

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Российский государственный профессионально-педагогический
университет»

На правах рукописи

БИЛАЛОВ Дамир Харасович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВКИ СОВМЕЩЕННОГО
ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ
ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВОЙ МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ**

05.02.09 - Технологии и машины обработки давлением

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор
Лехов Олег Степанович

Екатеринбург - 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР	13
1.1. Технология и оборудование совмещенных процессов непрерывного литья и деформации для производства листов из черных и цветных металлов и сплавов.....	13
1.2. Технология и оборудование для производства биметаллических полос	20
1.3. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.....	27
1.4. Выводы.....	33
2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЛИСТА ИЗ СТАЛИ	35
2.1. Моделирование совмещенного процесса непрерывного литья и деформации с использованием программного комплекса ANSYS.....	35
2.1.1. Теория решения контактных задач упруго-пластичности с учетом больших деформаций и перемещений.....	36
2.1.2. Этапы расчета по программе ANSYS.....	40
2.2. Исследование напряженно-деформированного состояния металла в очагах деформации совмещенного процесса	44
2.2.1. Общая постановка задачи.....	44
2.2.2. Исходные данные и принятые допущения.....	46
2.2.3. Задание толщины стенки оболочки и температуры заготовки	47
2.2.4. Расчет величины ферростатического давления.....	48
2.2.5. Зависимость модуля упругости от температуры	48
2.2.6. Методика определения сопротивления деформации в зависимости от степени и скорости деформации и температуры металла.....	49

2.3. Напряженно-деформированное состояние металла при формировании полосы в зоне гибки узких боковых стенок оболочки с жидкой фазой.....	50
2.3.1. Общая постановка задачи.....	50
2.3.2. Расчетная схема и граничные условия.....	51
2.3.3. Результаты расчета и их анализ.....	53
2.4 Напряженно-деформированное состояние металла в зоне очага деформации затвердевшего металла.....	61
2.4.1. Постановка задачи.....	61
2.4.2. Исходные данные и принятые допущения.....	62
2.4.3. Расчетная схема и граничные условия.....	63
2.4.4. Результаты расчета и их анализ.....	66
2.5. Оценка течения затвердевшего металла на границе с жидкой фазой.....	71
2.6. Выводы.....	76
3. УСТАНОВКА СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛОС	78
3.1. Способ получения биметаллической полосы на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации	78
3.2 Расчет параметров совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.....	81
3.3 Напряженно-деформированное состояние металла в очаге деформации при получении биметалла сталь-алюминий.....	82
3.4. Выводы.....	88
4. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВОК СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЛИСТОВОЙ МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ	89
4.1. Оптимизация параметров установки совмещенного процесса литья и деформации при получении листовой металлопродукции.....	89

4.2. Математическая модель совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.....	91
4.3. Результаты решения задачи оптимизация основных параметров установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.	94
4.4. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для получения широкого листа из сплавов алюминия повышенной прочности.....	100
4.5. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листов из магниевых сплавов.....	104
4.6. Оценка качества листовой металлопродукции	110
4.6.1. Оценка влияния параметров неразъемного кристаллизатора на уровень растягивающих напряжений в боковых стенках оболочки с жидкой фазой.....	110
4.6.2. Исследование структуры металла при получении листовой металлопродукции.....	113
4.7. Выводы.....	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	118
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	121

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. На современном этапе развития металлургического производства все большее распространение получают совмещенные процессы непрерывного литья и деформации, которые позволяют получить как заготовки по форме и размерам близких к готовым изделиям, так и готовый прокат, тем самым снизить энергоемкость технологических процессов, металлоемкость оборудования, капитальные и эксплуатационные затраты [1-8]. Однако совмещение процессов непрерывного литья и деформации следует рассматривать не только с точки зрения согласования производительности этих процессов, а, что не менее важно, также и с точки зрения получения качественного проката, поскольку непрерывнолитые заготовки имеют поверхностные и внутренние дефекты. В связи с этим, агрегаты, входящие в состав литейно-прокатных комплексов, должны обеспечить получение проката высокого качества и увеличение выхода годного.

Одним из перспективных вариантов создания совмещенных процессов непрерывного литья и деформации является применение в составе литейно-прокатного комплекса принципиально новых машин непрерывного литья заготовок, позволяющих получить непрерывнолитые заготовки, близкие по форме и размерам к готовому прокату [1, 2, 5].

Степень разработанности проблемы исследования. За рубежом [4, 5, 7-9] для совмещения процессов непрерывного литья и прокатки используются машины непрерывного литья тонких слябов толщиной 10 – 15мм. В частности, на установке непрерывного литья фирмы «Маннесман-Демаг» выходящий из кристаллизатора сляб толщиной 60 мм обжимается двумя парами валков зоны вторичного охлаждения до толщины 15 мм, что позволяет сократить количество клетей для последующей прокатки.

Для дальнейшего развития черной и цветной металлургии необходимо создание ресурсосберегающих технологических процессов и компактных

установок совмещенных процессов непрерывного литья и деформации [6, 8, 10, 11], что позволит снизить энергетические и капитальные затраты, увеличить выход годного и повысить качество металлопродукции и, соответственно, снизить объем продаж слитков, особенно из цветных металлов и сплавов.

Для оценки нового совмещенного процесса непрерывного литья и деформации важно провести теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния металла при формировании листовой заготовки из оболочки с жидкой фазой и деформации затвердевшего металла, что позволит оценить течение металла, особенно на границе с жидкой фазой, определить уровень и характер распределения нормальных и касательных напряжений в очаге циклической деформации, то есть, прогнозировать качество листовой металлопродукции.

Широкое применение в различных областях техники находят биметаллы. Применение их позволяет достичь не только качественно новых свойств изделий, но и существенной экономии дорогостоящих материалов, и прежде всего, цветных металлов.

В связи с этим очень важно создание и внедрение ресурсосберегающих технологических процессов и оборудования на заводах цветной металлургии и улучшения качества биметаллических полос, т.е. создание принципиально новой отечественной установки совмещенных процессов непрерывного литья и деформации.

Производство биметаллических полос на заводах ОЦМ, в частности сталь-алюминий, путем прокатки связано с высокими капитальными и эксплуатационными затратами и имеет низкую производительность.

Существующие способы непрерывного литья биметалла не позволяют получить биметаллический слиток высокого качества, поскольку соединение слоев биметалла осуществляется после выхода слоев из двух кристаллизаторов, что приводит к образованию на поверхностях слоев

окисных пленок, которые ухудшают условия сцепления слоев, при этом плакирующий слой имеет литую структуру металла. Кроме этого, реализация этих способов связана с высокими капитальными и эксплуатационными затратами.

Таким образом, разработка и внедрение установок совмещенных процессов непрерывного литья и циклической деформации позволит существенно снизить расход топлива, электроэнергии и металлоемкость оборудования, повысить качество металлопродукции и улучшить экологическую обстановку.

Разработка этого направления производства листовой металлопродукции требует решения принципиально новых задач, включающих разработку алгоритмов расчета параметров установок и оценку напряженно-деформированного состояния металла при получении листовых и биметаллических полос.

Изложенное выше позволило сформулировать **цель диссертационного исследования:** на основе применения современных методов решения задач упруго-пластичности и оптимизации разработать научные основы создания установок совмещенных процессов непрерывного литья и деформации для получения листов из черных и цветных металлов и сплавов и биметаллических полос.

Для реализации поставленной цели определены **задачи диссертационного исследования:**

- разработать алгоритм и решить задачу определения напряженно-деформированного состояния металла в очагах деформации при получении стального листа на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации;

- по результатам численного решения указанной задачи оценить течение металла и определить закономерности распределения нормальных и касательных напряжений в очагах циклической деформации при

формировании листовой полосы из оболочки с жидкой фазой и деформации затвердевшего металла;

- поставить и решить задачу определения напряженно-деформированного состояния металла плакирующего слоя при получении биметалла сталь-алюминий на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации;

- поставить и решить задачу определения рациональных параметров установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации;

- оценить качество листовой металлопродукции.

Материал диссертации изложен в 4-х главах.

В первой главе представлен аналитический обзор по теме диссертации. Выполнен анализ современного состояния технологии и оборудования совмещенных процессов непрерывного литья и деформации для получения листовой металлопродукции. Рассмотрены технологические задачи в развитии процессов производства биметаллических полос. Описана конструкция установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листов из черных и цветных металлов и сплавов и биметалла. Изложены технологические и конструктивные достоинства и область применения установок совмещенных процессов непрерывного литья и деформации.

Вторая глава посвящена теоретическому исследованию напряженно-деформированного состояния металла в очагах деформации при получении стальной полосы на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Разработана математическая модель и алгоритм расчета, которые позволили оценить течение металла при формировании листовой полосы из оболочки с жидкой фазой и деформации затвердевшего металла и установить закономерности распределения нормальных и касательных напряжений в очагах циклической деформации.

В третьей главе описана установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для получения трехслойных биметаллических полос. Поставлена и решена задача определения напряженно-деформированного состояния плакирующих слоев при получении биметалла сталь - алюминий. В результате установлены закономерности распределения нормальных и касательных напряжений в очаге деформации плакирующего слоя биметаллической полосы.

В четвертой главе поставлена и решена задача оптимизации основных параметров установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Определены оптимальные по энергоемкости технологические, конструктивные и скоростные параметры установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. С учетом полученных результатов определены основные параметры вертикальной установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для получения широких листов из сплавов алюминия повышенной прочности и магния. Проведена оценка влияния радиуса сопряжения стенок неразъемного кристаллизатора установки на качество листовых полос.

Изложены результаты металлографического исследования изменения структуры металла по длине очага циклической деформации при получении полос из стали.

Научную новизну и теоретическую ценность представляют следующие разработки диссертации:

- закономерности распределения нормальных и касательных напряжений по длине очагов деформации, при формировании полосы из стальной оболочки с жидкой фазой и деформации затвердевшего металла, при получении листа из стали на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации;

- закономерности течения металла на границе с жидкой фазой при формировании стальной полосы из оболочки слитка с жидкой фазой и деформации затвердевшего металла;

- закономерности распределения нормальных и касательных напряжений по длине очага деформации плакирующего слоя алюминия при получении биметалла сталь-алюминий на установке совмещенного процесса на установке непрерывного литья и деформации;

- постановка и решение задачи по определению оптимальных по энергоемкости технологических и конструктивных параметров установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

Практическую ценность диссертации составляют:

- результаты моделирования в программном комплексе ANSYS напряженно-деформированного состояния металла при получении на установке совмещенного процесса литья и деформации листов из стали и биметаллических полос;

- параметры установки совмещенного процесса литья и деформации для получения стальных полос;

- параметры установок совмещенного процесса литья и деформации для получения широкого листа из сплавов алюминия повышенной прочности и магния;

- параметры установки совмещенного процесса литья и деформации для получения биметалла сталь-алюминий.

Полученные результаты использованы при разработке технологического и технического заданий на проектирование установки непрерывного литья и деформации для получения листа из алюминия для завода «Уралтрансмаш».

Методология и методы исследования:

- методы МКЭ – моделирования совмещенного процесса непрерывного литья и деформации в программном комплексе ANSYS;

- методы случайного поиска и симплекса.

На защиту выносятся:

- постановка задач и результаты расчета напряженно-деформированного состояния металла в очагах деформации при получении листа из стали и биметалла сталь - алюминий на установке совмещенного процесса литья и деформации;

- постановка и результаты решения задачи оптимизации параметров установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации;

- основные параметры установок совмещенных процессов непрерывного литья и деформации при получении металлопродукции из черных и цветных металлов и сплавов, в том числе биметаллических полос.

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается применением современных методов расчета напряженно-деформированного состояния металла в очагах деформации и оптимальных параметров установок непрерывного литья и деформации, а так же результатами исследования на опытной установке непрерывного литья и деформации.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, 2015); Международная научно-практическая конференция «Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика» (Воронеж, 2015); XIII Международный Конгресс «Цветные металлы и минералы - 2016» (г. Красноярск, 2016); X Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2016).

Публикации. Основные научные результаты работы отражены в 8 публикациях, в том числе в 4 статьях в рецензируемых научных журналах определенных ВАК РФ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 54 наименования. Содержание диссертации изложено на 127 страницах, включает 44 рисунка и 6 таблиц.

1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Технология и оборудование совмещенных процессов непрерывного литья и деформации для производства листов из черных и цветных металлов и сплавов

В настоящее время в мире ведутся работы по созданию установок непрерывного литья [7]. Предполагаемые технологии непрерывного литья в теоретическом плане основаны на объединении процессов кристаллизации металла и формоизменения затвердевшего слитка. Например, возможно литье полосы на двухвалковой установке бесслитковой прокатки. Анализ сложных условий нарастания оболочки слитка при ее деформации на участке относительно небольшой протяженности при высокой скорости литья 5-6 м/мин. показывает, что нарастание оболочки в кристаллизаторе переменного сечения сопровождается изменением ее формы, сводящимся к изгибу ее, сжатию или растяжению. Исследование поведения кристаллизующейся оболочки, находящейся под воздействием сжимающих и растягивающих усилий, а также ферростатического давления, показало, что на начальном этапе затвердевания возможно образование дефектов поверхности типа разрывов и складок.

В работе [35] отмечается, что повышение эффективности производства непрерывных заготовок достигается разработкой новых приемов воздействия на жидкий и кристаллизующийся металл. Предлагается конструкция установки непрерывного литья, где в кристаллизаторе происходит обжатие металла на наклонных гранях и его выталкивание на вертикальный калибровочный участок. В образующейся на выходе из кристаллизатора заготовке полностью отсутствует зона жидкого металла, за счет чего уменьшается технологическая длина установки. Непрерывное сжатие образующейся корочки увеличивает теплообмен металла с рабочими гранями

и повышает эффективность тепловой работы кристаллизатора. Кристаллизатор установки представляет собой разборную водоохлаждаемую конструкцию. Он состоит из четырех расположенных попарно продольных стенок, при этом каждая из наклонных стенок первой пары выполнена с расширенным (верхним) и вертикальным участками рабочей поверхности, закреплена на двух эксцентриковых параллельных горизонтальных валах с синхронным приводом их перемещения, а каждая из вертикальных стенок второй пары совершает смещенное к первой паре возвратно-поступательное движение. Формирование заготовки происходит за счет обжатия металла на наклонных стенках непрерывным его проталкиванием на вертикальный калибровочный участок. Однако в разъемном кристаллизаторе предлагаемой установки непрерывного литья при эксплуатации в промышленных условиях в местах контакта четырех стенок разъемного кристаллизатора будут из-за износа контактных поверхностей увеличиваться зазоры, что приведет к затеканию жидкого металла в эти зазоры и образованию заусенцев. Это может привести к нарушению стабильности процесса вытягивания полосы из кристаллизатора и ухудшению качества непрерывнолитых заготовок.

Также широко используются, особенно в цветной металлургии [7, 34], агрегаты Super Caster фирмы Fata-Hunter отличающиеся большим диаметром валков-кристаллизаторов, каждый из которых имеет индивидуальный привод от электродвигателя постоянного тока через планетарный редуктор. Технология бесслитковой прокатки требует значительно меньших капиталовложений и эксплуатационных расходов. Малая протяженность зоны интенсивного отвода тепла (дуги захвата) ограничивает допустимую скорость литья, которая не превышает $1 \div 2$ м/мин. На современных агрегатах клеть с двумя валками-кристаллизаторами преимущественно располагают наклоненной в сторону подачи жидкого металла под углом 15° к вертикали. Такое расположение позволяет точнее регулировать давление в питателе,

контролируя уровень металла в приемной коробке и обеспечивая ее ламинарное течение.

Бесслитковая прокатка тонкой (менее 1,5 мм) полосы со скоростью 23 м/мин обеспечивает качество, необходимое для получения тонкой фольги после обрезки кромок шириной $10 \div 20$ мм. Микроструктура, механические и физические свойства фольги, прокатанной из тонкой и толстой (6мм) полос, идентичны. Для повышения производительности агрегатов бесслитковой прокатки ведутся работы по совершенствованию системы подачи металла, интенсификации теплоотвода, контролю температурного режима.

Однако технология литья металла на установке с двумя валками-кристаллизаторами имеет ряд недостатков, поскольку еще не отработаны подвод и удержание металла (боковые стенки или бурты), получение качественной поверхности и структуры металла при минимальных обжатиях [1, 7].

Разработан высокоскоростной кастер (установка непрерывного литья с двумя валками-кристаллизаторами) для производства полосы толщиной $1 \div 6$ мм и шириной до 2200 мм из алюминиевых сплавов [34]. По сравнению со стандартным кастером суперкастер оснащен валками большего диаметра и имеет более высокую жесткость, что обеспечивает заданную точность профиля при различных сплавах и ширине ленты. Каждый валок приводится в действие отдельным двигателем постоянного тока мощностью 300 кВт через эпициклическую коробку передач. Скорость выхода ленты из кастера составляет $15 \div 38$ м/мин, производительность кастера 2,5 т/ч на каждый метр ширины ленты.

Основой базового процесса литья является планарное керамическое сопло (разливочная насадка), через которое расплав металла подается между двумя разливочными валками, имеющими внутреннее водяное охлаждение. Первым значительным усовершенствованием явилось установка клетки кастера на фундаменте с наклоном на 15° , что обеспечивает точное

регулирование выходного давления насадки и контроль уровня расплава в передней сливной камере. Это стабилизирует работу кастера и обеспечивает плавное течение металла из насадок в валки. Расплав металла подается в кастер из плавильной печи емкостью 50 т. Для обрезки кромок ленты используется устройство, состоящее из двух независимых обрезающих головок с общим приводом постоянного тока. Для измерения толщины ленты используется специальный рентгеновский датчик. Для поперечной резки ленты используются высокоскоростные ножницы механического типа с двигателем переменного тока и маховиком, которые обеспечивают 70 резов в минуту. Для обеспечения заданных допусков по толщине ленты используется сложная система регулирования зазора между валками, аналогичная системе холоднопрокатного стана.

Сравнение механических свойств фольги, полученной из тонкой литой ленты ($< 1,5$ мм) и фольги от традиционно выпускаемого проката (6мм) показало, что они несущественно отличаются. Следует отметить, что тонкая литая лента ($< 1,5$ мм) имеет более мелкую структуру металла, чем литая лента толщиной 6 мм.

Однако, непрерывная полоса, получаемая на кастере, имеет литую структуру, что не позволит при последующей холодной прокатке получить лист и фольгу для глубокой вытяжки. Кроме того, тонкая лента имеет волнистые кромки, для чего необходима обрезка кромок с обеих сторон ленты шириной до 20 мм.

Для повышения производительности агрегатов бесслитковой прокатки ведутся работы по совершенствованию систем подачи металла, интенсификации теплоотвода, контроля температурного режима, усилия прокатки и других параметров [5]. Металл должен затвердевать до выхода из валков, а затем получать обжатие порядка 15%, приняв форму полосы пригодной для последующей холодной прокатки. В черной металлургии ведутся работы по получению стальных полос, пригодных для последующей

холодной прокатки с постоянной толщиной, без внутренних и поверхностных дефектов. При литье в бандажии из медного сплава, покрытые никелем, средний разброс толщины составил $\approx 2\%$. Микроструктура тонкой стальной полосы значительно мельче, чем у непрерывнолитых слябов. Тяжелые и цветные металлы непрерывно разливают в металлические или графитовые кристаллизаторы установки горизонтального непрерывного литья. Металл поступает в кристаллизатор автоматически по мере вытягивания слитка. Отсутствие необходимости разгиба слитка и ограничений по длине жидкой фазы позволяет отлить любые сплавы. Для получения тонких заготовок из медных сплавов широко применяются установки непрерывного, горизонтального литья в сочетании со станами шаговой прокатки. На этих литейно-прокатных агрегатах производят полосы шириной до 620 мм и толщиной 2-3 мм, причем разнотолщинность не превышает 0,02 мм.

Разработаны технологические комплексы [8], в состав которых входят машины непрерывного литья, обжимные станы плоской прокатки. Установка горизонтального непрерывного литья работает по достаточно известной схеме с прерывистым вытягиванием слитка через графитовый кристаллизатор. На установке отливаются сплавы: латуни Л68 - Л95, медь, бронза БрОФ6,5-0,5. Размеры отливаемой полосы: толщина 15-25 мм, ширина 300÷650 мм. Расчетная производительность 0,8 т/ч. Причем толщина слоя металла, снимаемого при фрезеровании с каждой горизонтальной поверхности полосы, составляет 0,75÷1,0 мм. Разработан литейно-прокатный агрегат, включающий в свой состав установку горизонтального непрерывного литья и стан холодной периодической прокатки листа типа ХПЛ, для производства листов из меди и медьсодержащих сплавов толщиной 10÷40 мм и шириной 620 мм. Толщина прокатанного листа 2,5÷11 мм, ширина 300÷620 мм. Для производства листов из алюминия разработан литейно-прокатный агрегат ЛПА650А. Толщина

отливаемой заготовки 30-40 мм, ширина 280÷600 мм, скорость литья 18-120 м/ч. Толщина прокатанного листа равна 3-6 мм, ширина 300-620 мм.

В работе [46] описан перспективный способ непрерывного литья фольговых заготовок, использующийся на агрегатах бесслитковой прокатки «Super Caster» (FATA) на фольгопрокатных предприятиях ОК «РУСАЛ» (заводы «САЯНАЛ», «АРМЕНАЛ»), а также на отечественных установках на заводе «Михайловская фольга». Основные преимущества непрерывного литья алюминиевых полос из расплава в валковые кристаллизаторы – исключение из технологической схемы операции механической обработки и горячей прокатки с соответствующим сокращением энерго- и трудозатрат. Однако при этом возникает ряд серьезных трудностей, связанных с ухудшением качества фольги. Расплав поступает в пространство между валками и при контакте с поверхностью валков кристаллизуется, образуя корочки, которые двигаются вместе с поверхностью, далее после деформационного воздействия выходят из валков в форме листовой заготовки. Одной из основных проблем является отвод тепла из зоны кристаллизации, скорость которой составляет $10^2 \div 10^4$ град/с. Валки-кристаллизаторы для отвода тепла внутри охлаждаются водой и изготавливаются из материала, который обеспечивает высокую теплопроводность и механическую прочность. Для предупреждения образования трещин и обеспечения постоянства толщины полосы (безразнотолщинности) необходимо обеспечить постоянство уровня и стабильный металлостатический напор расплава в литниковой системе, предотвращая волнистость поверхности полосы. Перспективным направлением совершенствования процесса бесслитковой прокатки является использование валков-кристаллизаторов с медными бандажами, что позволяет увеличить производительность установок и качество фольговых заготовок.

В работе [47] отмечается, что пластическая деформация в процессе прокатки тонких слитков с твердой коркой и жидкой сердцевиной реализуется при производстве тонких полос в двухвалковых литейно-прокатных агрегатах, когда жидкий металл заливают в зазор между вращающимися навстречу один другому валками-кристаллизаторами. Первоначально происходит кристаллизация жидкого металла на каждом из валков, а затем после соединения корок слитка осуществляется пластическая деформация полосы. Практический интерес представляет производство такой полосы толщиной $1\div 5$ мм и шириной $1000\div 1150$ мм. Установлено, что при производстве полосы толщиной 4 мм в валковом литейно-прокатном агрегате с валками-кристаллизаторами диаметром 1000 мм для обеспечения хорошего качества металла следует принимать скорости выхода полосы не превышающие $7,5\div 11,4$ м/мин. Но для обеспечения степени пластической деформации равной 0,14, целесообразно иметь скорость литья не более 6,42 м/мин. Для полосы шириной 1,5 м при этом производительность составит 17 т/ч, а при диаметре валков 1500 мм – 25 т/ч.

При литье-прокатке в двухвалковом агрегате [48] происходит очень быстрое охлаждение жидкого металла на холодной поверхности валков-кристаллизаторов и возможно образование локальных участков сварки. При последующем отделении валка от слитка валок может вырывать частицы металла слитка. Для обеспечения качественной поверхности полосы и работоспособности валков затвердевшие на их поверхности частицы металла приходится удалять специальной обработкой валков металлическими щетками или шлифовальными кругами. Особенно существенным является эффект локального приваривания при литье стали в валках-кристаллизаторах со стальными бандажами. Для предотвращения этого явления необходимы:

- разработка эффективных систем охлаждения валков, не допускающих нагрева их поверхности свыше $200\div 250$ °С;

- усовершенствование систем смазки поверхностей валков перед их попаданием в зону кристаллизации и прокатки;
- рациональный выбор скоростей литья-прокатки, поскольку завышенные скорости способствуют локальной сварке поверхностей слитка и валков.

1.2. Технология и оборудование для производства биметаллических полос

Широкое применение в различных областях техники находят биметаллы. Их использование позволяет достичь не только качественно новых свойств изделий, но и существенной экономии дорогостоящих материалов, и прежде всего, цветных металлов [41-43].

В связи с этим необходимо создание и внедрение ресурсосберегающих технологических процессов и оборудования на заводах цветной металлургии и улучшения качества биметаллических полос, т.е. создание принципиально новой отечественной установки совмещенных процессов непрерывного литья и деформации.

Производство биметаллических полос на заводах ОЦМ, в частности сталь-алюминий, путем прокатки связано с высокими капитальными и эксплуатационными затратами и имеет низкую производительность.

Существующие способы непрерывного литья биметалла не позволяют получить биметаллический слиток высокого качества, поскольку соединение слоев биметалла осуществляется после выхода слоев из двух кристаллизаторов, что приводит к образованию на поверхностях слоев окисных пленок, которые ухудшают условия сцепления слоев, при этом плакирующий слой имеет литую структуру металла. Кроме того, реализация этих способов связана с высокими капитальными и эксплуатационными затратами.

Известны различные квалификационные схемы способов получения биметаллов, среди них авторы работы [44] предлагают классифицировать способы получения слоистых металлов по признаку наличия и отсутствия пластического деформирования. Они делят все методы получения биметалла на две большие группы: способы с применением пластического деформирования (хотя бы одного из компонентов) [30] и способы без пластического деформирования. В первую группу входят прессование, прокатка, во вторую – литье, наплавка, сварка плавлением.

В работе [41] сделан вывод о том, что при получении биметаллических листов способом совместной пластической деформацией осуществляется совмещение процессов требуемого формоизменения компонентов с их соединением в биметалл. При этом на характер деформации компонентов существенное влияние оказывает как температурно-скоростные условия, объемное соотношение компонентов биметалла, так и особенности приложения внешних сил, обусловленные конструктивными особенностями деформирующего инструмента (двухстороннее или многостороннее обжатие). При совместной прокатке заготовок, состоящих из разнородных металлических компонентов, сложные закономерности развития их пластического течения по длине очага деформации обуславливают сложный характер развития межслойной поверхности, по которой происходит формирование соединения.

Основной задачей большинства исследований является отыскание термомеханических условий схватывания слоев под действием пластической деформации. Между тем последующая за схватыванием равномерная совместная пластическая деформация может приводить не только к росту прочности соединения, но и к ее потере вследствие частичного или полного разрушения связей на контактной поверхности.

В работе [42] отмечается, что биметаллы позволяют не только повысить надежность и долговечность большого класса деталей и

оборудования, но и существенно сократить расходы на их изготовление в результате экономии дорогостоящих цветных металлов (меди, никеля, хрома, титана, молибдена, алюминия и др.). Применение биметаллов (низколегированная сталь + быстрорежущая сталь) позволяет на 70-80% сократить расходы быстрорежущей стали. Использование биметаллических контактов в электрических цепях дает экономию не только электроэнергии, но и цветных металлов, идущих на изготовление токоведущих деталей. Основные задачи при создании биметалла заключаются в обеспечении прочного соединения и заданного соотношения толщин слоев композиции, а также структуру, механические, технологические и другие свойства биметалла. Все существующие способы соединения металлов можно объединить в две большие группы: сварка плавлением (литейный метод, наплавка и др.) и сварка давлением (совместная горячая и холодная пластическая деформация, сварка взрывом и др.). Возрастающие потребности в биметаллах вызвали необходимость создания высокопроизводительных процессов их производства. Например, имеет перспективы инверсионное литье – процесс, при котором полоса – основа проходит через ванну с жидким металлом, который кристаллизуется на основе и вместе с ней вытягивается в виде биметалла с контролируемой конечной толщиной. Способ холодного рулонного плакирования, основанный на способности большинства пластически деформируемых металлов соединяться (сцепляться) при совместной деформации. Основной показатель качества биметалла – прочность соединения составляющих, которая определяется свойствами металлов (химическим составом, состоянием контактных поверхностей, механическими свойствами, структурой) и параметрами процесса (давлением, температурой, скоростью деформации и др.). Биметаллы можно подразделить на коррозионно-стойкие (сталь – коррозионно-стойкая сталь, сталь-титан, сталь-медь или медные сплавы), антифрикционные (сталь-медь и медные сплавы, сталь-алюминиевые

сплавы), электротехнические (сталь-медь или медные сплавы, сталь-алюминий, сталь-никель, сталь-титан), износостойкие и инструментальные (углеродистая сталь – легированная сталь, низкоуглеродистая – карбидная сталь).

В работе [43] отмечается, что биметаллы используются различными отраслями промышленности: электротехнической и электронной, автотракторной, химической, оборонной, машиностроением для легкой пищевой промышленности. Ряд способов производства биметаллов основан на способности соединения металлов при высоких температурах. В ряде технологий соединение металлов достигается при взаимодействии расплавленного металла с твердым, когда протекают процессы смачивания поверхности твердого металла жидким и растворение первого в последующем. Однако высокие температуры интенсифицируют процессы окисления металлов и образования окисных пленок на контактных поверхностях, что вызывает необходимость их защиты. В связи с этим, особую роль приобретают способы, не требующие технологических операций нагрева зоны соединения. К этим способам относятся холодное плакирование и сварка взрывом.

