

На правах рукописи.

ЗИСЕЛЬМАН ВИТАЛИЙ ЛЬВОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ И УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ПРОИЗВОДСТВА ЛЕНТ ИЗ БЕРИЛЛИЕВОЙ БРОНЗЫ,  
ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОКАТА

Специальность 05.16.05 - “Обработка металлов давлением”

Автореферат  
диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук.

Москва – 2006

Работа выполнена в ОАО «Московский завод по обработке цветных металлов» (МЗ ОЦМ).

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Кобелев Анатолий Германович,  
кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
Гуляев Анатолий Сергеевич

Ведущая организация:

Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН

Защита диссертации состоится «23»ноября 2006г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 217.038.01 в ОАО «Институт Цветметобработка» по адресу: 119017, г.Москва, Пыжевский пер., 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан «16» октября 2006 г.

Справки по телефону: 951-67-54.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат технических наук

Э.Н.Калмыкова.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие электротехники и электроники постоянно увеличивает спрос на листовой металлопрокат с хорошей электро- и теплопроводностью, высокой упругостью и коррозионной стойкостью. Комплексу этих требований отвечает плоский прокат из бериллиевых бронз, к качеству которого предъявляются все более высокие требования, включая расширение гаммы механических свойств. Решающее влияние на качество и формирования комплекса свойств лент, производимых из бериллиевых бронз, оказывают температурно-деформационные и скоростные условия прокатки, а также режимы термообработки.

В настоящее время практически не изучены зависимость пластичности бериллиевых бронз от основных технологических параметров в достаточно широком интервале их изменения, закономерности формирования механических свойств при различных режимах термомеханической обработки, что затрудняет создание рациональных технологий и совершенствование режимов прокатки. Требуют более глубокого изучения вопросы формирования размеров прокатываемой ленты в условиях действующего оборудования, что предопределяет обоснованность управляющих воздействий на толщину проката.

В связи с этим изучение закономерностей прокатки лент из бериллиевых бронз с учётом особенностей горячей и холодной деформации, а также термообработки, разработка методов расчёта и управления параметрами термомеханической обработки с учётом действующего оборудования, усовершенствование элементов оборудования и создание новой технологии, имеют важное научное и практическое значение. Разработка на их основе научно обоснованных технических и технологических решений в области прокатки и термообработки лент из

бериллиевых бронз и их внедрение в производство представляет собой актуальную задачу.

Цель работы. Совершенствование процессов горячей и холодной прокатки и термообработки лент из бериллиевых бронз на основе новых теоретических и технологических решений, направленных на улучшение качества готового проката и освоение новых видов продукции.

Для достижения указанной цели в работе были поставлены и решены следующие задачи:

- исследование сопротивления горячей пластической деформации материала в широком интервале изменения основных технологических параметров и получение количественной модели;
- изучение зависимости предельной пластичности бериллиевой бронзы от условий деформации и разработка рациональных режимов горячей прокатки с учётом ресурса пластичности материала ;
- исследование основных закономерностей формирования продольной разнотолщинности прокатываемых на стане лент и определение количественной связи основных технологических воздействий с точностью лент по толщине;
- изучение основных закономерностей формирования механических свойств лент при старении и разработка рациональных режимов термообработки;
- анализ показателей качества лент при различных технологиях производства.

Научная новизна. 1. Установлены основные закономерности изменения пластичности и сопротивления деформации бериллиевой бронзы применительно к температурно- скоростным условиям прокатки, а так же получены уравнения для расчёта  $\sigma_s$  и  $\Lambda_p$  в зависимости от истинной деформации, температуры и скорости деформации.

2. С использованием пластометрических исследований при дробном нагружении определена закономерность изменения сопротивления

деформации исследуемого сплава при сложных законах развития горячей деформации во времени. Найдена благоприятная область деформируемости сплава БрБ2 при температурах 750-550 °С и скоростях деформации 0,1-10 с<sup>-1</sup>.

3. Получили дальнейшее развитие методы определения разнотолщинности полос, позволившие установить количественные зависимости продольной разнотолщинности ленты БрБ2 от возмущающих и управляющих воздействий.

4. Выявлены основные закономерности изменения механических свойств бериллиевой бронзы при термообработке и определены зависимости свойств лент от температуры и времени старения при различных исходных состояниях материала, обеспечившие улучшение качества и расширение гаммы механических свойств готового проката.

Практическая значимость работы. Определены рациональные диапазоны изменения параметров комплексной технологии производства холоднокатаных лент из бериллиевой бронзы, включающие: температуру, обжатия и скорости прокатки, температурно-временные параметры искусственного старения лент, обеспечивающие увеличение выхода годного и расширение гаммы механических свойств в соответствии с требованиями потребителей. Результаты экспериментов и расчетов могут быть использованы при совершенствовании режимов прокатки и термообработки, разработке конструкций новых станов и систем автоматического регулирования технологических параметров, обеспечивающих улучшение качества производимых лент из бериллиевых бронз и были применены при проектировании нового завода по производству плоского проката из пружинных сплавов.

Основные результаты экспериментальных и теоретических исследований внедрены на двухвалковом стане 700×1300 ОАО “Московский завод по обработке цветных металлов” в виде температурно-деформационных и скоростных режимов прокатки полосовой заготовки из бериллиевых бронз толщиной 6мм, сокращенного последующего прокатного

передела, режимов искусственного старения лент, что нашло отражение в технологической инструкции ТИ СМК-23/27-6-2003. В результате данной работы на ОАО “МЗ ОЦМ” за счет снижения брака и повышения выхода годного получен значительный экономический эффект.

