

На правах рукописи

Николаев Виктор Алексеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА БЕССЛИТКОВОЙ ПРОКАТКИ
СТАЛЬНОЙ ПОЛОСЫ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ**

Специальность 05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2008

Работа выполнена в ОАО «Научно-исследовательский, проектный и конструкторский институт сплавов и обработки цветных металлов» (ОАО «Институт Цветметобработка»)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Бровман Михаил Яковлевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Шаталов Роман Львович

кандидат технических наук
Трайно Александр Иванович

Ведущая организация: ОАО «Московский металлургический завод
«Серп и молот»

Защита состоится 03 июня 2008 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д217.038.01 при ОАО «Институт Цветметобработка» (119017, Москва, Пыжевский пер., дом 5)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОАО «Институт Цветметобработка»

Автореферат разослан 25 апреля 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Ревина Н.И.

Справки: (495) – 951 – 50 – 55; www.cmet.ru

e-mail: post@cmet.ru

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Начиная с 1990-х годов многие страны, включая Россию, уделяют большое внимание технологии бесслитковой прокатки (БП) для производства тонких стальных полос, основанной на применении валковых литейно-прокатных агрегатов (ВЛПА). Эта технология является новой для черной металлургии.

Главные достоинства технологии БП – малая энергоемкость и высокая экологическая чистота производства; при этом обеспечиваются малые капитальные и эксплуатационные затраты. По многим удельным показателям указанная технология, несмотря на относительно малую годовую производительность (100 – 500 тыс.т/год), выигрывает по сравнению с традиционными технологиями производства стальных полос, что делает ее перспективной при создании мини-заводов.

Для успешного освоения и развития технологии валковой бесслитковой прокатки тонких стальных полос необходим анализ процесса пластической деформации полосы при бесслитковой прокатке, который существенно отличается от процесса обычной продольной прокатки. Важно определить критерии выбора эффективных основных параметров ВЛПА, в частности, диаметра валков-кристаллизаторов. Необходимы решения по повышению эффективности охлаждения валков-кристаллизаторов, гарантирующие получение стальных полос требуемой толщины и высокого качества.

Отмеченное свидетельствует об актуальности темы диссертационной работы.

Работа выполнена* в соответствии с планами НИР ОАО «Институт Цветметобработка».

Цель работы и задачи исследования. Цель настоящей работы: исследование процесса пластической деформации тонкой стальной полосы при бесслитковой прокатке, разработка новых технологических и технических решений, направленных на освоение БП в отечественной черной металлургии, и, в первую очередь, при создании мини-заводов.

Задачи исследования:

1. Исследование и расчет эффективных параметров процесса БП стальных полос, в том числе определение протяженности зоны пластической деформации, допустимой скорости полосы, критериев выбора диаметра ВК.
2. Анализ особенностей сопротивления деформации и уширения стальных полос.
3. Разработка мероприятий по повышению эффективности охлаждения валков-кристаллизаторов (ВК) и разработка новых их конструкций.
4. Анализ технологии БП как основы создания мини-завода.

* Научный консультант – доктор технических наук Ашихмин Г.В.

Научная новизна. В работе получены и выносятся на защиту следующие результаты, отличающиеся научной новизной:

1. Разработанная методика расчета и результаты определения эффективных параметров процесса бесслитковой прокатки стальных полос, включая скорость полосы, которая обеспечивает необходимый запас длины зоны пластической деформации, анализ особенностей сопротивления деформации и уширения полосы.

2. Обоснование выбора технологических параметров процесса, обеспечивающих его реализацию при любых диаметрах валков-кристаллизаторов.

3. Разработанные оригинальные конструкции валков-кристаллизаторов с максимальным приближением охладителя к поверхности контакта валка с полосой и с асимметричным охлаждением по окружности бочки, предназначенные для повышения эффективности охлаждения валков.

4. Анализ производительности и методика приближенной оценки затрат на создание мини-завода на основе ВЛПА.

Практическая значимость и реализация результатов работы. Разработанная комплексная методика расчета эффективных параметров процесса БП и установленные критерии к выбору диаметров ВК будут способствовать освоению технологии БП стальных полос на отечественных предприятиях, а также определению основных параметров ВЛПА при их конструировании.

Разработанные конструкции ВК могут обеспечить значительное повышение эффективности охлаждения и увеличение стойкости валков за счет снижения термических напряжений в бандажах (патенты РФ № 2310546 и № 2315682).

На Московском заводе по обработке цветных металлов полученные решения используются для совершенствования технологии БП цинкового сплава и разработки проекта ВЛПА повышенной производительности в связи с организацией производства на новой площадке завода.

Результаты и выводы диссертации приняты к использованию на Новокраматорском машиностроительном заводе (ЗАО «НКМЗ»), на фирме «Оснастка» (г. Краматорск, Украина), в научно-исследовательском и проектно-технологическом институте машиностроения (г. Краматорск, Украина).

Обоснованность и достоверность полученных результатов и выводов основаны на использовании положений современной теории прокатки, на анализе большого объема экспериментальной информации и подтверждены использованием результатов рядом предприятий.

Личный вклад соискателя. При проведении исследований, результаты которых опубликованы в соавторстве, диссертантом предложены основные идеи технических и технологических решений и выполнен анализ результатов расчетов.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 11 статьях; общий объем публикаций составляет 71 стр.; из них лично автору

диссертации принадлежит (указано в скобках в списке публикаций) 41 стр. (58%). Получено 2 патента РФ на изобретения.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были представлены на конференциях: 1-й межд. конф. молодых специалистов «Металлургия XXI века» (2005, Москва, ВНИИМЕТМАШ); 2-й межд. конф. молодых специалистов «Металлургия XXI века» (2006, Москва, ВНИИМЕТМАШ); межд. н-техн. конф. «Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении» (2006, Краматорск, Украина, ДГМА); 3-й межд. н-техн. конф. «Прогрессивные технологии в металлургии стали: XXI век» (2007, Донецк, Украина, ДонНТУ); межд. н-техн. конф. «Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов» (2007, Санкт-Петербург, СПбГПУ).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и списка использованных источников из 242 наименований. Общий объем работы: 193 страницы машинописного текста, включая 58 рисунков, 7 таблиц, 4 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1 Исследование и расчет основных параметров процесса БП стальных полос

Современный уровень бесслитковой прокатки стальных полос

Первые отечественные НИР по бесслитковой прокатке стальных полос были проведены еще в 1939 – 40 гг. на опытном ВЛПА Московского металлургического завода «Серп и молот».

В начале 1990-х годов исследования процесса БП стальных полос были поставлены на современном уровне в АХК «ВНИИМЕТМАШ им. акад. А.И. Целикова», были созданы опытно-промышленные агрегаты и разработан проект промышленного ВЛПА (В.В. Егоров и др.). Ряд работ, а также проект промышленного агрегата выполнен фирмой «ОЗМА» (О.А. Тимохин).

Настоящая диссертационная работа выполнена в развитие ранее проведенных в ОАО «Институт Цветметобработка» всесторонних исследований процесса БП тонких широких полос из алюминия и цинка (А.М. Кац, В.С. Кузнецов, Р.Л. Шаталов, Ю.Ф. Шевакин).

За рубежом в последние 20 лет ведущими машиностроительными и металлургическими фирмами и университетами Европы (проект «Eurostrip»), США, Австралии и Японии (проект «Castrip»), и других стран разработаны конструкторские и технологические решения и создано 10 промышленных ВЛПА для производства тонких (толщиной 1 – 5 мм) широких (шириной 1500 – 2000 мм) полос из углеродистых и коррозионностойких сталей.

Работы отечественных и зарубежных ученых и специалистов в области БП могут служить основой для успешного освоения в отечественной черной металлургии технологии бесслитковой прокатки тонких стальных полос.

Вместе с тем, проведенный аналитический обзор статей, книг, патентов и диссертационных работ показал, что в ранее выполненных разработках недостаточно изучены процессы пластической деформации полосы в процессе БП; необходимо продолжать работы по повышению эффективности охлаждения валков-кристаллизаторов.

Важной задачей является проведение исследований, ориентированных на создание отечественных технологий бесслитковой прокатки стальных полос и ВЛПА, превышающих по своим параметрам достигнутый на сегодня зарубежный уровень.

Определение протяженности зоны пластической деформации и допустимой скорости полосы при БП

Будем рассматривать схему реализации БП стальной полосы, когда жидкий металл заливают сверху в зазор между валками-кристаллизаторами (в дальнейшем, для краткости, – валками) как показано на рисунке 1 и на рисунке 2. Для того чтобы создать замкнутую ванну жидкого металла и предотвратить его кристаллизацию на боковых поверхностях слитка, к торцевым поверхностям валков прижимают плиты из огнеупорного материала. Такая схема успешно реализована на промышленных агрегатах.