Использование сварки взрывом – технически и экономически целесообразный способ получения следующих видов биметаллов: листов, в том числе крупногабаритных (площадью более 4-6 м²) с плакирующим слоем из коррозионно-стойких, износостойких и антифрикционных металлов. Дальнейшую обработку давлением сваренных взрывом биметаллических заготовок можно вести в горячем, теплом и холодном состоянии. Холодная прокатка – один из самых перспективных способов производства биметаллов, обладающий большими технологическими и экономическими достоинствами. Технологический процесс включает подготовку исходных составляющих, совместную холодную прокатку слоистых заготовок с высоким обжатием и термообработку биметалла. Во всех случаях холодной

прокатки (пакетной и рулонной) для получения биметаллов исходные заготовки подвергают обезжириванию, травлению (при необходимости) и зачистке контактных поверхностей. К настоящему времени разработаны технологии холодного плакирования широкого класса биметаллов: сталь+медные сплавы, сталь + алюминиевые сплавы, сталь + никелевые сплавы и др. Полученные этим способом композиции из двух, трех и более слоев общей толщиной 0,1 – 10 мм (и более) и шириной до 300 мм находят широкое применение в электронной, электротехнической, автомобильной, оборонной промышленности. К основным технологическим задачам в развитии этих процессов относятся увеличение ширины биметаллических листов, производимых рулонным методом, а также получение композиции с повышенной толщиной плакирующих слоев (до 10 ÷15 %) от толщины основного слоя) [50].

В работе [36] показано, что существует необходимость получения непрерывнолитых биметаллических и армированных заготовок с целью повышения их прочности. Приведены результаты моделирования на свинце получения непрерывнолитых кованных стальных армированных заготовок. Исследовали процесс изготовления непрерывнолитых кованных свинцовых заготовок прямоугольного сечения 7-12 x 30 мм², армированных медными и алюминиевыми шинами. Размеры поперечного сечения последних составили соответственно 3 x 8 и 4,5 x 15 мм², диаметр алюминиевого провода 5 мм. Экспериментальная установка включает разливочную емкость со стопором, погружной разливочный стакан, водоохлаждаемый кристаллизатор с приводом, редуктором и электродвигателем. Основным элементом установки является кристаллизатор, обеспечивающий обжатие металла на стенках, выполненных под наклоном в верхней части. Предварительно перед заливкой металла в кристаллизатор одновременно с затравкой устанавливают шину (провод) и ее проковывают. Металл заливают при зафиксированной шине, что исключает необходимость наличия приводных роликов. Исследование

качества непрерывнолитых кованных армированных свинцовых заготовок показало, что при скорости литья выше 0,5 м/мин и температуре свинца 430-500° С и при поддержании уровня расплава в зоне обжатия кристаллизатора обеспечивается получение непрерывнолитых кованных армированных заготовок с отсутствием на поверхности трещин и пор в металле.

В работе [49] отмечается, что развитие электротехники, радиотехники, электроники, авиакосмической техники и других отраслей науки и техники требуют организации высокопроизводительного непрерывного процесса производства прецизионных и многослойных материалов. Для получения многослойных материалов применяют ряд методов, которые можно разбить на три группы:

- методы, в которых для получения соединения не используется процесс пластического деформирования;

- методы, которые основаны на использовании пластического деформирования;

- комбинированные методы.

Однако наибольшее распространение получили методы соединения составляющих в твердом состоянии. К методам второй группы относятся различные виды обработки металлов давлением (прокатка, штамповка, волочение и др.), сварка взрывом и др. Среди комбинированных способов перспективно сочетание пластической деформации с предварительным нанесением плакирующего слоя гальваническим, электротехническим или другим способом. Для получения многослойных материалов широкое распространение находит плакирование ленты при прокатке, как в горячем, так и в холодном состоянии.

Особая роль среди новых материалов со специальными свойствами принадлежит слоистым металлическим композициям. Такие материалы могут быть получены соединением разнородных металлов в монолитную композицию, сохраняющую надежную связь составляющих при дальнейшей

технологической обработке и условиях эксплуатации. Однако, несмотря на высокую техническую и экономическую эффективность, применение слоистых материалов и их производство существенно отстает от потребностей химического, нефтяного, транспортного, энергетического и других отраслей промышленности. С помощью сварки взрывом (взрывное плакирование) получены композиты со следующим соединением слоев: 12X18H10T + сталь 20 + 12X18H10T (2+5+2). В результате сварки взрывом получены пластины трехслойного композита общей толщиной 8,35 мм. Из пластин были вырезаны заготовки для последующей прокатки размерами 8,35×35×110 мм. Прокатку проводили при температурах 25 °С и 500 °С на стане ДУО с диаметром валков 255 мм со скоростью 0,2 м/с. В работе сделаны выводы, что сварка взрывом обеспечивает прочное соединение слоев. Полученный трехслойный композит 12X18H10T + сталь 20 + 12X18H10T характеризуется достаточно высоким комплексом прочностных и пластических свойств, как после сварки взрывом, так и после дополнительной холодной прокатки с обжатием 50%. При этом прочностные свойства недеформированного композита оказываются существенно выше, чем у исходных листовых заготовок сталей 20 и 12X18H10T. Пластические свойства сварного композита «12X18H10T + сталь 20 + 12X18H10T» и стали 12X18H10T после холодной деформации с обжатием 50% находятся на одинаковом уровне.

Для дальнейшего развития черной и цветной металлургии необходимо создание ресурсосберегающих технологических процессов и компактных установок совмещенных процессов непрерывного литья и деформации [1], что позволит снизить энергетические и капитальные затраты, увеличить выход годного и повысить качество металлопродукции и, соответственно, снизить объем продаж слитков, особенно из цветных металлов и сплавов [12].

1.3. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации

Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации разработана на основе процессов и установок циклической деформации, защищенных международными заявками и патентами зарубежных стран и предназначенных для получения листа, сортовых заготовок, биметалла со скоростью порядка 10-15 м/мин и выше [3,10,11,13] (Рисунок 1.1).

Отличительными особенностями установки является то, что процессы образования оболочки, формирования полосы при наличии жидкой фазы, обжатие затвердевшего металла и продвижение полосы осуществляется в кристаллизаторе, что позволяет исключить зону вторичного охлаждения и существенно улучшить качество металлопродукции. Это удастся реализовать, благодаря принципиально новому взаимодействию стенок кристаллизатора с отливаемым слитком, при котором подвижные стенки кристаллизатора одновременно с формированием полосы продвигают ее по направлению разливки, создавая при этом на контактных поверхностях сжимающие напряжения, которые предохраняют оболочку слитка от разрушения и предотвращают образование дефектов, что позволяет получать не только тонкие слябы, но и лист толщиной 2-6 мм.

В процессе работы установки происходит перемешивание жидкого металла, корочки слитка постепенно сближаются, при этом часть металла выдавливается, что в совокупности способствует ускорению процесса затвердевания металла.

Основные преимущества установки совмещенных процессов непрерывного литья и деформации:

1. Минимальные габариты установки в связи с отсутствием зоны вторичного охлаждения.

2. Возможность получения листа из цветных и черных металлов толщиной 2-6 мм и заданной ширины со скоростью 10-15 м/мин.

3. Максимальное использование тепла литого металла.

4. Высокое качество металлопродукции обеспечивается:

- получением мелкозернистой и однородной структуры металла без дефектов литейной породы вследствие интенсивного перемешивания жидкого металла и обжатия стенками - бойками затвердевшего металла с высокой степенью деформации;

- процесс циклической деформации стенками - бойками затвердевшей полосы позволяет получить на выходе из кристаллизатора лист с мелкозернистой однородной структурой металла без дефектов и с хорошим качеством поверхности, что гарантирует при последующей холодной прокатке получение высококачественной фольги. Это особенно важно в связи с тем, что на зарубежных установках получают алюминиевый лист толщиной 6 мм и менее, имеющий практически литую структуру, что при последующей прокатке из-за недостаточной степени деформации не позволяет получить лист и фольгу для процессов глубокой вытяжки;

- исключением продольной разнотолщинности полосы вследствие узкого температурного интервала деформации;

- высокой точности полосы и хорошего качества ее поверхности вследствие деформации и наличия калибрующего участка на бойках кристаллизатора и хороших условий подачи смазки в очаг деформации.

5. Стабильность и хорошая возможность управления процессом непрерывного литья и деформации.

6. Возможность обрабатывать малопластичные и труднодеформируемые сплавы вследствие благоприятной схемы напряженного состояния металла при деформации стенками - бойками и в узком температурном интервале.

Следует также отметить, что в верхней части кристаллизатора УНЛД реализуется известный процесс непрерывного литья заготовок, в нижней части – хорошо изученный в промышленных условиях процесс циклической деформации непрерывнолитых заготовок [3, 14].

Для создания и эксплуатации данной установки требуются минимальные капитальные затраты, что связано со следующими особенностями данной установки:

- 1) небольшие габариты установки, поскольку отсутствует зона вторичного охлаждения;
- 2) для привода установки в ряде случаев можно использовать привод обычного прокатного стана, который обычно имеется на заводах;
- 3) из технологической линии исключаются нагревательные печи, а также прокатные клетки, количество которых зависит от толщины исходного непрерывнолитого сляба для получения горячекатаного листа толщиной 2-4 мм, что существенно снижает расход топлива и электроэнергии литейно-прокатного комплекса.

Предлагаемая установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации по техническим параметрам превосходит лучшие зарубежные аналоги и может быть успешно использована на заводах цветной металлургии.

На рисунке 1.1 изображено устройство для непрерывного литья и деформации заготовок. Устройство состоит из водоохлаждаемого кристаллизатора 1 и двух суппортов 2. Каждый суппорт установлен на двух эксцентриковых валах 3. К суппорту крепится стенка-боек с калибрующим участком. Боковые стенки разъемного кристаллизатора крепятся к торцам кристаллизатора 1.

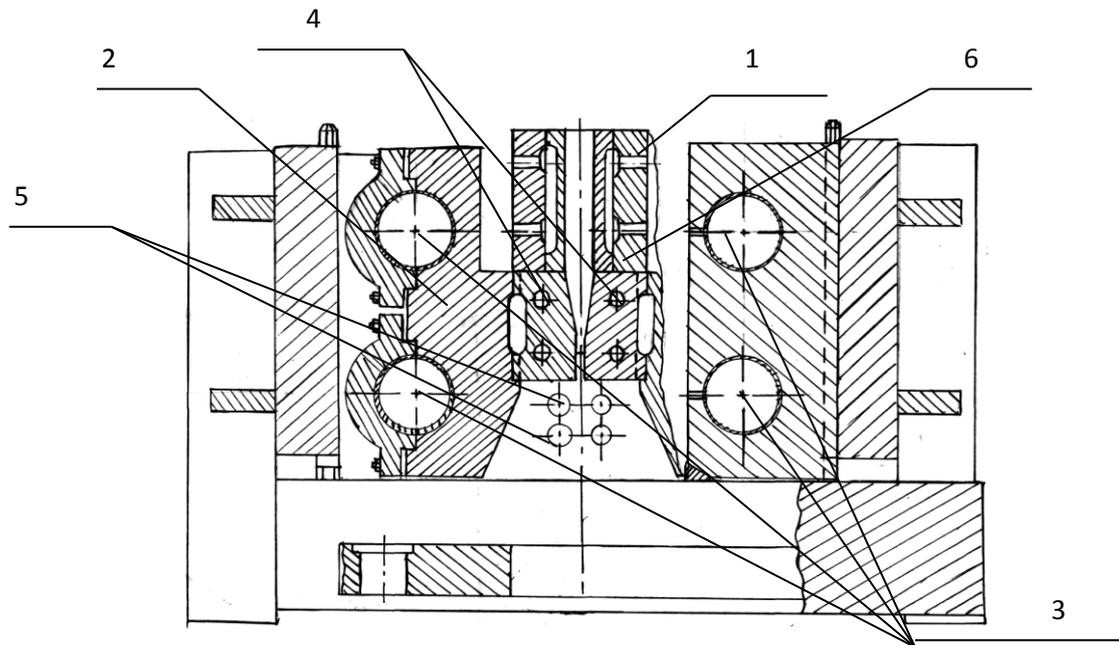


Рисунок 1.1 - Установка непрерывного литья и деформации:
 1 – неразъемный кристаллизатор; 2 - суппорт; 3 – эксцентрикковые валы;
 4 – стенки-бойки сборного кристаллизатора; 5 - направляющие и
 удерживающие ролики; 6 - канал для подвода смазки

Рабочие поверхности боковых стенок образуют в совокупности со стенками - бойками разъемный кристаллизатор, полость которого является продолжением полости кристаллизатора 1. Кристаллизатор 1 имеет по своей задней торцевой поверхности постоянный контакт с подвижными стенками - бойками 4, причем он прижимается к бойкам с помощью пружинного механизма.

Стенки-бойки кристаллизатора 4 имеют специальные каналы 6 для подвода смазки или эмульсии с тем, чтобы исключить налипание нагретого алюминия на рабочие поверхности стенок-бойков кристаллизатора.

Синхронное вращение эксцентрикковых валов 3 осуществляется от электродвигателя.

Вытягивание заготовки из кристаллизатора 1 осуществляется с помощью стенок-бойков 4 и тянущих роликов 5.

Сущность способа непрерывного литья и деформации заготовок заключается в следующем (Рисунок 1.1).

При установившемся процессе жидкий металл заливается в водоохлаждаемый кристаллизатор 1, который со стенками-бойками 4 совершает синхронные возвратно-поступательные движения.

За счет отвода тепла стенками кристаллизатора 1 образуется замкнутая оболочка с жидкой фазой заданного периметра. Затем оболочка с жидкой фазой поступает в стенки-бойки 4 разъемного кристаллизатора. Стенки-бойки 4 одновременно с формированием из оболочки с жидкой фазой заготовки продвигают ее по направлению непрерывного литья. При этом происходит сближение верхней и нижней стенок оболочки, т.е. уменьшение высоты заготовки с жидкой фазой. Это приводит к увеличению ширины заготовки за счет заполнения боковыми стенками оболочки вогнутых поверхностей боковых стенок кристаллизатора, т.е. происходит формирование плоской заготовки с жидкой фазой. Одновременно с формированием заготовки стенки-бойки 4 осуществляют продвижение оболочки по направлению непрерывного литья и вытеснение жидкого металла. По мере продвижения заготовки с жидкой фазой происходит смыкание верхней и нижней стенок оболочки, т.е. исключение жидкой фазы. После этого происходит циклическое обжатие стенками-бойками 4 кристаллизатора затвердевшей заготовки и калибровка сечения полосы.

Привод сообщает синхронное вращение эксцентриковым валам 3. При вращении эксцентриковых валов 3 установленные на них суппорты 2 с закрепленными на них стенками - бойками 4 совершают одновременно в одной плоскости синхронные перемещения по замкнутой круговой траектории с радиусом, равным эксцентриситету эксцентриковых валов. Такая кинематика движения бойков разъемного кристаллизатора обеспечивает возвратно-поступательные горизонтальные перемещения кристаллизатора 1, циклическое формирование из замкнутой оболочки с жидкой фазой плоской заготовки и обжатие затвердевшего металла с

одновременным продвижением заготовки в направлении непрерывного литья.

По мере продвижения оболочки с жидкой фазой через полость разъемной части кристаллизатора происходит смыкание широких стенок оболочки с исключением жидкой фазы, т.е. затвердевание металла. После этого происходит обжатие стенками - бойками затвердевшей полосы (ковка полосы) до заданной толщины листа, равной 2-4 мм. За счет высокой вытяжки полосы происходит увеличение скорости полосы и на выходе из сборного кристаллизатора она достигает 10-15 м/мин и выше. Интенсивная деформация полосы стенками-бойками обеспечивает получение листа с однородной и мелкозернистой структурой металла. Обжатие полосы осуществляется в узком температурном интервале, что исключает продольную разнотолщинность. Обжатие и калибровка полосы позволяют получить лист с хорошим качеством поверхности и заданной точности.

Точность полосы в поперечном направлении достигается специальной профилировкой бойков и выбором необходимой жесткости эксцентриковых валов, а получение заданной ширины листа обеспечивается боковыми подвижными стенками разъемной части сборного кристаллизатора.

Управление совмещенным процессом непрерывного литья и деформации с позиции обеспечения заданной производительности и получения листа высокого качества осуществляется путем изменения угловой скорости двигателя, что позволяет изменять положение конуса жидкой фазы, толщину оболочки, интенсивность перемешивания жидкой фазы, а также степень обжатия и скорость выхода полосы из кристаллизатора.

Совмещенный процесс непрерывного литья и деформации осуществляется в стационарном режиме, т.е. при одной угловой скорости вращения якоря электродвигателя. Управление процессом литья довольно простое и связано с изменением скорости электродвигателя, т.е. в

зависимости от температуры расплава, необходимого положения конуса жидкой фазы, производительности установки можно изменять скорость вытягивания полосы, т.е. управлять процессом кристаллизации.

Таким образом, совмещенный процесс непрерывного литья и циклической деформации может быть разбит на четыре стадии:

- кристаллизация металла в неразъемной части водоохлаждаемого кристаллизатора с образованием замкнутой оболочки с жидкой фазой;
- формирование полосы из слитка с жидкой фазой путем одновременного сближения корочек слитка и гибки боковых стенок;
- ковка стенками - бойками разъемного кристаллизатора затвердевшего металла до заданных размеров листа;
- калибровка полосы с целью обеспечения заданной точности листа.

1.4. Выводы

1. На современном этапе развития металлургического производства все большее распространение получают совмещенные процессы непрерывного литья и деформации, которые позволяют получить заготовки по форме и размерам близких к готовым изделиям, так и готовый прокат, тем самым позволяя снизить энергоемкость технологических процессов, металлоемкость оборудования, капитальные и эксплуатационные затраты.

2. Технология литья металла на двухвалковой установке бесслитковой прокатки имеет ряд недостатков, поскольку еще не отработаны подвод и удержание металла боковыми буртами, получение качественной поверхности полосы и требуемой структуры металла при минимальных обжатиях, а так же имеет место низкая стойкость валков-кристаллизаторов.

3. Широкое применение в различных областях техники находят биметаллы. Существующие способы производства биметаллических полос путем прокатки и непрерывной разливки не позволяют получить

биметаллические полосы высокого качества, имеют низкую производительность и связаны с высокими капитальными и эксплуатационными затратами. К основным технологическим задачам в развитии этих процессов относятся увеличение ширины биметаллических листов, производимых рулонным способом, а так же получение биметаллов с повышенной толщиной плакирующих слоев (до 10 – 15 %) от основного слоя.

Разработка эффективных технологий производства биметаллов, расширение их сортамента и повышения их качества способны дать мощный импульс технологическому прогрессу во многих отраслях промышленности.

4. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации защищена патентами РФ, по технико-экономическим показателям превосходит лучшие зарубежные аналоги и предназначена для получения листов из черных и цветных металлов и биметаллических полос. Внедрение компактных ресурсосберегающих установок непрерывного литья и деформации на заводах черной и цветной металлургии позволит существенно снизить энергетические и капитальные затраты, увеличить выход годного и повысить качество листовой металлопродукции.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЛИСТА ИЗ СТАЛИ

2.1. Моделирование совмещенного процесса непрерывного литья и деформации с использованием программного комплекса ANSYS [45]

Целями теоретического исследования совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении листа из стали являлись:

- определение напряженно-деформированного состояния металла при формировании полосы в зоне гибки узких боковых стенок оболочки с жидкой фазой;
- определение напряженно-деформированного состояния металла при обжатии стенками - бойками сборного кристаллизатора затвердевшего металла, то есть в зоне очага деформации. В качестве метода исследования будет использован вычислительный эксперимент на базе решения задач механики сплошной среды методом конечных элементов, а именно:
 - для первой задачи использована плоская постановка решения методом конечных элементов контактной задачи упруго-пластичности при наличии больших деформаций и перемещений;
 - для второй задачи использована объемная постановка решения методом конечных элементов контактной задачи упруго-пластичности при наличии больших деформаций и перемещений; Для решения изложенных выше задач использован современный пакет ANSYS [1, 23, 24, 38], который успешно применяется при решении методом конечных элементов контактных задачу пруго-пластичности и упругости при наличии больших деформаций и перемещений [1, 23, 37]. Далее рассмотрим алгоритмы решения приведенных выше задач.

2.1.1. Теория решения контактных задач упруго-пластичности с учетом больших деформаций и перемещений

При решении нелинейных задач упруго-пластичности в программе ANSYS учитываются два типа геометрических нелинейностей:

1. большие деформации, когда предполагается, что деформации не считаются бесконечно малыми, а являются конечными. Например, при обжатии полосы стенками - бойками степень деформации алюминиевой полосы может достигать 90%. Кроме того, учитываются изменения размеров полосы;
2. большие прогибы, предполагающие большие углы поворота и малые механические деформации, которые являются причиной появления напряжений. Это имеет место в процессе формирования полосы путем гибки узких боковых стенок оболочки с жидкой фазой.

Так как для совмещенного процесса непрерывного литья и деформации материал (сталь, алюминий) подвержен упруго-пластическому деформированию, то в программе ANSYS использованы соотношения, учитывающие большие деформации для упруго-пластических конечных элементов. При этом предполагается, что упругие деформации малы, а пластические являются произвольно большими.

В случае больших поворотов, но малых механических деформаций, являющихся причиной возникновения напряжений в полосе, в программе ANSYS используется процедура учета больших смещений.

Пластическое поведение материала характеризуется необратимой деформацией, которая возникает при достижении в материале определенного уровня напряжений. Пластические деформации предполагаются возникающими мгновенно, т.е. не зависящими от времени.

В качестве поведения материала используем классическое билинейное кинематическое упрочнение. На рисунке 2.1 представлена зависимость «напряжение-деформация» принятая в ANSYS для этой модели материала.

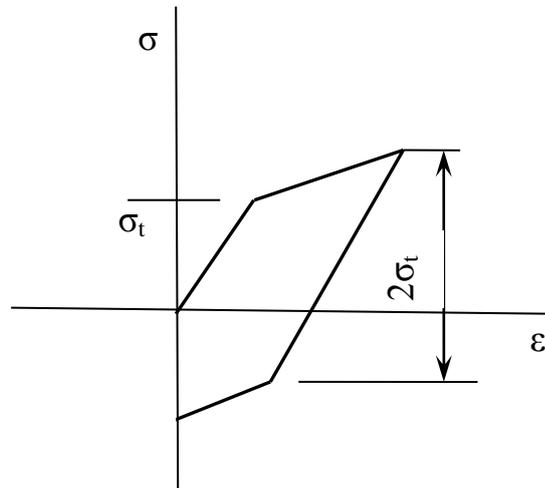


Рисунок 2.1 - Кривая « $\sigma - \epsilon$ » пластического поведения материала, характеризующая классическое билинейное упрочнение

Теория пластичности дает возможность получить соотношения, которые описывают упругопластический отклик материала. В программе ANSYS реализованы три критерия, составляющих основу рассматриваемой теории пластичности: критерий текучести, закон течения и правило (закон) упрочнения.

Критерий текучести

Критерий текучести определяет уровень напряжения, при котором начинается текучесть материала. Условие начала текучести позволяет свести многокомпонентное напряжение состояния к функции отдельных его составляющих $f(\{\sigma\})$, которую можно интерпретировать как эквивалентное напряжение σ_ϵ :

$$\sigma_\epsilon = f(\{\sigma\}), \quad (2.1)$$

где $\{\sigma\}$ - вектор напряжения.

При достижении эквивалентным напряжением предела текучести материала σ_t

$$f(\{\sigma\}) = \sigma_t \quad (2.2)$$

в материале возникают пластические деформации. При $\sigma_t < \sigma_\varepsilon$ материал остается упругим, а, следовательно, напряжения определяются упругими соотношениями « $\sigma - \varepsilon$ ». Обратим внимание на то, что в этом случае эквивалентное напряжение не может превысить предел текучести материала, так как развивающиеся мгновенно пластические деформации снижают напряжение до величины предела текучести.

Закон текучести

Закон текучести определяет направление пластических деформаций и определяется следующим соотношением:

$$\{d\varepsilon^{pl}\} = \lambda \{\partial Q / \partial \sigma\}, \quad (2.3)$$

где λ – согласующий множитель (определяет величину пластических деформаций);

Q – функция напряжений, называемая пластическим потенциалом (определяет направление пластических деформаций).

Если Q является функцией текучести (что обычно предполагается), закон текучести называется ассоциативным, а пластические деформации происходят в направлении, перпендикулярном к поверхности текучести.

Закон упрочнения

Закон упрочнения описывает изменение поверхности текучести с ростом пластических деформаций таким образом, что этим деформациям может быть поставлено в соответствие определенное напряженное состояние.

Существуют два закона упрочнения: изотропное (определяется пластической работой) и кинематическое (или трансляционное). При изотропном упрочнении поверхность текучести сохраняет неизменным положение своего центра и только увеличивается в размерах по мере развития пластических деформаций. В материалах с изотропной

пластичностью происходит изотропное упрочнение. При кинематическом упрочнении размеры поверхности текучести остаются постоянными, но по мере роста пластических деформаций она смещается в пространстве напряжений.

Итак, для расчета совмещенного процесса непрерывного литья и деформации используем следующую модель пластичности:

- наименование модели - классическая билинейная с кинематическим упрочнением, характеризующаяся следующими моментами:
- критерий текучести - Мизеса;
- закон текучести – ассоциативный (уравнение Друкера - Рейса);
- закон упрочнения – кинематический;
- отклик материала – билинейный;

Моделирование совмещенного процесса непрерывного литья и деформации с использованием программы ANSYS

При решении контактных задач механики сплошной среды использована теория, заложенная в пакете ANSYS. Следует отметить, что решение задачи контакта типа «поверхность - поверхность» представляет собой нелинейный анализ с возможностью учета больших деформаций, переменности контактного взаимодействия (смыкания – размыкания), Кулонова трения скольжения и многих других нелинейностей. Контакт представлен в программе последовательным положением точек на одной поверхности относительно линий или областей другой поверхности. Программа использует элементы контакта для отслеживания относительных положений контактирующих поверхностей. Элементы контакта – это конечные элементы, которые размещены на поверхностях контакта стенок-бойков и стальной полосы. Для описания контакта и трения к узлам на контактирующих поверхностях прикладываются соответствующие силы.

2.1.2 Этапы расчета по программе ANSYS

Программа ANSYS обладает многими возможностями конечно-элементного анализа – от простого линейного статического до сложного нелинейного динамического (нестационарного). Процедура типового расчета может быть разделена на три основных этапа:

1. Построение модели;
2. Задание нагрузок (задание статических и кинематических граничных условий) и получение решения;
3. Просмотр результатов.

Построение модели

Этап построение модели включает в себя задание типов конечных элементов, необходимых для проведения расчета, необходимых констант конечных элементов, свойств материала и создание геометрии модели.

- *Задание типов элементов*

В качестве конечных элементов при моделировании совмещенного процесса непрерывного литья и деформации использованы плоский восьмиузловой твердотельный конечный элемент PLANE 82 и объемный двадцатиузловой твердотельный конечный элемент SOLID 95.

- *Задание констант элементов*

В нашем случае константы элементов PLANE 82, SOLID 95 приняты такими, какие заложены в пакете ANSYS.

- *Задание свойств материала*

Свойства материала требуются для большинства типов элементов. В нашем случае для определения напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации при формировании полости путем гибки узких граней оболочки из стали с жидкой фазой значения модуля упругости E , модуля упрочнения E_1 и предела текучести определены в зависимости от температуры T и приведены в разделе 2.2.

Создание геометрической модели

Основной целью на этапе разработки геометрической модели является создание адекватной конечно-элементной модели, состоящей из узлов и элементов. Геометрические модели для решения поставленных задач (раздел 2.1) представлены в соответствующих разделах ниже.

Задание нагрузок и получение решения

На этом этапе прикладываются нагрузки, выбирается тип анализа и его опций, при необходимости разбивается решение на шаги и подшаги, определяются опции для выбора шага по нагрузке и производится решение. Под нагрузками понимаются как внешние усилия, так и граничные условия в виде ограничений на перемещения.

Как прикладываются нагрузки при решении указанных выше задач достаточно подробно описано в соответствующих разделах.

В нашем случае для моделирования совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении листа из стали и определения напряженного состояния металла в очагах деформации использован статический нелинейный анализ. Одним из способов получения нелинейного решения является разбиение нагрузки на шаги и подшаги. При этом количество шагов и подшагов следует задавать таким образом, чтобы обеспечить требуемую точность расчета и обеспечить сходимость решения задачи.

При моделировании совмещенного процесса непрерывного литья и деформации весь процесс был разбит на 90 шагов, поскольку деформация полосы происходит на угле поворота эксцентриковых валов 90 градусов. Пилотному узлу на каждом шаге задавалось кинематическое граничное условие в виде поворота эксцентриковых валов на угол, равный одному градусу. На каждом шаге (угле поворота эксцентриковых валов) полоса перемещалась и деформировалась за счет сил трения между полосой и перемещающейся стенкой - бойком сборного кристаллизатора. Для

обеспечения сходимости и необходимой точности расчета каждый шаг разбивался на 1500 подшагов. Выбор такого количества подшагов обусловлен тем, что на каждом подшаге решения приращение пластических деформаций не должно превышать 5 % с целью получения заданной точности решения.

Таким образом, при решении нелинейных задач для того, чтобы определить реакцию тела (системы тел) на механическое воздействие, пакет ANSYS одновременно обрабатывает набор линейных уравнений. Однако, набор линейных уравнений не может описать поведение нелинейной структуры. Чтобы решить нелинейные проблемы, необходим ряд последовательных линейных приближений с корректировкой. Поэтому в пакете заложен алгоритм пошагового нагружения и итерации равновесия.

Для обеспечения сходимости и требуемой точности решения каждый раз при решении нелинейной задачи нагрузка преобразуется в ряд приращений нагрузки. Приращения нагрузки могут задаваться за несколько шагов нагружения или за несколько подшагов в пределах одного шага нагружения. При завершении каждого шага решения программа уточняет матрицу жесткости, чтобы отразить нелинейные изменения в структурной жесткости перед переходом к следующему шагу приращения нагрузки. Неприятность, характерная для пошагового нагружения, состоит в том, что с каждым шагом приращения нагрузки неизбежно увеличивается время решения и при этом накапливается ошибка, что может явиться причиной того, что конечные результаты окажутся вне положения равновесия.