Апробация работы. Основные материалы работы доложены и обсуждены на: научно-технической конференции “Современные технологии в области производства и обработки цветных металлов”, Металл-Экспо 2004, г. Москва ВВЦ, ноябрь 2004г. ; международной научно-практической конференции “Высокотехнологичное оборудование для металлургической промышленности”, ВНИИМЕТМАШ, г. Москва, 2004 г. ; научной конференции “Теория и практика производства листового проката”, ЛГТУ, г. Липецк, 2005 г. ; научной конференции “Состояние, проблемы и перспективы развития металлургии и обработки металлов давлением”, МГВМИ, г. Москва, апрель 2005г. ; шестом конгрессе прокатчиков, ОАО “НЛМК”, г. Липецк, октябрь 2005 г.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 9 научных статьях и патенте РФ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных итогов и выводов, списка использованной литературы из 87 наименований и трех приложений. Работа изложена на 118 страницах машинописного текста, содержит 17 таблиц и 25 рисунков.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### 1. Состояние вопроса

Изучению пластической деформации бериллиевых бронз посвятили свои работы известные российские и зарубежные ученые: Бутомо Д.Г., Берковский И.Я., Павлов И.М., Губкин С.И., Бородько И.С., Берман С.И., Рахштадт А.Г., Стикней Ф., Рихардс И., Викле Р. и другие. Вместе с тем,

применительно к условиям горячей прокатки полосовой заготовки из бериллиевых бронз, практически не изучены закономерности реологического поведения деформируемого материала. Требуют также своего уточнения методы регулирования продольной разнотолщинности прокатываемых лент и расширения спектра их механических свойств в состоянии поставки потребителю за счет новых режимов старения.

Стабильность механических свойств производимых на МЗ ОЦМ лент из бериллиевых бронз не достаточно высокая. Так до 23% всех лент имеют относительное удлинение  $\delta$  меньше нижнего предела допустимых значений, то есть не соответствуют международному стандарту ASTM B 194. Выход годного по продольной разнотолщинности для лент толщиной 0,15 – 0,30 мм составляет не более 82,6 – 88,8%.

Для совершенствования действующих технологических процессов производства лент из бериллиевых бронз необходимы надежные данные по сопротивлению деформации  $\sigma_s$  и предельный пластичности  $A_p$  в широком интервале температурно-деформационных и скоростных параметров, количественные оценки влияния технологических воздействий и характеристик прокатного оборудования на точность лент по толщине, а также закономерности формирования механических свойств лент при старении.

## 2. Экспериментальные исследования физико-механических свойств и продольной разнотолщинности проката

Как показали результаты пластометрических исследований\* на автоматизированной торсионной пластометрической установке (АТПУ), сопротивление деформации сплава БрБ2 существенно зависит от температуры  $t$ , истинной деформации  $\bar{\epsilon}$  и скорости деформации  $\dot{\epsilon}$  (рис. 1).

При  $t = 450—600$  °С на начальной стадии деформирования, когда

---

\*Исследования выполнены под научным руководством д.т.н. проф. Шаталова Р.Л.

$\bar{\varepsilon} \leq 0,15—0,20$ , наблюдается существенное деформационное упрочнение интенсивность которого с ростом температуры снижается. Особенно заметно деформационное упрочнение при  $\dot{\varepsilon} = 10 \text{ с}^{-1}$ . При этой скорости деформации и  $t = 450 \text{ }^\circ\text{C}$  величина сопротивления деформации достигает уровня  $\sigma_s = 524,9 \text{ МПа}$ . Для кривых течения сплава в координатах « $\sigma_s$ - $\bar{\varepsilon}$ » характерна куполообразная форма с плавным и широким максимумом. Повышение температуры испытания с 600 до 650  $^\circ\text{C}$  приводит к резкому снижению сопротивления деформации (при  $\bar{\varepsilon} = 0,2$ ,  $\Delta\sigma_s = 93—141 \text{ МПа}$ ), что, вероятно, связано с растворением дисперсной фазы в твердом растворе сплава. В интервале температур 650—800  $^\circ\text{C}$  характер кривых течения меняется. При  $t = 650-700 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $\dot{\varepsilon} = 0,1-1,0 \text{ с}^{-1}$  на кривых « $\sigma_s$ - $\bar{\varepsilon}$ » в области  $\bar{\varepsilon} = 0,1-0,2$  появляется ярко выраженный максимум, который связан как с проявлением теплового эффекта пластической деформации (ТЭПД), так и с другими процессами динамического разупрочнения (динамическим возвратом, полигонизацией и динамической рекристаллизацией). При  $t = 750-800 \text{ }^\circ\text{C}$  характер всех кривых течения одинаков - после максимума с ростом  $\bar{\varepsilon}$  наблюдается плавное снижение величины  $\sigma_s$ , что связано с наложением на ТЭПД рекристаллизационного разупрочнения.

Аппроксимация экспериментальных кривых сопротивления деформации (см. рис. 1) позволила получить уравнение для расчета сопротивления деформации бериллиевой бронзы БрБ2:

$$\sigma_s = a_0 \cdot \bar{\varepsilon}^{a_1} \cdot \dot{\varepsilon}^{a_2} \cdot \exp(-a_3 \cdot \bar{\varepsilon}) \cdot \exp(-a_4 \cdot t) + a_5 \cdot \exp(-a_6 \cdot t), \quad (1)$$

где  $\bar{\varepsilon} = \ln(h_0/h_1)$  - истинная деформация;

$\dot{\varepsilon}$  - скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ ;

$t$  — температура,  $^\circ\text{C}$ ;

при  $t = 450-600 \text{ }^\circ\text{C}$   $a_0=2639$ ,  $a_1=0,920$ ,  $a_2=0,204$ ,  $a_3=4,80$ ,  $a_4=0,0011$ ,  
 $a_5=916,02$ ,  $a_6=0,00254$ ;

при  $t = 650-800 \text{ }^\circ\text{C}$   $a_0=244,7$ ,  $a_1=0,167$ ,  $a_2=0,086$ ,  $a_3=1,541$ ,  $a_4=0,0001$ ,  
 $a_5=6514,21$ ,  $a_6=0,0066$ .



