

На правах рукописи

Минаков Владимир Сергеевич



**МОДЕЛИРОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И РАСЧЕТ
ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЛИСТА ИЗ АЛЮМИНИЯ**

**Специальность: 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы металлургического
производства**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Екатеринбург
2006

Работа выполнена в ГОУ ВПО "Российский государственный профессионально-педагогический университет"

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Лехов Олег Степанович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Смирнов Сергей Витальевич

кандидат технических наук, доцент
Некрасов Игорь Иванович

Ведущее предприятие: ОАО «Уральская фольга»

Защита состоится 24 марта 2006 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д212.285.10 в Уральском государственном техническом университете – УПИ, по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. М – 323.

Ваш отзыв, заверенный печатью, просим направлять по адресу: 620002, г. Екатеринбург, К – 2, УГТУ-УПИ, Ученому секретарю совета института, тел. (343) 374 45 74, 375 46 04

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Переход к ресурсосберегающим и безотходным технологиям особенно важен при производстве металлоизделий массового производства. Это связано с тем, что существующие способы получения заготовок, а также готовой продукции из отдельных слитков не удовлетворяют таким требованиям, как снижение энергоемкости технологического процесса и получения заготовок необходимого качества.

К недостаткам традиционной схемы производства листовой металлопродукции и фасонных профилей следует отнести:

- низкий выход годного, обусловленный необходимостью удаления головной и донной частей слитков;
- высокую энергоемкость процессов, вызванную большими вытяжками при прокатке и необходимостью двукратного нагрева;
- искажение торцов блома при порезке раскатов на ножницах, что затрудняет захват заготовки при дальнейшей прокатке и снижает производительность стана, так как приходится делать дополнительные проходы.

Дальнейшее повышение технико-экономических показателей производства металлопродукции возможно лишь в результате использования непрерывнолитой заготовки, которая позволяет значительно увеличить выход годного, существенно снизить энергетические затраты и повысить качество металлоизделий.

Однако в настоящее время расход металла непрерывнолитых заготовок остается довольно высоким. Это связано с тем, что, с одной стороны, для продольного разделения непрерывнолитых слябов на листовые или сортовые заготовки используется газовая резка. Поверхностные слои толщиной до 15 мм с точечными дефектами непрерывнолитых слябов из нержавеющей стали удаляются механическим путем. Непрерывнолитые заготовки имеют наружные и внутренние трещины, в осевой зоне заготовки образуются ликвация, пористость, раковины.

С другой стороны, современные прокатные станы не позволяют совместить процессы непрерывной разливки и прокатки, то есть создать непрерывные литейно-прокатные комплексы. В связи с тем, что в настоящее время для деформации непрерывнолитых заготовок, а также в составе черновых групп непрерывных станов все более широкое применение находят различные конструкции ковочных агрегатов, весьма актуальным является исследование процессов циклической деформации бойками непрерывнолитых заготовок в целях разработки рациональных режимов и конструкций агрегатов для их реализации.

Цель работы. Разработка теоретических основ совмещенного процесса непрерывного литья и деформации, расчет параметров кристаллизатора, создание технологического процесса получения листовой заготовки и оценка качества листа из алюминия.

Научная новизна работы. Предложена и научно обоснована модель нестационарного совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении листа из алюминия, что позволило определить напряженно-деформированное состояние металла при формировании полосы в зоне гибки узких боковых стенок оболочки с жидкой фазой и в зоне очага деформации затвердевающего металла, а также оценить характер течения металла, особенно на границе с жидкой фазой оболочки слитка.

1. С использованием предложенной модели рассчитан уровень и характер распределения нормальных и касательных напряжений в очаге деформации в зависимости от влияния ряда технологических параметров работы экспериментальной установки.
2. На основе анализа механизма формирования заготовки в сборном кристаллизаторе выбраны и научно обоснованы рациональные параметры формообразования заготовки в сборном кристаллизаторе с целью снижения растягивающих напряжений в оболочке слитка, что является наиболее благоприятным для получения листа высокого качества.
3. Исследованы особенности структурообразования алюминия в зоне интенсивной горячей пластической деформации и выявлены условия кристаллизации, позволяющие получить ориентированную структуру с высокой степенью текстурованности.

Практическая ценность работы. Теоретические и экспериментальные исследования позволили получить следующие практические результаты:

- разработана новая технология непрерывного литья и деформации для получения листа из алюминия;
- найдены рациональные конструктивные параметры сборного кристаллизатора, позволяющие улучшить качество листа;
- установлена закономерность формоизменения структуры непрерывнолитой полосы из алюминия в процессе ее получения на установке непрерывного литья и деформации;
- разработаны рекомендации по выбору рациональных технологических и конструктивных параметров при проектировании установки непрерывного литья и деформации.

Реализация результатов работы. Разработаны технологическое и техническое задания на проектирование и изготовление установки непрерывного литья и деформации для получения листа из алюминия на ФГУП "Уралтрансмаш". Выполнен эскизный проект установки непрерывного литья и деформации для ФГУП "Уралтрансмаш". Изготовлена опытно-промышленная установка. С использованием опытно-промышленной установки непрерывного литья и деформации проведено моделирование процесса деформации и разработана технология получения листовой заготовки.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Постановка задачи и результаты расчета напряженно-деформированного состояния металла при формировании полосы в

- зоне гибки узких боковых стенок оболочки с жидкой фазой и в зоне деформации затвердевшего металла.
2. Модель совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении листа из алюминия.
 3. Алгоритм решения нестационарных контактных задач теории упруго-пластичности методом конечных элементов в плоской и объемной постановке.
 4. Конструкция установки непрерывного литья и деформации.
 5. Технология и параметры совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении листа из алюминия.
 6. Результаты комплексных экспериментальных исследований совмещенного процесса непрерывного литья и деформации и оценка качества листа из алюминия.
 7. Рекомендации по расширению областей использования установки непрерывного литья и деформации для получения листовых заготовок и листа из различных металлических материалов.