ANSYS программа преодолевает эту трудность, используя итерации равновесия Ньютона - Рафсона, которые в конце каждого приращения нагрузки следят за сходимостью равновесия в пределах некоторого заданного допуска.

Перед каждым решением по методу Ньютона - Рафсона оценивается последний баланс вектора нагружения, который составляет разницу между

восстанавливающимися силами (нагрузки, соответствующие элементным напряжениям) и приложенными нагрузками. Программа, используя последний баланс нагрузки, выполняет линейное решение и делает проверку сходимости. Если критерии сходимости не выполнены, повторяется операция вычисления последнего баланса вектора нагружения и обновление матрицы жесткости. Эта процедура повторяется до тех пор, пока не будет получена необходимая сходимость. При этом, чтобы помочь решить проблему сходимости, в пакете предусмотрена возможность активизации процесса сходимости командами изменения шага и восстановления, такими, как адаптивное слежение, автоматическая пошаговая нагрузка и деление шага пополам. Если сходимость все же не может быть достигнута, то программа либо продолжает рассматривать последний шаг нагружения, либо прерывает его. В последнем случае требуется, как правило, изменение сетки конечных элементов и изменение способа пошагового нагружения.

Таким образом, организация выполнения нелинейного анализа предусматривает три уровня:

«Верхний» уровень состоит из задания шага нагружения. При этом нагрузка на каждом шаге нагружения меняется по линейному закону.

Внутри каждого шага нагружения нагрузка может быть еще разбита на несколько подшагов для уменьшения шагов получения решения.

Для получения сходимости решения на каждом подшаге программа выполняет ряд итераций равновесия.

Просмотр результатов

Для просмотра результатов можно использовать два постпроцессора программы ANSYS. Общий постпроцессор используется для анализа результатов одного шага решения и обеспечивает, среди прочего, получение линий уровня, картину деформированного состояния, листинг результатов, оценку погрешности расчета, объединение расчетных случаев проведения вычислений на основе полученных данных. Постпроцессор процесса

нагружения используется для просмотра результатов в указанных точках расчетной модели на каждом шаге решения, можно получить график результатов как функцию времени или частоты, листинг результатов, выполнить арифметические и алгебраические вычисления.

2.2. Исследование напряженно-деформированного состояния металла в очагах деформации совмещенного процесса

2.2.1. Общая постановка задачи

На рисунке 2.2 представлена схема установки совмещенного процесса непрерывного литья и циклической деформации, которая состоит из водоохлаждаемого неразъемного кристаллизатора 1 и двух суппортов со стенками-бойками разъемного кристаллизатора 2 и 3.

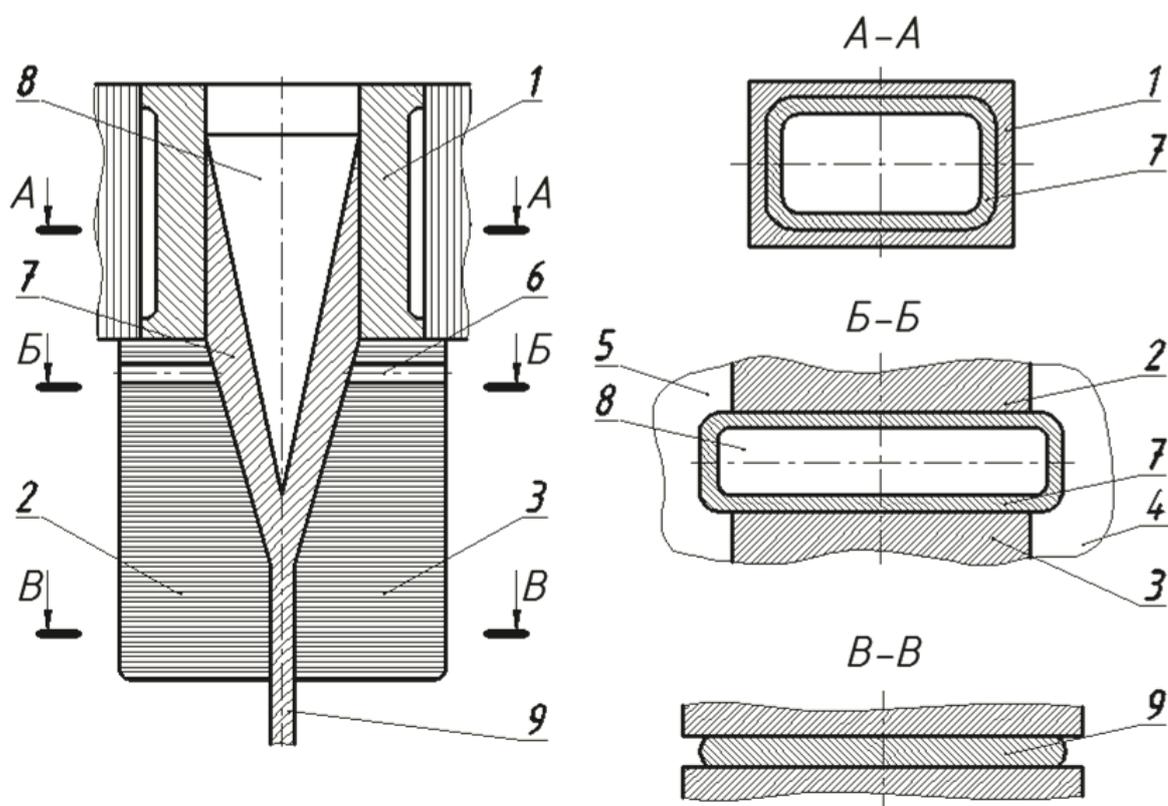


Рисунок 2.2 - Схема установки совмещенного процесса непрерывного литья и циклической деформации

Боковые стенки 4 и 5 разъемного кристаллизатора крепятся к торцам кристаллизатора 1. Рабочие поверхности боковых стенок образуют в совокупности со стенками - бойками разъемный кристаллизатор. Стенки - бойки имеют специальные каналы 6 для подвода эмульсии. Каждый суппорт со стенками - бойками установлен на двух эксцентриковых валах. Синхронное вращение эксцентриковых валов осуществляется от электродвигателя.

Совмещенный процесс непрерывного литья и циклической деформации может быть разбит на четыре стадии:

- кристаллизация расплава металла в неразъемном кристаллизаторе 1 с образованием затвердевшей оболочки 7 с жидкой фазой 8 и последующее вытягивание ее из кристаллизатора стенками - бойками;
- формирование стенками - бойками полосы из оболочки с жидкой фазой 8 путем одновременного сближения ее широких стенок и гибки боковых стенок (участок 1);
- циклическая деформация стенками - бойками затвердевшего металла до заданных размеров листа (участок 2);
- калибровка полосы 9 с целью обеспечения заданной точности размеров листа.

Для оценки нового совмещенного процесса проведено теоретическое исследование [16, 53]. Рассматривается процесс получения листа из стали 17ХГСА с сечением 4×1000 мм. Размеры полости неразъемного кристаллизатора: высота – 80 мм, ширина – 950 мм, длина – 300 мм. Скорость вытягивания слитка из неразъемного кристаллизатора $V = 2$ м/мин. Величина эксцентриситета валов $e = 5$ мм, угол наклона рабочих поверхностей стенок-бойков сборного кристаллизатора $\alpha = 10^\circ$. Общая длина сборного кристаллизатора 570 мм. Угловая скорость эксцентриковых валов 71 мин^{-1} . Толщину оболочки слитка с жидкой фазой при выходе из неразъемного кристаллизатора принимаем согласно расчету 8 мм, а в области

смыкания широких стенок оболочки слитка - 10 мм. Толщина затвердевшей полосы в момент смыкания стенок оболочки - 20 мм. При получении листа толщиной 4 мм степень деформации полосы равна 80%.

Температура внешней поверхности оболочки с жидкой фазой 2 равна 1200 °С, а внутренней - 1450 °С. Ферростатическое давление принято равным 0,015 МПа, а коэффициент трения между стенкой - бойком разъемного кристаллизатора и полосой составил 0,5. Значение модуля упругости E , модуля упрочнения E_1 и предела текучести σ_T приняты в зависимости от температуры в соответствии со значениями, приведенными в работе [1]. Коэффициент Пуассона принят равным 0,35.

Целью настоящего исследования являлось:

1. Определение напряженно-деформированного состояния металла при формировании полосы из оболочки с жидкой фазой путем гибки ее узких граней (участок 1).

2. Определение напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации затвердевшего металла (участок 2). В качестве метода исследования использован вычислительный эксперимент на базе решения задачи механики сплошной среды методом конечных элементов, а именно:

- для участка 1 использована «плоская» постановка контактной задачи упруго-пластичности при наличии больших деформаций и перемещений;

- для участка 2 - «объемная» постановка контактной задачи упруго-пластичности при наличии больших деформаций и перемещений. Для расчета использован вычислительный комплекс ANSYS.

2.2.2. Исходные данные и принятые допущения

При исследовании поставленных задач пренебрегаем инерционными и массовыми силами, деформируемый металл считаем несжимаемым и

изотропно упрочняющимся. Тепловыделением при деформации металла пренебрегаем. Слиток в зоне гибки узких боковых стенок оболочки с жидкой фазой (участок 1, Рисунок 2.2) находится в двухфазном состоянии. Поэтому необходимо в первую очередь задать толщину закристаллизовавшейся части слитка (толщину стенок оболочки) на этом участке. В качестве геометрической модели для расчета принимаем только закристаллизовавшуюся оболочку жидкой фазы. Задачу решаем в плоской постановке. На внутренних поверхностях оболочки необходимо задать статические граничные условия в виде ферростатического давления, которое необходимо рассчитать. Кроме того, для расчета требуется знание температурного поля оболочки и реологических свойств материала на этом участке, в частности необходимо иметь значение модуля упругости и коэффициента Пуассона, сопротивления деформации и модуля упрочнения. Все вышеперечисленное относится и к расчету участка 2 (очагу деформации затвердевшего металла), за исключением того, что задача решается не в плоской, а объемной постановке.

2.2.3. Задание толщины стенки оболочки и температуры заготовки

Толщину стальной оболочки на выходе из неразъемного кристаллизатора принимаем равной 8 мм, а в области смыкания широких стенок оболочки - 10 мм. Температуру внешней поверхности оболочки на участке с жидкой фазой принимаем равной 1200 °С согласно рекомендациям работы [39]. Температуру внутренней поверхности оболочки принимаем равной 1450 С° [39]. Температуру внешней поверхности очага деформации затвердевшего металла принимаем аналогично температуре внешней поверхности оболочки, а температуру по плоскости симметрии очага деформации - аналогично температуре внутренней поверхности оболочки.

Поле температур по толщине оболочки и в очаге деформации от плоскости его симметрии принимали по линейному закону [39].

2.2.4. Расчет величины ферростатического давления

Величину ферростатического давления определяем по нижеприведенной формуле в соответствии с работой [29]

$$P_{\phi} = \rho_{ж} \cdot g \cdot H_i, \quad (2.1)$$

где P_{ϕ} – величина ферростатического давления, МПа;

$\rho_{ж}$ - плотность жидкой стали, кг/м³;

g - ускорение свободного падения, м/с²

H_i - расстояние по вертикали от мениска металла в кристаллизаторе до заданной точки технологической оси, м.

В результате ферростатическое давление для оболочки из стали принято равным 0,015 МПа.

2.2.5. Зависимость модуля упругости от температуры

Величину модуля упругости стальной заготовки в диапазоне температур 1200-1400 °С определяем по зависимости (2.2), приведенной в работе [39]. Для температуры от 1400 °С до температуры солидуса значение модуля упругости интерполируем по графику из того же источника.

$$E = -4.566 \cdot 10^5 + 160 \cdot T + 3.266 \cdot 10^8 / T, \quad (2.2)$$

где E - модуль упругости материала, МПа;

T - температура заготовки, °С.

Модуль упрочнения E_1 принят для всего диапазона температур для стали принят равным 0,00015E.

2.2.6. Методика определения сопротивления деформации в зависимости от степени и скорости деформации и температуры металла

Для определения сопротивления деформации стали σ_s необходимо знание степени деформации ξ_i , скорости деформации u_i и температуры заготовки T . При обжатии оболочки с жидкой фазой на широких ее гранях степень деформации принимаем на уровне 0,001. Такая малая величина вызвана давлением на внутренние стенки только ферростатического давления. При гибке узких граней оболочки с жидкой фазой возникают большие деформации, поэтому для расчета принимаем величину деформации равной 0,5.

Учитывая, что угловая скорость эксцентрикового вала равна 60 мин^{-1} , а также то, что рабочий ход совершается на угле 90 градусов, определяем, что время одного рабочего хода равно $0,25$ сек. Отсюда следует, что скорость деформации широкой грани оболочки с жидкой фазой равна $0,004 \text{ с}^{-1}$, узкой грани $1-2 \text{ с}^{-1}$, а скорость деформации затвердевшего металла равна 2 с^{-1} .

После определения данных параметров для заданных температур можно найти значения сопротивлений деформации для стали по зависимости, приведенной в работе [39].

Вид этой зависимости следующий:

$$\sigma_s = 288 \cdot u_i^{0.107} \cdot (\ln \xi_i)^{1.45} \cdot e^{-0.00235T}, \quad (2.3)$$

где σ_s – сопротивление пластической деформации, МПа,

u_i - скорость деформации, с^{-1} ;

$\ln \xi_i$ - степень деформации, %;

T - температура металла, $^{\circ}\text{C}$.

Принятые для расчета оболочки из стали значения модуля упругости E , модуля упрочнения E_1 и сопротивления деформации в зависимости от температуры следующие:

$T, ^\circ\text{C}$	1200	1250	1300	1350	1400	1450
$E, \text{МПа}$	7565	4680	2631	1326	686	641
$E_1, \text{МПа}$	1,135	0,702	0,359	0,189	0,103	0,096
$\sigma_s, \text{МПа}$	53,226	42,859	29,052	19,694	13,350	9,049

2.3. Напряженно-деформированное состояние металла при формировании полосы в зоне гибки узких боковых стенок оболочки с жидкой фазой

2.3.1. Общая постановка задачи

Ниже представлены результаты расчета деформации оболочки с жидкой фазой на участке 1 (см. Рисунок 2.2), а именно, между неразъемным кристаллизатором и очагом деформации затвердевшего металла.

Рассматривалась деформация от действия на внутреннюю поверхность оболочки ферростатического давления, а на внешнюю поверхность по зоне контакта стенок-бойков с широкой стенкой задаваемого перемещения стенок-бойков.

Результаты получены решением задачи механики сплошной среды методом конечных элементов. Использована «плоская» постановка контактной задачи упруго-пластичности при наличии больших деформаций и перемещений.

Результаты даны в трех сечениях оболочки:

- после первого обжатия оболочки стенками - бойками (сечение «А»);
- после третьего обжатия (сечение «В»);
- после пятого обжатия (сечение «С»).

При этом после первого обжатия (сечение «А») сближение широких стенок оболочки составляет 10 мм, а ширина жидкой фазы уменьшается с 64 мм до 54 мм. В сечении «В» сближение широких стенок оболочки составляет 30 мм, а ширина жидкой фазы уменьшается с 64 мм до 34 мм. В сечении «С» сближение широких стенок оболочки составляет 50 мм, а ширина жидкой фазы уменьшается с 64 мм до 14 мм.

При расчете учитывалась история нагружения.

2.3.2. Расчетная схема и граничные условия

На рисунке 2.3 в системе координат ХОУ представлена четвертая часть заготовки, принятая для расчета. Со стороны внутренней поверхности оболочки задавались статические граничные условия в виде ферростатического давления, равного для оболочки для стали 0,015 МПа.

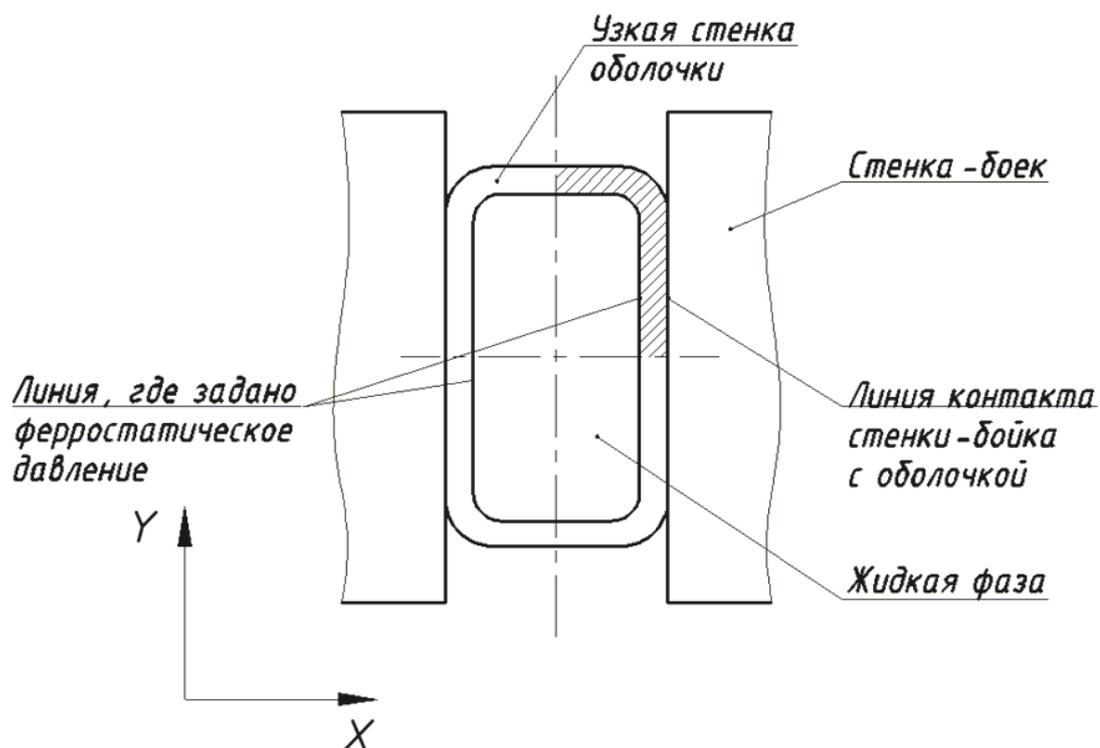


Рисунок 2.3 - Четверть оболочки принятая для расчёта (выделена штриховкой)

Что касается кинематических граничных условий, то на отсеченных поверхностях заготовки и стенки-бойка задавалась симметрия, означающая отсутствие на этих поверхностях перемещений в направлении оси X или Y (Рисунок 2.2). Для стенки-бойка задавалось перемещение в направлении, противоположном положительному направлению оси OX. Для расчета в сечении «А», «В» и «С» значения этих перемещений равнялись соответственно 5, 15 и 25 мм.

Типовая схема разбиения на конечные элементы в системе координат XOY даны на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 - Типовая схема разбиения на конечные элементы в системе координат XOY

В качестве конечного элемента использован плоский восьмиузловой конечный элемент, показанный на рисунке 2.5. Размер элемента равнялся в поперечном сечении заготовки 0,5 мм, а в продольном - от 0,5 до 1 мм.

Количество конечных элементов и число узлов было определено исходя из условия сходимости решения на каждом подшаге.

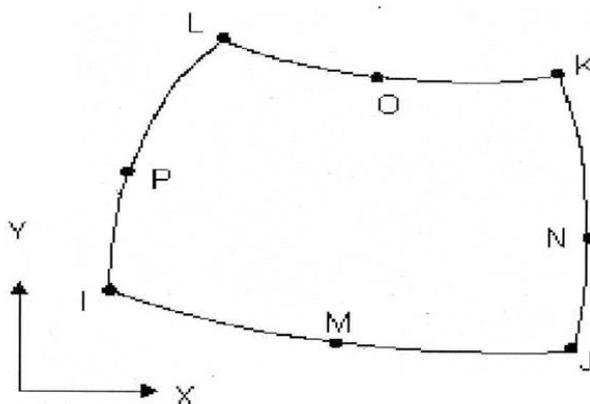


Рисунок 2.5 – Восьмиузловой твердотельный конечный элемент PLANET82, принятый для расчета

2.3.3. Результаты расчета и их анализ

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния в области узкой грани оболочки с жидкой фазой представлены в виде эпюр и изолиний перемещений, напряжений и деформаций. Причем представлены только значения определяющих процесс гибки величин.

Приняты следующие основные обозначения:

u_y – перемещение вдоль оси Y ;

ε_x – деформации в направлении оси X ;

σ_x – напряжения в направлении оси X .

На рисунках 2.6-2.8 представлены изолинии перемещений в стальной оболочке для трех сечений. Описание сечений дано в разделе 2.3.1. Изолинии перемещений даны на деформированном состоянии оболочки. Здесь же на рисунках приведено исходное состояние оболочки.

Все остальные рисунки выполнены в виде эпюр на недеформированном состоянии оболочки.

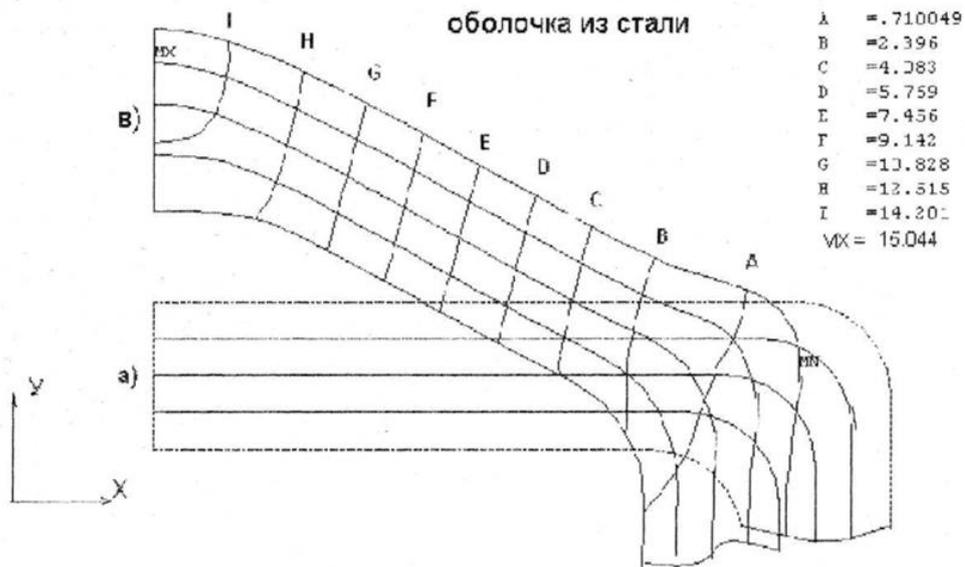


Рисунок 2.6 – Изолинии равных перемещений в направлении оси Y после первого обжатия оболочки стенками - бойками (сечение «А»): а) узкая грань оболочки до деформации; в) вид узкой грани оболочки после деформации; MX и MN – положение максимального и минимального значения перемещения. Значения изолиний А...I даны в мм.

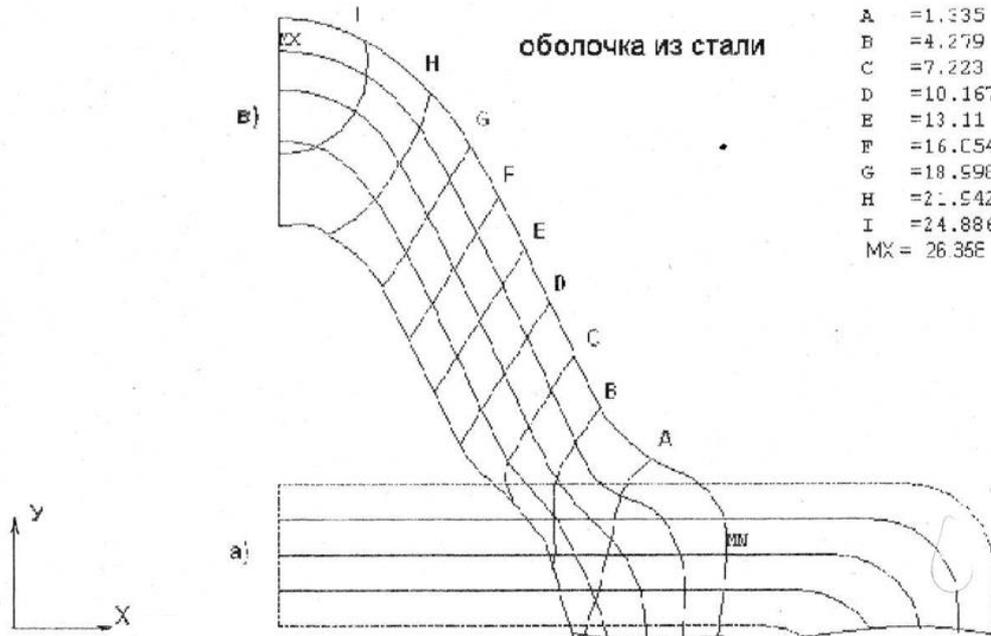


Рисунок 2.7 – Изолинии равных перемещений в направлении оси Y после третьего обжатия оболочки стенками - бойками (сечение «В»): а) узкая грань оболочки до деформации; в) вид узкой грани оболочки после деформации; MX и MN – положение максимального и минимального значения перемещения. Значения изолиний А...I даны в мм.

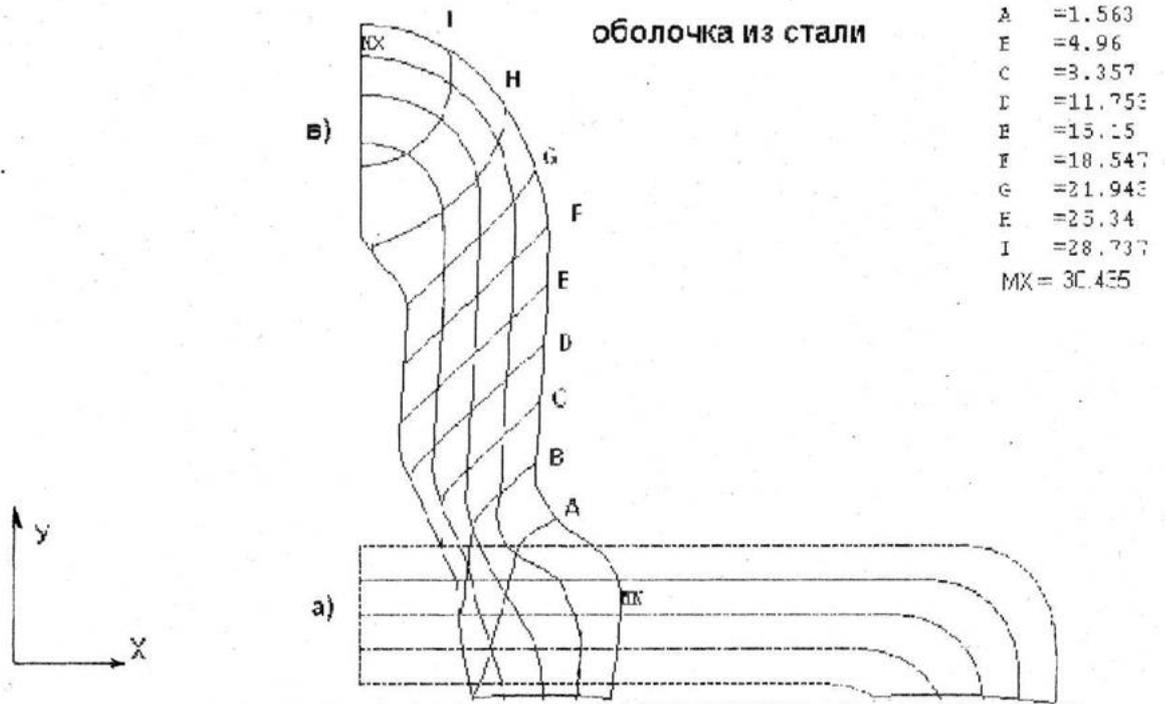


Рисунок 2.8 – Изолинии равных перемещений в направлении оси У после пятого обжатия оболочки стенками - бойками (сечение «С»): а) узкая грань оболочки до деформации; в) вид узкой грани оболочки после деформации; МХ и МN – положение максимального и минимального значения перемещения. Значения изолиний А...I даны в мм.

На рисунках 2.9-2.11 представлены эпюры этих же величин по периметру узкой стенки оболочки.