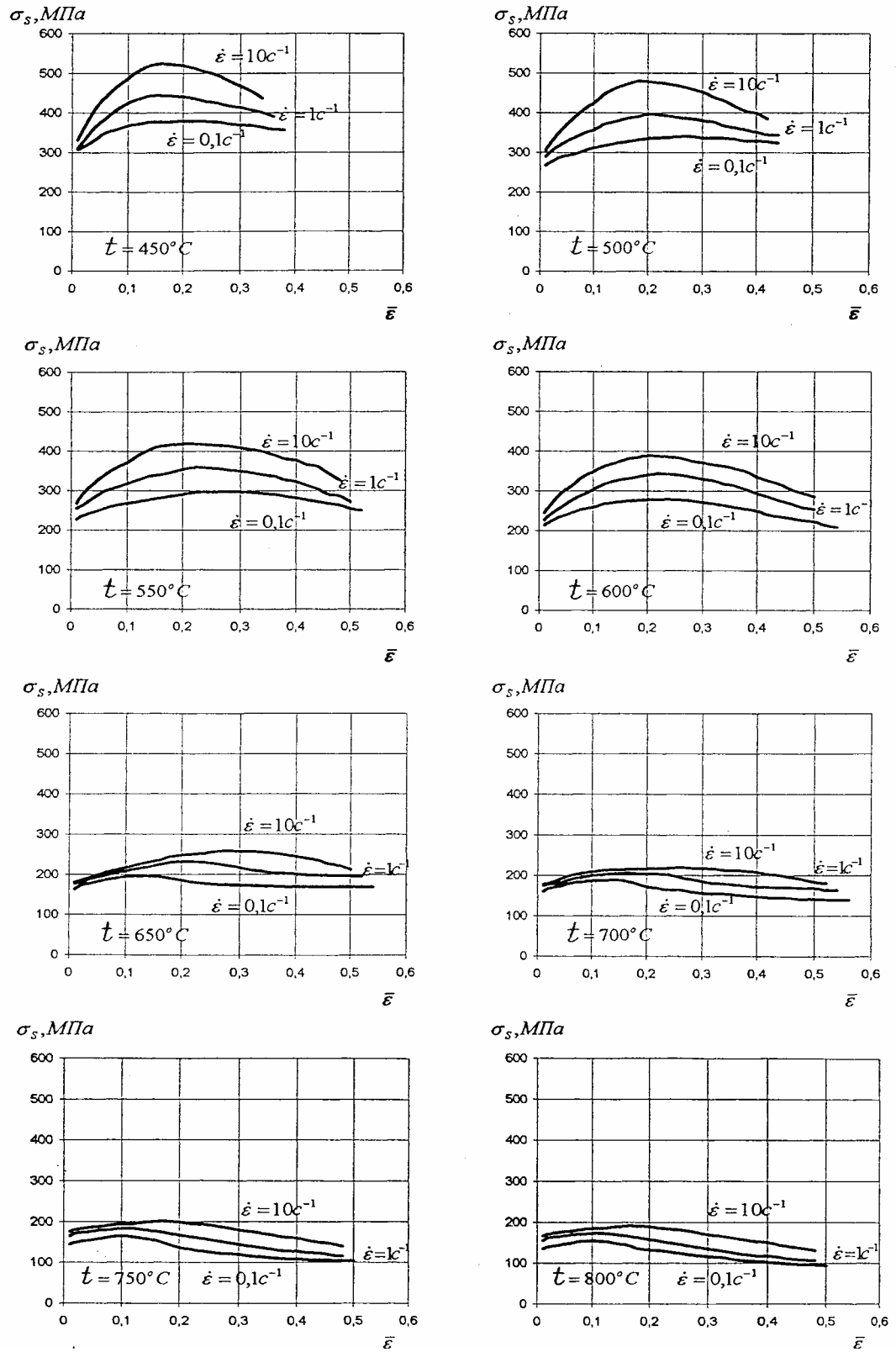


Рис. 1. Кривые сопротивления деформации сплава БрБ2 при различных температурно-скоростных условиях.

Характер и уровень кривых сопротивления деформации данного сплава в значительной мере связаны с зависимостью величины предельной пластичности  $\Lambda_p$  от температурно-скоростных условий испытаний (рис.2). Величину предельной пластичности  $\Lambda_p$  определяли для поверхности образца как  $\Lambda_p = \gamma$ , где  $\gamma = \pi \cdot n \cdot d_0 / l_0$ ;  $d_0$ ,  $l_0$  - начальные диаметр и длина образца;  $n$  - число оборотов активного захвата АТПУ до разрушения образца.

В интервале температур испытания  $t_{исп} = 450-800$  °С все три диаграммы предельной пластичности (см. рис. 2) для разных скоростей деформации  $\dot{\epsilon}$  (0,1, 1 и 10 с<sup>-1</sup>) имеют максимум при  $t_{исп} = 650$  °С. При данной температуре и  $\dot{\epsilon} = 0,1$  с<sup>-1</sup> величина  $\Lambda_p$  достигает своего наибольшего значения 2,7.

По результатам исследования предельной пластичности сплава БрБ2 определен диапазон рационального температурно-скоростного режима дробной деформации, охватывающий область высокой пластичности:  $t = 550-750$ °С;  $0,1 \text{ с}^{-1} < \dot{\epsilon} < 10,0 \text{ с}^{-1}$ .

Аппроксимация диаграмм предельной пластичности бериллиевой бронзы БрБ2 (см. рис.2) позволила получить уравнение:

$$\Lambda_p = a_0 \cdot \exp(a_1 \cdot t) + a_2 \cdot \exp(a_3 \cdot t) + a_4 \cdot \exp(a_5 \cdot \dot{\epsilon}), \quad (2)$$

где  $t$  - температура, °С;

$\dot{\epsilon}$  - скорость деформации, с<sup>-1</sup>;

$a_0 = 27,43199$ ,  $a_1 = 0,000147$ ,  $a_2 = -0,02051$ ,  $a_3 = 0,005399$ ,  $a_4 = -26,9758$ ,  
 $a_5 = 0,001705$ .

Физическое моделирование процесса дробной горячей деформации\*\* применительно к условиям прокатки полосовой заготовки на двухвалковом стане 700×1300 Московского завода ОЦМ производили на установке АТПУ. Моделирование осуществляли для четырех первых проходов по четырем режимам, принимая обжатия по проходам в пределах 18-20% и паузы между ними в пределах 15-17 с.

---

\*\* Исследования выполнены под научным руководством к.т.н., доц. Алдунина А.В.