Апробация работы. Основные результаты были доложены и обсуждены на региональной конференции "Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением", Магнитогорск, 2002; Третьей межвузовской научно-практической конференции "Фундаментальные проблемы металлургии", Екатеринбург, 2003; Урало-Сибирская научно-практической конференции, Екатеринбург, 2003; Третьей международной научно-практической конференции Регионального Уральского отделения Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, Екатеринбург, 2004.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 8 печатных работах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка, включающего 71 наименование. Работа изложена на 125 страницах машинописного текста, содержит 51 рисунок и 14 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. ТЕХНОЛОГИЯ И УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТА ИЗ АЛЮМИНИЯ

В начале XXI века в технологии производства металла произошел скачок, положивший начало промышленному изготовлению горячекатаных полос с использованием двухвалковых литейно-прокатных агрегатов взамен разливки стали на тонкослябовых МНЛЗ с последующей горячей прокаткой в чистовой группе.

Усовершенствование технологии литья в первую очередь было направлено на уменьшение толщины заготовки с целью исключения из производственной цепочки наиболее энергоемких процессов — прокатки и нагрева заготовки.

Конструктивный принцип литья полосы в двухвалковом кристаллизаторе заключается в том, что два ролика с водоохлаждаемыми медными рубашками расположены горизонтально на некотором расстоянии один от другого (зазор

между ними определяет толщину отливаемой полосы), и между ними, благодаря торцевым уплотнениям с обеих сторон, размещается ванна жидкого металла, пополняемая через погружной разливочный стакан. При вращении роликов навстречу друг другу жидкий металл втягивается в зазор между ними и кристаллизуется на медной водоохлаждаемой поверхности, как в обычном кристаллизаторе МНЛЗ, образуя полосу, которая вытягивается вниз и быстро затвердевает.

В настоящее время широко используются, особенно в цветной металлургии, 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 1-2 м/мин.

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.

Непрерывнолитая 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.

Определенный интерес представляют 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, поэтому непрерывное обжатие образующейся корочки увеличивает теплообмен металла с рабочими гранями и повышает эффективность тепловой работы кристаллизатора.

Все рассмотренные валковые машины непрерывного литья имеют ряд недостатков, поскольку не обеспечивают необходимого обжатия полосы с целью получения требуемой структуры металла и качественной поверхности полосы, что затрудняет получать лист и фольгу из алюминия и других цветных металлов для глубокой вытяжки. Кроме того, они сложны в эксплуатации и управлении, поскольку еще недостаточно отработаны подвод и удержание расплава металла в зоне кристаллизации, и имеют сравнительно низкую производительность.

Для дальнейшего развития цветной металлургии в жестких условиях рыночной экономики необходимо создание ресурсосберегающих технологических процессов и компактных установок совмещенных процессов непрерывного литья и деформации, что позволит снизить издержки производства, увеличить выход годного и повысить качество готовой металлопродукции и, соответственно, снизить объем продаж слитков и

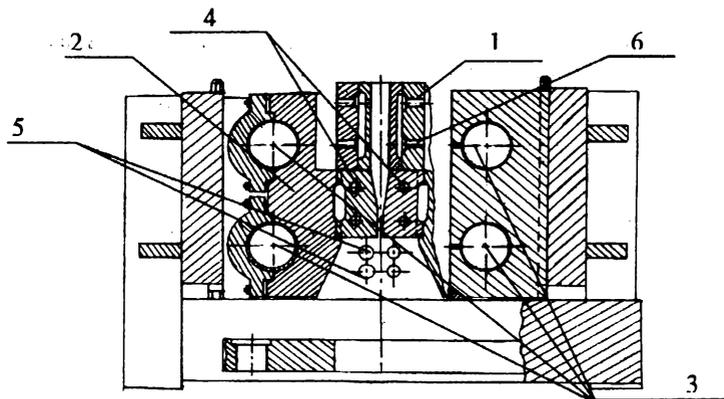
повысить конкурентоспособность металлопродукции из цветных металлов и сплавов.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ 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 предназначена для получения листа из цветных металлов и сплавов.

На рис. 1 изображен кристаллизатор для непрерывного литья и деформации заготовок, а на рис. 2 показан способ получения листа.

Кристаллизатор непрерывного литья и деформации

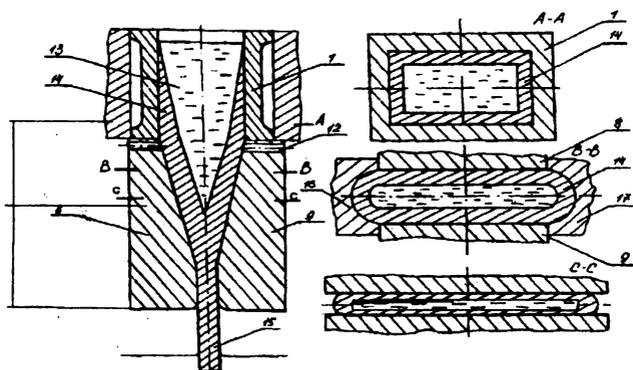


1 – неразъемный кристаллизатор; 2 - суппорт; 3 – эксцентриковые валы; 4 - разъемная часть сборного кристаллизатора; 5 - тянущие ролики; 6 - канал для подвода смазки;

Рис. 1

Предлагаемый технологический процесс получения листа из алюминия путем использования принципиально новой установки совмещенных процессов непрерывного литья и циклической деформации предусматривает исключение из технологической линии нагревательной печи и стана горячей прокатки, а также позволяет путем непрерывного литья впервые получить подкат для получения листа и фольги для глубокой вытяжки. Следует отметить, что все основные технологические операции получения листа осуществляются в сборном кристаллизаторе.

Способ получения листа



а - Схема

б - Рассматриваемые сечения

1 - неразъемный кристаллизатор; 8, 9 - стенки-бойки разъемного кристаллизатора; 12 - каналы для подвода смазки; 13 расплав металла; 14 - оболочка; 15 - готовая полоса; 16, 17 - боковые стенки разъемного кристаллизатора

Рис. 2

Жидкий алюминий из плавильной печи заливается в миксер, который предназначен для поддержания температуры, рафинирования и дозирования подачи расплава алюминия в кристаллизатор установки непрерывного литья и деформации. Из миксера расплав алюминия с помощью системы подачи заливается в кристаллизатор УНЛД. Система подачи расплава алюминия в кристаллизатор включает желоб, распределительную коробку и погружной стакан.