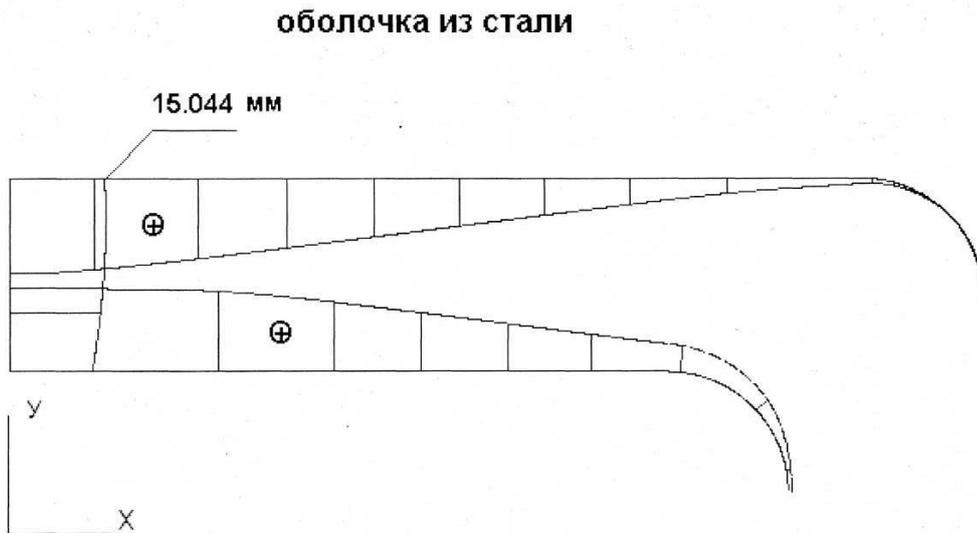


Рисунок 2.9 - Эпюры перемещения в направлении оси У после первого обжатия оболочки бойками (сечение «А»). Значения перемещений даны в мм

оболочка из стали

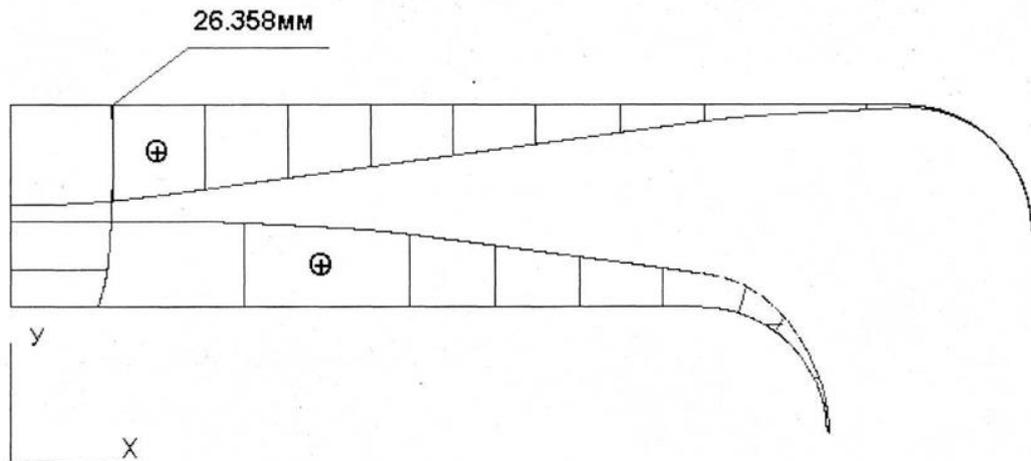


Рисунок 2.10 - Эпюры перемещения в направлении оси У после третьего обжатия оболочки бойками (сечение «В»). Значения перемещений даны в мм

оболочка из стали

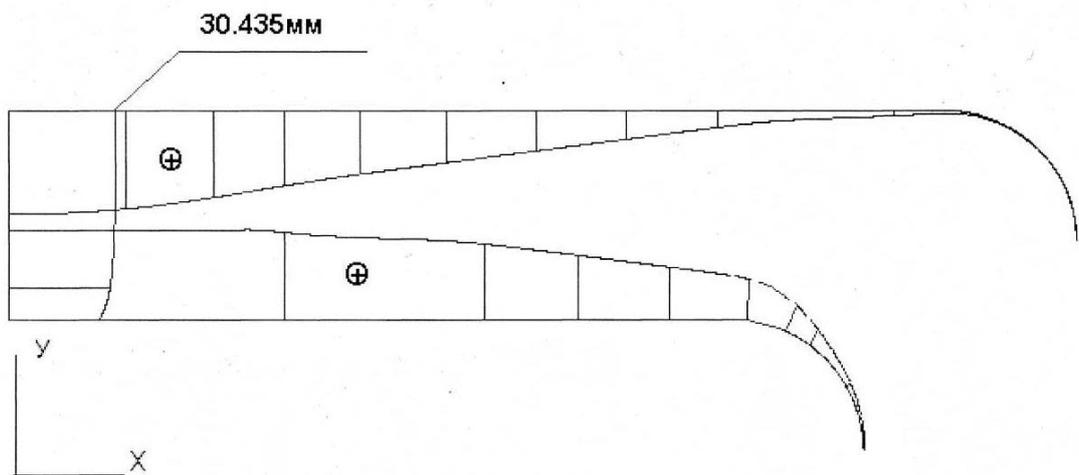


Рисунок 2.11 - Эпюры перемещения в направлении оси У после пятого обжатия оболочки бойками (сечение «С»). Значения перемещений даны в мм

На рисунках 2.12-2.14 приведены эпюры нормальных напряжений.

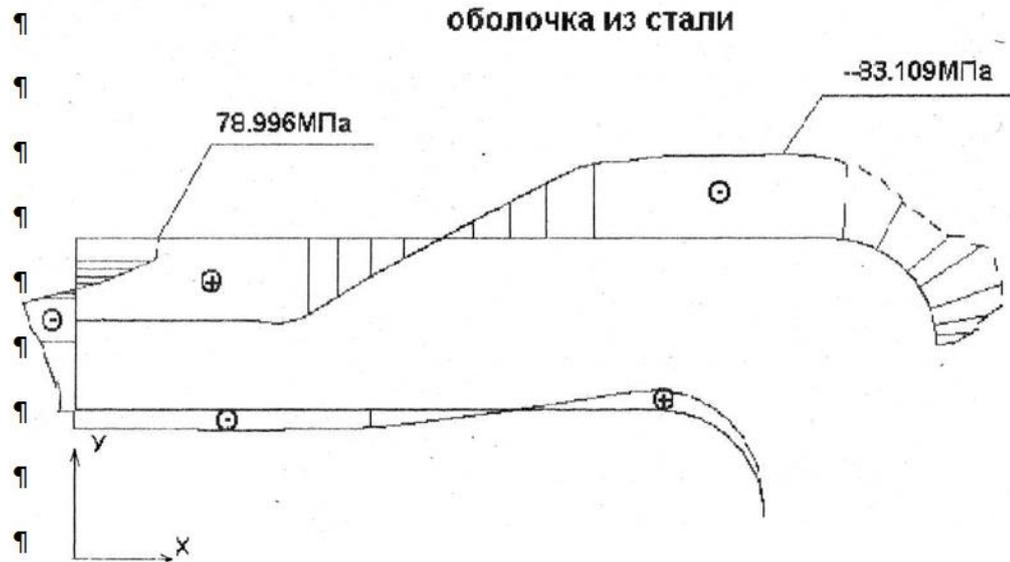


Рисунок 2.12 - Эпюры напряжений в направлении оси X после первого обжатия оболочки бойками (сечение «А»)

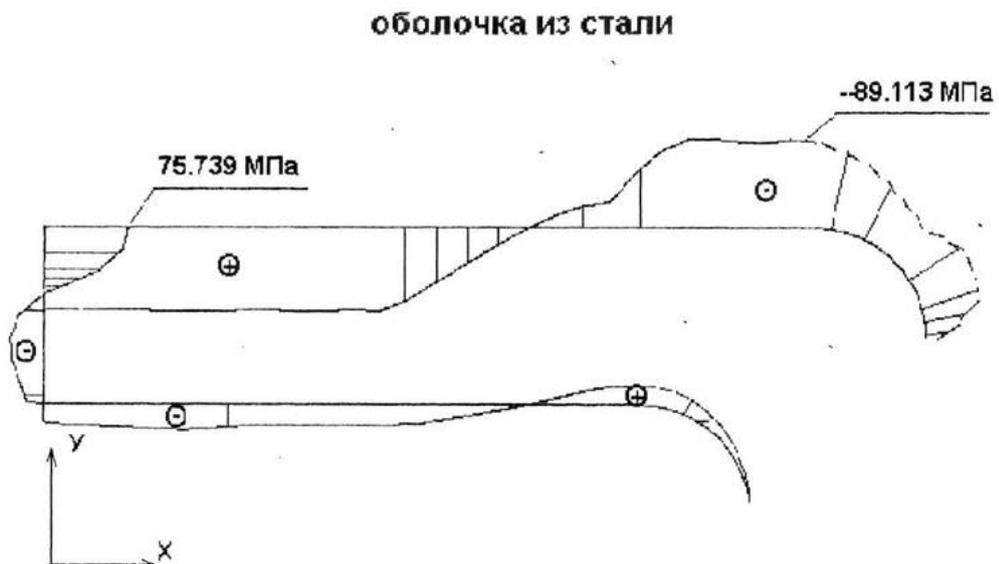


Рисунок 2.13 - Эпюры напряжений в направлении оси X после третьего обжатия оболочки стенками - бойками (сечение «В»)

оболочка из стали

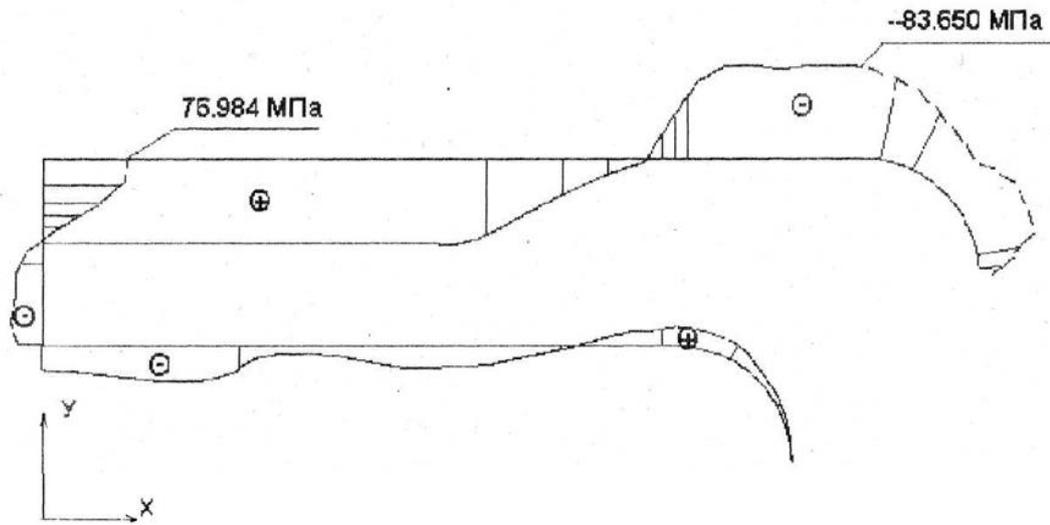


Рисунок 2.14 - Эпюры напряжений в направлении оси X после пятого обжатия оболочки стенками - бойками (сечение «С»)

На рисунках 2.15-2.17 представлены эпюры деформаций.

оболочка из стали

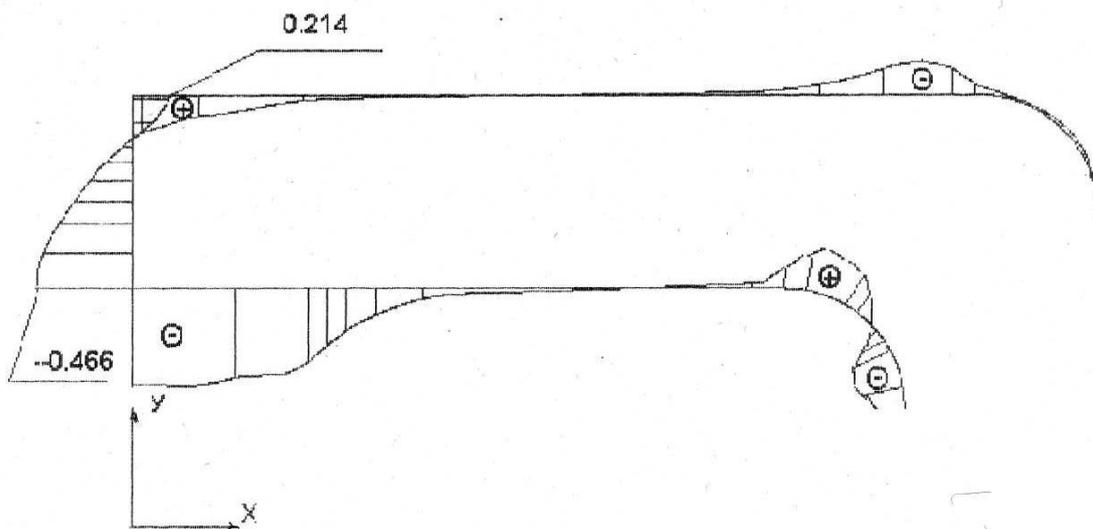


Рисунок 2.15 - Эпюры деформаций в направлении оси X после первого обжатия оболочки бойками (сечение «А»)

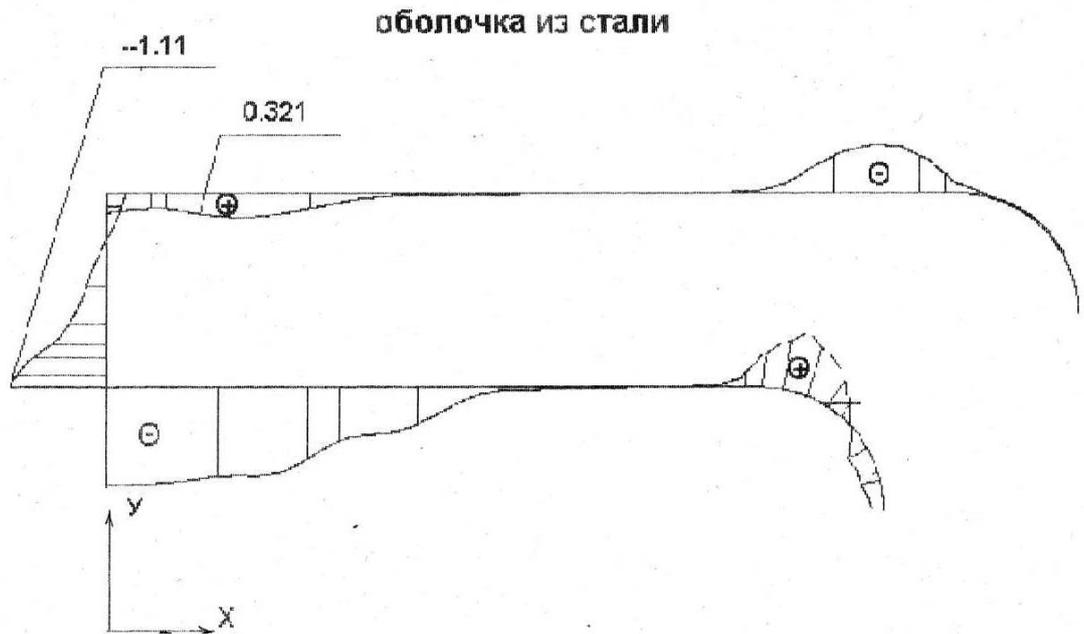


Рисунок 2.16 - Эпюры деформаций в направлении оси X после третьего обжатия оболочки бойками (сечение «В»)

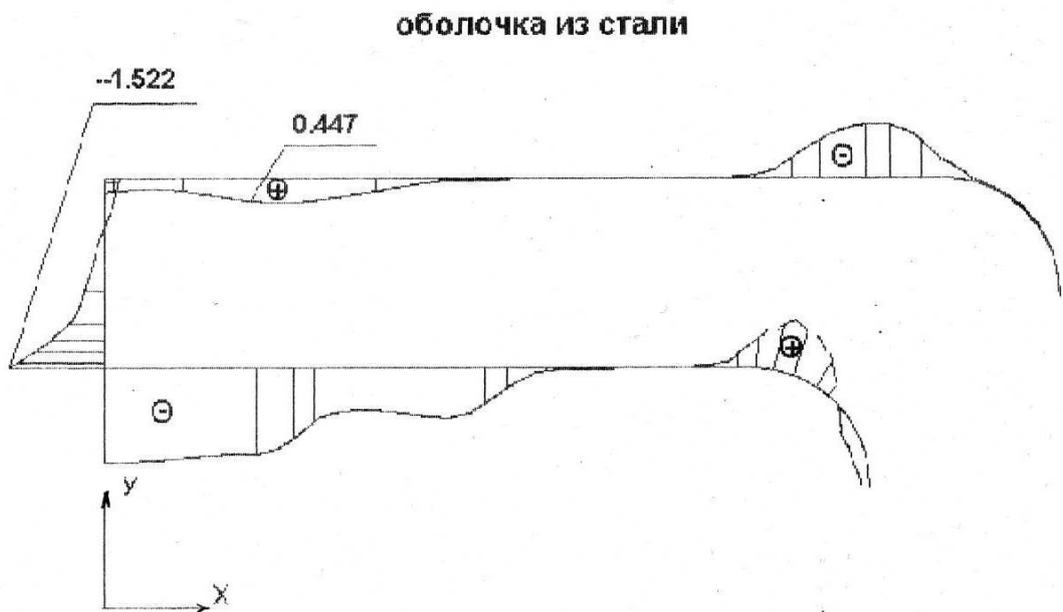


Рисунок 2.17- Эпюры деформаций в направлении оси X после пятого обжатия оболочки бойками (сечение «С»)

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния металла в области узкой грани оболочки с жидкой фазой представлены для трех перемещений широких граней оболочки в виде эпюр перемещений u_y , напряжений σ_x и деформаций ϵ_x (Таблица 2.1).

Таблица 2.1 - Максимальное значение перемещений u_y , растягивающих напряжений σ_x и деформаций ϵ_x , возникающих на внешней поверхности оболочки с жидкой фазой

u_y , мм	σ_x , МПа	ϵ_x
15,04	79,12	0,21
26,32	75,74	0,32
30,41	77,21	0,45

Полученные результаты свидетельствуют о сложном характере напряженно-деформированного состояния, возникающего при гибке узкой грани оболочки с жидкой фазой. На внешней поверхности узкой грани вблизи ее середины возникают растягивающие напряжения σ_x (Рисунок 2.13), переходящие в сжимающие в области перехода узкой грани в широкую, причем их величина достигает 89 МПа.

По мере сближения широких граней оболочки возрастают растягивающие деформации ϵ_x , достигающие величины 0,447 в сечении «С», где сближение широких граней оболочки с жидкой фазой составляет 50 мм, а ширина жидкой фазы металла равна 14 мм.

Таким образом, при формировании листа из стали установлено, что по мере гибки узких стенок оболочки с жидкой фазой от сечения «А» к сечению «С» растягивающие деформации на внешней поверхности узкой стенки вблизи ее середины возрастают и достигают величины 0,447. Однако при этом растягивающие напряжения по мере гибки практически не изменяются и составляют 77-79 МПа.

Эти растягивающие деформации и напряжения могут привести к возникновению трещин на внешней поверхности оболочки. Однако имеются пути снижения растягивающих напряжений на боковой поверхности

оболочки. Это связано с тем, что калибровка боковых стенок разъемной части кристаллизатора выполняется таким образом, что в процессе перемещения оболочки и гибке ее боковых стенок имеется контакт ее боковых стенок с боковыми стенками разъемного кристаллизатора. Таким образом, со стороны боковых стенок кристаллизатора на боковые стенки оболочки действуют сжимающие напряжения, величина которых будет зависеть от калибровки боковых стенок кристаллизатора, которые одновременно со стенками - бойками продвигают оболочку слитка по направлению литья и могут несколько обжимать боковые стенки оболочки. Такая технология непрерывного литья с подпором боковых стенок оболочки может привести к существенному снижению растягивающих напряжений на внешних поверхностях узких стенок оболочки слитка. Следует также отметить, что возникновение трещин на боковых поверхностях оболочки не приведет к браку листовой продукции, поскольку боковые кромки листа, как правило, обрезаются.

2.4. Напряженно-деформированное состояние металла в зоне очага деформации затвердевшего металла

2.4.1. Постановка задачи

Ниже представлены результаты расчета напряженно-деформированного состояния в очаге деформации (участок 2). Рассматривалась деформация от действия на внутреннюю поверхность очага статического давления жидкого металла, а на внешнюю поверхность - по зоне контакта бойков с широкой стенкой – задаваемого перемещения бойков.

Результаты получены решением задачи механики сплошной среды методом конечных элементов. Использована «объемная» постановка

контактной задачи упруго - пластичности при наличии больших деформаций и перемещений.

2.4.2 Исходные данные и принятые допущения

Как и при исследовании оболочки с жидкой фазой, материал исследования – сталь марки 17ХГСА

При расчете со стороны внутренней поверхности очага деформации необходимо приложить ферростатическое давление жидкого металла, определяемое по формуле (2.1). Принимая плотность жидкой стали равной 7600 кг/м^3 определяем величину ферростатического давления жидкого металла.

Величина этого давления для очага деформации из стали принята $0,030 \text{ МПа}$.

На внешней поверхности очага из стали принимаем так же, как и при исследовании оболочки, температуру, равной 1200°C . На внутренней поверхности заготовки значение температуры принимаем равной температуре 1450°C .

Посередине плоскости симметрии очага деформации температура принята равной температуре внутренних стенок.

Для бойка модуль упругости принят равным 210 ГПа , а коэффициент Пуассона – $0,35$.

Коэффициент Пуассона для очага деформации принят равным $0,35$ и постоянным для всего диапазона температур.

Коэффициент трения между бойком и стальной заготовкой принят равным – $0,5$.

2.4.3. Расчетная схема и граничные условия

На рисунках 2.18 и 2.19 в системе координат XOY представлена четвертая часть заготовки, принятая для расчета. Здесь же приведено положение бойка, который показан упрощенно.

Со стороны внутренней поверхности оболочки задавались статические граничные условия в виде ферростатического давления, равного для оболочки из стали $0,03$ МПа. Детально эти поверхности показаны на рисунках 2.18 и 2.19.

Что касается кинематических граничных условий, то на отсеченных поверхностях заготовки и бойка задавалась симметрия, означающая отсутствие на этих поверхностях перемещений в направлении оси X либо Y . Конкретно, по каким поверхностям задавалась симметрия, показано на рисунках 2.18 и 2.19.

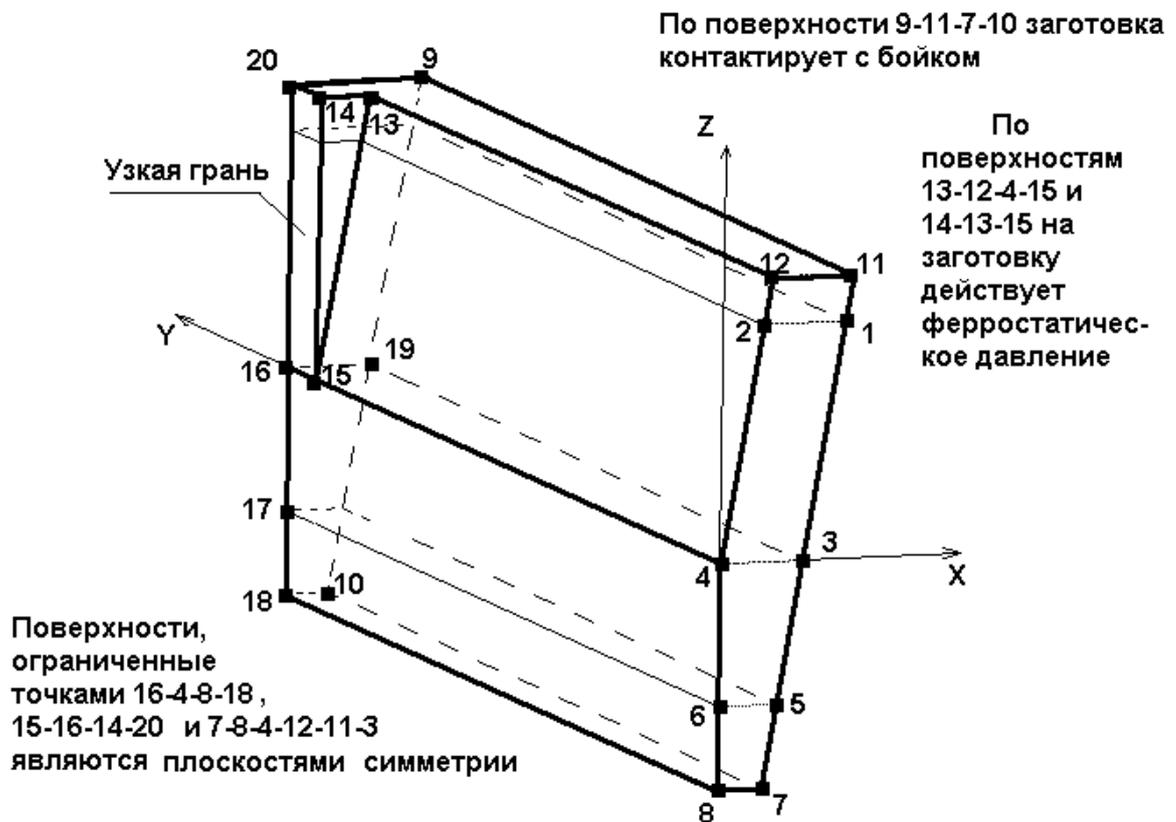


Рисунок 2.18 - Объемная четверть очага деформации в системе координат XYZ , принятая для расчета (боек не показан)

Для бойка задавались перемещения в направлениях, противоположных положительным направлениям осей OX и OZ . Для расчета значения этих перемещения равнялись соответственно 5 мм.

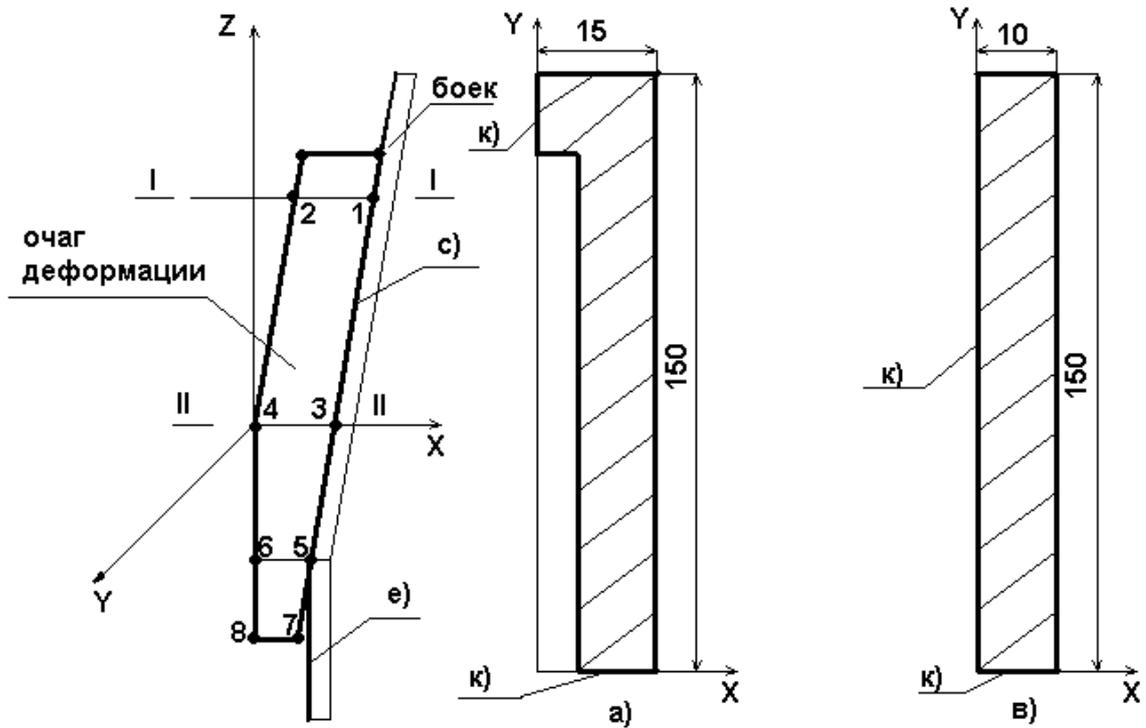


Рисунок 2.19 - Разрез плоскостью XZ четверти очага деформации: а) четверть очага деформации в сечении I-I, б) четверть очага деформации в сечении II-II, в) и г) контуры наклонного и калибрующего участков бойка; д) линия (плоскость) симметрии

Типовая схема разбиения на конечные элементы в системе координат XYZ дана на рисунке 2.20.

В качестве конечного элемента использован объемный двадцати узловой конечный элемент, показанный на рисунке 2.21.

Размер элемента находился в диапазоне – от 0,5 до 1 мм. Количество элементов для одной четверти очага деформации составило 46104, а число узлов – 53271. Количество конечных элементов и число узлов было определено исходя из условия сходимости решения на каждом подшаге.