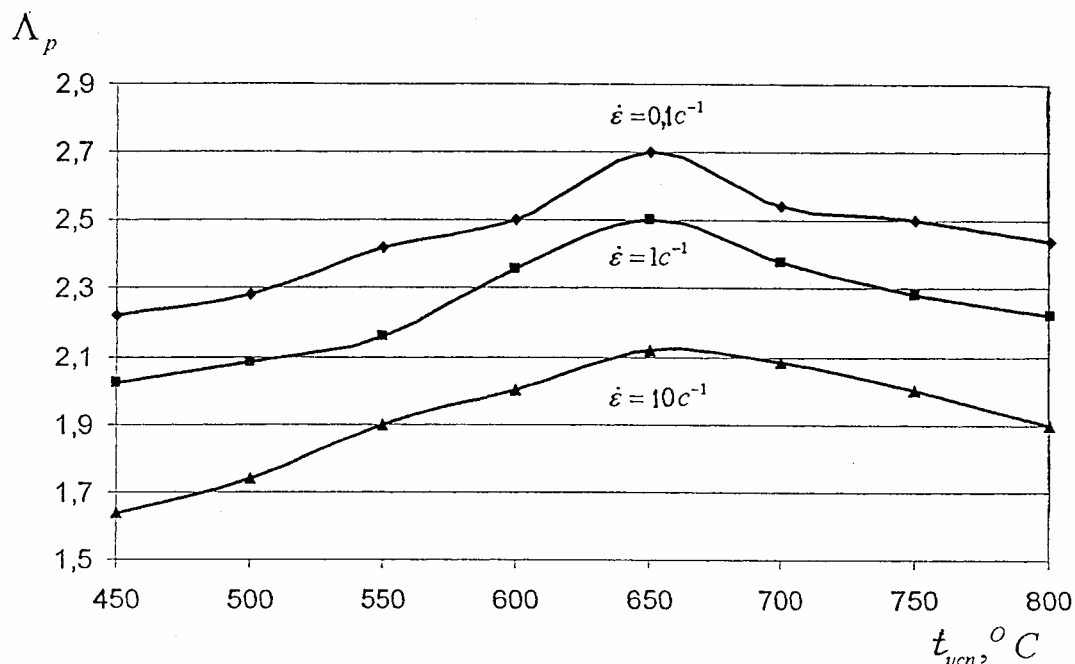


Рис. 2. Диаграммы предельной пластичности бериллиевой бронзы БрБ2.

Как видно из рис. 3, кривые дробного нагружения « $\sigma_s - \bar{\epsilon}$ », начиная со второго прохода, заметно превышают кривые непрерывной деформации (см. рис. 1). Разупрочнение во время пауз между обжатиями протекает лишь частично, а остаточный деформационный наклеп последовательно суммируется по проходам. Полученные зависимости для  $\sigma_s$  и  $\Lambda_p$  позволяют установить рациональные режимы прокатки и повысить точность расчёта силовых показателей процесса и толщины проката.

Для выявления закономерностей формирования продольной разнотолщинности лент по прокатным переделам было прокатано 5 партий слитков (в каждой партии по 24-28 слитков) по старой технологической схеме. Перед началом прокатки от каждой партии отбирали по 8

равномерно распределенных в ней слитков и по ходу прокатки, после каждого передела, выполняли измерение толщины по длине раската.

Поле разнотолщинности в пределах одной горячекатаной полосовой заготовки ( $h=5\text{мм}$ ) достигает  $\Delta h_{\text{п}}=0,4\text{ мм}$ , а в пределах партии –  $\Delta h_{\text{пип}}=0,5\text{мм}$ . При этом на продольную разнотолщинность заготовок от температурного клина накладывается низкочастотная составляющая с амплитудой  $0,05\text{-}0,10\text{ мм}$ , что, очевидно, связано с биением рабочих валков двухвалкового стана  $700\times 1300$ .

На следующих переделах при холодной прокатке заготовки до толщины  $1,5\text{ мм}$ , вследствие низкой жесткости прокатных клеток двухвалкового стана  $450\times 900$  и шестивалкового  $160/350\times 450$ , растет относительная продольная разнотолщинность полос  $\Delta h/h$ , а за счет сварки в один рулон без подбора полос по толщине происходит формирование заготовки со скачкообразным изменением толщины в местах сварки. Поле разнотолщинности одного рулона  $\Delta h_{\text{р}}=0,21\text{ мм}$ , что значительно больше, чем поле разнотолщинности одной полосы ( $\Delta h_{\text{п}}=0,13\text{ мм}$ ). В результате после прокатки такой заготовки на отделочном четырехвалковом стане  $125/380\times 320$  разнотолщинность готовой рулонной ленты ( $h=0,3\text{ мм}$ ) повторяет картину скачкообразного изменения толщины подката, а поле разнотолщинности достигает  $\Delta h_{\text{р}}=0,033\text{ мм}$ .

Анализ данных, полученных по ходу производства пяти контрольных партий проката, позволил получить график изменения относительной продольной разнотолщинности  $\Delta h/h$  по переделам (рис. 4). Если на прокатных переделах I-IV продольная разнотолщинность последовательно возрастает с  $10\%$  до  $18\%$ , то на последнем V-ом переделе она уменьшается до  $12,5\%$ . Относительная продольная разнотолщинность готовых лент превышает допускаемые отклонения как по ГОСТ 1789-70, так и по ТУ 48-21-265-73.