Из ковша с помощью системы заливки жидкий металл подается в неразъемную часть сборного кристаллизатора. При кристаллизации металла в неразъемной части кристаллизатора образуется замкнутая оболочка с жидкой фазой, причем толщина оболочки на выходе из неразъемного кристаллизатора достигает 9 мм. Этот слиток с жидкой фазой с помощью затравки и тянущего механизма вытягивается из неразъемной части кристаллизатора с заданной скоростью и поступает в водоохлаждаемые бойки разъемной части сборного кристаллизатора. Бойки, совершая плоское движение по замкнутой траектории, одновременно с формированием плоской заготовки осуществляют ее периодическое продвижение по направлению непрерывного литья. При этом на рабочие поверхности бойков разъемной части сборного кристаллизатора по специальным каналам в зазоры между бойками и полосой периодически подается порошок графита. Периодическая подача смазки в очаг деформации позволяет исключить налипание алюминия на рабочие поверхности бойков и тем самым улучшить качество поверхности листа из алюминия. По мере

продвижения оболочки с жидкой фазой через разъемный кристаллизатор происходит постепенное сближение широких стенок оболочки, т.е. уменьшение полосы с жидкой фазой. При этом происходит увеличение ширины, поскольку периметр оболочки остается практически постоянным. При периодическом процессе сближения корочек оболочки в конце жидкой фазы происходит интенсивное перемешивание жидкого металла, что способствует удалению в шлак неметаллических включений и получению качественного, химически однородного металла.

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 бойками затвердевшей полосы (ковка полосы) до заданной толщины листа, равной 2-4 мм.

Обжатие полосы осуществляется в узком температурном интервале и при довольно высокой температуре ($\approx 500^{\circ}\text{C}$), что исключает продольную разнотолщинность полосы и существенно снижает энергозатраты. 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.

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 бойками разъемного кристаллизатора затвердевшего металла до заданных размеров листа;
- калибровка полосы с целью обеспечения заданной точности листа.

Все эти стадии происходят последовательно и на конечном этапе позволяют сформировать определенную структуру и свойства проформированного металла. Для определения напряженно-деформированного состояния металла при формировании полосы в зоне гибки узких боковых стенок оболочки с жидкой фазой (участок I, рис. 2а), в зоне очага деформации (участок II, рис. 2а), а также влияние радиуса сопряжения стенок неразъемного кристаллизатора на уровень растягивающих деформаций и напряжений был использован вычислительный эксперимент на базе решения задач механики сплошных сред методом конечных элементов. Для участка I использована плоская постановка задачи теории упруго - пластичности при наличии больших деформаций и перемещений, а для участка II – объемная постановка задачи теории упруго - пластичности при наличии больших деформаций и перемещений.

Все расчеты выполнены с использованием стандартных физико-механических свойств технически чистого алюминия марки А5.

Для расчета использован пакет ANSYS. Толщину корочки 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 алюминия принимаем равной 530 °С, а внутренней поверхности оболочки - 660 °С.

Для определения напряженно-деформированного состояния металла при деформировании полосы в зоне гибки боковых стенок оболочки с жидкой фазой рассматривалась деформация от действия на внутреннюю поверхность оболочки ферростатического давления, а на внешнюю поверхность – по зоне контакта бойков с широкой стенкой от перемещения бойков.

Величина статического давления жидкого металла для оболочки из алюминия принята равной 0,005 МПа. Коэффициент Пуассона для оболочки принят равным 0,35. Коэффициент трения между бойком и алюминиевой заготовкой, где применяется смазка, принят равным - 0,1. В качестве расчетной схемы принята четвертая часть оболочки с жидкой фазой.

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния в области узкой стенки оболочки с жидкой фазой представлены в виде эпюр и изолиний перемещений, деформаций и напряжений. Приняты следующие обозначения: U_y – перемещения в направлении оси Y, ϵ_x – деформация в направлении оси X, σ_x – напряжения в направлении оси X.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА В ОЧАГАХ ДЕФОРМАЦИИ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ

Все расчеты проведены для трех сечений оболочки слитка представленного на рис. 3.

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

На рис. 4 представлены эпюры напряжений в направлении оси X после первого обжатия оболочки бойками (сечение А).

Таким образом, при литье листа из алюминия установлено, что по мере гибки узких граней оболочки с жидкой фазой от сечения «А» к сечению «С» растягивающие деформации на внешней поверхности узкой грани вблизи ее середины возрастают и достигают величины 0,6 МПа. Это не может привести к возникновению микротрещин, так как предел текучести составляет 0,12 МПа и он соизмерим с расчетными напряжениями. Если образование подобных дефектов для валковых машин не принципиально и легко устранимо операцией обрезки кромок, то для установки непрерывного литья и деформации это существенно, так как обрезки нет, а есть калибровка полосы. Расчетные данные подтверждены экспериментальными исследованиями микроструктуры полосы, где на боковых гранях трещин не обнаружено.

Выборочные результаты приведены в табл. 1.

Четверть оболочки принятая для расчета

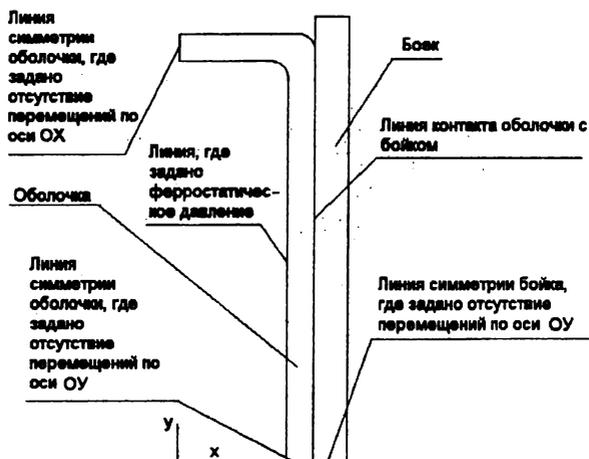


Рис. 3

Эпюры напряжений в направлении оси X после первого обжатия оболочки бойками (сечение А).