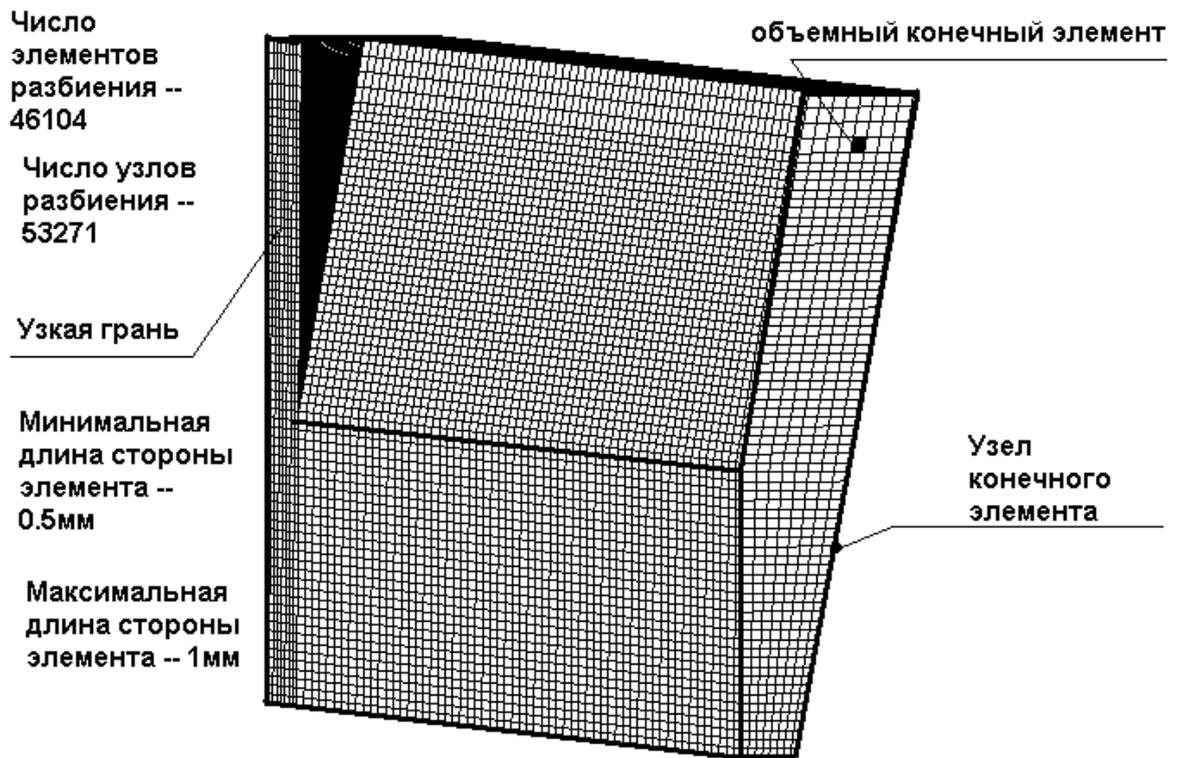


Рисунок 2.20 - Сетка конечных элементов для четверти очага деформации

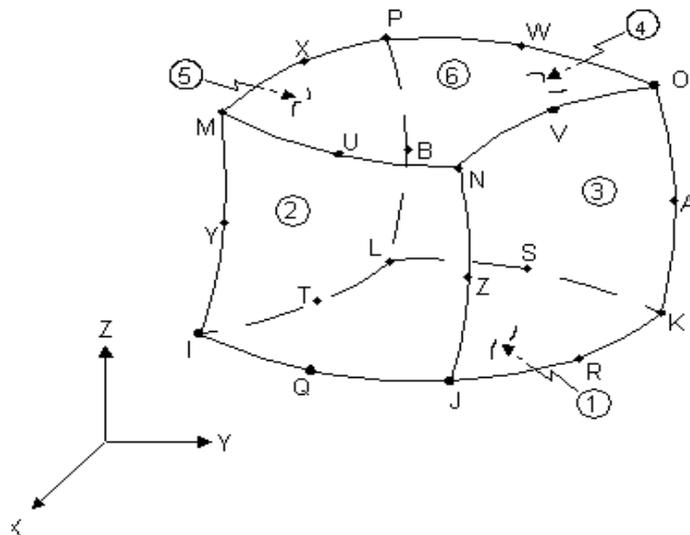


Рисунок 2.21 - Двадцатиузловой объемный, твердотельный конечный элемент SOLID95, принятый для расчета: 1, 2, 3, 4, 5, 6 - стороны конечного элемента; I, J, K, L, M, N, O, P - узлы в вершинах элемента; A, B, Y, Z, Q, R, S, T, V, W, X, U –дополнительные узлы на сторонах элемента; SX, SY, SZ – напряжения в направлении осей X, Y и Z соответственно

2.4.4 Результаты расчета и их анализ

Результаты расчета напряженно деформированного состояния металла в очаге деформации представлены в виде эпюр напряжений. Аналогично результатам гибки узкой грани оболочки с жидкой фазой представлены только существенные значения.

Представленные эпюры даются на недеформированном состоянии очага деформации.

Приняты следующие основные обозначения:

σ_x , σ_y , σ_z - напряжения в направлении осей X, Y, Z соответственно.

На рисунках 2.22-2.24 представлен характер распределения нормальных напряжений вдоль осей X и Z и касательных напряжений (Рисунок 2.24). Результаты даны для зоны контакта очага с бойком. На рисунках 2.25 и 2.26 представлено распределение нормальных напряжений вдоль осей X и Z для плоскости симметрии. Приведем выборочные результаты по максимальным напряжениям по поверхности контакта очага со стенкой - бойком и в плоскости симметрии. Так, напряжения в плоскости симметрии составляли соответственно -107, -64 и -101 МПа, а эти напряжения в зоне контакта очага деформации со стенкой - бойком составляли -96, -61 и -117 МПа.

Представленные результаты свидетельствуют о благоприятной схеме напряженного состояния в очаге циклической деформации. Как следует из этих данных и приведенных эпюр напряжений, металл при деформации находится практически в условиях всестороннего сжатия.

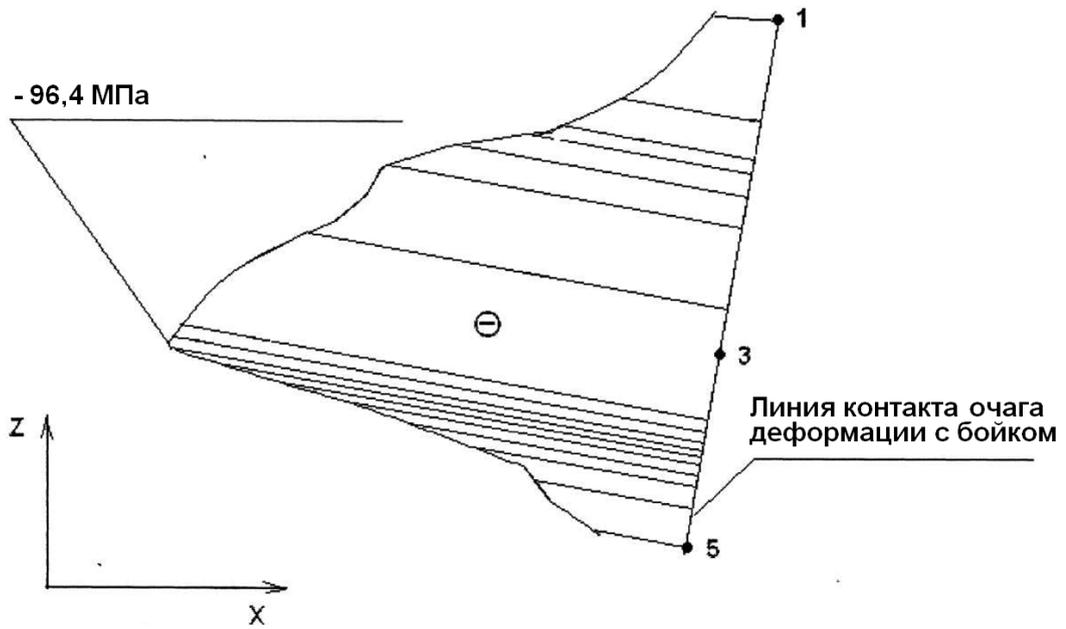


Рисунок 2.22 - Характер напряжения по оси X вдоль линии 1-3-5 очага деформации

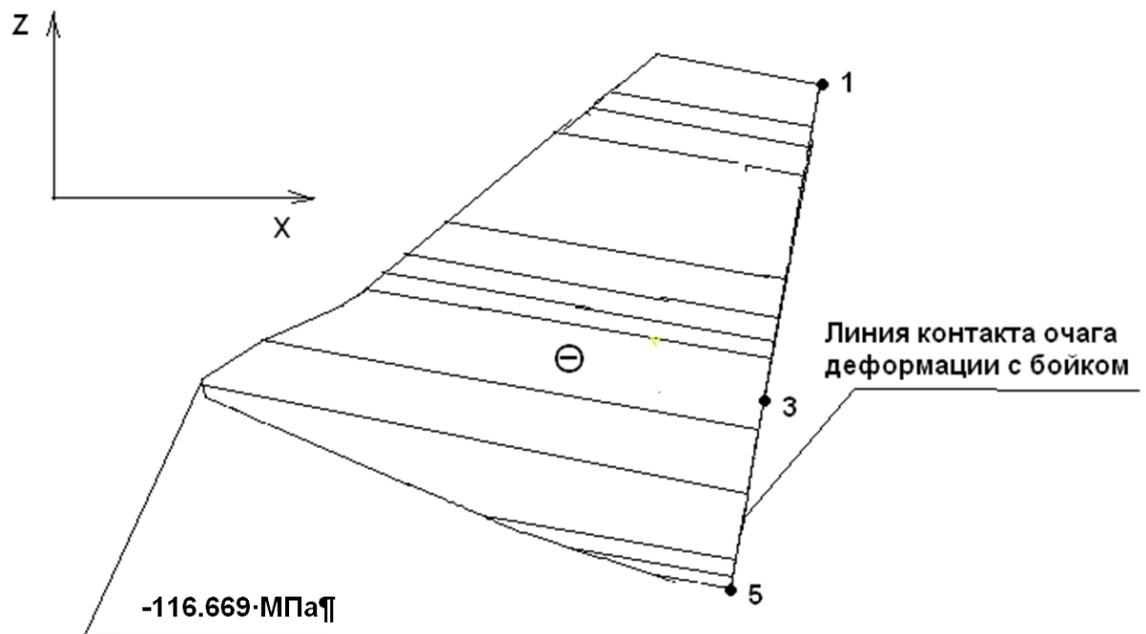


Рисунок 2.23 - Характер напряжения по оси Z вдоль линии 1-3-5 очага деформации

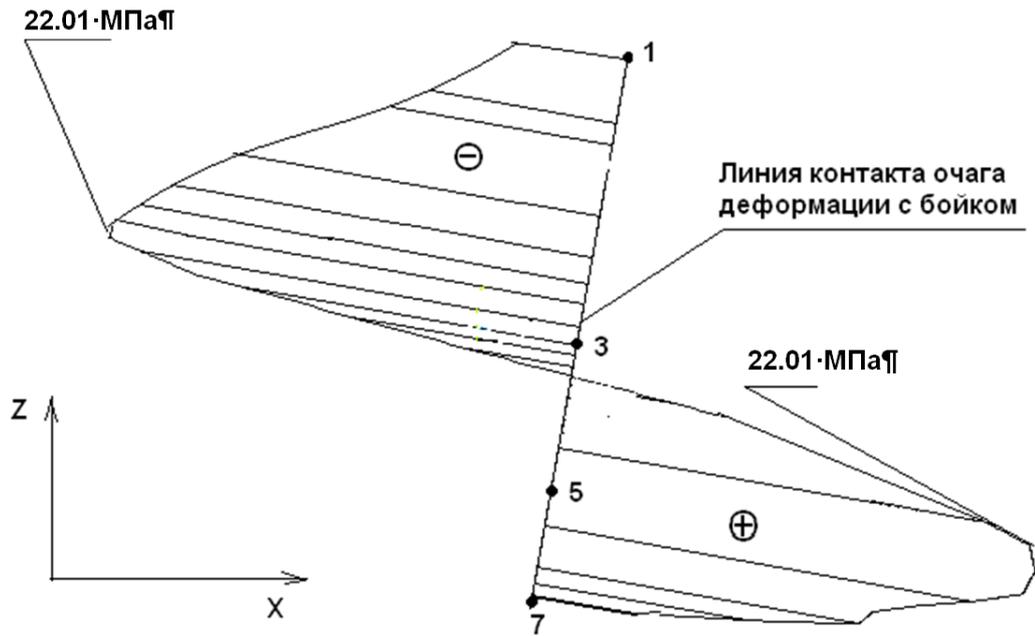


Рисунок 2.24 - Характер касательных напряжений вдоль линии 1-3-5-7 очага деформации

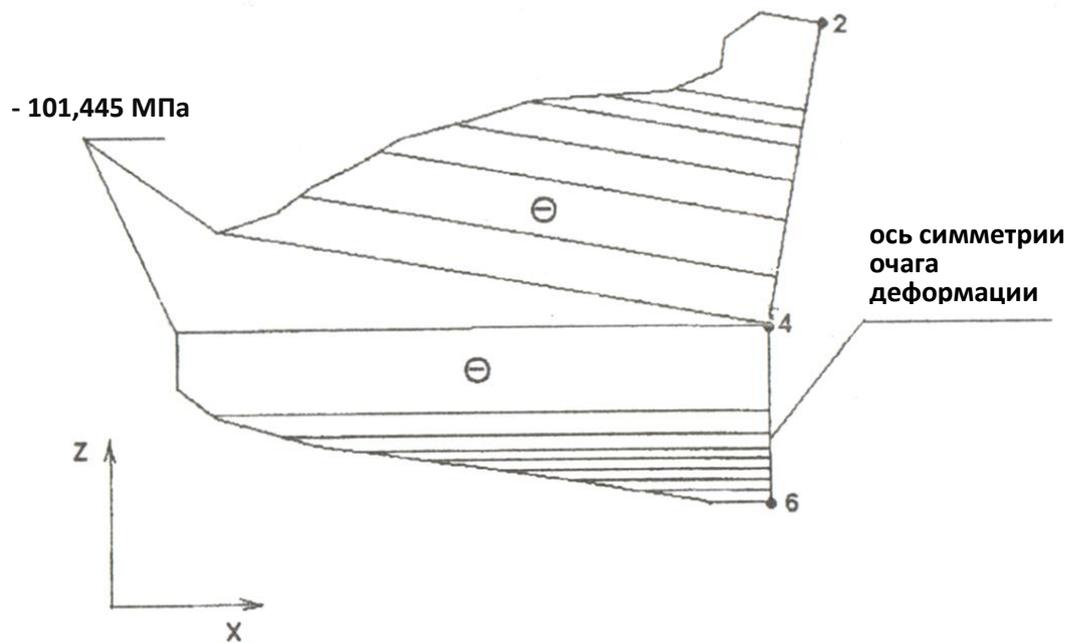


Рисунок 2.25 - Характер напряжения по оси X вдоль линии 2-4-6 очага деформации

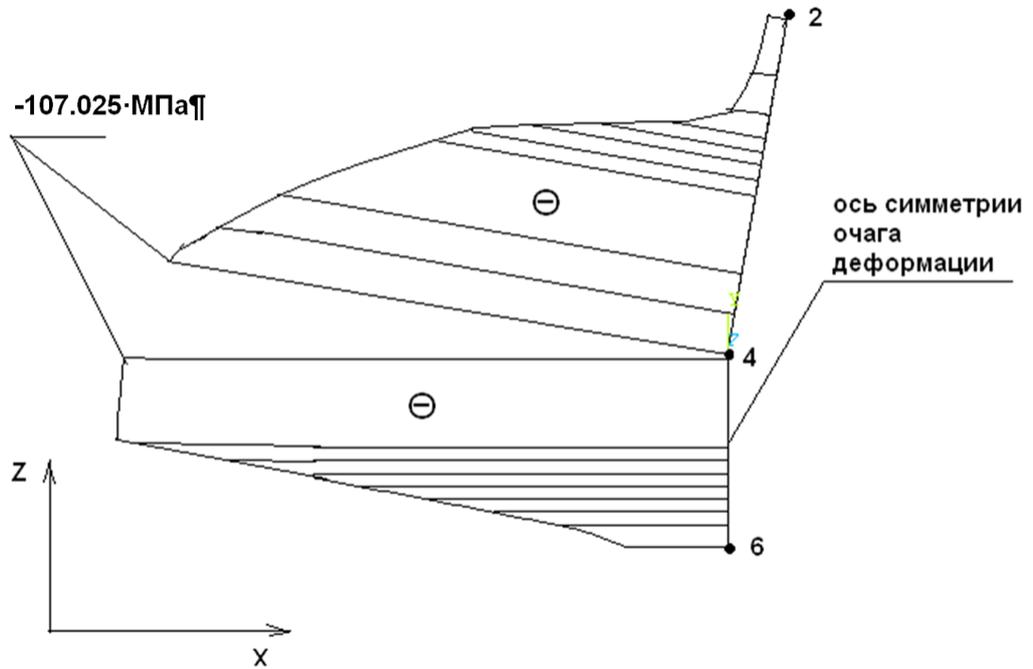


Рисунок 2.26 - Характер напряжения по оси Z вдоль линии 2-4-6 очага деформации

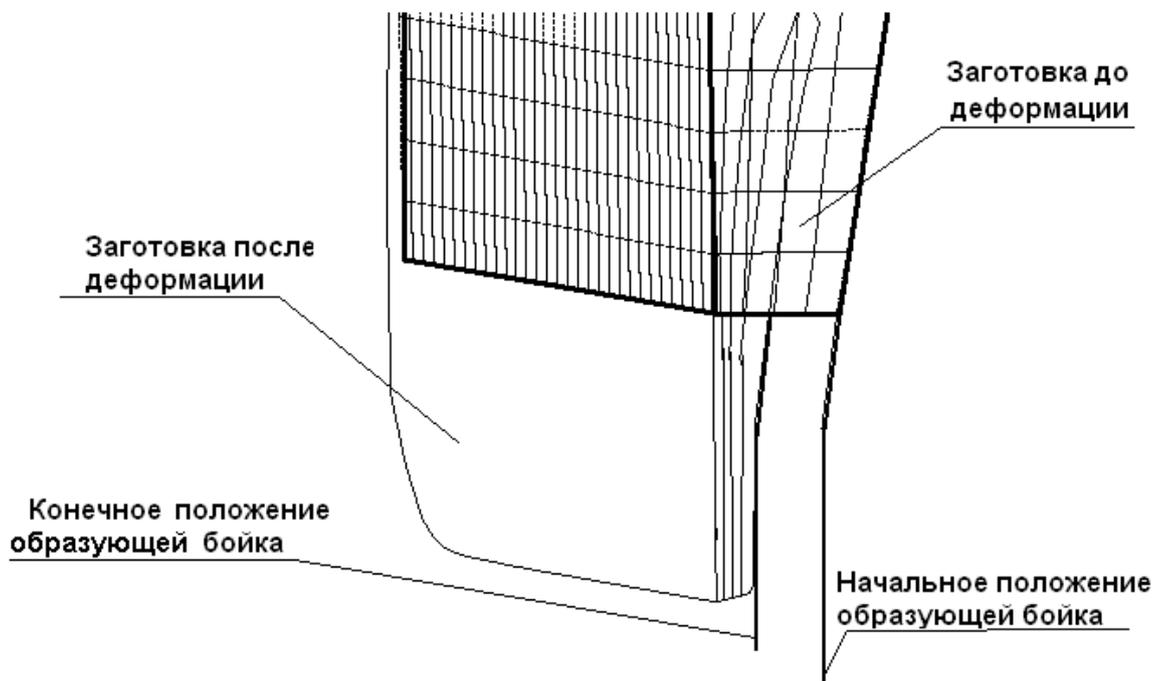


Рисунок 2.27 - Вид исходного и конечного состояния очага деформации в объеме

Рисунок 2.27 наглядно отражает характер деформации очага деформации в объеме, а рисунок 2.28 - распределение нормальных напряжений вдоль осей X, Y и Z в срединной плоскости очага деформации (параллельной плоскости XY).

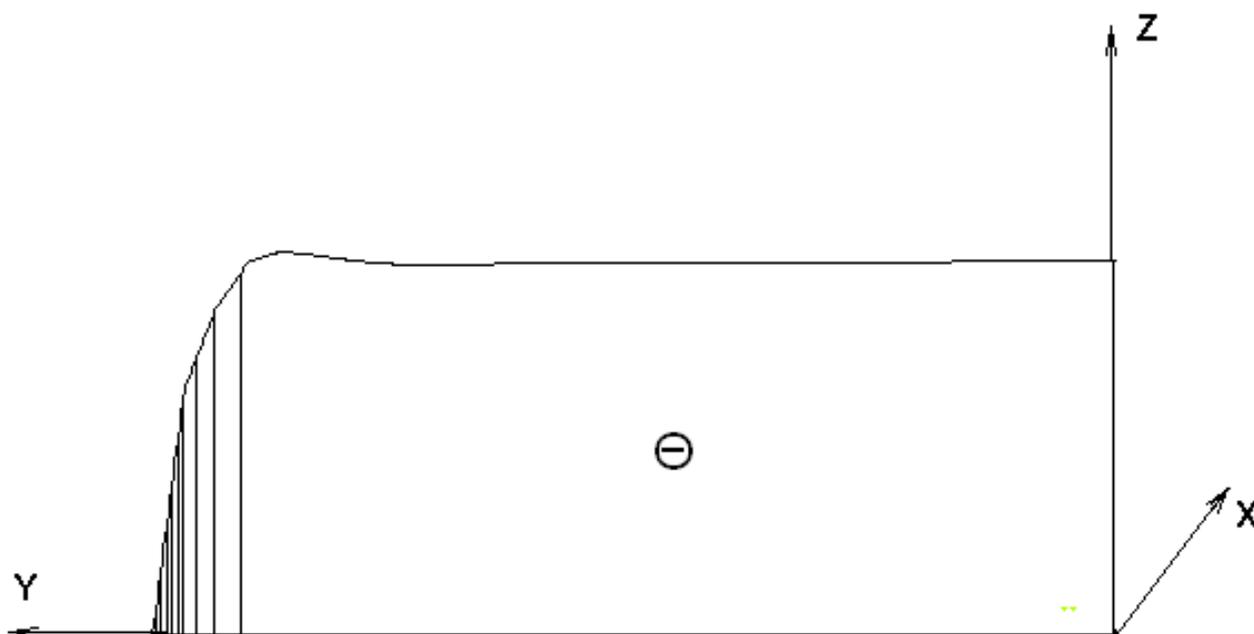


Рисунок 2.28 - Характер напряжений вдоль оси Y в очаге деформации

В таблице 2.2 представлены выборочные результаты по максимальным напряжениям по поверхности контакта очага с бойком и в плоскости симметрии.

В таблице не отражены касательные напряжения в зоне опережения. Их уровень аналогичен уровню касательных напряжений, приведенных в таблице для зоны отставания. Знак же их противоположен.

Таблица 2.2 – Выборочные результаты по максимальным напряжениям (МПа) по поверхности контакта очага с бойком и в плоскости симметрии

Напряжения в плоскости симметрии			Напряжения в зоне контакта очага деформации с бойком			
σ_x	σ_y	σ_z	σ_x	σ_y	σ_z	σ_{zx}
-107	-64	-101	-96	-61	-117	-22

Представленные результаты свидетельствуют о благоприятной картине напряженного состояния в очаге деформации. Как следует из представленных эпюр напряжений и таблицы 2.2 металл при деформации находится практически в условиях всестороннего сжатия.

2.5 Оценка течения затвердевшего металла на границе с жидкой фазой

Для оценки течения затвердевшего металла на границе с жидкой фазой был произведен расчет напряженно-деформированного состояния в очаге деформации. Результаты расчета представлены в виде эпюр перемещений. Аналогично результатам гибки узкой грани оболочки с жидкой фазой представлены только существенные значения. Не представленные значения параметров малы по сравнению с приведенными, и поэтому не приводятся.

Приняты следующие основные обозначения: u_x , u_y , u_z – перемещения в направлении осей X, Y, Z соответственно,

На рисунке 2.29 представлен вид исходного и конечного состояния очага деформации в плоскости XZ (за исключением зон, близлежащих к узким граням заготовки).

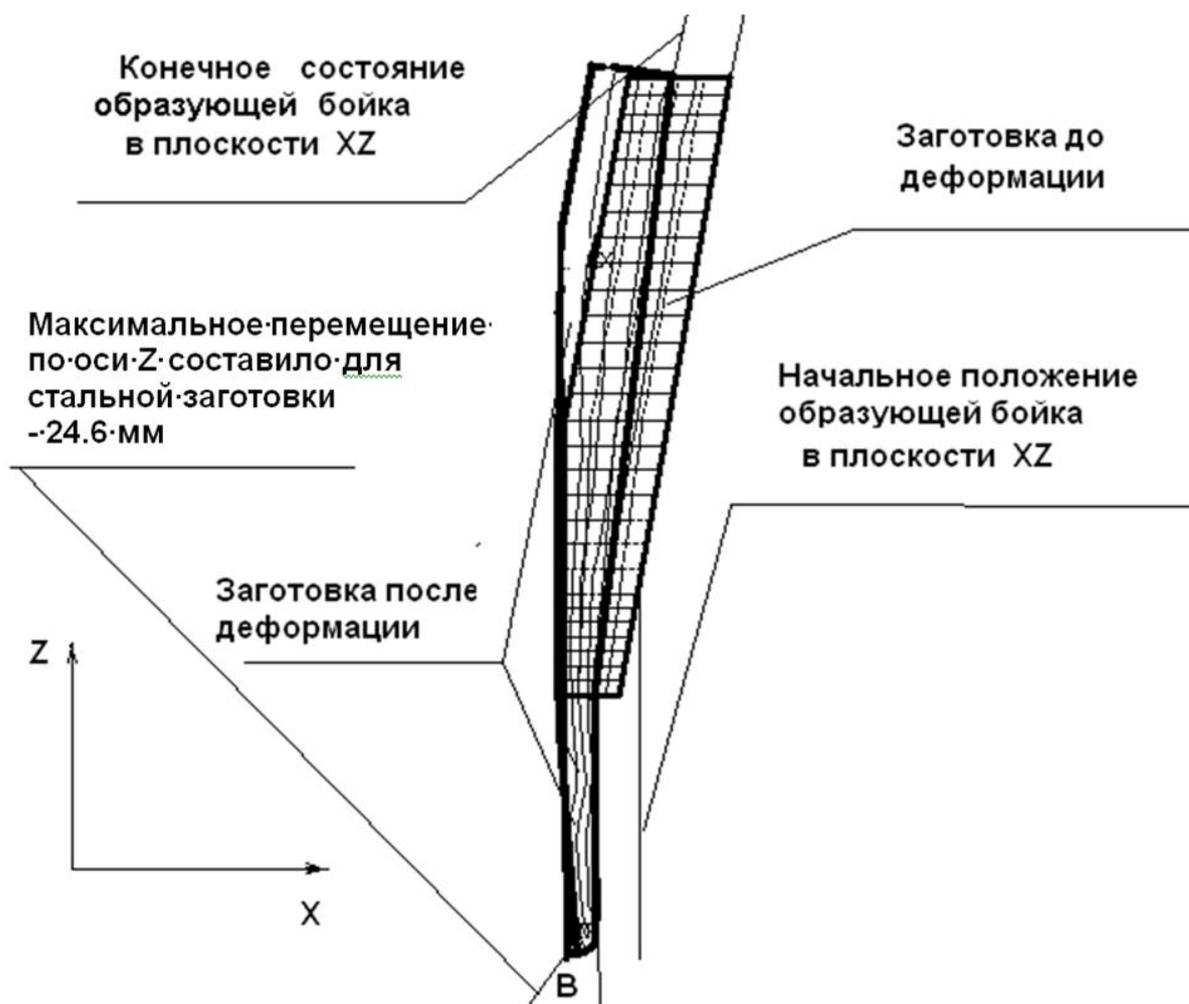


Рисунок 2.29 - Вид исходного и конечного состояния очага деформации в плоскости XZ

На рисунке 2.30 представлен характер перемещений вдоль оси Z по оси симметрии очага деформации, а на рисунке 2.31 дано распределение этих же перемещений по линии контакта очага с бойком.

Рисунки 2.32-2.35 отражают, каким образом характерные точки очага деформации перемещаются по оси Z (по оси разливки).

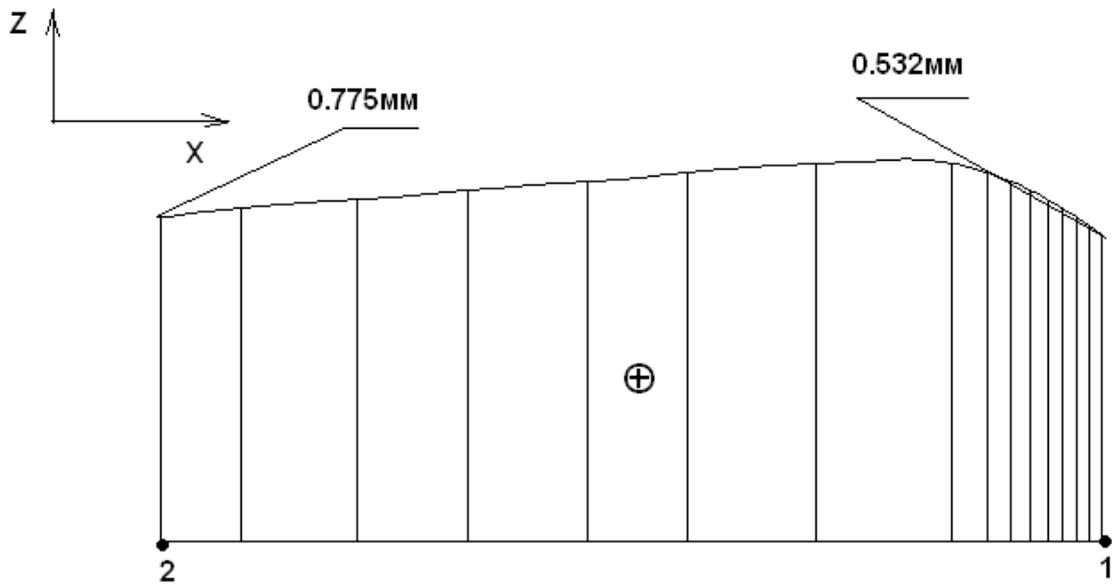


Рисунок 2.32 - Характер перемещения по оси Z вдоль линии 1-2 очага деформации



Рисунок 2.33 - Характер перемещения по оси Z вдоль линии 3-4 очага деформации

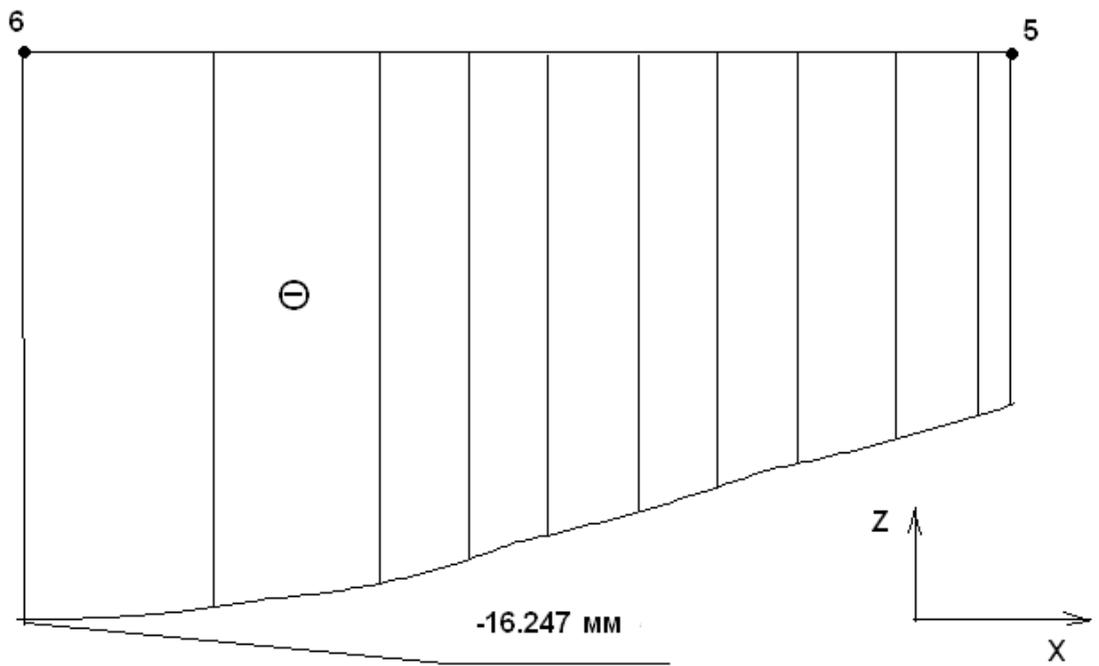


Рисунок 2.34- Характер перемещения по оси Z вдоль линии 5-6 очага деформации

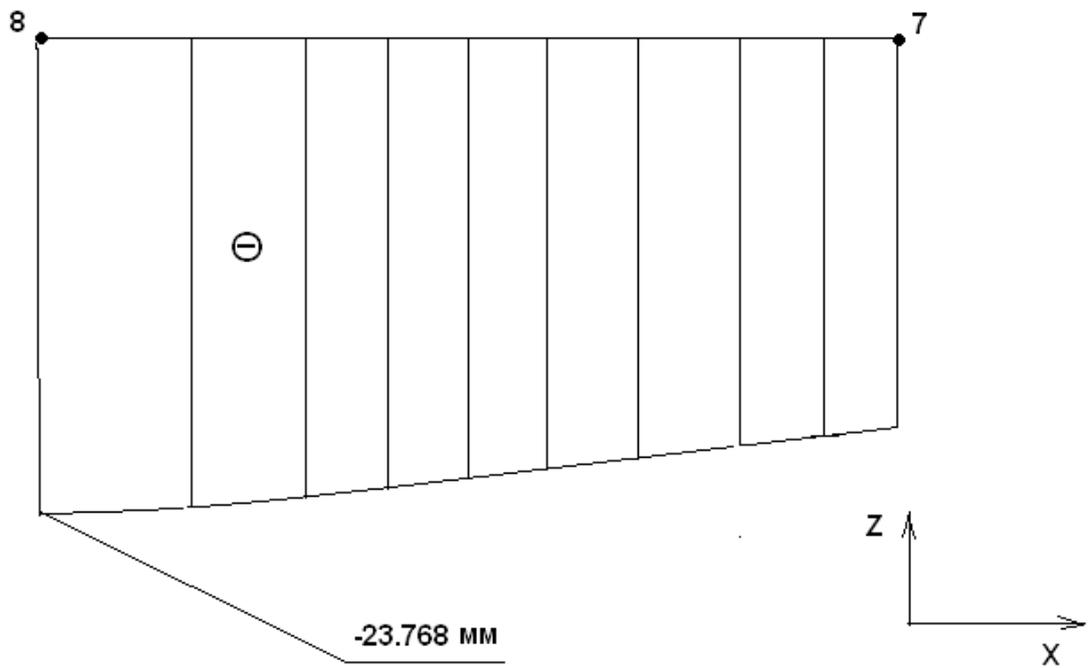


Рисунок 2.35 - Характер перемещения по оси Z вдоль линии 7-8 очага деформации

В таблице 2.3 представлены выборочные результаты по перемещениям металла в направлении оси Z для точек 1...8, показанных на рисунках 2.32-2.36.

