

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный профессионально-педагогический университет»

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Лехов Олег Степанович

Официальные оппоненты: **Готлиб Борис Михайлович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщений», заведующий кафедрой «Мехатроника»;

Карамышев Андрей Павлович, кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», доцент кафедры «Металлургические и роторные машины»

Ведущая организация - Открытое акционерное общество «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург

Защита состоится «22» декабря 2016 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.285.10 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»: <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=262484>

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Раскатов Евгений Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На современном этапе развития металлургического производства все большее распространение получают совмещенные процессы непрерывного литья и деформации, которые позволяют существенно снизить энергоемкость технологического процесса, металлоемкость оборудования, капитальные и эксплуатационные затраты и улучшить качество листовой металлопродукции.

Предлагаемые технологии непрерывного литья основаны на объединении в одной установке процессов кристаллизации расплава металла и пластической деформации затвердевшего металла. Такой совмещенный процесс непрерывного литья и деформации реализован в новой установке непрерывного литья и деформации для получения листовой металлопродукции и может быть использован для создания и внедрения ресурсосберегающих технологических процессов в черной и цветной металлургии. Возрастающие потребности промышленности в биметаллах вызвали необходимость создания принципиально новых процессов их производства с целью повышения производительности, расширения сортамента и улучшения качества биметаллических полос. Разработаны технологии холодного плакирования широкого класса биметаллов сталь-сплавы цветных металлов, которые находят широкое применение в различных отраслях промышленности. К основным технологическим задачам в развитии этих процессов относятся увеличение ширины биметаллических листов, производимых рулонным методом, а также получение биметалла с повышенной толщиной плакировочных слоев. Изложенные выше проблемы производства биметаллических полос могут быть успешно решены с использованием компактной установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

Таким образом, широкое внедрение ресурсосберегающих технологических процессов и оборудования на заводах черной и цветной металлургии на современном этапе возможно на основе создания новых

установок совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листовой металлопродукции.

Разработка этих прогрессивных направлений 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.

Методология и методы исследования:

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

- методы случайного поиска и симплекса.

Наиболее существенные научные результаты, полученные лично автором, и их новизна:

Установлены 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.

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

Установлены 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;

Поставлена и решена задача по определению оптимальных по энергоемкости технологических и конструктивных параметров установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

Практическую значимость 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» (х/д работа № 10-201-08). Компактная установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства стальных листов толщиной 3-24 мм и шириной до 2200 мм принята к внедрению в ОАО «Уральский трубный завод» (договор № у-83/16 от 13.10.2016 г.).

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 также результатами исследования на опытной установке непрерывного литья и деформации.

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

завода «Уралтрансмаш» (х/д работа № 10-201-08). Компактная опытно-промышленная установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства стальных листов толщиной 3-24 мм и шириной до 250 мм принята к внедрению в ОАО «Уральский трубный завод» (договор № у-83/16 от 13.10.2016 г.).

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

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 7 научных работах, из них 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ.

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации и дана общая характеристика работы.

В **первой главе** представлен аналитический обзор по теме диссертации, в результате которого обоснована цель и определены задачи диссертационного исследования.

Во **второй главе** описан алгоритм и проведено теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния металла в очагах

деформации при получении стальной полосы на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

На рисунке 1 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.

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);