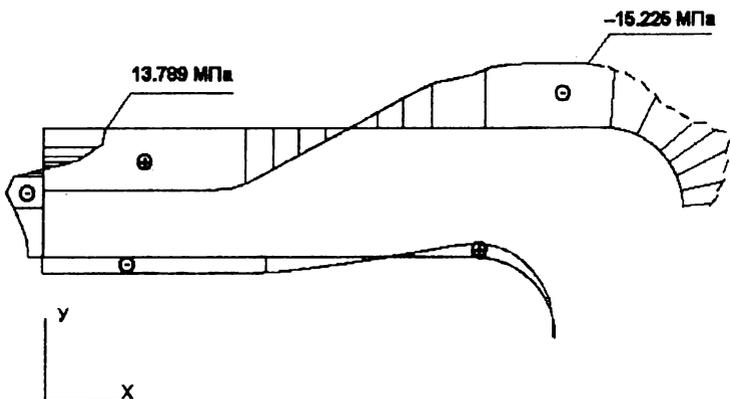


Рис. 4

Таблица 1.

Максимальные значения перемещений u_y , растягивающих напряжений σ_x , и деформаций ϵ_x , возникающих на внешней поверхности оболочки с жидкой фазой

Сечение оболочки	u_y , мм	σ_x , МПа	ϵ_x , %
"А"	14,906	13,789	0,238
"В"	26,451	14,000	0,471
"С"	30,816	13,812	0,608

Проведены расчеты при литье листа в кристаллизатор с различными радиусами сопряжения его стенок, что позволило оценить влияние радиуса сопряжения стенок неразъемного кристаллизатора на уровень растягивающих деформаций и напряжений. Установлено, что при увеличении радиуса сопряжения стенок кристаллизатора происходит существенное снижение растягивающих деформаций, однако при этом практически не изменяются растягивающие напряжения на внешней поверхности грани оболочки с жидкой фазой.

Так, например, при радиусе сопряжения стенок кристаллизатора $R = 40$ мм в сечении "В" происходит снижение растягивающих деформаций ϵ_x с 0,47% при $R = 5$ мм до 0,27% при $R = 40$ мм, растягивающие напряжения практически не изменились: при $R = 5$ мм, $\sigma_x = 14,00$ МПа, а при $R = 40$ мм, $\sigma_x = 13,86$ МПа. Еще больше снижение растягивающих деформаций происходит в сечении "С". Так при $R = 5$ мм $\epsilon_x = 0,61\%$, тогда как при $R = 40$ мм $\epsilon_x = 0,21\%$. Следует также отметить, что при этом глубина проникновения растягивающих деформаций составляет 1,5 мм при толщине оболочки равной 8 мм, т.е. наблюдается небольшая зона растяжения, что не будет способствовать разрушению оболочки. Таким образом, при выборе сечения полости неразъемного кристаллизатора радиус сопряжения его стенок целесообразно принимать равным $25 \div 40$ мм.

Исследование напряженно-деформированного состояния металла в зоне очага деформации выполнено с использованием объемной постановки контактной задачи теории упруго - пластичности при наличии больших деформаций и перемещений.

На рис. 5 в системе координат ХОУ представлена четвертая часть заготовки, принятая для расчета. Здесь же приведено положение бойка, который показан упрощенно.

Объемная четверть очага деформации в системе координат ХYZ, принятая для расчета (боек не показан)

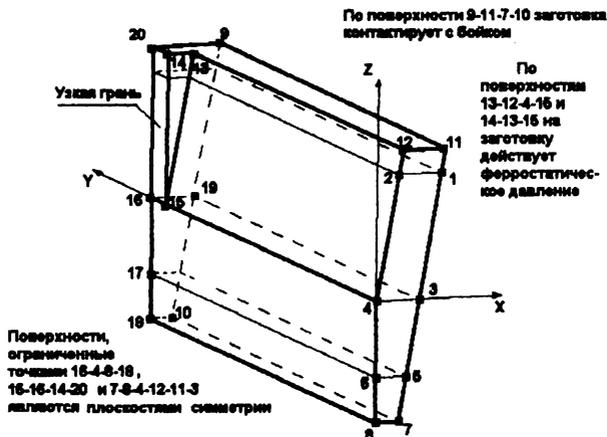


Рис.5

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

Таблица 2

Выборочные результаты по максимальным напряжениям по поверхности контакта очага с бойком и в плоскости симметрии

Напряжения в плоскости симметрии, МПа			Напряжения в зоне контакта очага деформации с бойком, МПа			
σ_x	σ_y	σ_z	σ_x	σ_y	σ_z	σ_{zx}
-16	-14	-18	-22	-12	-16	-5

* Примечание. Напряжения указаны со знаком минус, так как они относятся к сжимающим.

Представленные результаты свидетельствуют о благоприятной картине напряженного состояния в очаге деформации. Как следует из представленных эпюр напряжений и табл. 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. Представленные результаты свидетельствуют о том, что при деформации затвердевший металл не выдавливается в конус жидкой фазы оболочки слитка, а перемещается в направлении непрерывного литья.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЛИСТА ИЗ АЛЮМИНИЯ

Целью исследования совмещенного процесса непрерывного литья и циклической деформации являлась оценка качества листа из алюминия. В первую очередь следовало оценить калибровку бойков (угол наклона рабочей поверхности, длину калибровочного участка, радиусы сопряженных поверхностей) и ее соответствие кинематическим параметрам движения бойков с позиции получения поверхности листа хорошего качества, а также оценить условия захвата полосы бойками. Для этих целей в соответствии с выполненными расчетами была произведена модернизация лабораторной установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации вертикального типа. Кроме того, известно, что при горячей прокатке алюминия наблюдается налипание алюминия на рабочую поверхность вала, что приводит к ухудшению качества листа. В связи с этим, было исследовано влияние смазки.