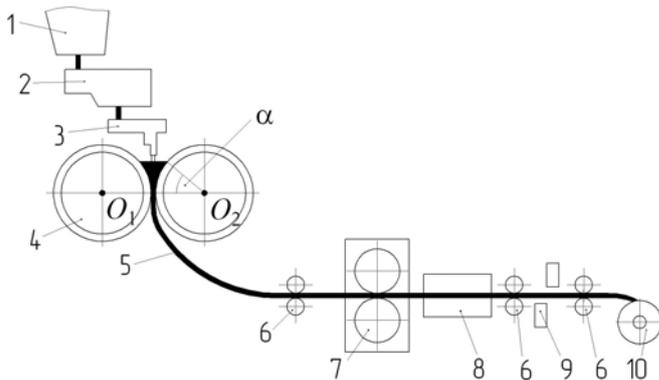


Рисунок 1 – Общая схема состава оборудования технологической линии с валковым ЛПА для производства тонких стальных полос: 1 – ковш; 2 – промежуточный ковш; 3 – разливочное устройство; 4 – ВЛПА; 5 – полоса; 6 – тянущие ролики; 7 – прокатная клетка; 8 – участок охлаждения; 9 – ножницы; 10 – моталка

В какой-то момент времени $\tau = \tau_0$ две твердые корки соприкасаются в точке C (где $y = y_0$). Угол γ , соответствующий этому сечению, можно определить из соотношения:

$$[R + \delta(\tau_0)] \cos \gamma = R + 0,5h, \quad (1)$$

где h – конечная толщина полосы (в сечении $y = 0$); при этом время

$$\tau_0 = \frac{\alpha - \gamma}{\omega}, \quad \text{здесь } \omega \text{ – угловая скорость валков.} \quad (2)$$

Положение мениска жидкого металла AB относительно плоскости O_1-O_2 ($y = 0$), проходящей через оси валков, определяет угол α (см. рисунок 2). От мениска, т.е. от точек A и B начинается кристаллизация жидкого металла, и на рабочих поверхностях обоих валков формируются две твердые корки металла толщиной $\delta(\tau)$, где τ – время.

Положение мениска жидкого металла AB относительно плоскости O_1-O_2 ($y = 0$), проходящей через оси валков, определяет угол α (см. рисунок 2). От мениска, т.е. от точек A и B начинается кристаллизация жидкого металла, и на рабочих поверхностях обоих валков формируются две твердые корки металла толщиной $\delta(\tau)$, где τ – время.

Ширина мениска жидкого металла H определена соотношением $2R\cos\alpha + H = 2R + h$, откуда

$$H = h + 2R(1 - \cos\alpha). \quad (3)$$

От точки C ($y = y_0$) начинается пластическая деформация полосы валками, т.е. собственно процесс прокатки.

Длина всей контактной зоны металла с валками L равна:

$$L = \sqrt{R(H - h)} = R\sqrt{2(1 - \cos\alpha)} = 2R\sin\frac{\alpha}{2}, \quad (4)$$

а длина зоны пластической деформации: $l = \sqrt{R(h_0 - h)}$, где h_0 (или $2\delta(\tau_0)$) – определяется решением уравнения (1), для чего следует принять конкретное выражение для функции $\delta(\tau)$. Величина h_0 – это толщина полосы в сечении, проходящем через точку C , т.е. при $y = y_0$.

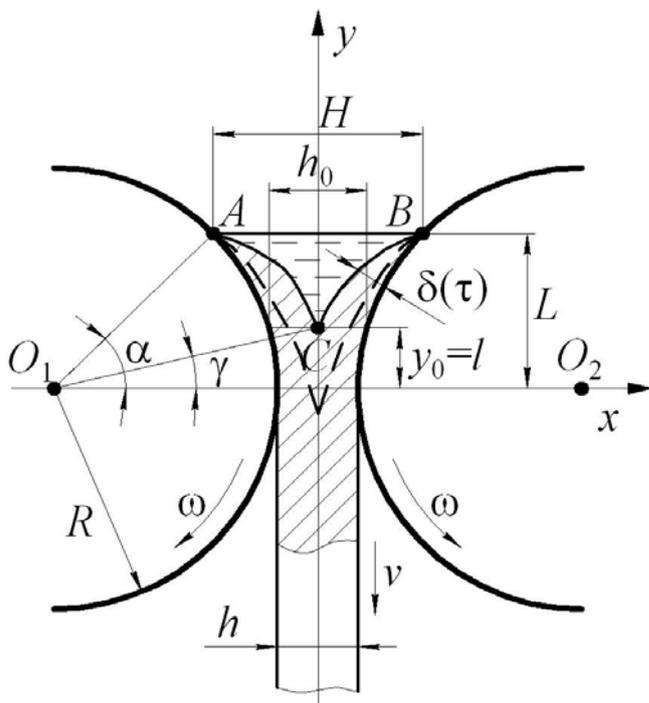


Рисунок 2 – Схема к расчету параметров процесса БП

Если увеличивать скорость процесса БП, то получим режим, при котором $\gamma = 0$, $h_0 = h$, т.е. точка C будет при некоторой критической скорости v_k расположена на оси x ($y = 0$).

Можно осуществлять процесс и при $v > v_k$, когда жидкая фаза будет расположена и ниже плоскости $y = 0$, т.е. при $\gamma < 0$ как показано пунктиром на рисунке 2. Однако, это существенно изменяет процесс и ухудшает качество полосы, так как металл не будет подвергаться пластической деформации сразу после окончания кристаллизации: ухудшает структуру и может наблюдаться повышенная пористость металла, могут возникнуть несплошности, расслоения металла, а иногда возможно раздутие средней по ширине части полосы под действием давления жидкого металла. Поэтому полосы, полученные со скоростью $v > v_k$, могут иметь большую поперечную разнотолщинность.

Для обеспечения высокого качества полос процесс БП следует осуществлять при $v < v_k$ и $\gamma > 0$ (см. рисунок 2); при этом необходимо иметь некоторый «запас» по v (см. ниже формулу (9)). Реализация процесса при $\gamma > 0$ требует обоснованного определения угла γ и знания зависимости толщины корки полосы δ от времени.

Во многих работах по непрерывной разливке металлов для определения толщины корки слитка используют «закон квадратного корня»:

$$\delta = k_1\sqrt{\tau}, \quad (5)$$

где k_1 – коэффициент кристаллизации; τ – время от начала кристаллизации.

Однако формула (5) дает недостоверные результаты для начальной стадии кристаллизации и быстро протекающего процесса кристаллизации тонких полос.

Поскольку при БП весь процесс затвердевания-деформации полосы в очаге кристаллизации-деформации (ОКД) продолжается от долей секунды до 2 – 3 с, в нашей работе использована соответствующая этому условию формула М.Я. Бровмана и А.В. Царева:

$$\delta(\tau) = \sqrt{x_0^2 + 2k\tau} - x_0, \quad (6)$$

где k и x_0 – постоянные величины для данного металла или сплава: k – постоянная, аналогичная коэффициенту кристаллизации и имеющая размерность $\text{м}^2/\text{с}$; x_0 – постоянная величина, имеющая размерность м , определяющая увеличение толщины корки слитка в начальные моменты кристаллизации.

Скорость затвердевания $\dot{\delta}$ согласно формуле (6) равна $\dot{\delta} = d\delta/d\tau = k/\sqrt{x_0^2 + 2k\tau}$ и при $\tau \rightarrow 0$ величина $\dot{\delta} \rightarrow k/x_0$, т.е. скорость затвердевания является величиной конечной. Таким образом, физический смысл постоянной x_0 состоит в том, что она характеризует скорость затвердевания в самом начале процесса кристаллизации, когда $x_0 = k/\dot{\delta}(0)$.

Если время затвердевания велико, что характерно для слитков большой толщины, то $x_0^2 \ll 2k\tau$ и можно приближенно принимать $x_0 \approx 0$ и применять формулу (5).

После подстановки $\delta(\tau)$ из (6) в уравнение (1) и с учетом (2) получаем уравнение для определения γ :

$$\alpha - \gamma = \frac{\omega R^2}{2k \cos^2 \gamma} \left[\left(1 + \frac{h}{2R} \right)^2 - \cos \gamma \left(2 + \frac{h}{R} - \frac{x_0}{R} - \frac{hx_0}{R^2} \right) + \cos^2 \gamma \left(1 - \frac{x_0}{R} \right) \right]. \quad (7)$$

При $\gamma = 0$ получаем формулы для определения критических скоростей:

$$\left. \begin{array}{l} \text{– угловой скорости валков: } \omega_{\text{к}} = \frac{2k\alpha}{h(0,25h + x_0)}; \\ \text{– линейной скорости полосы: } v_{\text{к}} = \omega_{\text{к}} R. \end{array} \right\} \quad (8)$$

На основании опытных данных были определены величины k и x_0 для углеродистых сталей: $k = (0,45 - 1,0)^{-5}$, $\text{м}^2/\text{с}$ и $x_0 = (2,4 - 6,0)^{-3}$, м .