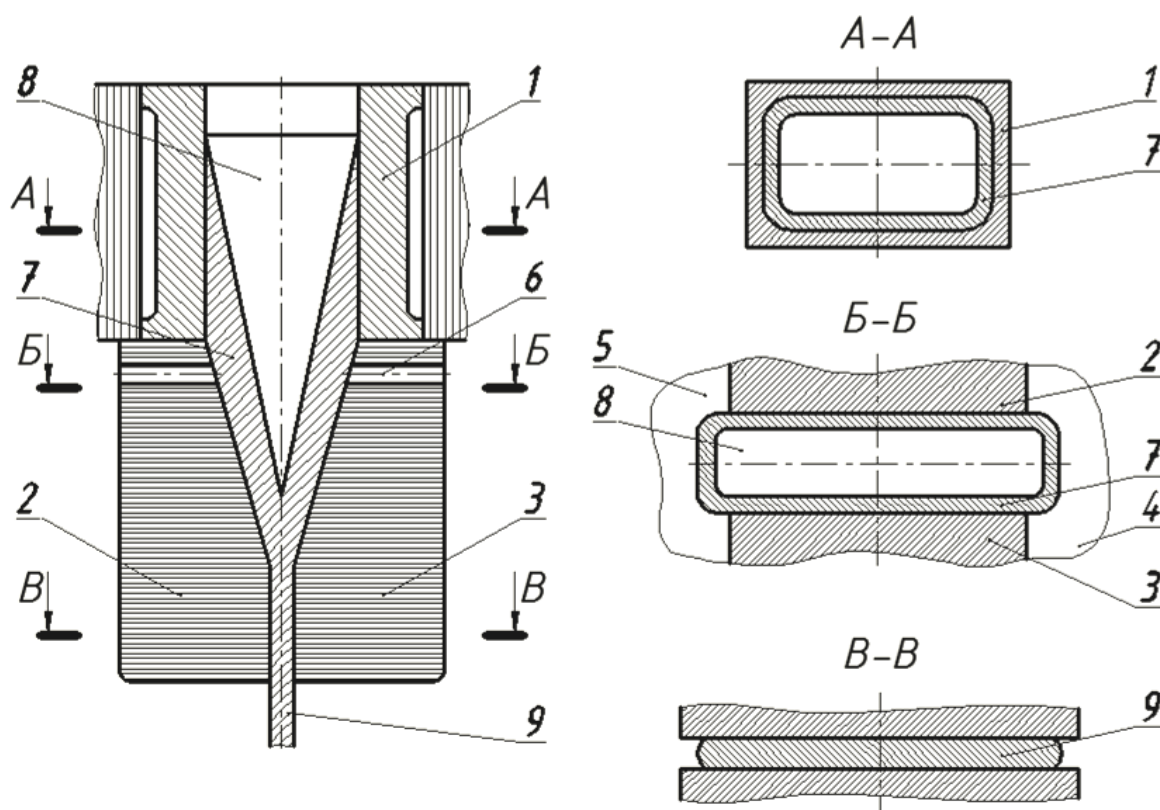


Рисунок 1 - Схема установки совмещенного процесса непрерывного литья и циклической деформации.

Для оценки нового совмещенного процесса проведено теоретическое исследование. 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 $\alpha = 10^\circ$. Угловая скорость эксцентриковых валов 71 мин^{-1} . Толщину оболочки слитка с жидкой фазой при выходе из неразъемного кристаллизатора принимаем согласно расчету 8 мм. Температура внешней поверхности оболочки с жидкой фазой 2 равна 1200°C , а внутренней - 1450°C . Ферростатическое давление принято равным $0,015 \text{ МПа}$, а коэффициент трения между стенкой - бойком разъемного кристаллизатора и полосой составил $0,5$.

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 теории упруго-пластичности при наличии больших деформаций и перемещений;

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

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

T, °C	1200	1250	1300	1350	1400	1450
E, МПа	7565	4680	2631	1326	686	641
E ₁ , МПа	1,135	0,702	0,359	0,189	0,103	0,096
σ _s , МПа	53,226	42,859	29,052	19,694	13,350	9,049

На рисунке 2 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.