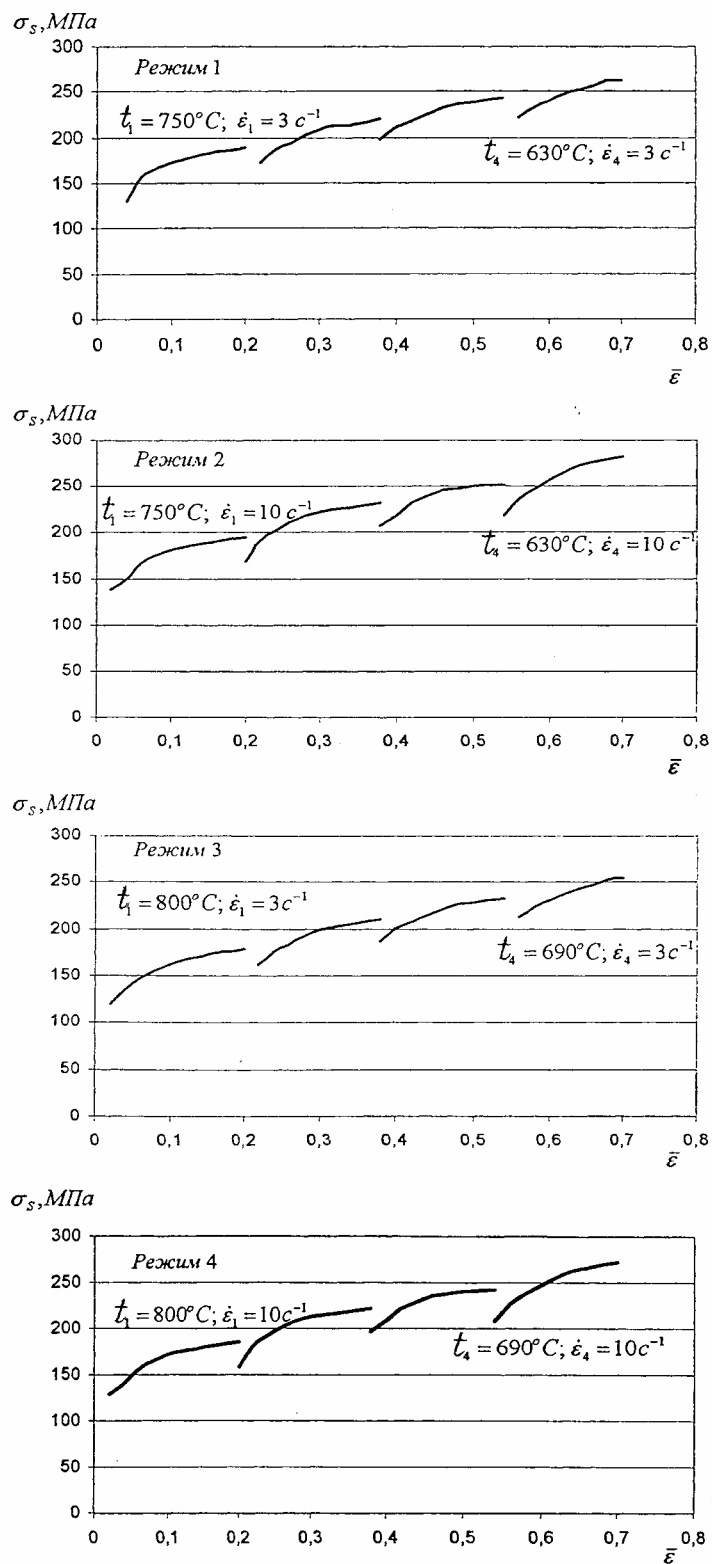


Рис. 3. Кривые сопротивления деформации при физическом моделировании горячей прокатки полосовой заготовки из сплава БрБ2.

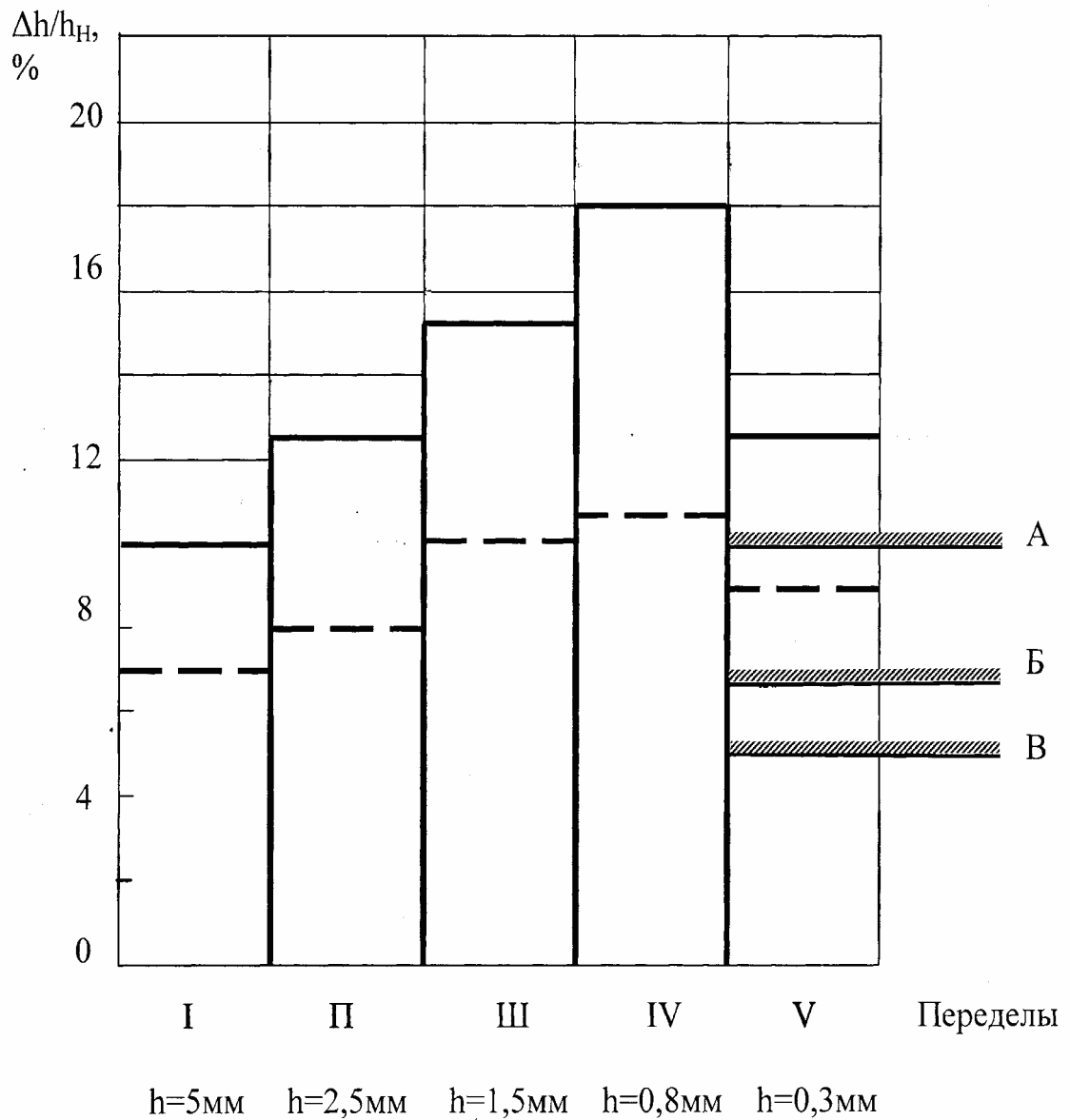


Рис. 4. Изменение относительной продольной разнотолщинности  $\Delta h/h_n$  проката по переделам:

— - по старой технологии; - - - по новой технологии; А, Б – допустимые отклонения по ГОСТ 1789-70 нормальной и повышенной точности соответственно; В – допустимое отклонение по ТУ 48-21-265-73.