Таблица 2.3 – Значения перемещений металла в направлении оси Z

Номер точки	Перемещения, u_z мм для очага из стали
1	0,532
2	0,775
3	-1,623
4	-0,917
5	-15,308
6	-16,247
7	-22,328
8	-23,768

Представленные результаты свидетельствуют о том, что при деформации затвердевший металл не выдавливается в конус жидкой фазы оболочки слитка, а перемещается в направлении непрерывного литья.

2.6 Выводы

1. Разработана математическая модель и алгоритм определения напряженно-деформированного состояния металла в очагах деформации при получении стальной полосы на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

2. С использованием модели определены закономерности распределения нормальных и касательных напряжений в очагах деформации при формировании листовой полосы из оболочки слитка с жидкой фазой и деформации затвердевшего металла. Установлено, что в очагах циклической деформации стальной полосы реализуется благоприятная с позиции качества

листа схема напряженного состояния с преобладанием высоких сжимающих напряжений.

3. Проведена оценка течения металла при формировании полосы из оболочки слитка с жидкой фазой и деформации затвердевшего металла. Установлено, что при деформации затвердевший металл не выдавливается в конус жидкой фазы оболочки слитка, а перемещается в направлении непрерывного литья листовой полосы.

4. Определены основные параметры вертикальной установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для получения листов из легированной стали

3. УСТАНОВКА СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛОС

3.1. Способ получения биметаллической полосы на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации

Предлагаемая разработка базируется на отечественных разработках, включающих установки совмещенных процессов непрерывного литья и циклической деформации [6, 11, 54], позволяющие существенно снизить расход топлива, электроэнергии и металлоемкость оборудования, повысить качество металлопродукции и улучшить экологическую обстановку.

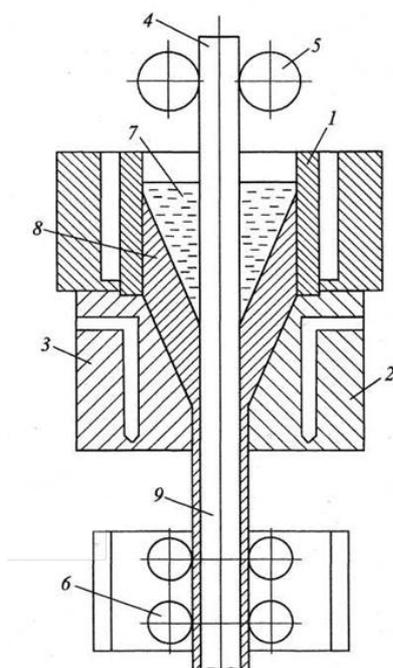


Рисунок 3.1 - Способ получения биметаллической полосы:

1 – неразъемный кристаллизатор; 2, 3 – стенки-бойки разъемного кристаллизатора; 4, 5 – направляющие ролики; 6 – тянущие ролики; 7 – расплав металла плакирующего слоя; 8 – оболочка плакирующего металла; 9 – полоса основного металла

Способ непрерывного литья биметаллической полосы [11] включает подачу в кристаллизатор металла плакирующего слоя (алюминий, медь и

т.п.) в жидком состоянии и предусматривает непосредственно в кристаллизаторе соединение полосы второго металла (сталь и т.п.) в твердом состоянии с кристаллизуемой оболочкой плакирующего слоя путем обжатия с последующей калибровкой полосы, причем скорость литья определяется заданной толщиной плакирующего слоя и размерами сборного кристаллизатора [18] (Рисунок 3.1).

Основные преимущества предлагаемого способа непрерывного литья и деформации в сравнении с зарубежными и отечественными аналогами [12, 17, 19, 21]:

- повышение качества биметалла за счет обжатия стенками - бойками биметаллического слитка, что обеспечивает надежное сцепление слоев, получение мелкозернистой однородной структуры металла плакирующего слоя, хорошего качества поверхности полосы и высокой точности толщины плакирующего слоя;
- расширение сортамента биметаллических полос;
- повышение производительности процесса непрерывного литья биметаллических полос;
- существенное снижение капитальных и эксплуатационных затрат;
- высокая стабильность и управляемость предлагаемого технологического процесса получения непрерывной биметаллической полосы.

Особенно актуально получение биметаллической полосы: сталь-медь, сталь-алюминий, т.е. основная полоса из стали имеет по всему периметру плакирующий слой меди или алюминия. Такой биметалл может найти широкое применение в качестве токопроводящих шин в электротехнической промышленности, что позволит существенно снизить расход дорогостоящей меди или алюминия.

Реализовать изложенные выше преимущества предлагаемой технологии позволяет принципиально новая конструкция кристаллизатора, в котором происходят процессы кристаллизации с образованием оболочки плакирующего слоя с жидкой фазой с одновременным ее продвижением по направлению литья, сближения широких сторон оболочки плакирующего металла с полосой второго металла, обжатия стенками-бойками кристаллизатора биметаллического слитка и калибровки биметалла, т.е. из кристаллизатора установки выходит биметаллическая полоса с заданной толщиной плакирующего слоя и хорошего качества. Кристаллизатор (Рисунок 3.1) состоит неразъемной части 1, где происходит образование оболочки 8 с жидкой фазой 7 и разъемной части, состоящей из двух стенок-бойков 2 и 3, причем рабочая полость разъемной части является продолжением полости неразъемной части. Подвижные стенки-бойки кристаллизатора приводятся в движение от эксцентрикового привода. [10,11].

Таким образом, процессы формирования биметаллического слитка, ковка биметаллической полосы и калибровка осуществляется в разъемной части кристаллизатора. Неразъемная часть кристаллизатора с помощью пружинного механизма, имеет плотный контакт с торцами стенок - бойков разъемной части катализатора, т.е. обе части кристаллизатора перемещаются как единое целое. Скорость биметаллической полосы 9 при выходе из кристаллизатора установки достигает 6-10 м/мин и выше [13, 15].

Для получения биметаллических полос разработана ресурсосберегающая технология производства биметаллических полос на установке совмещенных процессов непрерывного литья и деформации. Предлагаемая технология непрерывного литья биметалла включают подачу в неразъемный кристаллизатор металла плакирующего слоя в жидком состоянии и соединение полосы основного металла в твердом состоянии с кристаллизующимися корочками плакирующего слоя путем обжатия с высокой степенью деформации. Скорость непрерывного литья, равная

скорости прохождения полосы основного металла через кристаллизатор, определяется заданной толщиной плакирующего слоя. Обжатие биметаллической полосы осуществляется в кристаллизаторе, при этом полоса не охлаждается на воздухе, то есть деформация осуществляется в узком температурном интервале, что исключает продольную разнотолщинность плакирующего слоя. Такая технология обеспечивает надежное сцепление слоев, получение биметалла заданной толщины, повышение производительности процесса.

3.2 Расчет параметров совмещенного процесса непрерывного литья и деформации

По методике, изложенной в работе [45], определим параметры процесса получения биметаллической полосы сталь-алюминий. Для расчета примем, что толщина стальной полосы 6 мм, толщина оболочки σ плакирующего слоя слитка, выходящего из неразъемной части кристаллизатора $\sigma=6$ мм. Скорость вытягивания слитка из неразъемной части кристаллизатора $V_1=4$ м/мин. Угол наклона рабочей поверхности бойка $\alpha=10^\circ$, эксцентриситет $e=5$ мм. Длина наклонного участка рабочей поверхности стенок-бойков разъемной части кристаллизатора

$$l_2 = \frac{H_0 - h}{2 \operatorname{tg} \alpha} = \frac{44 - 8}{2 \operatorname{tg} 10} = 100 \text{ мм},$$

где $\alpha=10^\circ$.

Величина подачи биметаллического слитка в разъемной части кристаллизатора

$$S = e / \operatorname{tg} \alpha = 5 / \operatorname{tg} 10 = 28 \text{ мм},$$

где $e=5$ мм.

Частота вращения эксцентриковых валов

$$n = \frac{10^3 \cdot V_1}{S} = \frac{10^3 \cdot 4}{28} = 142,5 \text{ мин}^{-1}.$$

Часовая производительность установки

$$Q_{\text{ч}} = 60h \cdot V_1 \cdot B \cdot \gamma = 60V_1 \cdot B(h_1 \cdot \gamma_1 + h_2 \cdot \gamma_2) = \\ = 60 \cdot 4(2 \cdot 2,27 + 6 \cdot 7,8) \cdot 10^{-3} = 12,7 \text{ т,}$$

где γ_1 - удельный вес алюминия, $\gamma_1 - 2,7 \text{ т/м}^3$;

γ_2 - удельный вес стали, $\gamma_2 - 7,8 \text{ т/м}^3$;

B- ширина полосы, м.

Годовая производительность

$$Q_{\text{г}} = 7000 \cdot Q_{\text{ч}} = 7000 \cdot 12,7 = 88900 \text{ т.}$$

Среднее удельное контактное давление алюминия А5 при температуре 530 °С принимаем по данным теоретического исследования

$$P_c = 22,3 \text{ МПа.}$$

Сила деформации при обжатии биметаллической полосы

$$P = P_c \cdot F_k = 22,3 \cdot 30 \cdot 1000 = 669 \text{ кН.}$$

Расчетная мощность электродвигателя установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации

$$N = \frac{0,21 \cdot P \cdot n \cdot e}{\eta} = \frac{0,21 \cdot 669 \cdot 142,5 \cdot 0,005}{0,7} = 143 \text{ кВт.}$$

3.3 Напряженно-деформированное состояние металла в очаге деформации при получении биметалла сталь-алюминий

При совместной обработке биметаллического слитка, состоящего из различных металлов, представляют практический интерес закономерности развития их пластического течения по длине очага деформации. Это обуславливает сложный характер развития межслойной поверхности, по которой происходит формирование соединения разнородных металлов. Особенности кинематического и силового взаимодействия компонентов по межслойной поверхности определяют условия формирования биметалла и прочность соединения слоев. Очень важно получить заданное соотношение толщин слоев биметалла к моменту начала их пластической деформации,

поскольку это будет определять степень их деформации, а сам момент, в свою очередь, зависит от соотношения толщин компонентов, их реологических характеристик, параметров очага деформации и граничных условий на контакте со стенками-бойками и на межслойных поверхностях. Следует отметить, что наличие окисных пленок на поверхности компонентов биметалла существенно затрудняет или полностью исключает возможность получения прочного соединения слоев. В связи с этим, пластическая деформация биметаллического слитка должна способствовать разрушению окисных пленок на межслойных поверхностях и, тем самым, повышению прочности соединения. В предлагаемом способе получения биметаллической полосы использован процесс циклической деформации, который характеризуется высокими напряжениями на контактных поверхностях биметаллического слитка и бойков, что обеспечивает интенсивную пластическую проработку слоев по всей высоте биметаллической полосы [1].

Таким образом, циклическая деформация биметаллической полосы с высоким уровнем сжимающих напряжений на контакте его со стенками-бойками сборного кристаллизатора обеспечивает интенсивную пластическую деформацию слоев, что способствует разрушению окисных пленок на межслойных поверхностях и, тем самым, надежному сцеплению слоев.

Для оценки новой технологии производства биметаллических полос было определено напряженно-деформированное состояние металла плакирующего слоя в очаге деформации при получении биметалла сталь-алюминий.

Толщина полосы из стали принята равной 4 мм. Температура ее 20 градусов. Толщина слоя алюминия на стальной полосе принималась равной 1,5 мм. Коэффициент трения между стальной полосой и слоем алюминия принят равным 1,0, а между алюминием и стенкой - бойком - 0,1. Толщина оболочки σ плакирующего слоя из алюминия $\sigma = 4$ мм, скорость вытягивания оболочки с жидкой фазой из неразъемного кристаллизатора $v_1 = 8$ м/мин.

Расчетная схема процесса показана на рисунке 10. При расчете со стороны внутренней поверхности очага деформации задавались статические граничные условия в виде ферростатического давления, равным 0,01 МПа.

На внешней поверхности очага деформации из алюминия принимаем температуру, равной 530°C. Для этой температуры модуль упругости равен 1088 МПа, модуль упрочнения – 0,163 МПа и предел текучести 12,3 МПа. Для стенки-бойка модуль упругости принят равным 210 ГПа, а коэффициент Пуассона – 0,3. Коэффициент Пуассона для очага деформации принят равным 0,35.

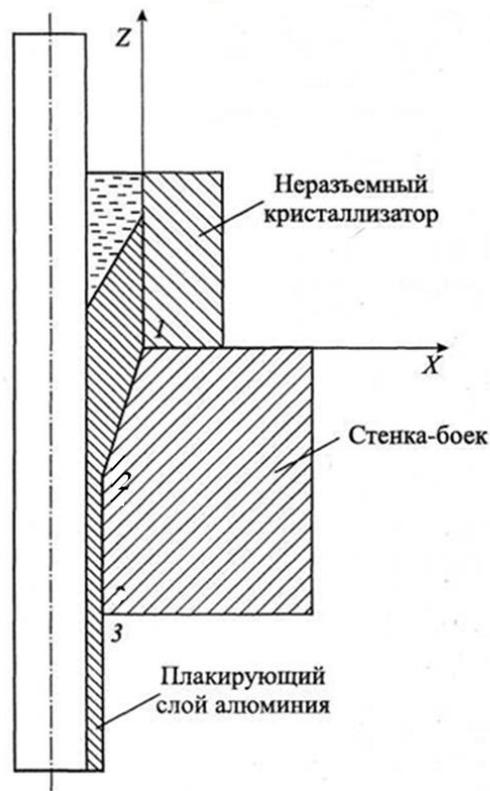


Рисунок 3.2 - Расчётная схема совмещённого процесса непрерывного литья и деформации при получении биметалла сталь-алюминий

Результаты получены решением задачи механики сплошной среды методом конечных элементов. Конкретно: использована объемная постановка контактной задачи упруго-пластичности при наличии больших деформаций и перемещений. Для стенки-бойка задавались перемещения,

равные 5 мм, в направлениях, противоположных положительным направлениям осей X и Z.

В качестве конечного элемента использован двадцатиузловой объемный твердотельный конечный элемент SOLID 95 [1]. Размер элемента находился в диапазоне – от 0,5 до 1мм.

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния металла плакирующего слоя из алюминия в очаге деформации представлены в виде эпюр напряжений. Приняты следующие основные обозначения: σ_x , σ_y , σ_z - напряжения в направлении осей X,Y,Z соответственно.

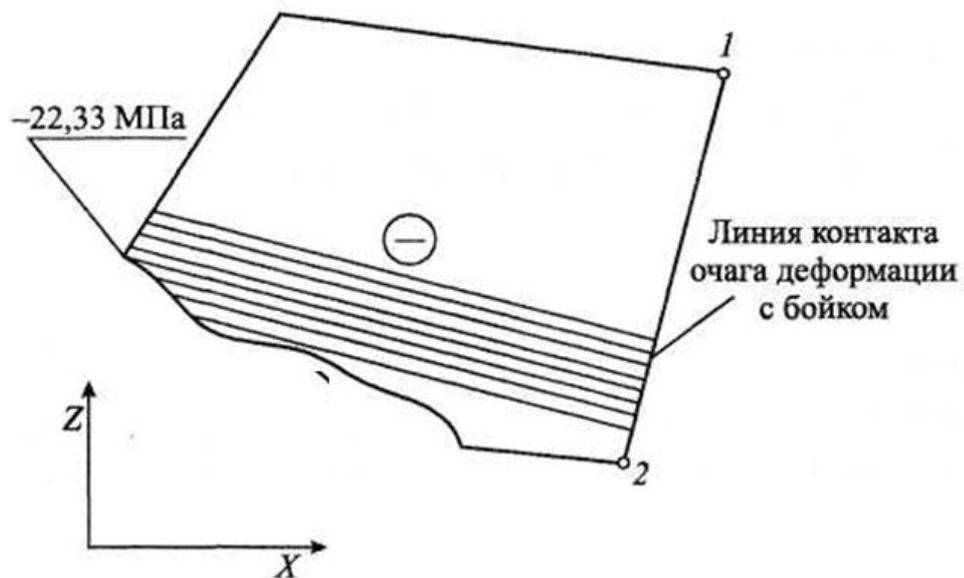


Рисунок 3.3 - Характер напряжения по оси X вдоль линии 1-2 очага деформации

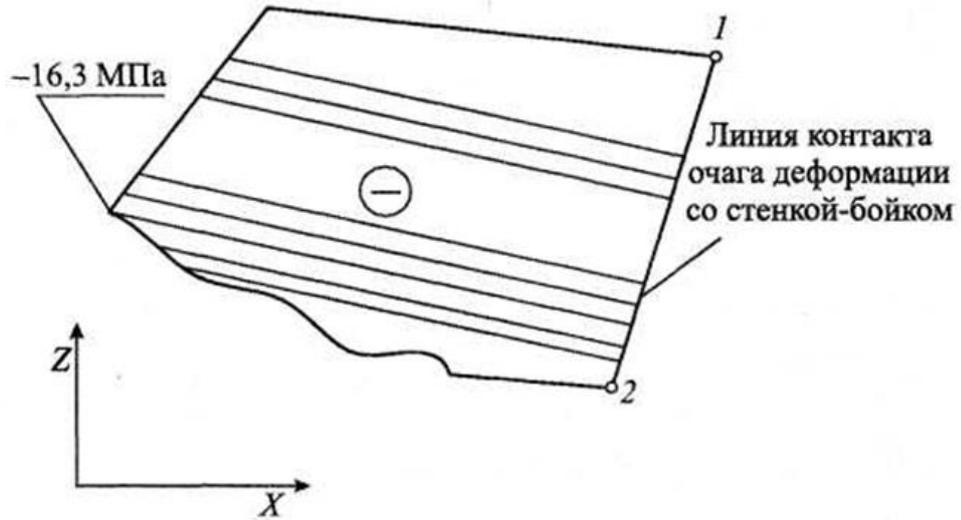


Рисунок 3.4 - Характер напряжения по оси Z вдоль линии 1-2 очага деформации

На рисунках 3.3, 3.4 представлены закономерности распределения нормальных напряжений вдоль осей X и Z и касательных напряжений на рисунке 3.5.

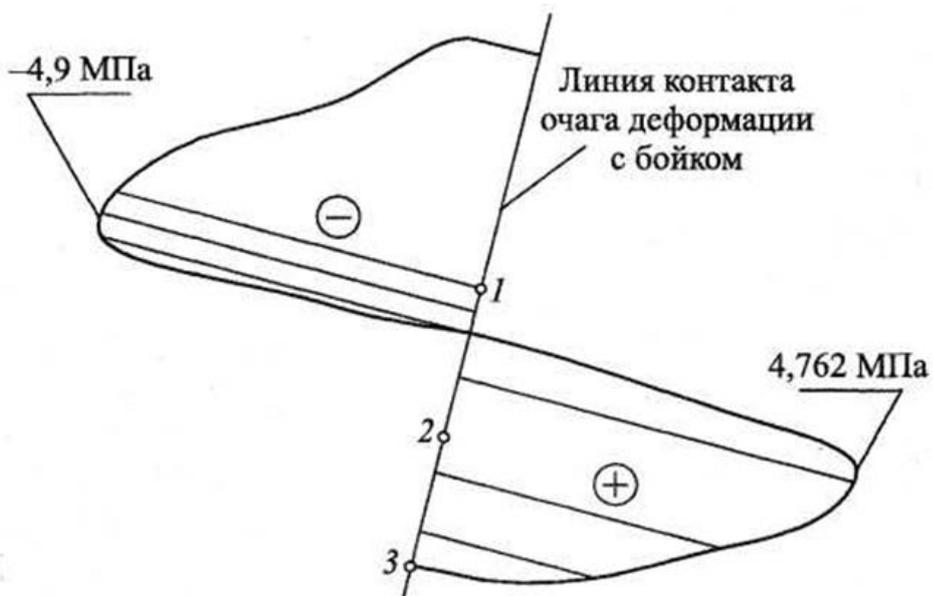


Рисунок 3.5 - Характер касательных напряжений вдоль линии 1-2-3 очага деформации. Положение точек смотри на рисунке 3.2

В таблице 3.1 приведены выборочные результаты по максимальным напряжениям по поверхности контакта плакирующего слоя в зоне очага деформации со стенкой - бойком.

Таблица 3.1 - Выборочные результаты по максимальным напряжениям (МПа) по поверхности контакта очага деформации со стенкой - бойком

σ_x	σ_y	σ_z	σ_{zx}
-22	-12	-16	-5

* знак (-) означает, что напряжения на контактной поверхности биметаллической полосы со стенкой-бойком сжимающие.

Представленные результаты свидетельствуют о благоприятной схеме напряженного состояния в очаге деформации при получении биметалла сталь-алюминий. Как следует из представленных эпюр напряжений, металл плакирующих слоев находится практически в условиях всестороннего сжатия. Таким образом, циклическая деформация биметаллической полосы с высоким уровнем сжимающих напряжений на контакте ее со стенкой - бойком сборного кристаллизатора обеспечивает интенсивную пластическую деформацию плакирующих слоев из алюминия, что способствует надежному сцеплению слоев и получению мелкозернистой структуры плакирующего слоя из алюминия.

Для получения листа высокого качества необходимо обеспечить точное регулирование толщины и плоскостности листа, выходящего из кристаллизатора УНЛД [14]. Конструкция установки совмещенного непрерывного литья и деформации предусматривает установку каждого суппорта привода стенок-бойков на два эксцентриковых вала. Такая схема обеспечивает повышенную жесткость системы и позволяет обеспечить соблюдение строгих допусков листа при любых рабочих условиях, сплавах и ширине листа [11].

Для получения листа с требуемым профилем рабочая поверхность стенки-бойка сборного кристаллизатора должна иметь заданную

выпуклость, которая обеспечивается соответствующей механической обработкой. В качестве финишной операции применяется шлифование рабочей поверхности стенок-бойков, что обеспечивает соответствие профиля бойка деформируемому металлу или сплаву, скорости непрерывного литья и деформации, ширине листа и позволяет получить лист необходимого профиля.

Стенка-боек крепится к суппорту клиновым механизмом, который обеспечивает дополнительную жесткость системе бойков и обеспечивает заданную точность листа. Клиновой механизм позволяет регулировать толщину листа.

Кроме того, известно, что при горячей прокатке алюминия наблюдается налипание алюминия на рабочую поверхность валка, что приводит к ухудшению качества листа [17]. В установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации стенки-бойки разъемного кристаллизатора во время холостого хода в циклической деформации отводятся от деформируемой полосы. Этот момент является наиболее удобным для надежной подачи эмульсии или смазки на рабочие поверхности стенок-бойков. Учитывая вышеизложенное предлагается циклическая схема подачи эмульсии или смазки по линии стыка разъемного и неразъемного блоков сборного кристаллизатора. Для этого в плоскости стыка блоков необходимо предусмотреть каналы подачи эмульсии или смазки. Равномерность нанесения эмульсии или смазки на рабочие поверхности обеспечит кинематика движения стенок-бойков.

Для оценки новой технологии производства биметаллических полос и оценки качества биметалла проведены экспериментальные исследования на модернизированной лабораторной установке при получении биметалла сталь-алюминий. Для пропуска через сборный кристаллизатор стальной полосы предложена система направляющих и тянущих роликов, привод

которых синхронизирован как между собой, так и со скоростью непрерывного литья и деформации.

В ходе эксперимента в водоохлаждаемый неразъемный блок сборного кристаллизатора заливали расплав алюминия, через который пропускали стальную полосу толщиной 4 мм. Кристаллизующиеся оболочки плакирующих слоев смыкали со стальной полосой по всему ее периметру в разъемном блоке сборного кристаллизатора и подвергали их циклической деформации подвижными стенками-бойками с последующей калибровкой полученной биметаллической полосы.

Циклическая обработка стенками-бойками плакирующих слоев биметаллической полосы с достаточно высокой степенью деформации позволяет получить надежное сцепление слоев, а калибровка полосы обеспечивает получение заданной толщины плакирующего слоя и биметаллического листа в целом.

Расстояние между рабочими поверхностями калибрующего участка стенок-бойков разъемного кристаллизатора равнялось 7 мм, поэтому толщина плакирующего слоя составила по 1,5 мм на сторону и при этом получена хорошая поверхность биметаллической полосы.

Серьезным преимуществом предлагаемой технологии получения биметалла в сравнении с существующими способами является то, что она позволяет получить плакирующий слой одинаковой толщины по всему периметру основной полосы. Это особенно важно при получении биметалла типа сталь-медь применяемого для изготовления токопроводящих изделий повышенной прочности и биметалла сталь-алюминий для производства биметаллического листа для судостроительной промышленности.

3.4. Выводы

1. Определено напряженно-деформированное состояние металла плакирующего слоя в очаге деформации при получении биметалла сталь-алюминий на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

2. Установлены закономерности распределения нормальных и касательных напряжений в очагах деформации при получении биметаллической полосы. Установлено, что в очаге циклической деформации биметаллической полосы реализуется благоприятная с позиции качества биметалла схема напряженного состояния с преобладанием сжимающих напряжений.

3. Определены основные параметры вертикальной установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для получения биметаллических полос.

4. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВОК СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЛИСТОВОЙ МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ

В настоящее время в цветной металлургии всё большее распространение получают совмещённые процессы непрерывного литья и деформации для производства листовой металлопродукции, что позволяет существенно снизить энергоёмкость технологического процесса, металлоёмкость оборудования, расходы на эксплуатацию и капитальные и затраты, а так же улучшить качество листа из цветных металлов и сплавов. Предлагаемые технологии непрерывного литья основаны на объединении в одной установке процессов кристаллизации расплава металла, формирования слитка с жидкой фазой и пластической деформации затвердевшего металла [1]. Такой совмещённый процесс непрерывного литья и деформации реализован в установке непрерывного литья и деформации для производства листа из стали, цветных металлов и сплавов [10].

4.1. Оптимизация параметров установки совмещенного процесса литья и деформации при получении листовой металлопродукции

Для разработки данных прогрессивных технологических процессов необходим новый подход к решению задач проектирования установок совмещённых процессов литья и деформации. Это связано с тем, что уже на стадии проектирования установки необходимо обеспечить заданную производительность, минимальную металлоёмкость оборудования и энергоёмкость технологического процесса и получение листовой металлопродукции высокого качества. Отсюда следует, что задача создания установок совмещённого процесса непрерывного литья и деформации весьма сложная, что обусловлено противоречивостью приведённых выше технических показателей. Например, при проектировании установки

совмещенного процесса непрерывного литья и деформации необходимо знать закономерности течения металла и распределения напряжений в очаге деформации, что позволит оценить качество листа и обоснованно выбрать технологические параметры процесса. Таким образом, задача определения оптимальных параметров установок совмещённого процесса непрерывного литья и деформации весьма сложная и трудоёмкая и не может быть успешно решена традиционными методами расчёта.