Проведенные исследования позволили скорректировать расчетную калибровку стенок-бойков и получить поверхность листа хорошего качества. Наибольшее влияние на качество поверхности листа оказывают калибрующие участки бойков, длина которых в 1,5 - 2,0 раза должна превышать величину подачи полосы, и радиус поверхности бойка между рабочей частью бойка и калибрующим участком.

Исследование процесса кристаллизации и структурообразования проводили с использованием технически чистого алюминия, химический состав которого приведен в таблице 3.

Таблица 3.

Химический состав алюминия

Химический состав, % Марка алюминия	Al, не менее	Примеси, не более								
		Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Zr	прочие
А5 гост 11069-74	99,50	0,3	0,25	0,05	0,05	0,03	0,06	0,02	-	0,03
Исследованный состав	99,401	0,15	0,15	0,22	0,003 6	0,0053	0,058	0,008 4	0,0006 5	0,003

Анализ химического состава исследованного алюминия, выполненный спектральным методом на приборе "Лесо" показал, что по сравнению с ГОСТом имеется некоторое превышение по меди, однако по основным примесям и содержанию алюминия он соответствует алюминию технической чистоты марки А5. При таких концентрациях медь полностью растворима в алюминии (предельная растворимость атомов меди в решетке алюминия в твердом состоянии составляет 2,5 ат.%), собственных фаз не образует и влияния на процесс кристаллизации алюминия не оказывает. Другими словами, все основные примеси в указанных концентрациях не оказывают существенного влияния на процесс кристаллизации исследуемого алюминия, так как собственных фаз не образуют и модифицирующего эффекта проявить не могут. В данном случае структурообразование будет определяться только внешними эффектами, к которым можно отнести, главным образом, условия теплоотвода в кристаллизаторе и параметры горячей пластической деформации в бойках установки непрерывного литья и деформации.

Для проведения исследований был изготовлен слиток на экспериментальной установке непрерывного литья и деформации (УНЛД), позволяющей одновременно деформировать и вытягивать из кристаллизатора металлическую заготовку в виде полосы толщиной 4 мм и шириной 30 мм. Для этого расплав алюминия, перегретый на 50...70 °С в тигле индукционной печи ($T_{\text{печи}} = 710 \dots 730 \text{ } ^\circ\text{C}$) был залит в кристаллизатор установки, ниже

отверстие которого закрыто специальной алюминиевой затравкой. После выдержки расплава в кристаллизаторе в течение 7...10 сек., достаточных для образования твердой корочки закристаллизованного металла, была задействована бойковая часть машины, что позволило продеформировать и частично вытянуть заготовку из выходного отверстия бойков. Затем действие бойков было остановлено и металл окончательно закристаллизовался в слиток внутри кристаллизатора. После охлаждения слиток был извлечен и разрезан на образцы для проведения исследований.

Полученная геометрия слитка позволяет выделить в сечении три зоны:

I – зона недеформированного металла; II – очаг деформации; III – зона продеформированного металла (заготовка).

В первой зоне, где деформация отсутствовала, в результате самопроизвольной кристаллизации сформировалась довольно крупнозернистая неравномерная структура алюминия. Каждое зерно представляет собой дендрит, выросший из одного центра кристаллизации. Причем, если в приповерхностных слоях, где была максимальная теплоотдача через стенки кристаллизатора, сформировалась разнотернистая по размерам, но равноосная по форме структура (рис. 8), то ближе к середине слитка зерна приобретают выраженную столбчатую форму (рис. 8). Особенно хорошо это заметно при металлографическом сканировании слитка в продольном сечении, начиная с боковой поверхности. Весьма крупный размер столбчатых кристаллов, достигающих значений в длину 330 мкм и в ширину 13 мкм обусловлен, по-видимому, как перегревом расплава перед заливкой в кристаллизатор, так и повышенной чистотой расплава.

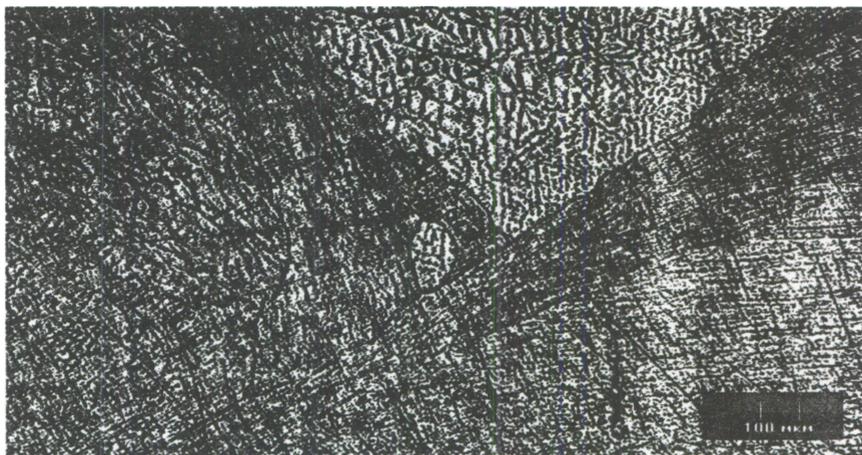


Рис. 8. Микроструктура литого алюминия центральной части слитка

Высокая скорость охлаждения в металлическом кристаллизаторе способствовала не только образованию столбчатой структуры, но и измельчила

внутреннее строение зерна, которое определяется формой и размерами первично кристаллизовавшихся ветвей дендрита. Из рисунка видно, что дендрит в пределах одного зерна имеет весьма тонкие и извилистые ветви, что свидетельствует о небольших размерах дендритной ячейки. Таким образом, условия кристаллизации в УНЛД способствуют образованию столбчатой микроструктуры с тонким внутренним строением, обеспечивающим повышенную прочность и пластичность алюминия. Подобная морфология внутреннего строения литого алюминия чаще всего рассматривается как фактор положительный для условий последующей интенсивной горячей пластической деформации.

Во второй зоне слитка, соответствующей очагу деформации, происходит интенсивная горячая пластическая деформация металла для получения заданной толщины заготовки. При выходе из бойков суммарная степень обжатия полосы может достигать 75%. Пластическая деформация кардинально изменила структуру литого алюминия, что должно эффективно влиять на его свойства.