Значительный разброс данных является естественным; он зависит от изменений температуры расплава и химического состава металла, от температуры поверхности валков. В каждом конкретном случае величины k и x_0 должны уточняться.

Принимая величины α в пределах $\alpha = 20^\circ - 30^\circ$ (обоснование – см. ниже), получим соотношение между h и H в виде: $H = h + (0,12 \div 0,26)R$. Длина зоны пластической деформации составит $l = \sqrt{R(h_0 - h)} = R\sqrt{(1 - \cos \gamma) \cdot 2}$, а зоны затвердевания (вдоль оси y): $L - l = \sqrt{R(H - h)} - \sqrt{R(h_0 - h)}$. Величина $h_0 = h + 2R(1 - \cos \gamma)$.

Всегда имеются отклонения толщины корки $\Delta\delta$ от номинальной. Анализ отклонений и степень их разброса приведен в ряде работ. Например, в работах М.Я. Бровмана и А.М. Каца установлено, что разнотолщинность корки в начале процесса кристаллизации металла может достигать 30%, а затем она уменьшается до 8 – 12%.

В валковых ЛПА весь процесс затвердевания жидкого металла происходит с высокой скоростью и поэтому можно допустить, что разнотолщинность (утонение) корки достигает 30%.

Отклонения, связанные с возможным утонением корки являются опасными, и для их учета следует на 30% увеличить h в формулах (8). Тогда вместо критической скорости v_k необходимо ориентироваться на меньшую – эффективную величину скорости $[v]$. В этом случае формулу для расчета $[v]$ надо записать в виде:

$$[v] = \frac{1,54k\alpha R}{h(0,33h + x_0)}. \quad (9)$$

В качестве примера на рисунке 3 приведены данные расчетов $[v]$ и v_k для случая литья-прокатки полос разной толщины в валках-кристаллизаторах диаметром 1000 мм (при $k = 0,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; $x_0 = 3,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$).

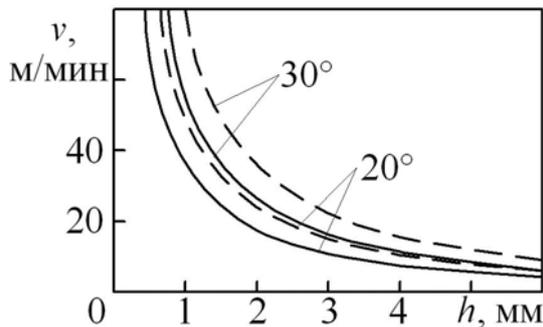


Рисунок 3 – Скорости стальных полос разной толщины в валках $D = 1000$ мм для углов $\alpha = 20^\circ$ и 30° (сплошные линии – эффективная скорость $[v]$; пунктирные – критическая скорость v_k)

Возможные колебания угла γ приводят к изменению длины зоны пластической деформации l и соответственно – степени деформации закристаллизовавшейся полосы. Если колебания γ таковы, что возможно достижение величин $\gamma = 0$; $h_0 = h$, то в этом критическом случае $l = 0$, т.е. длина зоны деформации сокращается до нуля. Такой режим опасен как было показано выше. Поэтому всегда необходимо обеспечивать выполнение условия $l > 0$, т.е. $v < v_k$, а для этого с учетом $\Delta\delta$ практически надо принимать $v < [v]$.

Следовательно скорость $[v]$ необходимо несколько уменьшить до v_ε , чтобы обеспечить требуемую пластическую деформацию полосы (относительное обжатие порядка 15% и более). Тогда, исходя из заданной величины ε и соотношения

$$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h} = \ln \left[1 + \frac{2R(1 - \cos \gamma)}{h} \right]$$

определяем угол γ и, подставив в формулу (9) вместо α величину $(\alpha - \gamma)$, находим требуемую скорость $v_\varepsilon < [v]$.

Практически при углах γ в пределах $\gamma = 2^\circ - 5^\circ$ соответствующая длина зоны деформации l обеспечивает обжатие $\varepsilon = 20 - 30\%$ при толщине полосы $h = 1 - 4$ мм и диаметрах валков $D = 500 - 1500$ мм.

Превышение значений $\varepsilon = 20 - 30\%$ может привести к большим усилиям и моментам прокатки, к необходимости увеличения жесткости ВК и клетки в целом, а также к большому влиянию опережения и уширения в зоне прокатки на все параметры ОКД.

Технологические основы выбора диаметра валков-кристаллизаторов

В технологии БП тонких стальных полос особая роль принадлежит валкам-кристаллизаторам, которые одновременно выполняют две функции – кристаллизатора «с подвижной стенкой» и деформирующего инструмента. Несмотря на то, что валки являются важным элементом технологического процесса и диаметры валков в известных ВЛПА существенно отличаются (от 500 до 1800 мм), критерии выбора этого важного конструктивного и технологического параметра БП не сформулированы.

Отметим главные ограничения процесса БП, которые следует учитывать при определении диаметра ВК.

Для обеспечения эффективного процесса следует выполнять очевидное условие:

$$\delta(\tau_1) > 0,5h, \quad (10)$$

где $\delta(\tau_1)$ – толщина затвердевшей корки полосы за время τ_1 ; $\tau_1 = Ra/v$ – время движения металла вдоль дуги, определяемой углом α , с окружной скоростью $v = \omega \cdot R$ (ω – угловая скорость валка).

Фактически это условие равносильно рассмотренному выше ограничению скорости полосы: $v < v_k$ (или $v_\varepsilon < [v]$).

Имеется еще одно ограничение параметров процесса – это величина угла α , определяющего уровень мениска жидкого металла относительно плоскости выхода полосы из ВК. Угол α не должен быть чрезмерно большим, иначе возникает опасность подстуживания расплава в тонком клиновом слое у краев мениска, что может привести к появлению тонких окисленных слоев у поверхности полосы.

По результатам анализа, проведенного в диссертации, было установлено, что эффективное значение угла α составляет 30° (см. также таблицу 1).

В экспериментах на опытном агрегате ВНИИМЕТМАШ (В.В. Егоров, А.И. Майоров) при БП стальных полос толщиной 1 – 2 мм в валках диаметром 600 мм наилучшие результаты по разнотолщинности полосы были получены при $\alpha = 30^\circ$; по сравнению с $\alpha = 13^\circ$ уменьшилась чувствительность процесса к колебаниям в подаче расплава (см. ниже).

Отметим техническое противоречие: для увеличения скорости полосы, а, следовательно, и производительности валкового агрегата желательнее угол α увеличивать (см. формулы (8) или (9)); однако при этом уменьшается угол контакта края мениска с поверхностью валка вблизи точки *A* (см. рисунок 2), что может привести к локальному переохлаждению металла и ухудшению его качества. Приходится выбирать угол α настолько большим, насколько это возможно без ухудшения качества полосы. С таким же выбором мы сталкиваемся при определении (как было показано выше) скорости полосы, которую хотелось бы увеличивать, но без потери в качестве полосы.

Таким образом, при выборе диаметра ВК необходимо учитывать:

1. Основные технологические параметры процесса БП: угол α , характеризующий уровень мениска расплава, и скорость полосы v .

При любом диаметре валков можно получать полосы высокого качества и обеспечивать стабильную работу ВЛПА, если выбраны эффективные значения α и v . Превышение эффективных α и v приведет к снижению качества полосы из-за недостаточной степени пластической деформации или из-за затвердевания тонких слоев металла у краев мениска.

2. Производительность ВЛПА: чем больше D (и больше v – см. формулы (8) и (9)), тем больше производительность агрегата G :

$$G = \rho b h v = \frac{1,332 \cdot \rho b k D}{0,25h + x_0}, \text{ т/час (при } \alpha = 30^\circ), \quad (11)$$

где ρ – плотность металла, кг/м³; b – ширина полосы, м.

3. Требуемую степень деформации полосы ϵ , которая зависит и от скорости v , и от D , т.е. от длины зоны контакта металла с валками $L = D \cdot \sin \frac{\alpha}{2}$.

К дополнительной оценке технологических характеристик процесса

Рассмотрим ряд характеристик процесса в дополнение к приведенным выше оценкам основных технологических параметров α и v .