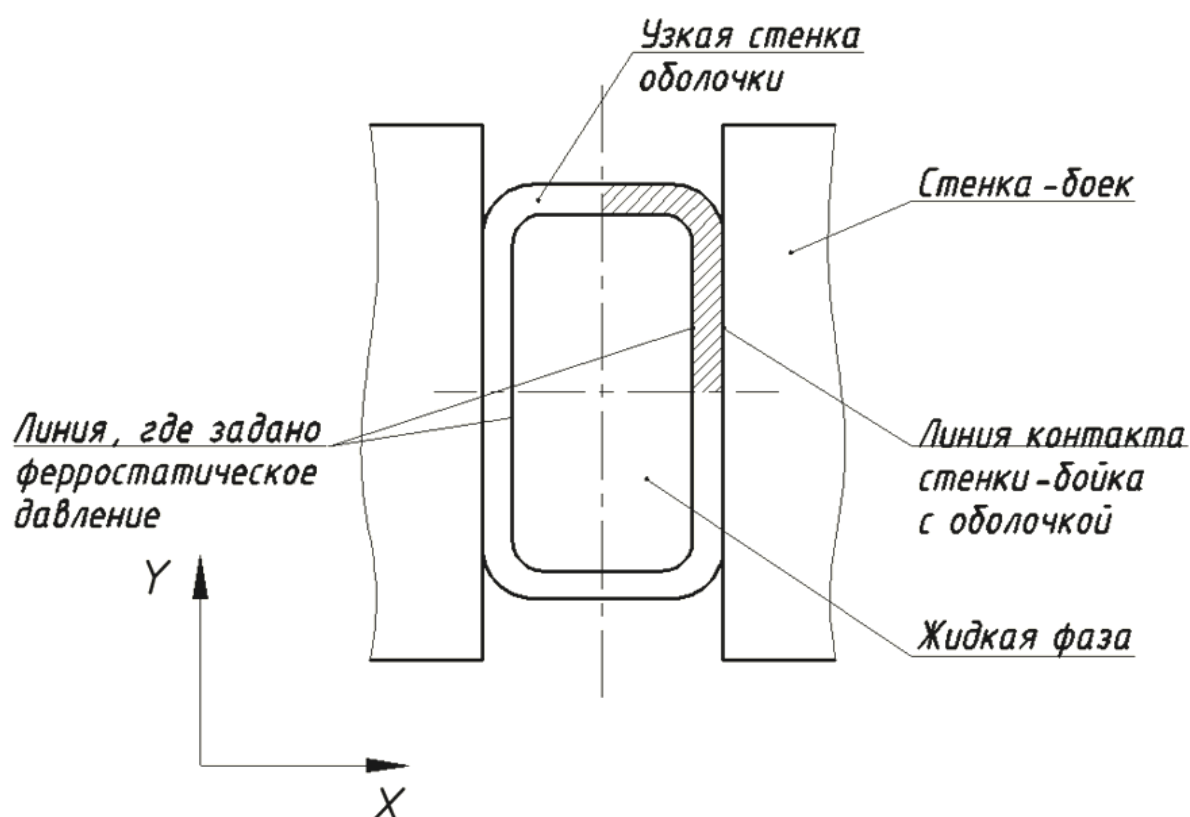


Рисунок 2 - Четверть оболочки, принятая для расчёта

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния в области узкой грани оболочки с жидкой фазой представлены в виде эпюр (рисунок 3).

оболочка из стали

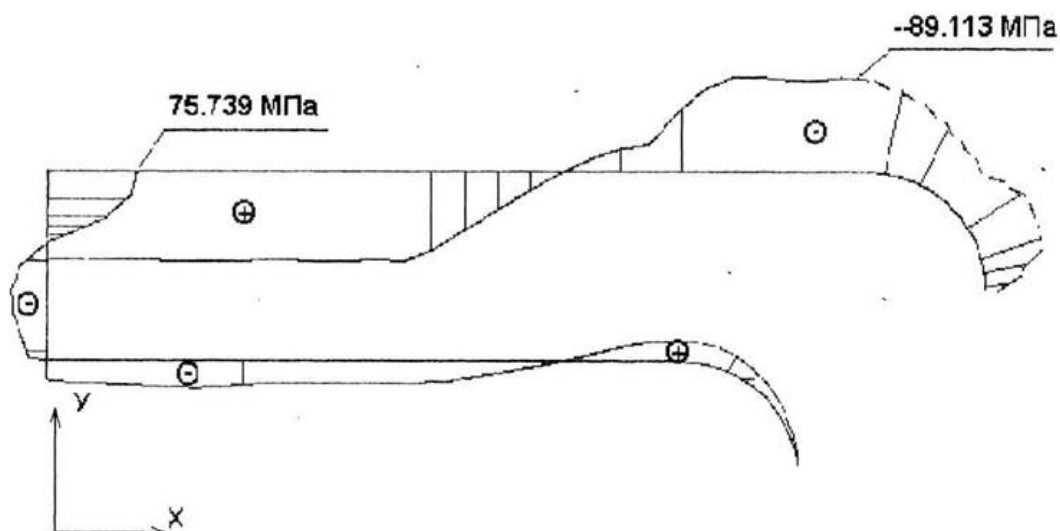


Рисунок 3 - Эпюры напряжений в направлении оси X после третьего обжатия оболочки стенками - бойками (сечение «В»)

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 1).

Таблица 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 3), 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, 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.

Ниже представлены результаты расчета напряженно-деформированного состояния в очаге деформации (участок 2). На рисунке 4 в системе координат ХОУ представлена четвертая часть заготовки, принятая для расчета.