На стадии проектирования установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации необходимо обоснованно выбрать схему компоновки линии привода и конструктивные параметры, параметры очага циклической деформации и мощность приводного двигателя, обеспечивающих выполнение заданной производительности, снижение энергоёмкости технологического процесса и нагруженности оборудования и получение листов высокого качества. Для решения данной задачи целесообразно использовать алгоритм оптимизации [3], который в совокупности с пакетом прикладных программ обеспечивает комплексный подход к определению оптимальных параметров установки, учитывая при этом противоречивость критериев оптимизации.

Выбор критериев оптимизации

При выборе критериев оптимизации установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации следует учитывать особенности ее работы в составе литейно-прокатного комплекса. В этом случае к технологическому процессу предъявляется ряд технических требований, таких как выполнение заданной производительности, обеспечение проработки литой структуры металла по всему сечению заготовки и расширение сортамента листовых полос. Таким образом, выбор оптимальных параметров процесса непрерывного литья и деформации определяется рядом показателей, таких как производительность, энергоёмкость, нагруженность, качество полос, что усложняет решение задачи оптимизации.

Обоснование выбора метода оптимизации

Для определения оптимальных конструктивных и технологических параметров установки непрерывного литья и деформации использован комбинированный алгоритм, построенный на базе двух методов оптимизации: метода случайного поиска и метода симплекса Нелдера и Мида. Алгоритм построен таким образом, что каждый шаг расчета при последовательном использовании указанных методов оптимизации улучшает предыдущее решение и в конечном итоге позволяет определить действительно оптимальные параметры установки. Метод случайного поиска используется для нахождения начального приближения искомого решения, поскольку он выявляет все локальные точки. Метод симплекса позволяет уточнить решение, полученное на предыдущем этапе. Этот метод работает быстро вблизи экстремума и не чувствителен к небольшим неровностям рельефа функции. Следует отметить, что в процессе оптимизации параметров установки исследовали поведение целевой функции вблизи точки экстремума с целью оценки устойчивости решения.

4.2 Математическая модель совмещенного процесса непрерывного литья и деформации

Расчет параметров технологического процесса [1]

Обозначим размеры неразъемной части кристаллизатора, м: ширину – B_0 , высоту – H_0 , рабочую длину – l_1 .

Толщина оболочки слитка σ_1 , выходящего из неразъемного кристаллизатора, определяется по формуле: [1]

$$\sigma_1 = K \sqrt{T} \quad (4.1)$$

где K – коэффициент затвердевания, м/мин^{1/2}. В случае непрерывного литья алюминия $K = 45$. Для стали $K = 23$.

Время кристаллизации, мин.:

$$T = l_1 / V_1 \quad (4.2)$$

где V_1 – скорость вытягивания слитка в неразъемном кристаллизаторе, может быть принята равной 2-4 м/мин.

Длина наклонного участка разъемного кристаллизатора, мм:

$$l_3 = \frac{H_0 - h}{2 \operatorname{tg} \alpha} \quad (4.3)$$

Величина подачи стенками - бойками слитка S_1 в разъемном кристаллизаторе

$$S_1 = e / \operatorname{tg} \alpha \quad (4.4)$$

где e – величина эксцентриситета эксцентрикового вала, мм; α – угол наклона рабочей поверхности бойка разъемного кристаллизатора, град.

Частота вращения эксцентриковых валов УНЛД, мин^{-1}

$$n = \frac{10^3 \cdot V_1}{S_1} \quad (4.5)$$

Длина деформирующего участка стенки-бойка

$$l_0 = \frac{H_1 - h}{2 \operatorname{tg} \alpha} \quad (4.6)$$

где H_1 – толщина затвердевшей полосы; h – толщина листа.

Длина калибрующего участка стенки-бойка выбирается из соотношения:

$$l_k = (1,5 - 2,0) \cdot S_1 \quad (4.7)$$

Длина разъемного кристаллизатора

$$l_p = l_3 + l_k \quad (4.8)$$

Общая длина сборного кристаллизатора

$$L = l_1 + l_p \quad (4.9)$$

Часовая производительность установки

$$Q_u = 60 H_1 \cdot B_1 \cdot V_1 \cdot \gamma, \quad (4.10)$$

где H_1 – толщина полосы после смыкания оболочек слитка, м; B_1 – ширина полосы после смыкания корочек слитка, м; γ – удельный вес металла, для алюминия $\gamma=2,7$ т/м³.

***Расчет энергосиловых параметров совмещенного процесса
непрерывного литья и деформации***

Сила деформации сплошного слитка стенками - бойками может быть найдена по приближенной формуле

$$P = P_c \cdot F_k \quad (4.11)$$

где P_c – среднее удельное контактное давление;

F_k – площадь очага деформации:

$$F_k = l_d \cdot B_c \quad (4.12)$$

где B_c – средняя ширина очага деформации, мм.

Среднее удельное давление

$$P_c = n_\sigma \cdot \sigma_s, \quad (4.13)$$

где n_σ - коэффициент напряженного состояния

$$n_\sigma = 0,88 + 0,5 l_d / H_c, \quad (4.14)$$

где $H_c = (H_1 + h) / 2$.

Соппротивление металла деформации σ_s определяется в зависимости от марки металла, температуры полосы (T), степени (ε) и скорости (I) деформации по одной из известных методик.

Степень деформации:

$$\varepsilon = \Delta H / H_1 \quad (4.15)$$

Средняя скорость деформации:

$$I = 1,45 \frac{V \cdot \varepsilon}{l_d} \quad (4.16)$$

где V – скорость радиального перемещения бойков :

$$V = \frac{\pi \cdot n \cdot e}{30}. \quad (4.17)$$

Изменение температуры металла в очаге деформации полосы стенками - бойками определяется по формуле В.К. Смирнова и В.А. Шилова [13]:

$$\Delta T = T_0 - \frac{1000}{\sqrt[3]{\frac{0,0255 \cdot \Pi \cdot \tau}{\omega} + \left(\frac{1000}{T_0 + \Delta T_\delta + 273} \right)^3}} + 273 \quad (4.18)$$

где Π – периметр полосы до входа ее в очаг деформации, мм; ω – площадь поперечного сечения полосы до деформации, мм²; τ – время движения полосы до очага деформации, с; ΔT_δ – изменение температуры металла в очаге при деформации полосы, °С:

$$\Delta T_\delta = 0,183 \cdot \sigma_s \cdot \ln \lambda ,$$

где T_0 – температура металла перед входом полосы в очаг деформации, °С.

Для определения общего усилия действующего на боек следует просуммировать усилия, действующие на рассмотренных участках.

Мощность приводного электродвигателя

$$N_{дв} = \frac{0,21 \cdot P \cdot n \cdot e}{\eta}, \text{ кВт} \quad (4.19)$$

где η – коэффициент полезного действия линии привода.

4.3. Результаты решения задачи оптимизация основных параметров установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации

Следующим этапом расчёта после определения напряженно-деформированного состояния металла в очагах деформации совмещенного процесса непрерывного литья и деформации является выбор оптимальных технологических, конструктивных и скоростных параметров установки, позволяющих снизить энергоёмкость технологического процесса (Э), выполнить заданную производительность (П) и получить лист высокого качества.

Учитывая актуальность экономии материально-энергетических ресурсов в качестве целевой функции целесообразно принять энергоёмкость

технологического процесса (Θ), а на другие показатели наложить ограничения. В качестве параметров управления принять величину эксцентриситета эксцентриковых валов (e) и угол наклона рабочей поверхности стенок-бойков сборного кристаллизатора (α), которые определяют величину подачи полосы (S) за цикл обжата и единичное обжатие (Δh).

Таким образом, задача оптимизации параметров установки непрерывного литья и деформации может быть сформулирована следующим образом:

Минимизировать $\Theta(\bar{x})$, $\bar{x} = [e, \alpha]$ (1) при ограничениях:

$$\begin{aligned} P &\geq P_3; \quad M \leq [M]; \quad e^{(1)} \leq e \leq e^{(2)}; \\ \alpha^{(1)} &\leq \alpha \leq \alpha^{(2)}; \quad \varepsilon \leq [\varepsilon]; \quad \omega \leq [\omega]; \quad P \leq [P]. \end{aligned}$$

где ε – степень деформации листа, %; ω – угловая скорость эксцентриковых валов, s^{-1} ; P – усилие деформации, кН; M – крутящий момент на эксцентриковых валах, кН·м.

Для решения задач оптимизации использован комбинированный алгоритм, построенный на базе методов случайного поиска и симплекса и математическая модель совмещённого процесса непрерывного литья и деформации при получении листа [1].

Диапазон изменения варьируемых параметров:

$$2,5 \text{ мм} \leq e \leq 7,5 \text{ мм};$$

$$7,5^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ .$$

Результаты расчёта энергосиловых параметров совмещённого процесса непрерывного литья и деформации в зависимости от величины эксцентриситета эксцентриковых валов и угла наклона рабочей поверхности стенки бойка при получении листа сечением 2×1500 мм из стали 17ХГСА приведены в таблицах 4.1 и 4.2.

В результате расчёта установлено, что наибольшее влияние на расход энергии имеет угол наклона рабочей поверхности стенки-бойка – α . При

изменении α от $7,5^\circ$ до 15° при величине эксцентриситета эксцентриковых валов $e = 5$ мм и производительности УНЛД 26,1 т/ч, расход энергии изменяется от 74,3 кВт·ч/т до 52,9 кВт·ч/т, причём угловая скорость эксцентриковых валов при этом изменяется от 52 мин^{-1} до 107 мин^{-1} . Величина эксцентриситета эксцентриковых валов в диапазоне $2,5 \div 7,5$ при одном угле α не влияет на расход энергии.

Таблица 4.1- Энергосиловые параметры совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении листа сечением 2×1500 мм из стали 17ХГСА. $e = 5$ мм. Производительность 26,1 т/час.

α , град.	7,5	10	12,5	15
S_1 , мм	38,4	28,4	22,6	18,7
n , мин^{-1}	52	71	88	107
l_g , мм	69	51	40,7	33,6
F_k , мм^2	103500	76500	61000	50500
p , МПа	242	220	184	170
P , кН	25000	16800	11200	8600
N , кВт	1940	1780	1480	1380
\mathcal{E} , кВт·ч/т	74,3	68,2	56,7	52,9

На основании проведённого исследования установлено, что для выполнения заданной производительности приняты оптимальные параметры: $\alpha = 10^\circ$ и $e = 5$ мм, угловая скорость эксцентриковых валов $n = 71 \text{ мин}^{-1}$. Таким образом, принятые параметры сборного кристаллизатора, величина эксцентриситета и угловая скорость эксцентриковых валов обеспечивают выполнение заданной производительности установки непрерывного литья и деформации [1, 3].

Таблица 4.2 - Энергосиловые параметры совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении листа сечением 2х1500 мм из стали 17ХГСА. $e = 7,5$ мм. Производительность 26,1т/час

α , град.	7,5	10	12,5	15
S_1 , мм	57	42,7	33,9	31,7
n , мин ⁻¹	34,7	46,8	59	71,2
l_g , мм	69	51	40,7	33,6
F_k , мм ²	103500	76500	61000	50500
p , МПа	242	220	184	170
P , кН	25000	16800	11200	8600
N , кВт	1952	1769	1487	1378
Ξ , кВт·ч/т	74,8	67,8	57,0	52,8

С учетом результатов оптимизации определены основные параметры вертикальной установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для получения листов из легированной стали сечением 2÷4 мм×1500 мм:

- размеры полости неразъемного кристаллизатора 80×1450×300 мм;
- скорость вытягивания слитка из неразъемного кристаллизатора – 2 м/мин.;
- величина эксцентриситета эксцентриковых валов – 5 мм;
- угол наклона рабочей поверхности стенки-бойка – 10 град.
- угловая скорость эксцентриковых валов - 71 мин⁻¹;
- производительность – 26,1 т/час.;
- мощность приводного электродвигателя – 1800 кВт.

По аналогичной методике определены основные параметры установки непрерывного литья и деформации для получения листа сечением 2÷4 × 1500 мм из алюминия:

- величина эксцентриситета эксцентриковых валов – 5 мм;

- угол наклона рабочей поверхности стенки-бойка – 10 град.;
- скорость выхода оболочки с жидкой фазой из неразъёмного кристаллизатора – 2 м/мин;
- скорость выхода листа толщиной 4 мм и 2 мм из кристаллизатора соответственно 9 и 18 м/мин;
- угловая скорость эксцентриковых валов – 71 мин⁻¹;
- расчетная мощность привода электродвигателя постоянного тока – 600 кВт;
- производительность – 9 т/ч;
- габаритные размеры установки: 1800 (высота) × 2000 (ширина) × 2500 (длина) мм.

Полученные результаты использованы при разработке технологического технического задания на проектирование установки непрерывного литья и деформации для получения листа из алюминия для завода «Уралтрансмаш».

Для выполнения эскизного проекта установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации использовано компьютерное проектирование (Рисунок 4.1).

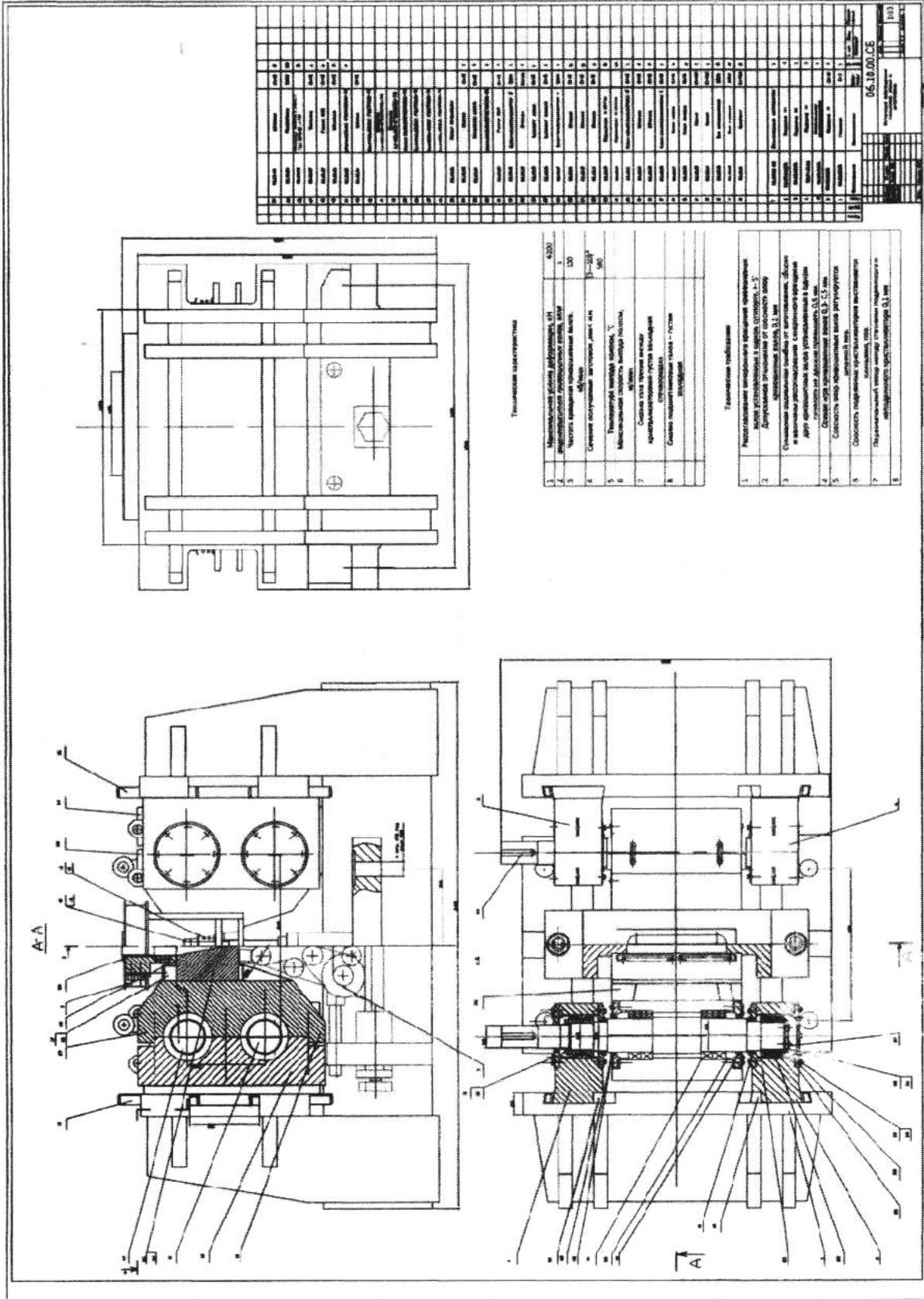


Рисунок 4.1 – Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации

4.4. Установка совмещённого процесса литья и деформации для получения широкого листа из сплавов алюминия повышенной прочности

На современном этапе металлургического производства всё более широкое распространение получают совмещённые процессы непрерывного литья и деформации, которые при производстве листовой продукции позволяют существенно снизить энергоёмкость технологического процесса, металлоёмкость оборудования, капитальные и эксплуатационные затраты.

Агрегаты бесслитковой прокатки, используемые в настоящее время на заводах цветной металлургии, имеют ряд недостатков:

- 1) сравнительно низкая производительность (скорость бесслитковой прокатки $0,6 \div 0,8$ м/мин);
- 2) определённые ограничения по величине обжатия полосы не обеспечивают получение заданной структуры и качества поверхности листа, а также затрудняют получение листа из алюминия для глубокой вытяжки;
- 3) низкий выход годного, поскольку величина боковой обрезки листа достигает 25 мм на сторону;
- 4) низкая стойкость валков-кристаллизаторов ($2 \div 3$ недели).

Разработан принципиально новый технологический процесс и установка совмещённого процесса непрерывного литья и деформации для производства листа из цветных металлов и сплавов [1,10], по технико-экономическим показателям превосходящие зарубежные аналоги. Это позволит создать на заводах цветной металлургии энергосберегающие технологические процессы, осуществить глубокую переработку сырья и повысить качество листа. Отличительными особенностями установки непрерывного литья и деформации является то, что процессы образования оболочки с жидкой фазой, механическое перемешивание расплава металла, формирование полосы, циклическая деформация затвердевшего металла и

калибровка листа осуществляются в сборном кристаллизаторе установки, что позволяет существенно снизить энергозатраты и улучшить качество листа.

Предлагаемая технология непрерывного литья и деформации позволяет получить лист из сплавов алюминия повышенной прочности толщиной $2 \div 12$ мм и выше и шириной до 2800 мм, существенно снизить капитальные и эксплуатационные затраты, улучшить качество листовой металлопродукции.

Для выбора рациональных параметров технологического процесса и установки непрерывного литья и деформации, а также оценки качества листа из сплавов алюминия проведены теоретические и экспериментальные исследования [45].

Целью теоретического исследования напряжённо-деформированного состояния металла в очаге деформации являлась оценка величины и закономерности распределения напряжений с позиции получения листа из сплавов алюминия повышенной прочности. Установлено, что в очаге деформации реализуется схема напряжённого состояния с преобладанием высоких сжимающих напряжений. Таким образом, металл практически находится в условиях всестороннего сжатия, что способствует получению листа из сплавов алюминия высокого качества.

Одним из основных преимуществ компактных установок непрерывного литья и деформации [20] в сравнении с лучшими зарубежными аналогами, кроме высокой производительности, является возможность обрабатывать малопластичные и труднодеформируемые сплавы из алюминия вследствие благоприятной схемы напряжённого состояния металла при деформации полосы стенками - бойками с высокой степенью деформации в узком температурном интервале. Кроме того, имеются хорошие возможности управления совмещённым процессом непрерывного литья и деформации с позиции получения листа высокого качества. Так, для получения заданной

структуры металла, можно просто изменять степень деформации металла в широком диапазоне, достигая 90%.

Высокая точность листа и хорошее качество его поверхности достигается путём изменения шероховатости стенок-боков по длине очага деформации и хороших условий подачи смазки в очаг деформации. Смазка не выдавливается из очага деформации, как при прокатке, так как она периодически подаётся в очаг деформации во время циклического отхода стенок-бойков от деформируемой полосы. Кроме того, наличие калибрующего участка на стенках бойках сборного кристаллизатора обеспечивает получение листа заданной точности независимо от износа рабочих поверхностей стенок-бойков.

Совмещённый процесс литья и деформации исключает продольную и поперечную разнотолщинность листа вследствие узкого температурного интервала деформации и высокой жёсткости конструкции установки непрерывного литья и деформации, поскольку силы деформации воспринимаются четырьмя эксцентриковыми валами.

В отличие от агрегатов бесслитковой прокатки установка непрерывного литья и деформации позволяет снизить величину боковой обрезки листа и исключить трещины по кромкам листа вследствие постоянного контакта кромок алюминиевой полосы с боковыми стенками сборного кристаллизатора.

Для повышения точности листа шириной до 2800 мм из сплавов алюминия повышенной прочности в конструкции установки для увеличения жёсткости предусмотрены опоры эксцентриковых валов по оси непрерывного литья и деформации листовой полосы.

Современная технология получения листа из сплавов алюминия повышенной прочности [27, 28] шириной до 2800 мм включает получение слябов на машине непрерывного литья, обжатие их на обжимном стане для увеличения ширины полосы и её прокатка в широкополосном прокатном

стане. Создание и эксплуатация такого комплекса сопровождается высокими капитальными, эксплуатационными и энергетическими затратами и возникают проблемы при получении листа высокого качества (структура металла, продольная разнотолщинность, качество поверхности) [17].

Таким образом, предлагаемый процесс и компактная установка непрерывного литья и деформации может быть успешно использована для получения широкого листа из сплавов алюминия повышенной прочности, что позволит снизить капитальные и эксплуатационные затраты, энергоёмкость технологического процесса и получить лист специального назначения высокого качества.

Основные параметры вертикальной установки непрерывного литья и деформации для получения листа сечением $8 \div 12 \times 2750$ мм из дюралюминия:

- величина эксцентриситета эксцентриковых валов $e = 5$ мм;
- угол наклона рабочей поверхности стенок-бойков сборного кристаллизатора $\alpha = 10^\circ$;
- размеры неразъёмного кристаллизатора: ширина $B_0 = 2700$ мм, высота $H_0 = 100$ мм, длина рабочей части $L_0 = 200$ мм;
- толщина оболочки слитка с жидким расплавом на выходе из неразъёмного кристаллизатора $\delta = 12,5$ мм;
- скорость вытягивания оболочки слитка с жидким металлом из неразъёмного кристаллизатора $v_1 = 1,5$ м/мин;
- толщина затвердевшего металла перед деформацией стенками-бойками $H_1 = 25$ мм;
- длина стенок-бойков разъёмной части сборного кристаллизатора $l_2 = 305$ мм;
- длина сборного кристаллизатора $L = 500$ мм;
- усилие деформации при получении листа 8×2750 мм из дюралюминия Д16 – 24400 кН;
- угловая скорость эксцентриковых валов $n = 53$ мин⁻¹;

- часовая производительность 16,6 тонн/час;
- мощность приводного двигателя $N = 1940$ кВт.

Разработан принципиально новый совмещённый процесс и установка непрерывного литья и деформации для получения широкого листа из сплавов алюминия повышенной прочности, который позволяет снизить капитальные и эксплуатационные затраты, энергоёмкость технологического процесса и получить лист высокого качества.

4.5. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листов из магниевых сплавов

Увеличение использования в последние годы сплавов на основе магния в качестве конструкционного материала обуславливается его широким применением в разных отраслях промышленности: авиастроении, машиностроении, строительстве, производство бытовой техники [51, 52]. Следует отметить, что механические свойства магния и сплавов на его основе, за исключением модуля упругости, находятся на более высоком уровне в сравнении со сталью и алюминием [52]. Преимущества магния по сравнению со сталью и алюминием заключается в высокой теплопроводности и электромагнитной способности [51]. Кроме того, магниевые сплавы обладают высоким соотношением между прочностью и плотностью, а также экономичной вторичной переработкой и хорошей возможностью повторного применения [52]. К недостаткам магния относится то, что необходимые пластические свойства достигаются только при температурах выше 225°C , а также низкая устойчивость к коррозии [52].

Высокая цена на листовый материал из магния обусловлена рядом причин [51]. Обработка магния является трудоемким процессом и осуществление высоких степеней деформации возможно только в определенном диапазоне температур. Кроме того, на рынке металла имеется

недостаток непрерывнолитых заготовок из магниевых сплавов высокого качества. В связи с этим, главная проблема при производстве магниевого листа связана с некачественным состоянием литой структуры заготовок, в частности с наличием высокой доли пор и пустот и других дефектов [51].

Традиционные способы производства листового материала из магния включает реверсивную прокатку непрерывнолитых заготовок [51]. Число проходов зависит от толщины сляба. Вследствие низкой теплоемкости прокат быстро остывает ниже критической температуры прокатки, что приводит к резкому снижению пластичности материала и образованию трещин на кромке листа.

Решить изложенные выше проблемы листовой металлопродукции из магния возможно при использовании литейно-прокатных комплексов [51]. Данное направление производства магниевых полос состоит из технологии литья тонкой полосы в двухвалковом кристаллизаторе (TRC) и последующей реверсивной горячей прокатки [51, 52]. Данная технология позволяет исключить недостатки традиционной технологии и позволяет достичь производства листовой полосы из магниевых сплавов более экономичным путем для широкого применения, например в автомобильной промышленности [52]. Одним из преимуществ совмещения процессов литья и прокатки состоит в быстром охлаждении и одновременной частичной деформации полосы [52]. Это приводит к получению мелкозернистой структуры металла, предотвращению образования пор, пустот и хрупких выделений. Таким образом, существенно повышается пластичность и качество металла.

Технологический процесс включает выплавку в защитной атмосфере магниевого сплава и транспортировку расплава в литейный желоб. В конце литейного желоба находится форсунка, с помощью которой расплав направляется в зазор между валками, где он быстро кристаллизуется и частично деформируется между охлажденными валками. Из литейно-

прокатной клетки выходит черновая полоса шириной 780 мм и толщиной $3\div 7$ мм. Это позволяет сократить число проходов при горячей реверсивной прокатке для получения конечной толщины полосы (менее 1,5 мм) [51]. Литейно-прокатная полоса после обрезки кромок сматывается в рулон и направляется либо в клетку, либо в печь. В печи черновая полоса подогревается до температуры прокатки. Далее на реверсивном стане кварто полоса прокатывается, за один или пять проходов до требуемой конечной толщины.

Таким образом, технологический процесс производства листов из магния и его сплавов должен обеспечить минимально допустимое отклонение толщины листа, однородную и мелкозернистую структуру металла, низкую анизотропию механических свойств, минимизацию трещин полосы и высокое качество поверхности листов. Для этого необходимы специальные исследования влияния различных условий прокатки, термообработки и применения различных смазочных материалов [31, 51]. Кроме того, имеет место сложность процессов в зеве валков литейно-прокатной клетки. Изменение формы форсунки, температуры расплава, зазора между валками и температуры прокатки оказывают существенное влияние на получение качественной черновой полосы и, как следствие, магниевых листов высокого качества. Кроме того, технология литья металла на установке с двумя валками-кристаллизаторами имеет ряд недостатков, среди которых невысокая скорость литья, низкий выход годного из-за обрезки боковых кромок полосы, литая структура металла вследствие малой степени деформации полосы [1].

Решить изложенные выше проблемы производства качественной листовой продукции из магниевых сплавов возможно с использованием установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации [1, 10].

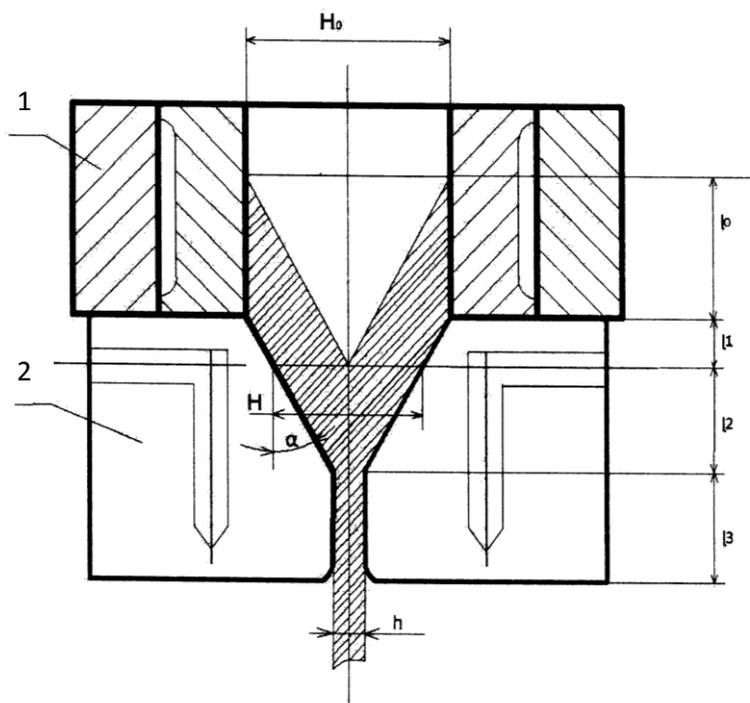


Рисунок 4.2 – Схема совмещенного процесса непрерывного литья и деформации: 1 – неразъемный кристаллизатор; 2 - стенки-бойки

Рассмотрим технологические возможности установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации с позиции получения листов заданной ширины и толщины 2÷4 мм и выше из магниевых сплавов высокого качества. Отличительными особенностями данного процесса является то, что все четыре его стадии (Рисунок 4.2) осуществляются в сборном кристаллизаторе, что позволяет существенно увеличить скорость литья, улучшить качество листа и снизить энергозатраты.

В случае сплавов магния важным фактором влияющим на улучшение его пластичности является получение мелкозернистой структуры в процессе деформации, что способствует повышению механических свойств листовой продукции [51].