Оценим характерные параметры процесса БП при следующих исходных данных (рисунок 4): $D = 1000$ мм; $h = 1 - 4$ мм; $b = 1000$ мм; угол мениска $\alpha = 10^\circ - 30^\circ$; ширина мениска $H = h + 2R(1 - \cos \alpha)$, зависящая от его уровня

$$L = D \cdot \sin \frac{\alpha}{2}.$$

Длина зоны пластической деформации полосы $l = R\gamma$ (см. рисунок 2) при $D = 1000$ мм, $\alpha = 30^\circ$ и углах $\gamma = 2^\circ$ и 5° равна:

$\gamma, ^\circ$	$l, \text{ мм}$	$l/L, \%$
2	17,0	6,8
5	42,5	17,0

Скорость выхода полосы v при указанных исходных данных определяли по формуле (9), приняв $k = 0,8 \cdot 10^{-5}$ м²/с и $x_0 = 3,0 \cdot 10^{-3}$ м. Результаты расчетов согласно принятым исходным данным приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Скорости v и v_0 (см. рисунок 4) и возможные колебания уровня мениска расплава ΔL

$\alpha, ^\circ$	10				20				30			
$h, \text{ мм}$	1,0	2,0	3,0	4,0	1,0	2,0	3,0	4,0	1,0	2,0	3,0	4,0
$H, \text{ мм}$	16	17	18	19	61	62	63	64	135	136	137	138
$v, \text{ м/мин}$	19,2	9	5,4	3,6	38,4	17,4	10,8	7,8	57,6	26,4	16,2	11,4
$v_0, \text{ м/мин}$	1,2	1,08	0,9	0,78	0,6	0,558	0,516	0,486	0,42	0,39	0,354	0,33
$\Delta L, \text{ мм}$	2	1,71	1,48	1,29	1,04	0,93	0,85	0,81	0,71	0,65	0,59	0,55
$\Delta L/L, \%$	2,3	1,96	1,71	1,49	0,61	0,54	0,5	0,47	0,28	0,26	0,24	0,22

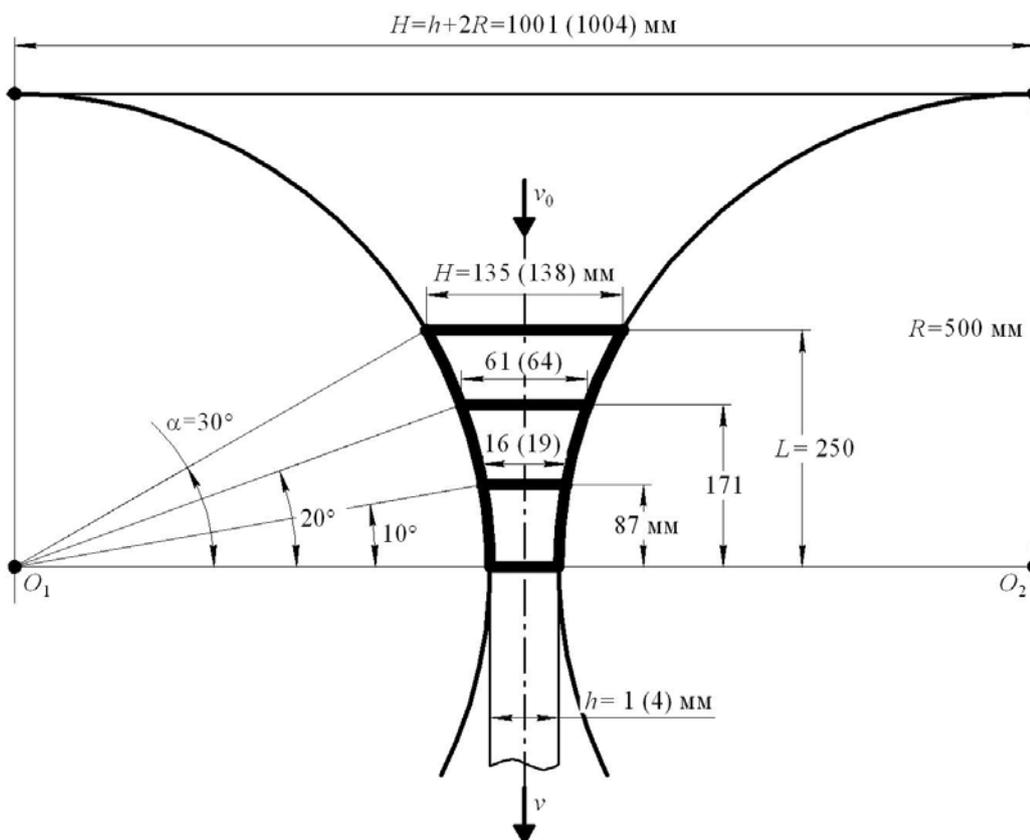


Рисунок 4 – Геометрические характеристики ОКД для стальной полосы толщиной $h = 1$ мм и 4 мм (в скобках) при $D = 1000$ мм (без учета упругой деформации рабочей клетки ВЛПА)

Согласно данным таблицы 1 и рисунка 4, время прохождения металлом всей дуги контакта его с валками L , равное $\tau = L/v$, составит:

h , мм	1,0	2,0	3,0	4,0
τ , с	0,27	0,58	0,95	1,35

Значения τ не зависят от угла α : с увеличением α одновременно прямо пропорционально увеличиваются и L и v .

Скорость деформации при $D = 1000$ мм и $\varepsilon = 20...50\%$ составит $\dot{\varepsilon} = (5...10)\text{с}^{-1}$ при $v = 100$ м/мин.

Из условия постоянства расхода металла в любом сечении ОКД в единицу времени: $\rho \cdot b \cdot h \cdot v = \rho' \cdot b \cdot H \cdot v_0$ (где ρ и ρ' – плотность твердого и жидкого металла) определили скорость металла на мениске $v_0 = v \cdot \frac{h}{H} \cdot \frac{\rho}{\rho'}$.

В таблице 1 приведены результаты расчета скоростей v и v_0 (условно принято $\rho = \rho'$). Из приведенного соотношения можно оценить влияние случайных колебаний v и v_0 друг на друга.

Помимо этого, важна оценка возможных колебаний уровня мениска L . Были проведены (для принятых исходных данных) расчеты при дополнительном быстром введении в межвалковую зону объема расплава, составляющего 10% от Q (см. таблицу 1). Представленные данные свидетельствуют о том, что при $\alpha = 20 - 30^\circ$ колебания уровня мениска ΔL в несколько раз меньше, чем при $\alpha = 10^\circ$.

В отношении независимости процесса БП от колебаний уровня мениска жидкого металла предпочтительнее схема ВЛПА с горизонтальной (или боковой) подачей расплава, которую широко применяют при производстве полос из алюминия и цинка.

О явлении налипания металла на валки

При горячей и холодной прокатке хорошо известно явление налипания (наваривания) частиц прокатываемого металла на валки. Особого внимания заслуживает это явление применительно к процессу БП, когда имеют дело с дорогостоящими валками, поверхность которых приходится постоянно зачищать, и с необходимостью выпуска из ВЛПА тонкой полосы с заданной шероховатостью поверхности.

В диссертации проанализированы возможные схемы локального удаления с поверхности полосы фрагментов металла цилиндрической и конической формы. Получены расчетные зависимости, характеризующие условия, при которых происходит «вырывание» этих фрагментов из поверхностного слоя полосы.

Предотвращению локального приваривания частиц металла к валку и улучшению качества поверхности полосы могут способствовать следующие мероприятия:

- разработка эффективных конструкций ВК и систем их охлаждения, не допускающих нагрева поверхности валков свыше 200 – 250 °С;
- применение эффективных смазок и усовершенствование систем смазки поверхностей валков;
- применение валков с небольшой встречной конусностью, чем обеспечивается скольжение валков относительно полосы в тангенциальном направлении с разрушением локальных участков сварки путем среза.

2 Анализ особенностей сопротивления деформации и уширения стальных полос

Особенности изменения сопротивления деформации стали в процессе БП

Сопротивление деформации σ при горячей прокатке полос часто определяют как функцию температуры металла t , его степени деформации $\varepsilon = \ln(h_0/h_1)$ и скорости деформации $\dot{\varepsilon} = v\varepsilon/l$. Можно использовать известные (К. Инуйе, М.Я. Бровман и др.) формулы типа:

$$\sigma = \sigma_0 \varepsilon^{n_1} (\dot{\varepsilon})^{n_2} \exp(-n_3 t), \quad (12)$$

где σ_0 , n_1 , n_2 , n_3 – величины для данного металла или сплава постоянные.

В формуле (12) величина σ_0 это – сопротивление деформации при базовых (постоянных) условиях испытания.

Термомеханические характеристики процесса БП ε , $\dot{\varepsilon}$ и t к определению σ будут следующими:

$$\text{– степень деформации } \varepsilon = \ln \frac{h_0}{h} = \ln \left[1 + \frac{R}{h} \sin^2 \gamma \right]; \quad (13)$$

$$- \text{ скорость деформации } \dot{\varepsilon} = \frac{v}{R \sin \gamma} \ln \left[1 + \frac{R}{h} \sin^2 \gamma \right]; \quad (14)$$

– температура t , которую в случае тонкой полосы принимают усредненной по ее толщине.