В зоне начала деформации, когда усилия еще малы, столбчатые кристаллы, ориентированные к центру слитка, начинают поворачиваться вдоль направления прокатки. В этом случае угол поворота еще невелик, а сами кристаллы в размерах не увеличиваются. Весьма интересным представляется формирование на этом этапе деформирования некоторой зубчатости границ зерен, что является характерным для технологии высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО). Такое строение границ зерен оказывается весьма полезным при возрастании степени деформации, когда зерна не только поворачиваются, но и начинают вытягиваться в направлении главной деформации растяжения. В этом случае сохраняется сплошность границ, так как зерна не проскальзывают друг относительно друга, а деформируются совместно.

В средней зоне очага деформации зерна практически заканчивают свой разворот и на этом этапе формируется текстура деформированного алюминия. Преимущественная кристаллографическая ориентировка зерен в листовом прокате характеризуется определенным расположением в пространстве и кристаллографических плоскостей, и кристаллографических направлений. Для алюминия и алюминиевых сплавов характерна текстура прокатки $(110)[112]$, то есть кристаллографические плоскости (110) большинства зерен параллельны плоскости листа, а направление $[112]$ параллельно направлению прокатки. На выходе из бойков поворот зерен заканчивается, они приобретают окончательный размер, и устанавливается конечная текстура.

Известно, что совершенство текстуры, определяемое относительным количеством зерен с преимущественной ориентировкой, зависит от температуры и степени деформации, причем степень совершенства текстуры, как правило, возрастает с увеличением степени и температуры деформации (до определенного предела).

В нашем случае температурно-временные параметры деформирования таковы, что позволяют сформировать структуру с высокой степенью

совершенства текстуры, что может оказать решающую роль при последующей прокатке заготовки в алюминийевую фольгу до определенной толщины листа. Фольга алюминийевая толщиной менее 200 мкм требует перед последующим деформированием проведение дополнительного рекристаллизационного отжига с целью измельчения структуры.

Исследование микроструктуры деформированного металла в поперечном сечении показало, что кристаллы литого алюминия, пластически деформируясь, изменяют свою форму, вытягиваются в направлении главной деформации растяжения и приобретают геометрию в виде пластин.

Подобное строение металлических материалов вообще и алюминия в частности после горячей пластической деформации сопровождается анизотропией свойств. Физико-химические и механические свойства деформированных полуфабрикатов в разных направлениях могут значительно отличаться. Это предполагает рассматривать полученную структуру как промежуточную, которая может быть адаптирована к конкретному последующему использованию за счет режимов термической обработки. В частности, как уже отмечалось, для последующей прокатки в фольгу подобная структура предпочтительна. Для других целей, используя рекристаллизационный отжиг, можно обеспечить нужную степень и требуемый тип текстуры, в том числе полностью рассеять текстуру.

Особо следует отметить, что в горячедеформированном алюминии уже в процессе деформации развиваются процессы возврата и полигонизации, снижающих уровень свободной энергии (напряжений II рода). В результате такой металл имеет более устойчивую, более стабильную структуру по сравнению с холодnodeформированным и вследствие этого более высокую температуру рекристаллизации.

Следовательно, в нашем случае за счет высоких скоростей охлаждения в кристаллизаторе и бойковой части машины следовало ожидать подавление процессов рекристаллизации в зоне деформации и, как следствие, получение одинаковой по всему сечению текстурированной структуры. Однако металлографические исследования показали, что в приповерхностных слоях в зоне максимальной деформации обнаруживается сплошной слой мелких рекристаллизованных зерен. Температурно-временные параметры деформирования позволяют реализоваться только процессам рекристаллизации обработки, причем только в тех микрообъемах, где достигнута определенная степень деформации. Вероятнее всего это происходит в средней зоне деформации, ближе к выходному отверстию бойков, где степень деформации в поверхностных слоях может достигнуть 20...30%, что и обеспечивает формирование здесь весьма мелкозернистой структуры. При выходе из бойков температура металла резко падает, что подавляет все процессы перекристаллизации. В результате полоса заготовки имеет комбинированную структуру, состоящую из текстурированных кристаллов в виде пластин в основе и мелких рекристаллизованных зерен в поверхностных слоях. Рекристаллизация снижает прочностные характеристики металлических материалов и в условиях больших степеней деформации может способствовать

выкрашиванию отдельных микрообъемов или образованию микротрещин в поверхности. Все это можно рассматривать как дефекты, снижающие потребительские качества заготовки. Эти дефекты устранимы за счет введения в конструкцию УНЛД спрейерного охлаждения полосы на выходе из бойков, что снизит температуру металла в зоне деформации и предотвратит развитие процессов рекристаллизации.

Определенный интерес представляют микродорометрические исследования. На рис. 9 (а) представлены результаты замеров микротвердости по продольному сечению слитка в точках, показанных на рис. 9 (б). Измерения проводили на некотором расстоянии от поверхности вне зоны рекристаллизованных зерен.

Видно, что литая структуры алюминия вне зависимости от формы зерна имеет примерно одинаковую микротвердость на уровне $36...37 \text{ кг/мм}^2$, что хорошо согласуется со справочными данными для технически чистого алюминия.

В зоне деформации микротвердость поверхности слитка начинает быстро расти, достигая максимума на выходе из бойков машины на уровне $\approx 52 \text{ кг/мм}^2$, то есть наблюдается довольно значительное упрочнение деформированного алюминия. В условиях горячей пластической деформации подобный эффект обусловлен резким ростом плотности дислокаций и образованием полигональной структуры.