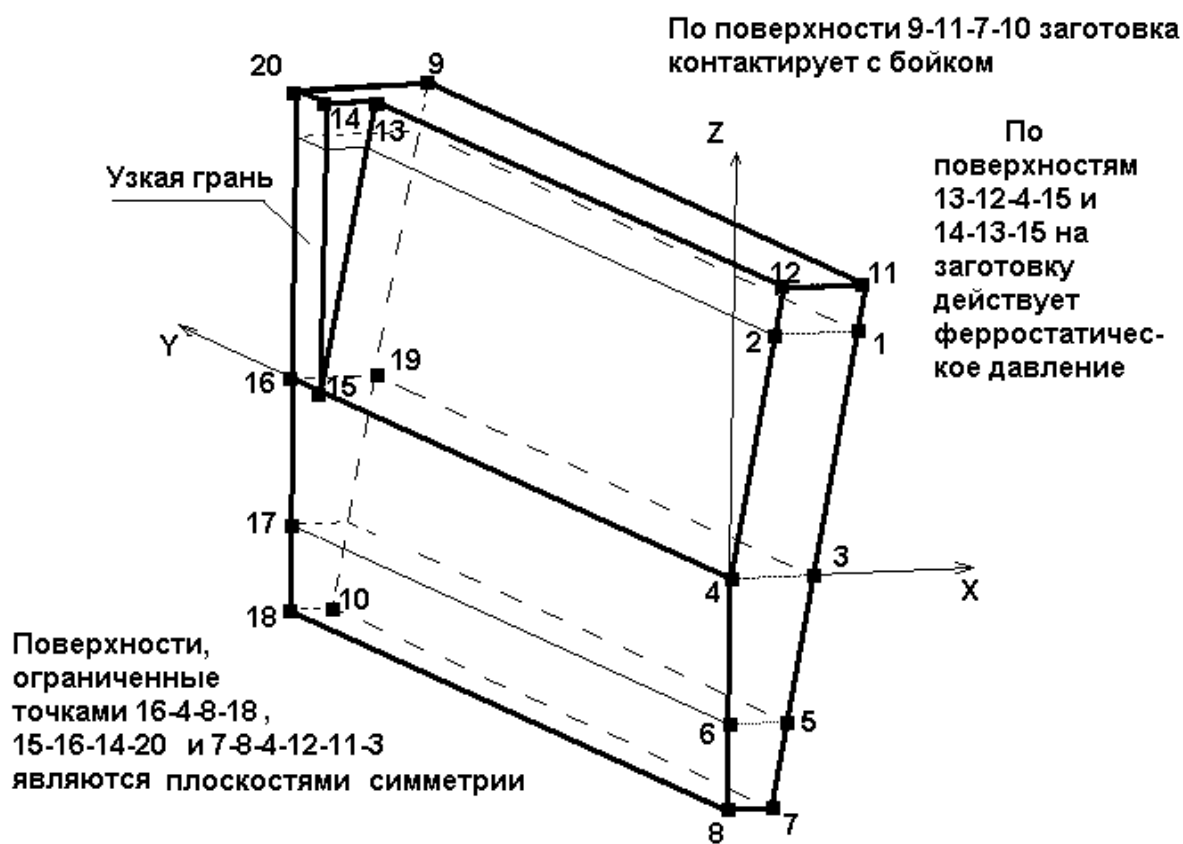


Рисунок 4 - Объемная четверть очага деформации в системе координат XYZ, принятая для расчета

В качестве конечного элемента использован объемный двадцатиузловой конечный элемент, показанный на рисунке 5. Размер элемента находился в диапазоне – от 0,5 до 1 мм.

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации представлены в виде эпюр напряжений.

На рисунках 5, 6 представлен характер распределения нормальных напряжений вдоль осей X и Z и касательных напряжений (рисунок 6).