При стационарном режиме и параболическом распределении температуры по толщине полосы максимальная величина теплового потока:

$$q = \frac{4\lambda\Delta t}{h}, \quad (15)$$

где λ – коэффициент теплопроводности; $\Delta t = t_{\text{ц}} - t_{\text{п}}$, здесь $t_{\text{ц}}$ и $t_{\text{п}}$ – соответственно температура центра и поверхности полосы толщиной h .

Тогда, при $q = (2 \div 6) \cdot 10^6$ Вт/м²; $\lambda = 30$ Вт/м·гр и $h = 4 \cdot 10^{-3}$ м перепад температуры Δt по толщине полосы согласно формуле (15), будет равен $\Delta t = qh / 4\lambda = 67 \div 200$ °С.

Если принять, что температура поверхности полосы равна $t_{\text{п}} = 1050 \div 1200$ °С (как обычно у стальных непрерывнолитых слябов), то температура центральных слоев полосы в этом случае будет равной $t_{\text{ц}} = 1117 \div 1400$ °С, т.е. средняя температура $t_{\text{ср}} = 1260$ °С. После завершения затвердевания тонкой полосы происходит быстрое изменение распределения температуры, и максимальный перепад температуры по ее толщине может уменьшиться до 100 °С; в этом случае усредненную величину σ можно определять при $t_{\text{ср}} = 1200$ °С.

Для оценки особенностей изменения σ в условиях БП были проведены эксперименты по одноосному растяжению образцов при высоких температурах; при этом цилиндрические образцы вырезали из слитка, полученного полунепрерывным литьем.

На рисунке 5 приведены графики функций $\sigma(\varepsilon)$ для стали 45. Видно, что за исключением небольшого начального участка (при $\varepsilon < 0,015\%$) упрочнения нет, и величина $\sigma(\varepsilon)$ не зависит от ε , но сильно зависит от скорости деформации $\dot{\varepsilon}$.

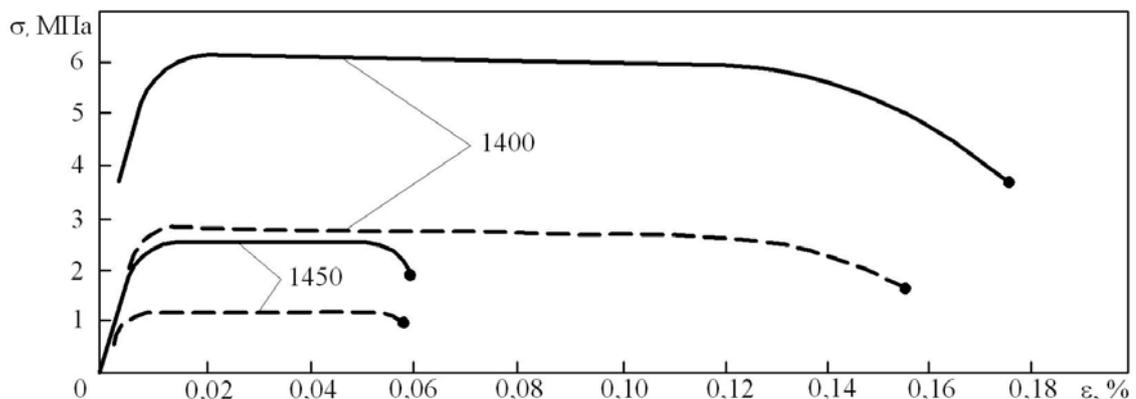


Рисунок 5 – Экспериментальные кривые $\sigma(\varepsilon)$ для стали 45 при $\dot{\varepsilon} = 4,16 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ (сплошные линии) и $\dot{\varepsilon} = 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ (пунктирные); цифры у кривых – температура t °С

М.Я. Бровманом было показано, что в области высоких температур, близких к температуре плавления, зависимость σ от скорости деформации, т.е. $\sigma(\dot{\varepsilon})$ близка к линейной, когда $\sigma = C\dot{\varepsilon}$.

Сравнивая величины σ при одинаковых степенях деформации и различных скоростях деформации, т.е. $\sigma_1 = C(\dot{\varepsilon})_1^{n_2}$ и $\sigma_2 = C(\dot{\varepsilon})_2^{n_2}$, получим $\sigma_1 / \sigma_2 = (\dot{\varepsilon}_1 / \dot{\varepsilon}_2)^{n_2}$. Отсюда можно определить величину n_2 :

$$n_2 = \lg(\sigma_1 / \sigma_2) / [\lg(\dot{\varepsilon}_1 / \dot{\varepsilon}_2)]^{-1}, \quad (16)$$

характеризующую зависимость сопротивления деформации от скорости деформации.

На рисунке 6 приведен график функции $n_2(t)$, дающий представление о зависимости σ углеродистой стали от $\dot{\varepsilon}$ при высоких температурах; точки получены по формуле (16), на основании проведенных опытов. По этим экспериментальным данным получена эмпирическая формула, удовлетворительно описывающая функцию $n_2(t)$:

$$n_2 = 0,14 + 3,7 \cdot 10^7 \left(\frac{t - 1000}{t_{\text{пл}}} \right)^{16}, \quad (17)$$

где $t_{\text{пл}}$ – температура плавления металла.

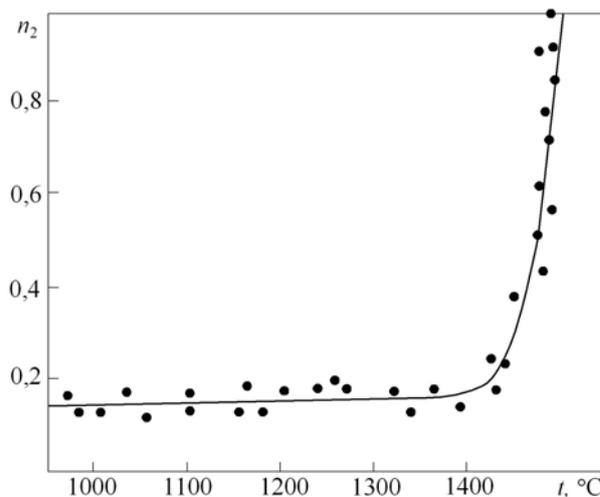


Рисунок 6 – График функции $n_2(t)$; точки получены по экспериментальным данным; линия – аппроксимация функции по формуле (17)

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в диапазоне $t = 900 - 1400$ °C можно принимать $n_2 = \text{const} = 0,14$, как это обычно принимают для большинства сталей. Только в области температур, близких к температуре затвердевания, т.е. при $t > 1400$ °C, происходит резкое и быстрое увеличение n_2 вплоть до величины $n_2 = 1,0$.

При $n_2 = 1,0$ и $\dot{\varepsilon} = (5 - 10) \text{c}^{-1}$ составляющая $(\dot{\varepsilon})^{n_2}$ в формуле (12) в 4 – 7 раз меньше, чем при $n_2 = 0,14$.

С увеличением скоростей БП температура центральных слоев деформируемой полосы повышается и может превысить 1400 °C.

Для расчета сопротивления деформации углеродистых сталей при $t > 1400$ °C и $\dot{\varepsilon} \leq (10^{-4} \div 10^{-5}) \text{c}^{-1}$ можно предложить соотношение:

$$\sigma \approx (3,0 \div 3,5) \cdot 10^{14} \exp(-1,54 \cdot 10^{-2} t) \dot{\varepsilon}, \text{ МПа}. \quad (18)$$

В то же время для металла на поверхности полосы (при $t = 1000 - 1200$ °C) целесообразно применять обычные формулы $\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, t)$ типа (12) для углеродистой стали.

Анализ влияния $\dot{\epsilon}$ на сопротивление деформации других сталей может быть также проведен с использованием изложенной методики.

Особенности уширения стальной полосы

Уширение полос при БП имеет специфические особенности и при неправильном его учете может нарушить процесс литья-прокатки. Несмотря на большое число исследований, посвященных процессу БП цветных металлов, уширению полос уделено мало внимания и имеются лишь отдельные указания на это явление. Исключение составляют экспериментальные исследования уширения полосы из цинкового сплава, проведенные Р.Л. Шаталовым, А.М. Кацем, М.В. Кудиным и др. на Московском заводе ОЦМ. На наличие уширения при БП стальных полос указывает О.А. Тимохин.

Уширение полосы при БП начинает развиваться с сечения ОКД, где завершается кристаллизация слитка и начинается его обжатие валками, т.е. ниже плоскости, проходящей через точку C – точку, где заканчивается лунка жидкой фазы (см. рисунок 2).