Определяющими с точки зрения получения листа из магниевых сплавов с мелкозернистой и однородной структурой без дефектов являются вторая и третья стадии (участки l_1 и l_2), где осуществляется формирование полосы из слитка с жидкой фазой и циклическая деформация затвердевшего

металла. Для оценки качества листа из сплава магния проведено теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния металла в очагах деформации этих стадий. Для определения напряжений и течения металла в очагах деформации при формировании полосы в зоне гибки боковых стенок оболочки слитка с жидкой фазой и при деформировании затвердевшего металла применяли метод конечных элементов [1, 45]. Для этих двух стадий процесса проката соответственно плоская и объемная постановка задачи упругопластичности. Для расчета использован пакет ANSYS [1, 45]. Исходные данные для расчета приняты следующие. Размеры полости неразъемного кристаллизатора: ширина – 1450 мм, высота – 100 мм, рабочая длина – 200 мм. Толщина оболочки слитка из магния с жидкой фазой на выходе из неразъемного кристаллизатора равна 8 мм, а скорость выхода – 2 м/мин. Подача полосы за один цикл обжата – 28 мм. Единичное обжатие – 5 мм. Суммарная степень деформации полосы при получении листа толщиной 4 мм составляет 77%. Установлено, что нормальные напряжения в очагах деформации являются сжимающими, в частности при деформации затвердевшего металла их максимальные значения составляют, МПа: $\sigma_x = -40$; $\sigma_y = -24$; $\sigma_z = -32$.

Таким образом, практически формирование из слитка с жидкой фазой полосы путем гибки боковых стенок оболочки осуществляется в условиях всестороннего сжатия, что предохраняет оболочку слитка от разрушения и предотвращает образование трещин на боковых поверхностях полосы. Кроме того при периодическом сближении стенок-бойков часть жидкого металла выдавливается из конуса жидкой фазы, что способствует перемешиванию расплава и ускорению процесса затвердевания металла. При этом происходит удаление из конуса жидкого металла неметаллических включений.

На третьей стадии процесса происходит циклическая деформация стенками-бойками затвердевшего металла с высокой степенью деформации (до 90%) и в узком температурном интервале, чем достигается интенсивная

проработка литой структуры металла с получением однородной и мелкозернистой структуры листа из магниевых сплавов. Обжатие стенками-бойками полосы с высокой вытяжкой позволяет на выходе из сборного кристаллизатора достичь скорости листа $15\div 20$ м/мин.

Высокое качество листов из магниевых сплавов обеспечивается:

- исключением продольной разнотолщинности листа, вследствие узкого температурного интервала деформации;

- исключением поперечной разнотолщинности, которая достигается специальной профилировкой стенок-бойков и высокой жесткостью эксцентриковых валов, а получение заданной ширины листа обеспечивается боковыми подвижными стенками разъемного кристаллизатора;

- калибровкой сечения листа на четвертой стадии, причем точность листа по толщине не зависит от износа рабочих поверхностей стенок-бойков, поскольку они имеют калибрующие участки, которые обеспечат заданную толщину листа.

Управление совмещенным процессом непрерывного литья и деформации с позиции обеспечения заданной производительности и получения листа высокого качества осуществляется путем регулирования угловой скорости двигателя, что позволяет изменять положение конуса жидкой фазы, толщину оболочки слитка, скорость вытягивания слитка, перемешивания жидкого металла, а также степень обжатия и скорость выхода полосы из сборного кристаллизатора.

Таким образом, установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации может быть эффективно использована для производства листовой продукции из сплавов магния, что позволит существенно снизить капитальные и эксплуатационные затраты, энергоемкость технологического процесса и получить лист высокого качества.

Основные параметры вертикальной установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для получения листа сечением $2 \div 4$ мм \times 1500 мм из сплавов магния:

- размеры неразъемного кристаллизатора: ширина 1450 мм, высота 100 мм, длина рабочей части 200 мм;
- скорость вытягивания оболочки слитка с расплавом из неразъемного кристаллизатора – 2 м/мин;
- угловая скорость эксцентриковых валов – 70 мин^{-1} ;
- мощность приводного двигателя – 1800 кВт;
- производительность – 6 т/час.

4.6. Оценка качества листовой металлопродукции

4.6.1. Оценка влияния параметров неразъемного кристаллизатора на уровень растягивающих напряжений в боковых стенках оболочки с жидкой фазой

Для оценки влияния радиуса сопряжения стенок неразъемного кристаллизатора на уровень растягивающих деформаций и напряжений рассмотрен процесс получения листа из стали на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Общий вид установки и процесса описан в разделе 1.3 и показан на рисунках 1.1 и 2.2.

Целью настоящего исследования являлось:

- определение напряженно-деформированного состояния металла при формировании полосы в зоне гибки узких боковых стенок оболочки с жидкой фазой;
- оценка влияния радиуса сопряжения стенок неразъемного кристаллизатора на уровень растягивающих деформаций и напряжений на внешней поверхности узких стенок оболочки с жидкой фазой.

Исследование выполнено для полосы из стали марки 17ХГСА. Для расчета использован пакет ANSYS. Толщину оболочки на выходе из неразъемного кристаллизатора принимаем равной 8 мм, а в области смыкания широких стенок оболочки – 10 мм. Температуру внешней поверхности оболочки на участке с жидкой фазой для стали принимаем равной 1200С, а внутренней поверхности оболочки - 1450°С.

Рассматривалась деформация от действия на внутреннюю поверхность оболочки ферростатического давления, а на внешнюю поверхность - по зоне контакта стенок-бойков с широкой стенкой - задаваемого перемещения стенок-бойков. Для решения использована плоская постановка контактной задачи упруго-пластичности при наличии больших деформаций и перемещений [1, 45].

Постановка задачи и результаты исследования приведены в разделе 2.2.

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния металла в области узкой стенки оболочки с жидкой фазой представлены в виде эпюр перемещений, деформаций и напряжений. Приняты следующие основные обозначения:

u_y – перемещение вдоль оси Y;

ϵ_x – деформации в направлении оси X;

σ_x – напряжения в направлении оси X.

На рисунках 2.12-2.17 представлены эпюры напряжений и деформаций в направлении оси X (σ_x) при формировании полосы стенками-бойками из оболочки с жидкой фазой. В таблице 2.1 даны выборочные результаты.

Необходимо отметить, что при гибке узкой стенки оболочки возникает напряженно-деформированное состояние, имеющее сложный характер, а именно:

- вблизи середины внешней поверхности узкой стенки возникают растягивающие напряжения и деформации, переходящие в сжимающие в зоне перехода узкой стенки в широкую (Рисунки 2.12-2.14);

- от сечения А к сечению С величины растягивающих деформаций возрастают в 2,1 раза (Рисунки 2.15-2.17);
- для оболочки из стали уровень растягивающих деформаций значителен и достигает величины 0,45.

Таким образом, установлено, что при получении листа из стали на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации на внешней поверхности узких стенок оболочки с жидкой фазой, вблизи ее середины, возникают растягивающие деформации, возрастающие по мере гибки от сечения «А» к сечению «С» и достигающие значения 0,445. При этом растягивающие напряжения составляют $75,7 \div 79,0$ МПа, т.е. практически не изменяются.

Однако имеются пути снижения растягивающих напряжений [1, 35, 45] на боковые поверхности оболочки, тем самым улучшения качества листа и снижения боковой обрезки. Это связано с тем, что калибровка боковых стенок разъемной части сборного кристаллизатора выполняется таким образом, что в процессе перемещения оболочки с жидкой фазой и гибке ее боковых стенок имеется их контакт с боковыми стенками кристаллизатора. Таким образом, со стороны боковых стенок кристаллизатора на боковые стенки оболочки с жидкой фазой действуют сжимающие напряжения, величина которых зависит от калибровки боковых стенок кристаллизатора, которые одновременно со стенками - бойками продвигают оболочку по направлению литья и могут несколько обжимать боковые стенки оболочки, особенно в месте наибольших растягивающих напряжений. Такая технология непрерывного литья с подпором может привести к существенному снижению растягивающих напряжений на внешних поверхностях узких стенок оболочки. На рисунке 2.12 показано распределение напряжений σ_x по толщине оболочки, из которого следует, что растягивающие напряжения в поверхностном слое оболочки переходят в сжимающие во внутренних слоях оболочки. Такая закономерность распределения напряжений по толщине оболочки не будет способствовать разрыву оболочки с жидкой фазой.

Приведенные выше значения растягивающих напряжений и деформаций на боковых стенках оболочки с жидкой фазой получены при радиусе сопряжения стенок неразъемного кристаллизатора $R=10$ мм. Также проведены расчеты для оценки влияния радиуса сопряжения стенок неразъемного кристаллизатора на уровень растягивающих напряжений и деформаций. Установлено, что увеличение радиуса сопряжения стенок кристаллизатора приводит к существенному снижению растягивающих деформаций, а растягивающие напряжения на внешней поверхности узкой стенки оболочки при этом практически не изменяются. Например, в сечении «В» происходит снижение растягивающих деформаций ε_x с 0,32 при $R = 10$ мм до 0,21 при $R = 50$ мм, а растягивающие напряжения при этом практически не изменились: при $R = 10$ мм, $\sigma_x = 75,7$ МПа, а при $R = 50$ мм, $\sigma_x = 75,4$ МПа. Еще большее снижение растягивающих деформаций происходит в сечении «С». Так при $R = 10$ мм, $\varepsilon_x = 0,45$, тогда как при $R = 50$ мм, $\varepsilon_x = 0,19$. Глубина проникновения растягивающих деформаций в сечении «С» составляет чуть более 1,5 мм при толщине оболочки 8 мм, т.е. наблюдается лишь незначительная зона растяжения, которая не будет способствовать разрушению деформируемой оболочки с жидкой фазой. Таким образом, при проектировании сечения полости неразъемного кристаллизатора для получения листа из стали на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации целесообразно принимать радиус сопряжения его стенок равным 45 - 50 мм.

4.6.2. Исследование структуры металла при получении листовой металлопродукции

Циклическая деформация стенками бойка затвердевшего металла с высокой степенью обжатия (до 90%) позволяет в условиях повышенных температур существенно изменить литую структуру стали и на выходе получить лист с однородной мелкозернистой структурой. Так, на рисунке 4.3

показана динамика структурообразования по длине очага циклической деформации при получении листа из стали 45 [1].

Видно, что с увеличением степени обжатия при формировании листа в бойках в зависимости от температурно-деформационных параметров реализуются процессы рекристаллизационной контролируемой прокатки, что способствует измельчению зёрненной микроструктуры стали [22]. Для обоснования выбора режима циклической деформации с точки зрения формирования требуемой структуры необходимо учитывать два аспекта: во - первых, кинетику превращения горячедеформированного аустенита и, во - вторых, кинетику его рекристаллизации. По имеющимся данным [53], критическая точка A_{r3} начала выделения феррита при небольших скоростях охлаждения для углеродистых сталей находится в области температур $800 \div 820$ °С, причем температура рекристаллизации аустенита для таких сталей также находится вблизи 800 °С.

В результате совмещения процесса непрерывного литья и циклической деформации удастся измельчать зерна аустенита путем многократной рекристаллизации в том случае, когда температура деформации выше температуры начала рекристаллизации аустенита. При этом мелкозернистая структура аустенита сохраняется до начала (γ - α)-превращения и способствует образованию мелкозернистой структуры феррита, которая при ускорении скорости охлаждения вне стенок бойков формирует исходную структуру листа [25, 26].

Расчеты [40, 53] показали, что средний условный диаметр зерна в начале очага деформации (Рисунок 4.3) с размера $d_{\Sigma}^H \sim 0,111$ мм² уменьшился до значения $d_{\Sigma}^H \sim 0,0099$ мм² на выходе из бойков, т.е. практически в 11,5 раз.

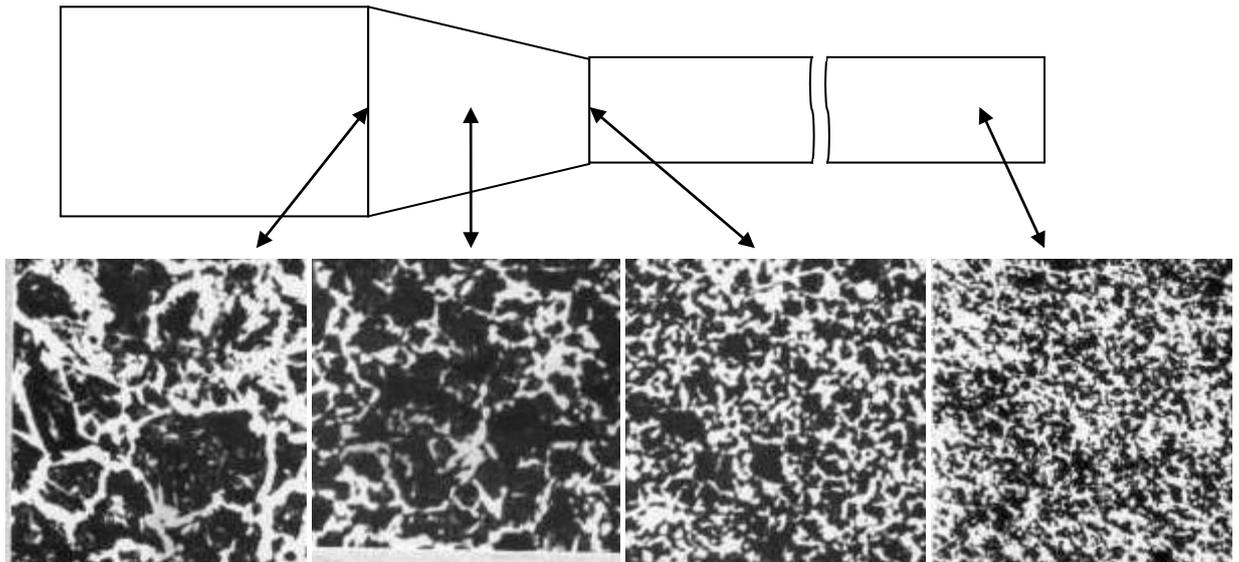


Рисунок 4.3 - Микроструктура стали 45 по длине очага циклической деформации ($\times 100$)

Следует отметить, что образованная зёрненная структура остается неизменной вплоть до полного охлаждения металла [32].

Таким образом, особенности структурообразования стали по технологии совмещенного процесса непрерывного литья и циклической деформации в случае оптимально выбранных температурно-деформационных параметров способствует получению заготовок и изделий высокого качества в сочетании с мелкозернистой структурой обеспечивающей удачное сочетание таких свойств, как прочность, вязкость и хладостойкость [33].

4.7. Выводы

1. Поставлена и решена задача оптимизации основных параметров установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листовой металлопродукции. В результате определены оптимальные по энергоемкости технологические, конструктивные и скоростные параметры установки.

2. Определены основные параметры вертикальных установок совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для получения широкого листа из сплавов алюминия повышенной прочности и магния.

3. Предложены пути повышения качества листа при получении его на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Установлено, что при увеличении радиуса сопряжения стенок неразъемного кристаллизатора происходит существенное снижение растягивающих деформаций на внешних поверхностях узких стенок оболочки слитка с жидкой фазой при их гибке, что будет способствовать повышению качества листа.

4. Проведено исследование структуры металла в процессе деформации полосы из стали. Установлено, что совмещенный процесс непрерывного литья и циклической деформации позволяет получить лист с однородной и мелкозернистой структурой металла.

5. Полученные результаты использованы при разработке технологического и технического заданий на эскизное проектирование установки непрерывного литья и деформации для получения листа из алюминия для завода «Уралтрансмаш».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы разработаны научные основы создания установок совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листовой металлопродукции

Для достижения этих целей решены следующие научные и практические задачи:

1. Разработана математическая модель и алгоритм определения напряженно-деформированного состояния металла в очагах деформации при получении стальной полосы на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Модель позволила оценить течение металла при формировании полосы из оболочки с жидкой фазой и деформации затвердевшего металла и установить закономерности распределения нормальных и касательных напряжений в очагах циклической деформации. Установлено, что в очагах деформации стальной полосы реализуется благоприятная с позиции качества листа схема напряженного состояния с преобладанием высоких сжимающих напряжений.

2. Оценка течения затвердевшего металла на границе с жидкой фазой показала, что при деформации затвердевший металл не выдавливается в конус жидкой фазы оболочки слитка, а перемещается в направлении непрерывного литья листовой полосы.

3. Поставлена и решена задача определения напряженно-деформированного состояния металла плакирующих слоев при получении биметалла сталь-алюминий. В результате установлены закономерности распределения нормальных и касательных напряжений в очаге деформации плакирующего слоя. Установлено, что циклическая деформация биметаллической полосы с высоким уровнем сжимающих напряжений на контакте ее со стенками-бойками сборного кристаллизатора обеспечивает

интенсивную деформацию плакирующих слоев из алюминия, что способствует надежному сцеплению слоев биметаллической полосы.

4. В результате решения задачи оптимизации основных параметров установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации определены оптимальные по энергоемкости технологические, конструктивные и скоростные параметры установки. С учетом полученных результатов определены параметры установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации вертикального типа для получения листа из дюралюминия толщиной 8-12 мм и шириной 2750 мм.

5. Проведена оценка влияния радиуса сопряжения стенок неразъемного кристаллизатора на качество листовых полос из стали. Установлено, что для снижения уровня растягивающих деформаций на узких гранях оболочки слитка с жидкой фазой радиус сопряжения стенок неразъемного кристаллизатора целесообразно принимать 45-50 мм.

6. Проведено металлографическое исследование изменения структуры металла по длине очага циклической деформации при получении стальных полос на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

Исследование структурообразования при получении листа из стали 45 показало, что циклическая деформация затвердевшего металла с высокой степенью обжата позволяет существенно изменить литую структуру стали и на выходе из установки получить лист с однородной и мелкозернистой структурой металла.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Разработанные в диссертации основные научные положения и методики расчета рекомендуется в перспективе использовать для проектирования установок совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства широкого сортамента листовой металлопродукции из черных и цветных металлов, сплавов и биметаллических полос.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лехов О.С. Совмещенные процессы непрерывного литья и деформации для производства проката / Лехов О.С., Комратов Ю.С. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. – 411с.

2. Комратов Ю. С. Совершенствование производства проката в условиях НТМК / Ю. С. Комратов, О. С. Лехов. - Екатеринбург: Изд-во «Банк культурной информации», 2002. - 384 с.

3. Лехов О.С. Оптимизация машин для деформации непрерывнолитых заготовок / О.С. Лехов. - Екатеринбург: УИФ "Наука", 1995. - 184 с.

4. Эренберг Х.-Ю. Литье и обжатие с разливки тонких слябов на заводе фирмы «Маннесман ререн-верке АГ» / Х.-Ю. Эренберг //Металлург. пр-во и технология металлург. процессов.- пер.с нем. - М., 1990. С. 46—56.

5. Матвеев Б.Н. Непрерывное литье тонких заготовок повышает эффективность производства проката / Б.Н. Матвеев // Пластическая деформация сталей и сплавов: сб. науч. тр. - М.: МИСИС - 1996. - С. 302-308.

6. Лехов О.С. Установка совмещенных процессов непрерывного литья и деформации для производства тонких слябов и листа / О.С. Лехов, В.И. Одинокоев // Черная металлургия России и СНГ в XXI веке: Сб. тр. межд. конф. Т.3. - М.: Металлургия. - 1994. - С. 189-191.

7. Борисов В.Т. Основные направления непрерывной разливки заготовок, близкие по размерам к готовой продукции / В.Т. Борисов, Д.П. Евтеев, В.И. Лебедев // Черная металлургия России и СНГ в XXI веке: Сб. тр. межд. конф. - М.: Металлургия, - 1994. - С. 182-184.

8. Шевакин Ю.Ф. Технология и оборудование для непрерывных и совмещенных процессов производства проката из меди, медных сплавов, алюминия и титана / Ю.Ф. Шевакин, И.И. Добкин, А.В. Бушев // Пластическая деформация сталей и сплавов: Сб. научных трудов. - М.: МИСИС. - 1996. - С. 378-386.

9. Еберле А. Непрерывная разливка и прокатка тонких слябов /А. Еберле, Г. Волл-нер, Д. Габел и др.//Сталь и железо. - 1990. - №1. - С. 81—88.
10. Лехов О.С. Способ непрерывного литья слябовых заготовок и устройство для его осуществления / О.С. Лехов. //Патент 2077407, Россия.
11. Лехов О.С. Способ получения биметаллической полосы / О.С. Лехов.// Патент 2064364, Россия.
12. Лехов О.С. Исследование процесса непрерывного литья и деформации для производства листа из цветных металлов / О.С. Лехов, М.В. Баранов, И.В. Киршин, С.Ф. Каменских // Известия вузов. Цветная металлургия. - 1998. - №4. - С.44-47.
13. Лехов О.С. Расчет температурного поля совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении листа из алюминия / О.С.Лехов, М.В. Баранов // Теория машин металлургического и горного оборудования: Межвузовский сборник научных трудов. Екатеринбург: УГТУ-УПИ. - 1986. - С.102-108.
14. Лехов О.С. Оптимизация параметров литейно-прокатных модулей / О.С. Лехов, М.В. Баранов // Теория и технология процессов пластической деформации: Сборник трудов научно-технической конференции. - М.: ГТУ-МИСИС. - 1997. - С.170-173.
15. Лехов О.С. Напряженно-деформированное состояние металла при получении листа из алюминия на установке непрерывного литья и деформации / О.С. Лехов, М.В. Баранов, В.С. Минаков // Известия вузов. Цветная металлургия. - 2004. - №1.- С.44-47.
16. Лехов О.С. Исследование напряженно-деформированного металла в очаге циклической деформации при получении листа из стали на установке непрерывного литья и деформации / О.С. Лехов, М.В. Баранов, В.С. Минаков // Известия вузов. Черная металлургия. - 2004. - № 2. - С. 25-27.
17. Баранов М.В. Особенности структурообразования алюминия в условиях интенсивной высокотемпературной пластической деформации/

М.В. Баранов, Б.Н. Гузанов, О.С. Лехов, В.С. Минаков // Известия вузов. Цветная металлургия. - 2007. - №1. - С. 65-70.

18. Лехов О.С. Расчет температуры кристаллизатора при непрерывном процессе литья-деформации биметаллической полосы / О.С. Лехов, И.В. Лисин, М.Ю. Туев // Производство проката. - 2014. - №12. - С. 209-214.

19. Лехов О.С. Исследование совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства биметаллических полос / О.С. Лехов, В.В. Турлаев, И.В. Лисин, М.Ю. Туев // Вестник Магнитогорского технического университета. - 2014. - № 4. - С. 69-73.

20. Лехов О,С. Установка непрерывного литья и деформации для получения широкого листа из сплавов алюминия повышенной прочности/ О.С, Лехов, В.В. Турлаев, М.Ю.Туев, И.В, Лисин// Производство проката. - 2015. - № - 5. - С. 11-13.

21. Лехов О.С. Ресурсосберегающая технология производства биметаллических полос./ О.С. Лехов, И.В. Ухлов, И.В. Лисин, Д.Х. Билалов // Ковочно-штамповочное производство. - 2015. - № 4. - С.16-19.

22. Шкатов В.В. Преобразование зеренной структуры аустенита в цикле деформация - первичная рекристаллизация / В.В. Шкатов., И.В. Богомолов / Физика металлов и металловедение. - 1996. - Т.81. - Вып. 2. - С.149 - 158.

23. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред / Дж. Оден. - М.: Мир, 1976. - 486 с.

24. Исследование термонапряженного состояния роликов МНЛЗ. Отчет о НИР/ под ред. С.Е. Карлинского. – Свердловск: изд-во НИИТЯЖМАШ, 1984. - 92 с.

25. Хлестов В.М. Влияние параметров контролируемой прокатки на аустенитную и конечную структуру стали 09Г2ФБ / В.М. Хлестов, З.В. Фролова / Известия Вузов. Черная металлургия. - 1989. - № 4. - С.68 - 71.

26. Дорожко Г.К. Влияние деформации на кинетику превращения аустенита, структуру и свойства стали 10ХСНД / Г.К. Дорожко, В.М. Хлестов, К.Н. Соколов / *Металловедение и термическая обработка металлов.* - 1977. - № 12. - С. 24 - 28.

27. Третьяков А.В. Механические свойства металлов при обработке давлением: справочник / А.В.Третьяков, В.И. Зюзин. - М.: *Металлургия*, 1973. - 224 с.

28. Фридляндер И.Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы. – М.: *Металлургия*, 1979. – 208 с.

29. Бернштейн М.Л. Структура деформируемых металлов / М.Л. Бернштейн. – М.: *Металлургия*, 1977. – 431 с.

30. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов / Р. Хоникомб. – М.: *Мир*, 1972. – 408 с.

31. Колачев Б.А. *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов* / Б.А. Колачев, В.И.Елагин, В.А.Ливанов. - М.: "МИСИС", 2001. – 416 с.

32. Шкатов В.В. Закономерности формирования феррито-перлитной структуры при распаде переохлажденного аустенита / В.В. Шкатов, Л.И. Франценюк, И.В. Богомолов / *Известия Вузов. Черная металлургия.* - 1997. - № 3. - С. 47 - 50.

33. Иванько А.А. *Твердость: справочник* / Под ред. Г.В. Самсонова. – Киев: *Наукова Думка*, 1968. – 126 с.

34. (Fata Huner) A revolutionary approach high speed thin casting / E. Biancotti // *Теория и технология процессов пластической деформации: Материалы симпозиума.* - М.: ГТУ-МИСИС - 1995. - С.184-189.

35. Стулов В.В. Влияние параметров разлива металла на получение непрерывно-литой ковальной заготовки / В.В. Стулов, В.И. Одинокоев // *Известия вузов. Черная металлургия.* - 1997. - №1. - С. 24-26.

36. Стулов В.В. Исследование получения непрерывно-литых кованных армированных заготовок / В.В.Стулов, В.И.Одинокоев // Известия вузов. Черная металлургия. - 1997. - №2. - с.20-22.

37. Поляков А.П. Комплекс программ решения на ЭВМ термоупругопластических задач / А.П.Поляков, А.Ф.Трусов, И.Ф.Волегов, И.В.Поваляева // Автоматизация инженерного труда : Сб. научн. трудов. НИИТЯЖМАШ. – Свердловск. - 1989. - С.105-109.

38. ANSYS, Structural Analysis Guide, Release 6.0. Электронный ресурс. <http://www.cadfern.ru>. Дата обращения 10.03. 2014.

39. Нисковских В.М. Машины непрерывного литья слябовых заготовок / В.М. Нисковских, С.Е. Карлинский, А.Д. Беренов. - М.:Металлургия, 1991.- 272 с.

40. ГОСТ 5639–82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. - Введ. 01.01.83 - М. : Изд-во стандартов, 1983. - 21 с.

41. Носков Е.П. Современные технологические процессы с использованием порошковых и слоистых материалов / Е.П. Носков, Г.С. Гун, В.Л. Стебляноко. - Магнитогорск, 1993. - 260с.

42. Кузнецов Е.В. Биметаллы: современные технологии и применение // Е.В.Кузнецов, А.Г.Кобелев // Пластическая деформация сталей и сплавов: Сб.научных трудов. – М.:МИСИС. - 1996. - С.296-302.

43. Кузнецов Е.В. Основные направления развития технологии производства биметаллов / Е.В.Кузнецов // Теория и технология процессов пластической деформации: труды научно-технической конференции. - М.: МИСИС. - 1997. – С. 111-119.

44. Король В.К. Основы технологии производства многослойных металлов / В.К.Король, М.С. Гильденгорн. - М.: Металлургия, 1970. - 237с.

45. Лехов О.С. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Теория и расчет / О.С. Лехов, В.В. Турлаев, И.В. Лисин.

Екатеринбург: Изд. УРФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2014. - 112 с.

46. Бажин В.Ю. Бесслитковая прокатка алюминиевых полос / В.Ю. Бажин // Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов: труды международной научно-технической конференции. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. - 2007. - С. 337-338.

47. Бровман М.Я. Протяженность зоны пластической деформации и допустимая скорость при бесслитковой прокатке / М.Я.Бровман, В.А. Николаев, В.П. Полухин // Металлы. - №1. - 2007. - С. 44-49.

48. Бровман М.Я. О повышении качества поверхности полосы при прокатке в валковых совмещенных агрегатах / М.Я. Бровман, В.А. Николаев / Производство проката. - № 5. - 2006. – С. 9-14.

49. Зарапин Ю.Л. Агрегаты и непрерывные линии для производства прецизионных многослойных материалов из тугоплавких и цветных металлов и сплавов / Ю.Л. Зарапин, Н.А. Чиченев // Теория и технология процессов пластической деформации: труды научно-технической конференции. - М.: МИСИС. - 1996. - С. 64-68.

50. Смирнов С.В. Исследование процесса «сварка взрывом + пакетная прокатка» для производства композитных материалов / С.В. Смирнов, С.В. Гладковский, И.А. Голубкова, Е.А. Коковихин, Д.И. Вичужанин // Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Сборник материалов VI международной научно-технической конференции. Минск : ФТН НАН Беларуси. - 2009. - С. 17-22.

51. Кавалла Р. Литье и прокатка магниевых сплавов / Р. Кавалла, М. Ульман, Шмидт, К. Нэк // Материалы международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении». - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. - 2014. - С.549 – 558.

52. Нам А. Концепция реверсивной горячей прокатки и термомеханической обработки магниевых сплавов / А. Нам, Р. Кавалла, А. Зиновьев // Материалы международной молодежной научно-практической

конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении». - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. - 2014. - С.593 – 597.

53. Лехов О.С. Исследование совмещенного процесса непрерывной разливки и циклической деформации для получения листов из стали / О.С. Лехов, Б.Н. Гузанов, И.В. Лисин, Д.Х. Билалов // Сталь. – 2016. -№1. - С 52-62.

54. Лехов О.С. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства биметаллических полос / О.С. Лехов, И.В. Лисин / Известия Вузов. Черная металлургия. - 2015. - № 6. - С. 30 - 35.