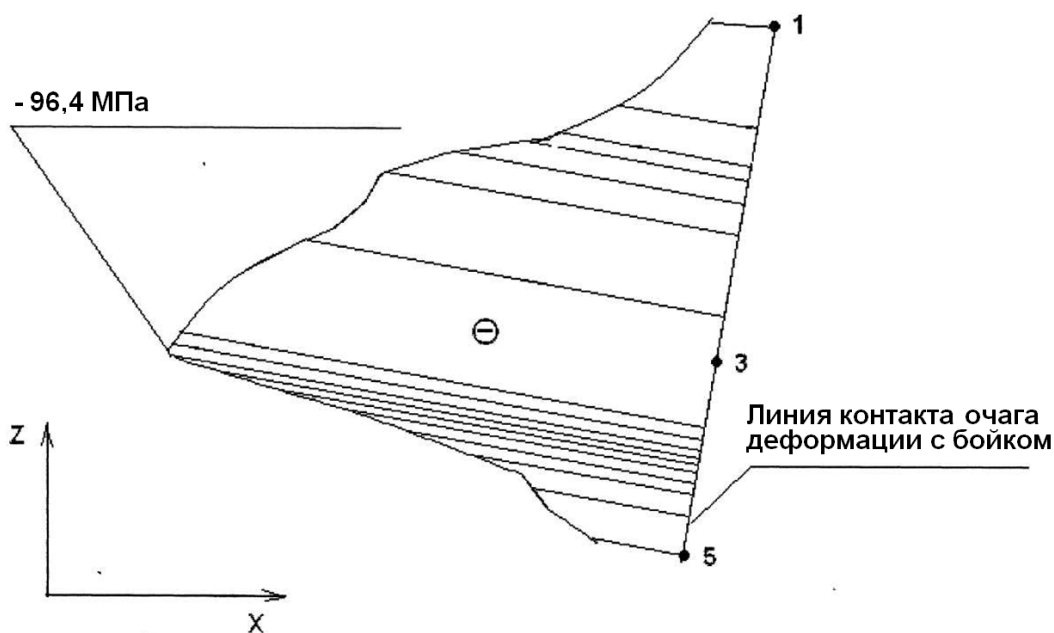


Рисунок 5 - Характер напряжения по оси X вдоль линии 1-3-5 очага деформации

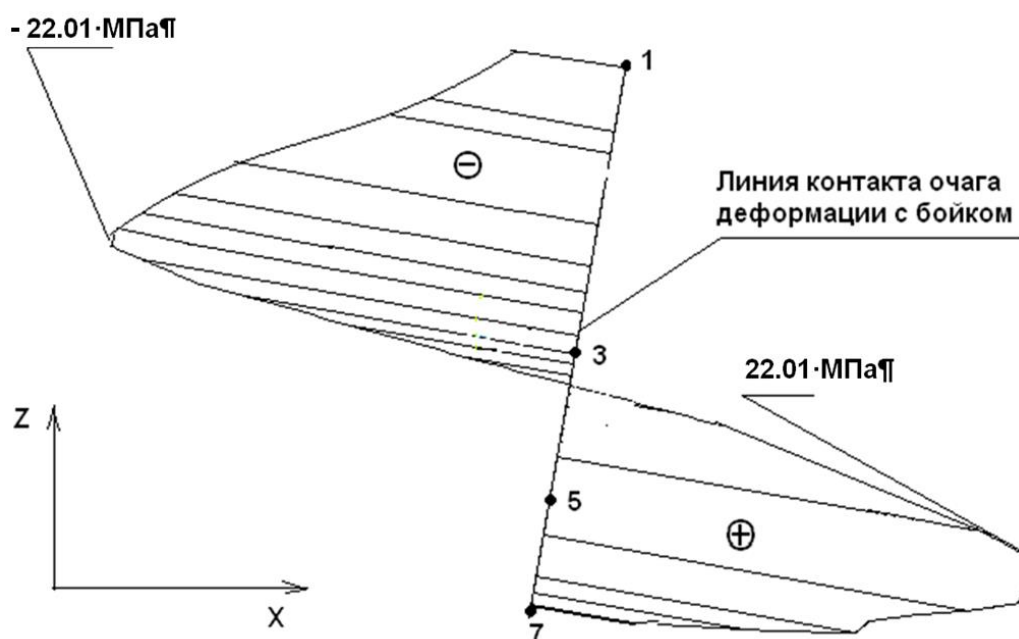


Рисунок 6 - Характер касательных напряжений вдоль линии 1-3-5-7 очага деформации

Таблица 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 металл при деформации находится практически в условиях всестороннего сжатия.

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. На рисунке 7 дано распределение перемещений по линии контакта очага с бойком.

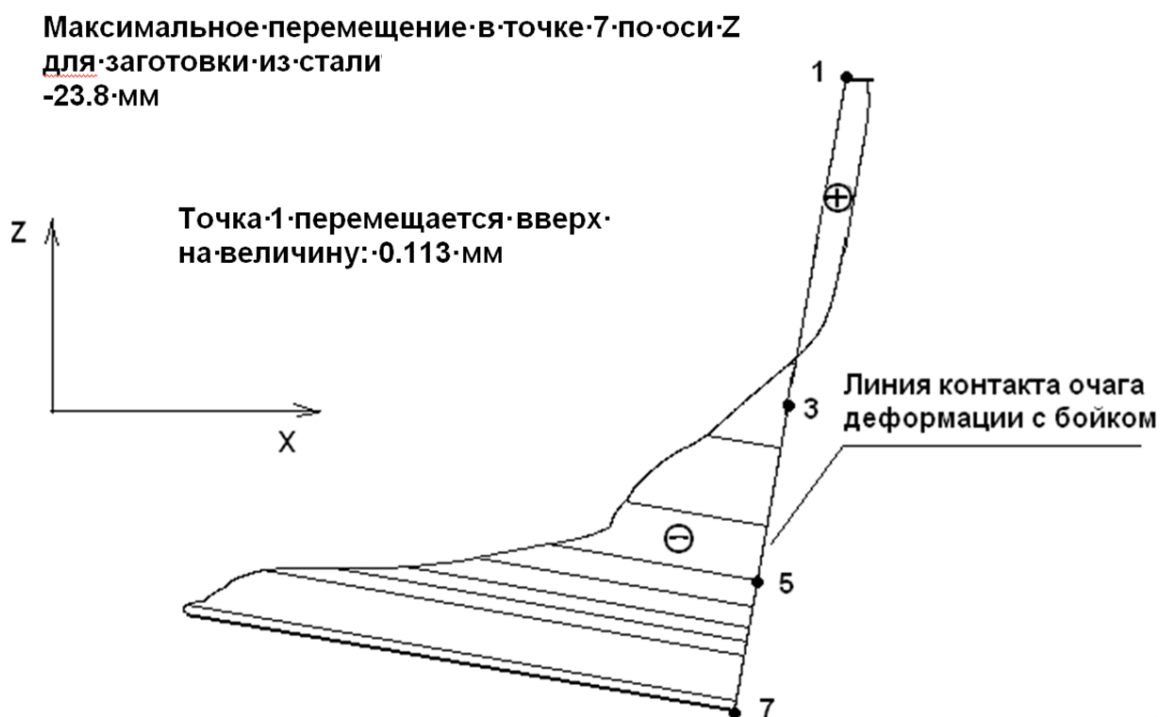


Рисунок 7- Характер перемещения по оси Z вдоль линии 1-3-5-7 очага деформации

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

В третьей главе описана установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для получения трехслойных биметаллических полос и определено напряженно-деформированное состояние плакирующих слоев при получении биметалла сталь-алюминий.