Уширение приводит к давлению на торцевую плиту и действует на участке прокатки протяженностью l , где торцевая плита препятствует свободному уширению полосы. Такое давление может сыграть отрицательную роль при реализации процесса, поскольку возможно «отжатие» огнеупорной плиты, что приведет к возникновению зазоров между плитой и торцевыми поверхностями валков, к попаданию жидкого металла в эти зазоры и к возникновению дефектов полосы.

Для уменьшения отрицательного влияния уширения следует рекомендовать выполнение торцевых плит составными по их высоте: верхняя часть плиты контактирует с расплавом, а нижняя – с кромками полосы в зоне уширения, т.е. ниже точки C (см. рисунок 2). Можно торцевые плиты профилировать так, чтобы после деформации и уширения полосы ее боковые грани (кромки) были плоскими.

В настоящее время на ВЛПА для «компенсации» уширения полосы в сплошных торцевых плитах делают скосы в зоне уширения. Составные торцевые плиты по сравнению со сплошными имеют, по крайней мере, два очевидных преимущества:

1 - верхняя и нижняя части составной плиты могут быть изготовлены из материалов, существенно разных по эксплуатационным свойствам и стоимости;

2 - возможна отдельная замена верхней и нижней частей составной плиты в случае, когда их стойкость будет существенно отличаться.

Подобные конструктивные решения важны, если иметь в виду, что в затратах на производство полосы (по проекту Eurostrip) доля затрат на плиты составляет 21%, а на ВК – 19%.

Для приближенной оценки уширения тонкой стальной полосы в процессе БП была получена формула (на основе решения М.Я. Бровмана):

$$\Delta b = b_0 z \ln \frac{h_0}{h}, \quad (19)$$

где Δb – абсолютное уширение ($\Delta b = b - b_0$; b и b_0 – соответственно конечная и исходная ширина полосы); h_0 – толщина полосы в сечении ОКД, где закончен процесс кристаллизации металла (см. рисунок 2); z – показатель уширения.

При больших отношениях ширины полосы к длине зоны деформации $z = 8 \cdot 10^{-3}$. Тогда формула (19) в окончательном виде:

$$\Delta b = b_0 \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot \ln \frac{h_0}{h}. \quad (20)$$

Например, при $h = 4 \cdot 10^{-3}$ м, $h_0 = 8 \cdot 10^{-3}$ м и $b_0 = 1$ м абсолютное уширение $\Delta b = 1 \cdot 8 \cdot 10^{-3} \ln(8/4) = 5,5 \cdot 10^{-3}$ м, т.е. 5 мм или 0,5% от b_0 .

Относительное уширение полосы β_y :

$$\beta_y = \Delta b / b_0 = 0,8 \ln(h_0 / h), \%. \quad (21)$$

Результаты расчетов по формуле (20) хорошо согласуются с экспериментальными данными М.М. Сафьяна, Ю.В. Коновалова и др., полученными при горячей прокатке тонких стальных полос ($b_0 \geq 1000$ мм) на широкополосовых станах.

К расчету энергосиловых параметров процесса БП стальной полосы

На основе решений, полученных в диссертации, предложена методика расчета энергосиловых параметров при пластической деформации стальной полосы в процессе БП. Приведенные формулы для расчета энергосиловых параметров содержат взаимосвязанные величины α , γ , σ и ν , которые относятся как к жидкой, так и к твердой фазам металла в ОКД и определяют эффективность осуществления совмещенного процесса кристаллизации-деформации, его производительность и качество полосы.

3 Повышение эффективности охлаждения ВК и улучшение условий их эксплуатации

Разработки, направленные на повышение эффективности охлаждения валков-кристаллизаторов необходимы для обеспечения высокопроизводительного процесса БП, расширения марочного и размерного сортамента агрегатов, а также для достижения высокой стойкости бандажей ВК.

Из решения стационарного уравнения теплопроводности получили оценки распределения по толщине бандажа температур и напряжений при внутреннем охлаждении бандажей разной толщины. В частности, определили максимальную температуру t_{\max} на поверхности вала в контакте с металлом:

$$t_{\max} = \frac{2q_{\max} R}{\lambda} \frac{(A^2 - 1) \ln A}{[A^2 - 1 + (A^2 + 1) \ln A]}, \quad (22)$$

где q_{\max} – максимальная величина теплового потока, действующего на валок, Вт/м²; R – внешний радиус бандажа, м; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·град; $A = R/r_0$ (r_0 – внутренний радиус бандажа, м).

Для тонкостенных бандажей, когда $h_6 \ll R$ и $A \approx 1 + \frac{h_6}{R}$ (где $h_6 = (R - r_0)$ – толщина бандажа), можно принять $A^2 \approx 1 + \frac{2h_6}{R}$; $\ln A \approx \frac{h_6}{R}$ и тогда

$$t_{\max} \approx \frac{q_{\max} h_6}{\lambda}. \quad (23)$$

Из работ А.Н. Шичкова, В.Н. Хлопонина, Э.А. Гарбера и др. известно, что охлаждением внешней поверхности валка можно значительно влиять на среднюю температуру валка и его минимальную температуру; однако на участке непосредственного контакта валка с горячим металлом влиять на t_{\max} интенсивностью охлаждения внешней поверхности валков практически невозможно. Формулы, полученные в диссертации, позволяют рассчитать параметры температурного режима валков с внутренним охлаждением и определить условия, при которых исключаются термические напряжения, приводящие к пластическим деформациям поверхностных слоев валков и термическим трещинам.

При быстром нагреве поверхностного слоя бандажа и при $\Delta t = t_{\max} - t_{\min}$ термические напряжения в бандаже равны: $\sigma_{\text{терм}} = E a_p \Delta t$, где t_{\min} – температура на внутренней поверхности (радиусом r_0) бандажа; E – модуль упругости материала бандажа; a_p – температурный коэффициент термического расширения. При этом необходимо соблюдение условия $\sigma_{\text{терм}} \leq \sigma_T / n$, где σ_T – предел текучести материала бандажа при его рабочей температуре; $n = 1,4$ – коэффициент запаса прочности по термическим напряжениям.

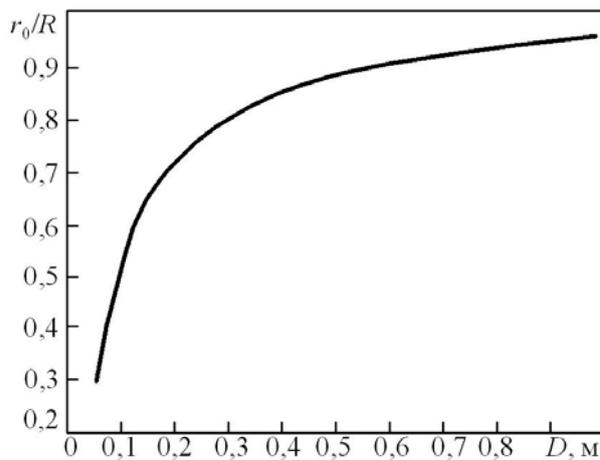


Рисунок 7 – Допустимые величины r_0/R при разных наружных диаметрах D валков, исключающие пластические деформации при одностороннем нагреве и $q_{\max} = 1 \text{ МВт/м}^2$

Для выполнения этого условия, например, при $\sigma_T = 240 \text{ МПа}$; $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ и $a_p = 10^{-5} \text{ град}^{-1}$ необходимо, чтобы максимальный перепад температуры по толщине бандажа Δt не превышал 120°C . На рисунке 7 приведены величины $A^{-1} = r_0/R$, при которых $t_{\max} = 120^\circ\text{C}$.

Уменьшить t_{\max} и обеспечить допустимый перепад Δt можно только интенсивным внутренним охлаждением, но для того, чтобы оно было эффективным, необходимо, чтобы внутренний радиус бандажа r_0 был бы

близок к R , т.е. для уменьшения t_{\max} поверхность охлаждения следует приблизить к поверхности нагрева.

В отличие от ВК с подачей воды в каналы на поверхности оси, была разработана конструкция ВК с максимальным приближением охладителя к поверхности контакта вала с металлом (патент РФ № 2315682).

Такой валок (рисунок 8) имеет сплошную ось 1 и бандаж 2 с каналами в виде тонкостенных труб 3 для подачи охладителя. Трубы вморожены в бандаж на части их длины и соединены по концам с коллекторами (в виде полых колец) 4 и 5 , расположенными по краям бандажа. Коллекторы позволяют по-разному соединять трубы друг с другом, а сами трубы могут быть круглого или овального сечения, гладкие или с рифлением на их внутренней поверхности.