Решение задачи повышения точности по толщине лент непосредственно связано с определением характеристик стана и полосы, а также уточнением величин управляющих воздействий.

Эксперименты и расчёты условий для прокатки ленты с толщины 1,5 на 1,1 мм, шириной 250 мм на стане 125/380x320 позволили определить модули жёсткости клетки  $M_k=1100$  кН и полосы  $M_p = 1650$  кН/мм, усилие прокатки  $P=1003$  кН, сопротивление деформации  $\sigma_{s\text{ ср.}} = 550$  МПа ( $\text{Н/мм}^2$ ), а также значение возмущающих воздействий (входной разнотолщинности, изменения сопротивления деформации по длине ленты, эксцентриситета рабочих и опорных валков), которые представлены в таблице 2.

На основе уравнения Симса-Головина с использованием зависимостей И.М. Мееровича и Ю.Д.Железнова определена количественная связь основных технологических возмущающих и управляющих воздействий с точностью прокатываемых лент по толщине.

Из анализа уравнения Симса-Головина следует, что чем больше модуль жесткости клетки и меньше сопротивление пластической деформации материала, а также другие технологические параметры, определяющие усилие прокатки, тем эффективней процесс стабилизации толщины полосы на выходе из стана.

Расчеты позволили количественно, оценить влияние возмущающих воздействий на формирование продольной разнотолщинности ленты и обосновать технические и технологические решения направленные на повышение точности проката без регулирования толщины направленным изменением раствора валков.

При оценке управляющих воздействий для компенсации изменения толщины полосы и сопротивления металла деформации на входе в клеть требуемая скорость  $V_{\text{ну}}$  перемещения нажимного устройства (НУ) будет пропорциональна величине перемещения  $\text{НУ} \Delta S_0$  на погонный метр длины ленты  $\Delta L$  и скорости прокатки  $V$ :

$$V_{\text{нy}} = \Delta S_0 \cdot V / \Delta L. \quad (3)$$

Требуемая скорость перемещения НУ при встречном эксцентриситете рабочих и опорных валков:

$$V_{\text{нy}} = 4\varepsilon(V \cdot h_0 / D \cdot h_1), \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  - эксцентриситет валков;

$h_0, h_1$  - толщина ленты на входе и выходе из валков;

$D$  - диаметр рабочих валков.

Использование уравнения Симса-Головина и зависимостей (3) и (4) позволило количественно оценить изменения зазора валков  $\Delta S$  и определить скорость перемещения нажимных устройств  $V_{\text{нy}}$  на стане 125/380x320 для стабилизации толщины ленты из сплава БрБ2 (табл.2).

Российским стандартом (ГОСТ 1789-70) предусмотрена поставка лент из бериллиевых бронз только в двух состояниях: А - мягкое (после закалки); Н - твердое (после закалки и холодной пластической деформации). Однако, в настоящее время, в зависимости от назначения и конструкции изделий из бериллиевых лент, кроме указанных двух состояний, требуются ленты с промежуточной регламентируемой твердостью, достигаемой пластической деформацией (состояния  $\frac{1}{4}$  Н,  $\frac{1}{2}$  Н,  $\frac{3}{4}$  Н), а также полным или частичным искусственным старением сплава для перевода материала из отмеченных выше состояний в новые состояния по твердости, а именно: АТ,  $\frac{1}{4}$  НТ,  $\frac{1}{2}$  НТ,  $\frac{3}{4}$  НТ, АМ,  $\frac{1}{4}$  НМ,  $\frac{1}{2}$  НМ.

В производственных условиях МЗ ОЦМ закалку лент бериллиевых бронз осуществляют в лентозакалочных печах.

Опытным путем были определены режимы термообработки лент из бериллиевой бронзы, обеспечивающие получение регламентированного размера зерна в структуре и однородное распределение дисперсной фазы.



Для температуры нагрева под закалку 780°C установлена аналитическая зависимость рационального времени нахождения ленты в печи от её толщины

$$\tau = 55 \cdot \lambda_n h + 168, \quad (5)$$

где  $\tau$  - время выдержки, сек.;

$h$  - толщина проката, мм.

Экспериментально исследована возможность получения лент с более широкой гаммой состояний по твердости. На лентозакалочной печи был проведен промышленный эксперимент по изучению влияния температуры  $t$  и времени старения  $\tau$  на временное сопротивление  $\sigma_b$  и относительное удлинение  $\delta$  сплава БрБ2 при различных исходных состояниях лент. Технологические параметры варьировались в пределах:  $t=200-520$  °C;  $\tau=3-240$  мин. По результатам механических испытаний образцов для исходных состояний А, 1/4 Н, 1/2Н, Н получено семейство кривых, часть из которых показана на рис. 5. Доказана возможность получения широкой гаммы механических свойств проката в соответствии с международными стандартами, а полученные зависимости (рис. 5) позволяют устанавливать режимы термообработки лент при старении, обеспечивающие производство новых видов плоского проката для изготовления современных пружинных контактов.

### 3. Усовершенствование технологии и разработка режимов прокатки и термообработки лент.

Новый технологический процесс отличается от старого тем, что слиток получают в кристаллизаторе сечением 90×280 мм и его размеры после механической обработки составляют 82×265×1400 мм. Увеличение толщины срезаемого с нижней и верхней поверхностей слитка позволили уменьшить химическую ликвацию в заготовке и тем самым увеличить пластичность. Горячую прокатку на двухвалковом стане 700×1300

производят при температуре 750-500 °С за восемь проходов до толщины 6 мм со смоткой раската в рулон. При этом исключается прокатка на двухвалковом стане 450х900. Затем рулонные заготовки после нагрева и закалки прокатывают на реверсивном четырехвалковом стане 250/750х800 с 6 до 1,5 мм за пять проходов.