Способ непрерывного литья биметаллической полосы 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 кристаллизующейся оболочкой плакирующего слоя путем обжатия с последующей калибровкой полосы, причем скорость литья определяется

заданной толщиной плакирующего слоя и размерами сборного кристаллизатора (рисунок 8).

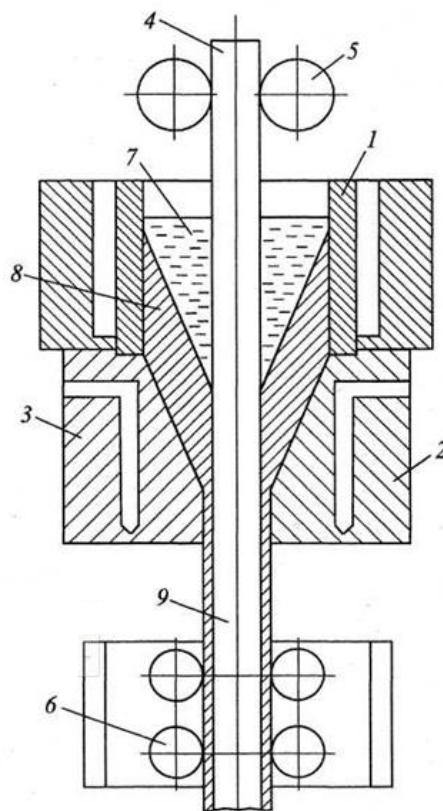


Рисунок 8 - Способ получения биметаллической полосы:
1 – неразъемный кристаллизатор; 2, 3 – стенки-бойки разъемного кристаллизатора; 4, 5 – направляющие ролики; 6 – тянущие ролики; 7 – расплав металла плакирующего слоя; 8 – оболочка плакирующего металла; 9 – полоса основного металла

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 8) 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.

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

Расчетная схема процесса показана на рисунке 9.

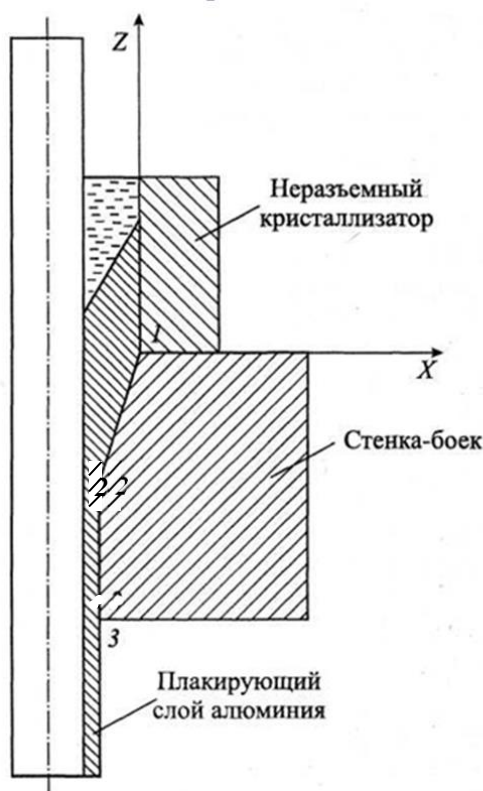


Рисунок 9 - Расчётная схема совмещённого процесса непрерывного литья и деформации при получении биметалла сталь-алюминий

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 210ГПа, а коэффициент Пуассона – 0,3. Коэффициент Пуассона для очага деформации принят равным 0,35.

Результаты получены решением задачи механики сплошной среды методом конечных элементов. Конкретно: использована объемная постановка контактной задачи теории упруго-пластичности при наличии больших деформаций и перемещений. Для стенки-бойка задавались перемещения, равные 5мм, в направлениях, противоположных положительным направлениям осей X и Z.

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

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния металла лакирующего 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.