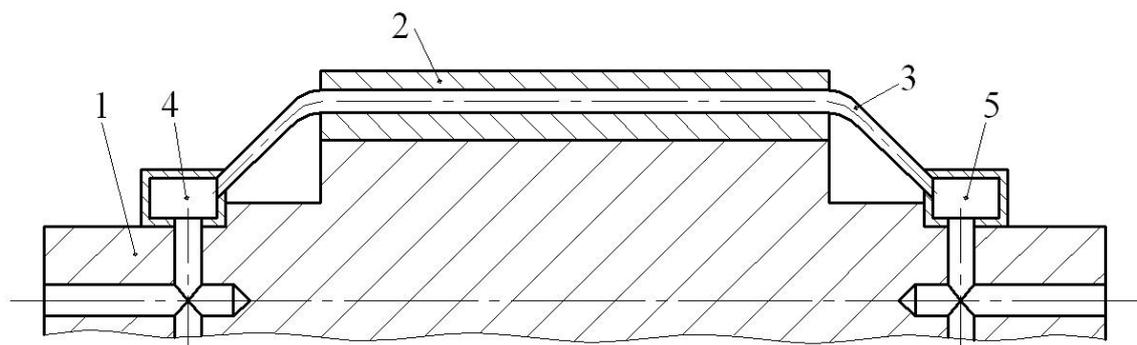


Рисунок 8 – Продольное сечение ВК с бандажом, в который вморожены тонкостенные трубы

Другие преимущества предложенной конструкции:

- высокая жесткость ВК, поскольку отпадает необходимость сверления осевого канала, проходящего через все тело вала;
- надежная посадка бандажа: посадочная поверхность оси гладкая (нет каналов на поверхности оси, которые значительно уменьшают площадь посадочной поверхности);
- исключены протечки охладителя, которые иногда наблюдаются в обычных конструкциях ВК из-за ослабления посадки на краях бандажа;
- валок технологичнее в изготовлении и дешевле, чем в случае использования бандажа со сверленными отверстиями.

В известных конструкциях ВК система внутреннего охлаждения обеспечивает равномерное распределение охладителя по всему периметру бандажа. В то же время внешний нагрев со стороны полосы воздействует, в основном, только на малый участок поверхности ВК, соответствующий углу $20 - 30^\circ$, т.е. является существенно асимметричным.

Была разработана конструкция ВК (рисунок 9), которая обеспечивает преимущественное охлаждение именно той части поверхности вала, которая подвергается интенсивному нагреву от металла (патент РФ № 2310546). При этом может быть обеспечено равномерное температурное поле в валке, независимо от того вращается он или нет (в аварийной ситуации).

На оси 1 вала закреплен бандаж 2 с вмороженными в него трубами 3 , которые соединены между собой коллектором 4 (согласно патенту РФ

№ 2315682). В осевом канале валка, служащим для подачи охладителя, установлен на оправке 6 эксцентрик 5 с уплотнением на его поверхности (рисунок 9). Эксцентрик 5 позволяет закрыть часть радиальных каналов 8 – 11 для подачи охладителя к бандажу 2 и обеспечивает преимущественную его подачу именно к той части поверхности валка, которая подвергается усиленному нагреву.

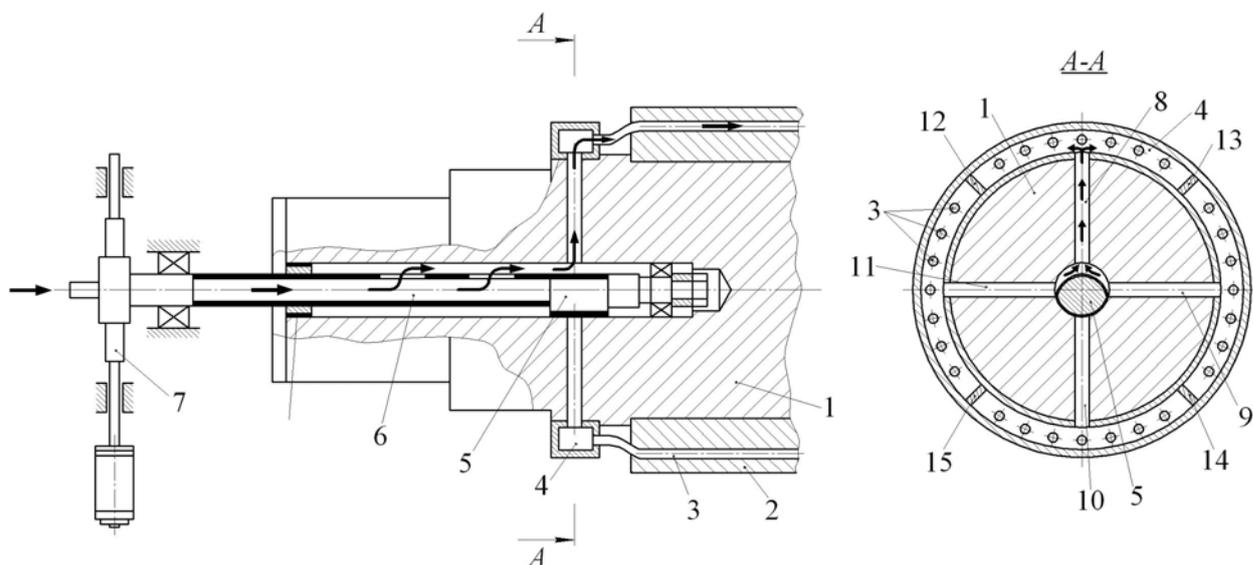


Рисунок 9 – Валок-кристаллизатор с устройством для асимметричного охлаждения по окружности бочки

Как показано на рисунке 9, эксцентрик 5 полностью перекрывает подачу воды в радиальный канал 10 и допускает поступление только незначительного количества воды в радиальные каналы 9 и 11; основная часть охладителя поступает в радиальный канал 8. Поскольку полость коллектора 4 разделена стенками 12 – 15 на четыре части, соответственно углам 90°, то канал 8 обеспечивает подачу охладителя только в семь труб и эффективное охлаждение только одной четверти поверхности валка. Валок вращается, но эксцентрик 5 на оправке 6 остается неподвижным и все время перекрывает полностью или частично доступ охладителя к тем участкам поверхности ВК, которые не подвергаются сильному нагреву. При необходимости оправку с эксцентриком можно повернуть с помощью реечного устройства 7.

В отличие от известных конструкций ВК, в которых, как бы ни увеличивали расход охладителя, одновременно усиливают охлаждение не только нагретых участков бандажа, но и холодных (что не нужно и только увеличивает термические напряжения и усиливает изгиб валка), разработанная конструкция позволяет эффективно охлаждать именно тот участок валка, который нагрет до более высокой температуры.

При любой конструкции ВК повышенная эффективность их охлаждения (см., например, формулы (22) и (23)) будет достигнута при изготовлении бандажей из высокотеплопроводных хромовых бронз, разработанных А.К. Николаевым (ОАО «Институт Цветметобработка») для теплообменников различного типа.

Следует также отметить, что любая система охлаждения валков будет неэффективной при образовании на поверхностях охлаждающих каналов слоя солей (накипи). Этот слой может значительно (в 1,5 – 2,0 раза и более) уменьшить тепловой поток и увеличить нагрев валка. Поэтому для охлаждения дорогостоящих и сложных по конструкции ВК необходимо использовать замкнутую систему охлаждения с циркуляцией через валки постоянного объема воды, предварительно подвергнутой химической обработке для удаления солей.

4 Технология БП стальных полос как основа создания мини-завода

Преимущества современных металлургических мини-заводов (ММЗ) листового профиля по капиталовложениям и затратам энергии, экологической чистоте и технологической гибкости производства заметно усиливаются в случае применения технологии БП и компактных ВЛПА.

Успешное применение технологии БП стальных полос и соответствующего оборудования требует разносторонней их оценки, в том числе, производительности ВЛПА и затрат на создание производства необходимой мощности.

В диссертации рассмотрен ряд ситуаций, когда необходимо обеспечить заданную годовую производительность мини-завода $G_{\text{год}}$.

Пусть при проектировании ММЗ необходимо обеспечить получение полосы с поперечным сечением $h \times b$ с годовой производительностью $G_{\text{год}}$, а один ВЛПА обеспечивает, согласно формуле (11), годовую производительность, равную $G \cdot \tau_{\text{год}}$, где $\tau_{\text{год}}$ – число рабочих часов в году. Тогда необходимое число агрегатов n будет определено соотношением:

$$n = \frac{G_{\text{год}}}{G \cdot \tau_{\text{год}}} . \quad (24)$$

Понятно, что следует принимать число агрегатов n целым (округляя до целого числа полученную расчетную величину).