Далее, как и по старой технологии, циклически следуют закалка ленты в лентозакалочной печи, травление в ванне, чистка поверхности на линии щеточной зачистки и прокатка на четырехвалковом стане 125/380×320 до требуемой толщины (0,05-1,0 мм). После каждой, кроме последней, холодной прокатки нагрев проката перед его закалкой производят до температуры 780 °С и выдерживают при данной температуре в течение времени, которое определяют по уравнению (5). После последней холодной деформации выполняют старение проката с использованием полученных графиков (рис. 5) в зависимости от исходного перед старением состояния и требуемого состояния поставки ленты потребителю.

#### 4. Опытно-промышленная проверка новой технологии и режимов производства лент

Для оценки эффективности новой технологии производства лент из бериллиевой бронзы по ее влиянию на механические свойства готовой продукции прокатывали партии лент из сплава БрБ2 толщиной 0,15-0,25 мм: 241 партию по старой технологии – 179 партий в твердом состоянии и 62 партии в мягком состоянии; 106 партий по новой технологии – 66 партий в твердом состоянии и 40 партий в мягком состоянии. Прокатанные ленты подвергали искусственному старению.

В табл. 1 приведены старый и новый режимы прокатки полосовых заготовок 5×270 мм и 6×275 мм из сплава БрБ2 партий №19 и №188 соответственно.

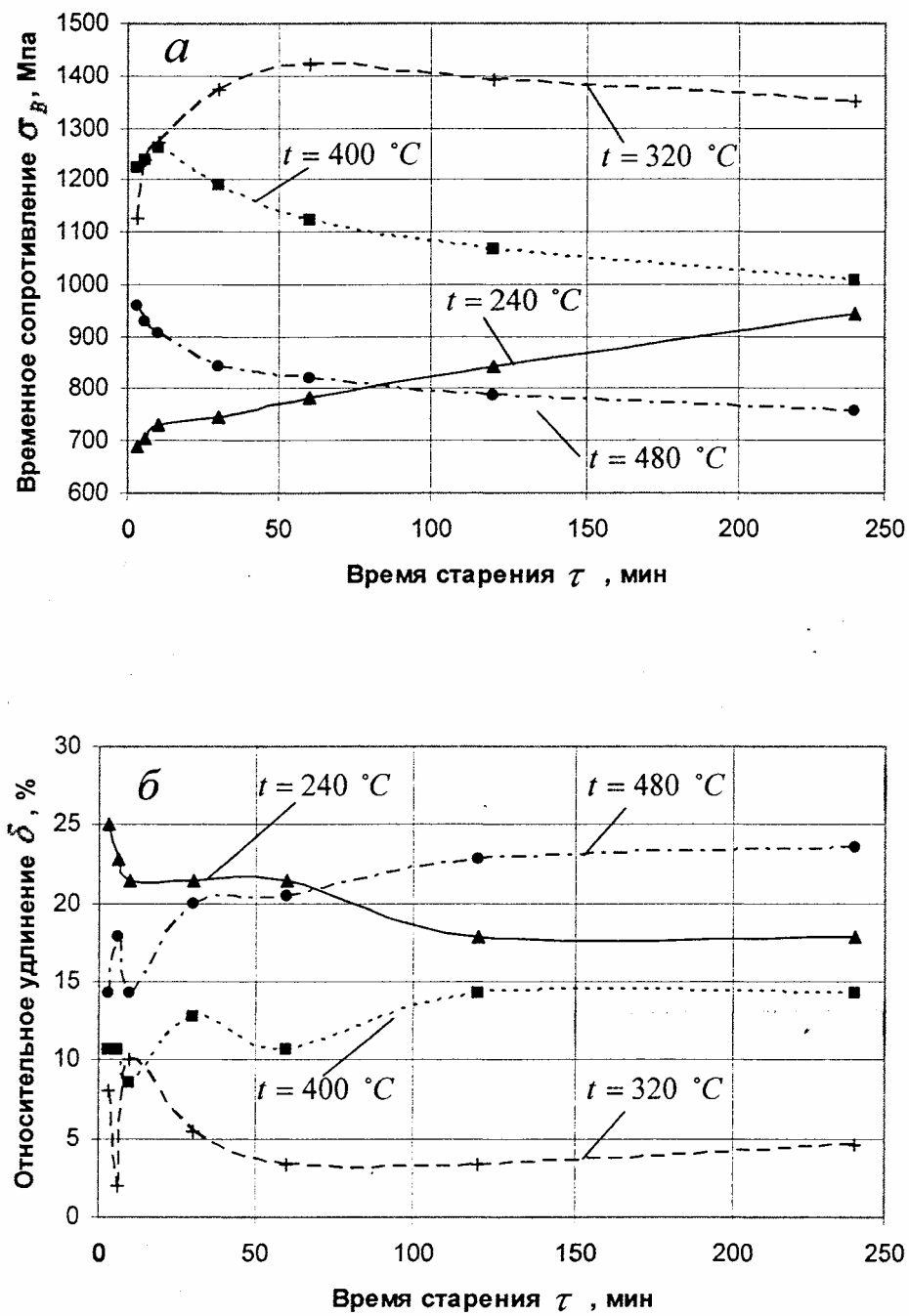


Рис. 5. Зависимость временного сопротивления  $\sigma_B$ (а) и относительного удлинения  $\delta$  (б) сплава БрБ2 от температуры  $t$  и времени старения  $\tau$  (исходное состояние  $\frac{1}{2}$  Н).

Таблица 1.