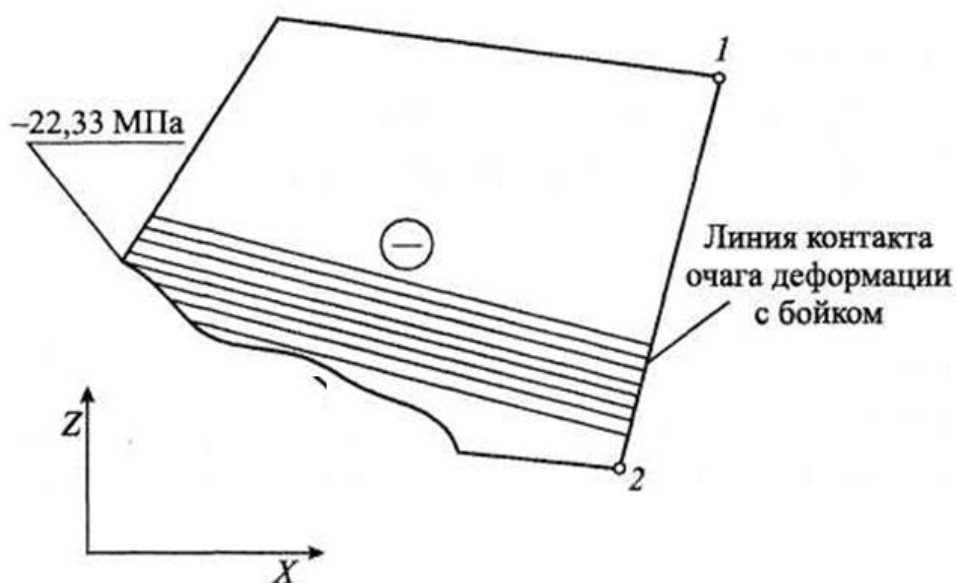


Рисунок 10 - Характер напряжения по оси X вдоль линии 1-2 очага деформации

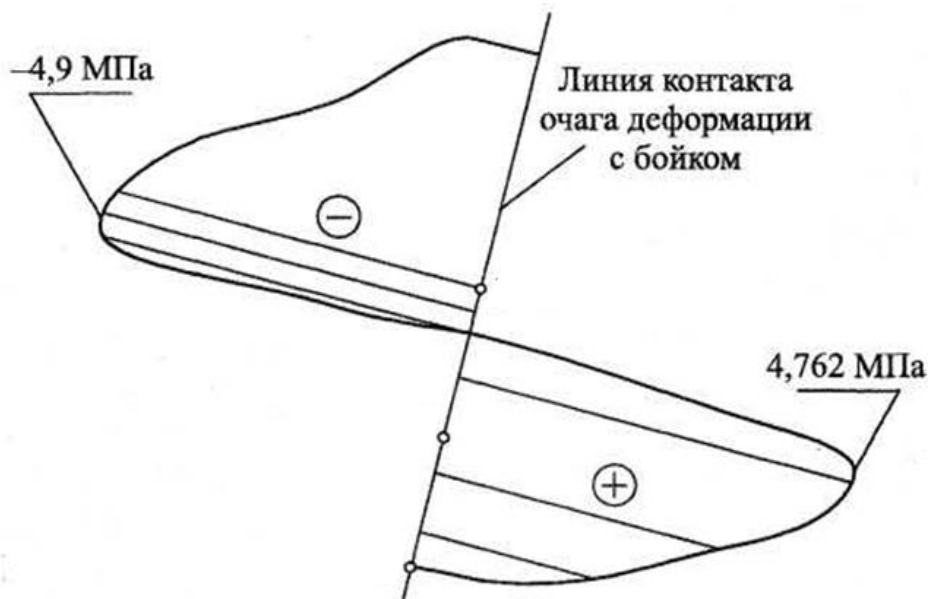


Рисунок 11 -Характер касательных напряжений вдоль линии 1-2-3 очага деформации

На рисунке 10 представлены закономерности распределения нормальных напряжений вдоль осей X и Z и касательных напряжений на рисунке 11.

В таблице 3 приведены выборочные результаты по максимальным напряжениям по поверхности контакта плакирующего слоя в зоне очага деформации со стенкой - бойком.

Таблица 3 - 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.

Определены параметры установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении биметаллической полосы сталь-алюминий сечением 8×1000 мм при толщине плакирующих слоев 1 мм: - скорость вытягивания слитка из неразъемного кристаллизатора 4 м/мин.;

- угловая скорость эксцентриковых валов - 142 мин^{-1} ;
- часовая производительность - 12,7 т;
- мощность приводного электродвигателя - 143 кВт.

В **четвертой главе** поставлена и решена задача оптимизации основных параметров установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации. Определены основные параметры вертикальной установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для получения широких листов из сплавов алюминия повышенной прочности и магния. Проведена оценка качества листовых полос.

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 энергоемкости технологического процесса и нагруженности оборудования и получение листов высокого качества.

Учитывая актуальность экономии материально-энергетических ресурсов в качестве целевой функции целесообразно принять энергоемкость технологического процесса (Ξ), 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 обжатия и единичное обжатие (Δh).