Для оценки затрат на создание и эксплуатацию ММЗ надо для предварительной оценки, разделить затраты на составляющие: C_1 – стоимость механического оборудования; C_2 – стоимость электрического оборудования и систем автоматики; C_3 – стоимость работ по строительству, включая затраты на очистные сооружения и природоохранные мероприятия; C_4 – стоимость обслуживания и ремонта оборудования завода.

Эти составляющие $C_i (i = 1 \dots 4)$ представлены в виде определенных функций диаметра D , т.е. $C = C_1(D) + C_2(D) + C_3(D) + C_4(D)$ при условии обеспечения заданной производительности

$$G_{\text{год}} = \sum_{i=1}^n G_i D_i , \quad (25)$$

где $G_i = \frac{1,332 \cdot \rho \cdot b \cdot k \cdot \tau_{\text{год}}}{0,25h + x_0}$, т/метр диаметра валка – годовая производительность агрегата при $D = 1$ м.

В диссертации приведены приближенные зависимости для определения $C_i (i = 1 \dots 4)$ в виде $C_i = a_i D_i^{n_i}$.

Надо иметь ввиду, что с увеличением диаметра валков стоимость самого двухвалкового агрегата (без учета стоимости других агрегатов в технологической линии) может резко возрасти (показатели n_1 и n_2 ориентировочно составляют: $n_1 = 1,5 - 2,8$ и $n_2 = 2,5 - 3,1$).

В целом технология бесслитковой прокатки стальных полос в валковых агрегатах может стать эффективным дополнением к традиционной технологии, не конкурируя с ней, и может стать основой создания мини-заводов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана комплексная методика расчета основных параметров процесса пластической деформации стальной полосы при бесслитковой прокатке, которая отличается учетом зависимости длины зоны пластической деформации от скорости прокатки.

На основе разработанной методики определены эффективные технологические параметры процесса БП, обеспечивающие устойчивость процесса, заданную производительность ВЛПА и высокое качество готовой продукции.

2. Анализ скоростного режима процесса показал, что с учетом возможных отклонений (утонений) толщины корки полосы от номинальной (до 30%) следует ориентироваться на скорость полосы, обеспечивающую необходимый запас длины зоны пластической деформации с тем, чтобы она не могла уменьшаться до нуля.

3. Показано, что длина зоны деформации в пределах $\gamma = 2 - 5^\circ$ (γ – угол, характеризующий сечение ОКД, в котором начинается обжатие полосы) позволяет обеспечить пластическую деформацию требуемой величины ($\varepsilon = 20 - 30\%$) при $D = 500 - 1500$ мм для полос толщиной 1 – 4 мм.

4. Установлено, что основными технологическими параметрами к выбору диаметра валков являются угол, характеризующий уровень мениска жидкого металла и скорость полосы. Выбор эффективных значений этих параметров обеспечит успешную реализацию процесса БП при любых диаметрах валков.

При выборе диаметра ВК для конкретного ВЛПА необходимо учитывать не только угол α и скорость полосы v , но и производительность агрегата и требуемую степень деформации полосы ε .

5. Величина сопротивления деформации металла σ при бесслитковой прокатке зависит от соотношения протяженности зон кристаллизации и пластической деформации полосы, причем с повышением скорости БП возрастает и температура металла. С повышением температуры углеродистой стали и с приближением ее к температуре плавления резко усиливается зависимость сопротивления деформации от скорости деформации.

6. Расчеты энергосиловых параметров при БП и обычной горячей прокатке тонких полос отличаются принципиально: в случае БП расчетные формулы содержат ряд взаимосвязанных величин (α , γ , σ , ν), которые по своей сути определяют саму возможность осуществления совмещенного процесса кристаллизации-деформации, его эффективность и качество полосы.

7. Анализ уширения при БП стальной полосы приводит к выводу о том, что торцевые плиты следует изготавливать составными по высоте; при этом части плиты должны быть изготовлены из разных материалов и иметь разные усилия поджатия к торцам валков.

8. Проведен анализ процесса деформации стальной полосы при налипании металла на валки. Разработана расчетная методика и предложены мероприятия, направленные на повышение качества поверхности стальной полосы.

9. Показано, что внутреннее охлаждение ВК может значительно уменьшить перепад температур по толщине банджа, но только в том случае, когда охлаждаемая поверхность близка к нагреваемой.

Разработана конструкция валка-кристаллизатора с максимальным приближением охладителя к поверхности контакта валка с полосой, обладающая преимуществами по сравнению с известными конструкциями (патент РФ № 2315682).

10. Разработана конструкция ВК с асимметричным охлаждением по окружности бочки, позволяющая повысить долговечность ВК и уменьшить термические напряжения в бандже (патент РФ № 2310546) за счет преимущественного охлаждения той части поверхности валка, которая подвергается интенсивному нагреву.

11. Применительно к созданию мини-завода проанализировано влияние диаметра валков-кристаллизаторов на производительность ВЛПА и предложена методика приближенной оценки затрат на изготовление агрегатов с валками разных диаметров.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ:

1. Николаев, В.Ал. Особенности и некоторые проблемы литейно-прокатных агрегатов с валковыми кристаллизаторами [Текст] / В.Ал. Николаев // *Металлургия XXI века. Труды первой международной конференции молодых специалистов.* – М.: ВНИИМЕТМАШ им. акад. А.И. Целикова, 2005. С. 130 – 135.

2. Бровман, М.Я. О повышении качества поверхности полосы при прокатке в валковых совмещенных агрегатах [Текст] / М.Я. Бровман, В.Ал. Николаев // *Производство проката.* 2006. № 5. С. 9 – 14. (авт. – 3 стр.)

3. Бровман, М.Я. Процесс формирования полосы и основы расчета технологических режимов валковых ЛПА [Текст] / М.Я. Бровман, В.Ал. Николаев // В кн.: *Медь. Латунь. Бронза. Уч. пос. для вузов.* Под общей ред. Ю.Н. Райкова. – М.: ОАО «Институт Цветметобработка», 2006. С. 319 – 331. (авт. – 7 стр.)

4. Бровман, М.Я. Возможности валковых литейно-прокатных агрегатов при создании мини-заводов [Текст] / М. Бровман, В. Полухин, В. Николаев // Национальная металлургия. 2006. №5 (сентябрь – октябрь). С. 37 – 41. (авт. – 2 стр.)

5. Бровман, М.Я. Протяженность зоны пластической деформации и допустимая скорость при бесслитковой прокатке [Текст] / М.Я. Бровман, В.Ал. Николаев, В.П. Полухин // Металлы. 2007. № 1. С. 44 – 49. (авт. – 2 стр.)

6. Николаев, В.Ал. Некоторые особенности процесса бесслитковой прокатки стальных полос [Текст] / В.Ал. Николаев // Производство проката. 2007. № 5. С. 11 – 13.

7. Бровман, М.Я. Анализ температурного режима и повышение эффективности охлаждения валков и роликов [Текст] / М.Я. Бровман, В.Ал. Николаев, В.П. Полухин // Производство проката. 2007. №7. С. 36 – 43. (авт. – 3 стр.)

8. Бровман, М.Я. Технологические основы и критерии выбора диаметра валков-кристаллизаторов при бесслитковой прокатке [Текст] / М.Я. Бровман, В.Ал. Николаев // Производство проката. 2007. №11. С. 2 – 6. (авт. – 3 стр.)

9. Бровман, М.Я. Сопротивление пластической деформации стали в процессе валковой бесслитковой прокатки [Текст] / М.Я. Бровман, В.Ал. Николаев, В.П. Полухин // Металлы. 2007. №4. С. 33 – 40. (авт. – 3 стр.)

10. Николаев, В.Ал. Элементы теории бесслитковой прокатки стальных полос [Текст] / В.Ал. Николаев // «Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов». Труды международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург: СПбГПУ, 2007. С. 108 – 113.

11. Бровман, М.Я. Определение производительности валковых ЛПА и затрат на их изготовление для новых мини-заводов [Текст] / М.Я. Бровман, В.Ал. Николаев // Производство проката. 2008. №1. С. 39 – 43. (авт. – 3 стр.)

ОРИГИНАЛЬНЫЕ РАЗРАБОТКИ ЗАЩИЩЕНЫ ПАТЕНТАМИ:

1. Валок установок непрерывного литья металлов [Текст]: пат. 2310546 Рос. Федерация: МПК В22D 11/124 / Бровман М.Я., Николаев В.Ал., Полухин В.П. – 2006117128/02; заявл. 19.05.2006; опубл. 20.11.2007, Бюл. №32. – 6 с: ил.

2. Валок-кристаллизатор установок непрерывного литья-прокатки металлов [Текст]: пат. 2315682 Рос. Федерация: МПК В22D 11/06 / Бровман М.Я., Николаев В.Ал., Полухин В.П. – 2006114603/02; заявл. 02.05.2006; опубл. 27.01.2007, Бюл. №3. – 10 с: ил.