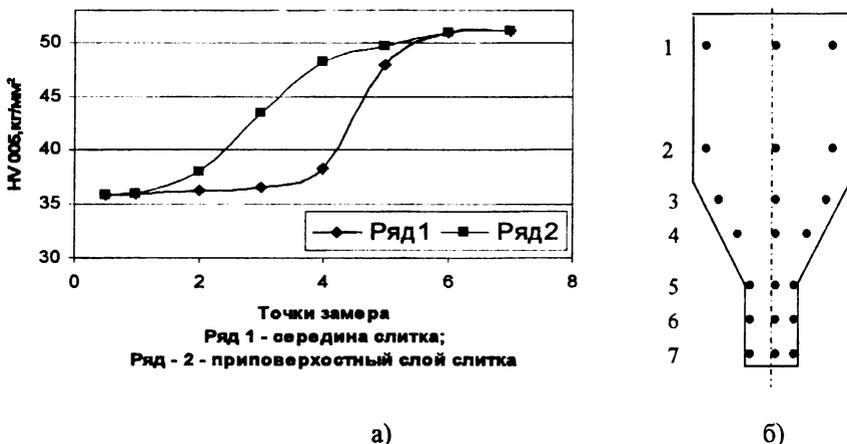


Рис. 9 . Распределение микротвердости (а) и схема замеров (б) по сечению слитка.

Процесс возврата при горячей пластической деформации может привести к аннигиляции части дислокаций, однако и в этом случае их плотность достигает значений $10^9...10^{10} \text{ см}^{-2}$ (в отожженном алюминии плотность дислокаций не превышает 10^7 см^{-2}). Микротвердость в средней части слитка значительно отстает от динамики упрочнения поверхности даже в конце зоны деформации, однако общая тенденция к упрочнению присутствует. В тоже время на выходе из бойков в готовой заготовке микротвердость по всему сечению полосы

примерно одинакова и находится на уровне 51...52 кг/мм². Полученные данные с определенной достоверностью позволяют предположить, что предложенная схема горячей пластической деформации, используемая в экспериментальной установке непрерывного литья и деформации, реализует практически сквозную проработку обрабатываемого металла в указанных геометрических размерах слитка и полосы.

4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ФГУП "УРАЛТРАНСМАШ"

Предлагаемая технология разработана для технологического процесса непрерывного литья и деформации алюминия для ФГУП "Уралтрансмаш" с созданием соответствующего оборудования (рис. 10) Предусматривается производство листа из алюминия сечением 2÷4×500 мм. Производительность установки непрерывного литья и деформации 10000 т листа в год. Лист предназначен для дальнейшего производства ленты, фольги, строительных профилей, автолиста и т.д. Разработано техническое задание и выполнен рабочий проект установки непрерывного литья и деформации, позволяющей производить 10 000т листа в год.

В состав основного оборудования УНЛД входят: сборный кристаллизатор общей длиной 600 мм, сечение которого в верхней части 80×450 мм, а на выходе из кристаллизатора - 2÷4×520 мм; четыре эксцентриковых вала с двумя суппортами; редуктор; приводной двигатель мощностью 300 кВт; тянущий механизм с отдельным приводом; ножницы для поперечной резки листа, наматывающее устройство.

Сборный кристаллизатор УНЛД состоит из неразъемного и разъемного кристаллизаторов. Неразъемный кристаллизатор представляет собой водоохлаждаемый кокиль из стали, внутренняя полость которого должна иметь специальное противопригарное покрытие, предотвращающее налипание алюминия на стенки кристаллизатора. В стенках кристаллизатора выполнены отверстия для охлаждающей воды.

Данная установка позволяет производить заготовку и лист из различных металлов и сплавов, причем как цветных, так и черных металлов. Анализ этой установки позволяет дать рекомендации по ее более широкому использованию, как в цветной, так и в черной металлургии.

Схема технологического процесса производства листа из алюминия на установке непрерывного литья и деформации