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

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

$$\begin{aligned} \Pi &\geq \Pi_3; \quad M \leq [M]; \quad e^{(1)} \leq e \leq e^{(2)}; \\ \alpha^{(1)} &\leq \alpha \leq \alpha^{(2)}; \quad \varepsilon \leq [\varepsilon]; \quad \omega \leq [\omega]; \quad P \leq [P]. \end{aligned}$$

где ε – степень деформации листа, %; ω – угловая скорость эксцентриковых валов, c^{-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.

Диапазон изменения варьируемых параметров $2,5 \text{ мм} \leq e \leq 7,5 \text{ мм}$, $7,5^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$.

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÷7,5 при одном угле α не влияет на расход энергии.

На основании проведённого исследования установлено, что для выполнения заданной производительности приняты оптимальные параметры: $\alpha = 10^\circ$ и $e = 5$ мм, угловая скорость эксцентриковых валов $n = 70 \text{ мин}^{-1}$.

С учетом результатов оптимизации определены основные параметры вертикальной установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для получения листов из легированной стали сечением $2\div 4$ мм×1000 мм:

- размеры полости неразъемного кристаллизатора $80 \times 950 \times 300$ 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 $2\div 4 \times 1500$ мм из алюминия:

- величина эксцентриситета эксцентриковых валов – 5 мм;
- угол наклона рабочей поверхности стенки-бойка – 10 град.;
- скорость выхода оболочки с жидкой фазой из неразъемного 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) \times 2000 (ширина) \times 2500 (длина) мм.

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.

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.

Решить проблемы производства качественной листовой продукции из магниевых сплавов возможно с использованием установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации.

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.

Для оценки качества листа из сплава магния AZ33 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. Для этих двух стадий процесса проката применены соответственно плоская и объемная постановка задачи упругопластичности.

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, 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÷4мм × 1500мм из сплавов магния:

- размеры неразъемного кристаллизатора: ширина 1450мм, высота 100мм, длина рабочей части 200мм;
- скорость вытягивания оболочки слитка с расплавом из неразъемного кристаллизатора – 2м/мин;

- угловая скорость эксцентриковых валов – 70мин^{-1} ;
- мощность приводного двигателя – 1800кВт ;
- производительность – бт/час .

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.

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

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, $\sigma_x = 75,7\text{МПа}$, а при $R = 50$ мм, $\sigma_x = 75,4\text{МПа}$. Еще большее снижение растягивающих деформаций происходит в сечении «С». Так при $R = 10$ мм, $\epsilon_x = 0,45$, тогда как при $R = 50$ мм, $\epsilon_x = 0,19$. 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.

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 обжатия 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:

1. Биалалов Д.Х. Ресурсосберегающая технология производства биметаллических полос / О.С. Лехов, И.В. Ухлов, И.В. Лисин, Д.Х. Биалалов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2015. - №4. - С. 16-19 (0,39 п.л./0,06 п.л.).

2. Биалалов Д.Х. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листов из магниевых сплавов / О.С. Лехов,

И.В. Ухлов, **Д.Х. Билалов** // Производство проката. - 2015. - № 9. - С. 10-13 (0,51 п.л./0,15 п.л.).

3. Билалов Д.Х. Исследование совмещенного процесса непрерывной разливки и циклической деформации для получения листов из стали / О.С. Лехов, Б.Н. Гузанов, **Д.Х. Билалов**, И.В. Лисин // Сталь. - 2016. - № 1. - С. 59-62 (0,72 п.л./0,16 п.л.).

4. Билалов Д.Х. Технологические возможности установок совмещенных процессов непрерывного литья и деформации для производства металлопродукции / О.С. Лехов, **Д.Х. Билалов** // Производство проката. – 2016. - №7. – С. 24-26 (0,41 п.л./0,2 п.л.).

Публикации в других изданиях:

5. Билалов Д.Х. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листов из цветных металлов, сплавов и биметалла / О.С. Лехов, И.В. Лисин, **Д.Х. Билалов** // Сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции. – Воронеж: ФГБОУ ВО ВГЛУ, 2015. - № 7. –Ч. 2 (18-2). - С. 89-92 (0,3 п.л./0,1 п.л.);

6. Билалов Д.Х. Оптимизация параметров установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листа / О.С. Лехов, М.Ю. Туев, **Д.Х. Билалов**, И.В. Лисин // Сборник трудов XI Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. – Казань: Казанский (Приволж.) фед. ун-т, 2015. - С. 2309-2310 (0,23 п.л./0,04 п.л.);

7. Билалов Д.Х. Исследование структуры металла в процессе деформации полос из стали и алюминия на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации / О.С. Лехов, **Д.Х. Билалов** // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций: сборник материалов X Международной конференции. – Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2016. – С. 144. (0,12 п.л./0,06 п.л.).