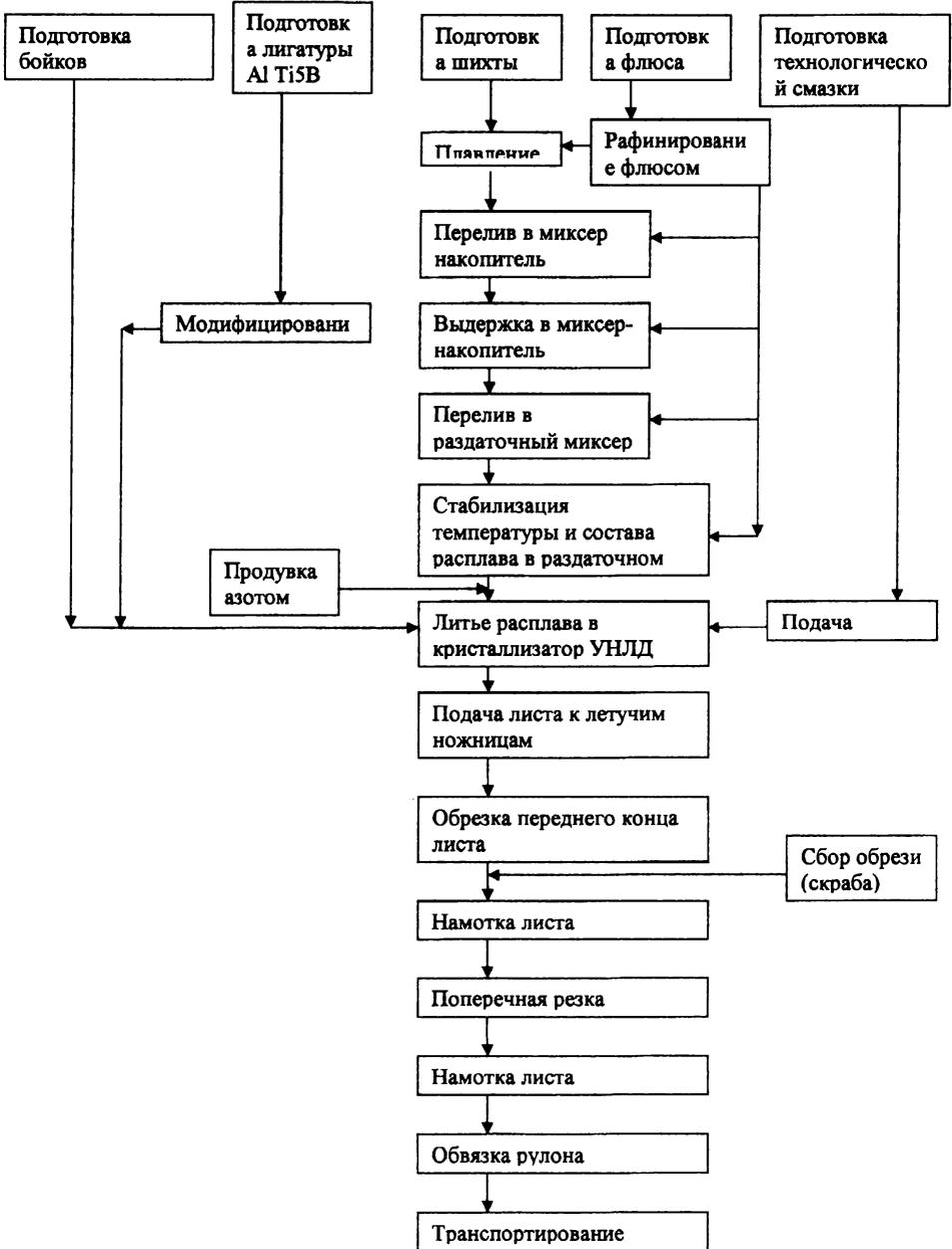


Рис. 10

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны теоретические основы совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листа из алюминия, позволяющий создать на заводах цветной металлургии ресурсосберегающие технологические процессы и улучшить качество листовой металлопродукции. Наиболее важные теоретические и экспериментальные научные разработки и обобщения заключаются в следующем.

1. Разработана модель нестационарного совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении листа из алюминия, модель позволяет определить напряженно-деформированное состояние металла при формировании полосы в зоне гибки узких боковых стенок оболочки с жидкой фазой и в зоне очага деформации затвердевшего металла.
2. В результате расчета напряженно-деформированного состояния металла в зоне гибки узкой грани оболочки металла с жидкой фазой построены эпюры и изолинии перемещений, напряжений и деформаций. Установлено, что по мере гибки узких граней оболочки с жидкой фазой растягивающие деформации на внешней поверхности узкой грани вблизи ее середины возрастают и достигают величины 0,6 МПа. Однако растягивающие напряжения, по мере гибки, практически не изменяются и составляют 13,8 – 14,0 МПа, это не может привести к возникновению микротрещин, так как предел текучести составляет 12,0 МПа и он соизмерим с расчетными напряжениями.
3. Выполнена оценка влияния радиуса сопряжения стенок кристаллизатора на уровень растягивающих деформаций. Установлено, что при увеличении радиуса сопряжения стенок кристаллизатора с 0,5 до 40 мм происходит снижение растягивающих деформаций с 0,47% до 0,27%. При проектировании кристаллизатора радиус сопряжения его стенок целесообразно принимать равным 25–40 мм.
4. В результате расчета напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации при получении листа из алюминия построены эпюры нормальных и касательных напряжений. Анализ полученных результатов свидетельствует о благоприятной схеме напряженного состояния в очаге деформации с преобладанием сжимающих напряжений, достигающих 22 МПа.
5. Проведена оценка характера течения затвердевшего металла на границе с жидкой фазой при деформации полосы. Установлено, что в процессе деформации затвердевшего металла стенками-бойками кристаллизатора металл не выдавливается в конус жидкой фазы, а перемещается в направлении непрерывного литья.
6. Проведено экспериментальное исследование совмещенного процесса непрерывного литья и деформации на модернизированной лабораторной установке с оценкой качества листа из алюминия, что позволило определить основные параметры технологического процесса.

7. Разработано техническое задание и рабочие чертежи для создания на заводе "Уралтрансмаш" участка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листа сечением $2+4 \times 500$ мм из алюминия.
8. По результатам опытно-промышленной эксплуатации этой установки можно будет дать более развернутые рекомендации по ее дальнейшему использованию, как в цветной, так и в черной металлургии.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. О.С. Лехов, М.В. Баранов, В.С. Минаков. Теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния металла при работе установки непрерывного литья и циклической деформации для получения листа из стали и алюминия. Моделирование и развитие процессов обработки давлением. Межрегиональный сборник научных трудов. Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2002. С. 64-69.
2. М.В. Баранов, И.В. Киршин, О.С. Лехов, В.С. Минаков, М.Ю. Туев, Т.Д. Гладких. Расчет основных параметров установки непрерывного литья и деформации для производства листа. Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: Межрегиональный сборник научных трудов. Магнитогорск. Изд-во МГТУ, 2002. С.75.
3. О.С. Лехов, М.В. Баранов, В.С. Минаков. Теоретическое исследование совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листа из алюминия// Вестник УГТУ-УПИ. № 5 (20): Фундаментальные проблемы металлургии. Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2003. С. 104-106.
4. О.С. Лехов, М.В. Баранов, В.С. Минаков. Исследование совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листа из алюминия: Сб. трудов Урало-Сибирской научно-практической конференции. Екатеринбург, 2003. С. 185-186.
5. О.С. Лехов, М.В. Баранов, В.С. Минаков. Напряженно-деформированное состояние металла при получении листа из алюминия на установке непрерывного литья и деформации// Изв. вузов. Цветная металлургия. 2004. № 1. С. 44-47.
6. О.С. Лехов, М.В. Баранов, В.С. Минаков. Исследование совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении листа из алюминия. Вестник УГТУ-УПИ № 15 (45). Екатеринбург, 2004, с. 226-228.
7. О.С. Лехов, М.Ю. Туев, И.В. Киршин, В.С. Минаков. Исследование процесса циклической деформации при получении стальных полос. Вестник УГТУ-УПИ № 15 (45). Екатеринбург, 2004, с. 228-230.
8. М.В. Баранов, Б.Н. Гузанов, О.С. Лехов, В.С. Минаков. Особенности структурообразования алюминия в условиях интенсивной высокотемпературной пластической деформации // // Изв. вузов. Цветная металлургия. (В редакции).

Подписано в печать 20.02.06. Формат 60x84/16. Бумага для множ. аппаратов.
Печать плоская. Тираж 100 экз. Заказ № 34
Российский государственный профессионально-педагогический университет.
620012, Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11.

Ризограф РГППУ. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11.