Режимы прокатки полосовых заготовок из сплава БрБ2 на двухвалковом стане 700×1300

Номер прохода	Параметры прокатки							
	$h_0$ , мм	$h_1$ , мм	$\varepsilon$ , %	$\dot{\varepsilon}$ , с <sup>-1</sup>	$t$ , °С	$\tau_{II}$ , с	$\sigma_s$ , МПа	$P^*$ , кН
Старый режим								
1	65	57	12,3	1,24	800	12-15	97,7	2453/2600
2	57	47	17,5	1,63	772	13-17	162,9	3067/3300
3	47	37	21,3	2,01	745	12-18	159,6	3438/3700
4	37	27	27,0	2,64	719	12-20	166,7	3950/4200
5	27	19	29,6	3,29	693	13-25	179,8	4170/4400
6	19	13	31,6	4,09	668	20-38	194,3	4380/4600
7	13	9,6	26,2	4,36	644	27-49	209,4	3902/4100
8	9,6	6,9	28,1	5,32	620	40-66	227,7	4299/4600
9	6,9	5	27,5	6,19	600	Охлажд. в рулоне	319,7	6632/7000
Новый режим								
1	82	73	11,0	1,03	750	15-18	110,5	2811/3000
2	73	59	19,2	1,52	716	17-21	181,0	4052/4300
3	59	44	25,4	2,01	677	18-24	187,5	4941/5200
4	44	30	31,8	2,70	639	19-27	207,7	5850/6300
5	30	18,5	38,3	3,74	608	25-37	232,9	6840/7200
6	18,5	12	35,1	4,47	572	29-47	329,1	9718/10100
7	12	8	33,3	5,34	540	42-64	356,1	9370/9900
8	8	6	25,0	5,40	515	Охлажд. в рулоне	376,4	7613/8100

\* В числителе расчет, в знаменателе – факт.

Сопоставление расчетных и фактически замеренных усилий прокатки  $P$  по проходам (см. табл. 1) показывает небольшое их отличие (5-8%), что свидетельствует о достаточно высокой точности полученной ранее математической модели сопротивления деформации (1).

При переходе на новый технологический процесс:  $\bar{\sigma}_v$  уменьшилось на 0,2-2,8 % и составило для различных состояний 457,2-1217,9 МПа, а его

среднеквадратичное отклонение  $S_{\bar{\sigma}_e}$  понизилось на 13,8-79,5 %;  $\bar{\delta}$  для большинства состояний увеличилось на 16,0-39,0% и получилось в пределах 1,9-37,4%, а  $S_{\bar{\delta}}$  уменьшилось на 5,3-11,5%; математическое ожидание микротвердости  $\overline{HV}$  в большинстве случаев снизилось на 5,0-7,1% и составило 101,4-377,0 HV, а  $S_{\overline{HV}}$  уменьшилось на 6,4-18,6%; глубина вытяжки по Эриксену  $\bar{t}$  практически не изменилась, а  $S_{\bar{t}}$  уменьшилось на 16,9-22,1%.

Для повышения точности лент по толщине внедрены экспериментально и теоретически обоснованные технические решения: на заготовительном (четырёхвалковом 250/750×800) и отделочном (четырёхвалковом 125/380×320) станах была усовершенствована подготовка рабочих и опорных валков, шейки и бочки которых шлифовали после центровки осей с контролем радиального биения; одновременно были заменены подшипники валков, которые перед установкой контролировали на величину эксцентриситета, позволившие снизить эксцентриситет валков более чем в 2 раза. На заготовительном стане был уточнен технологический регламент, что повысило точность подката, а ленто-закалочные печи для термообработки лент бериллиевых бронз были оснащены стабилизаторами скорости движения ленты, обеспечившие реализацию режимов в соответствии с уравнением (5).

По результатам холодной прокатки на четырёхвалковом стане 125/380×320 было количественно оценено улучшение качественных характеристик процесса и выравнивание продольной разнотолщинности ленты без регулирования толщины (табл. 2). Коэффициент выравнивания входной разнотолщинности определяли по зависимости

$$k_b = (\Delta h_0/h_0)/(\Delta h_1/h_1). \quad (6)$$

где  $\Delta h_0$  и  $h_0$ ,  $\Delta h_1$  и  $h_1$  — разнотолщинность и толщина ленты на входе и выходе из клетки.

Исследования проводили при прокатке в первом проходе ленты толщиной 1,5 до толщины 1,1 мм со скоростью  $v=1,5$  м/с. Результаты исследования приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Влияние технологических факторов на точность лент при прокатке бериллиевых бронз на четырехвалковом стане 125/380×320

№ п/п	Наименование факторов	$\Delta h$ , мм	$\Delta S$ , мм	$V_{ну}$ , мм/сек	$k_b$
1	Изменение входной толщины $\Delta H$ , 0,16 мм/0,08мм.	$\frac{0,096^*}{0,048}$	$\frac{0,36}{0,18}$	$\frac{0,045}{0,023}$	1,22
2	Изменение сопротивления металла деформации $\Delta\sigma_s$ , 18%МПа/ 10%МПа	$\frac{0,012}{0,006}$	$\frac{0,031}{0,024}$	$\frac{0,047}{0,023}$	-
3	Эксцентриситет валков $\epsilon$ , мм 0,01/0,003 рабочих	$\frac{0,006}{0,002}$	$\frac{0,020}{0,006}$	$\frac{0,65}{0,20}$	-
	0,02/0,01 опорных	$\frac{0,012}{0,006}$	$\frac{0,04}{0,02}$	$\frac{0,54}{0,26}$	-
4	ИТОГО	$\frac{0,126}{0,062}$	$\frac{0,451}{0,212}$	$\frac{1,282}{0,506}$	-

\*В числителе параметры до внедрения, в знаменателе – после внедрения технических и технологических решений.

На основании результатов исследования установлено, что с учетом коэффициента самовыравнивания ( $k_b = 1,22$ ) при холодной прокатке ленты из сплава БрБ2 на стане 125/380x320 одновременное снижение в 2 раза входной разнотолщинности, уменьшение на 8% колебаний сопротивления металла деформации, а также снижение эксцентриситета валков: рабочих в 3,3 и опорных в 2 раза приводит к значительному (в 2 раза) снижению продольной разнотолщинности ленты на выходе из клетки. Разработанные и

внедренные технологические и технические решения позволили повысить точность проката в соответствии с отечественными стандартами.

Применительно к этому стану и процессу получены количественные оценки управляющих воздействий ( $\Delta S$  и  $V_{ny}$ ) для уменьшения продольной разнотолщинности ленты на выходе из стана в зависимости от характеристик оборудования и подката. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании систем автоматического регулирования толщины ленты из бериллиевых бронз.

Внедрение новой технологии и разработанных режимов горячей прокатки на двухвалковом стане 700×1300 МЗ ОЦМ позволило улучшить качество проката по механическим свойствам, трещинам и обрывам и получить годовой экономический эффект более 10 млн. рублей.

## ОСНОВНЫЕ ИТОГИ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Для количественной оценки резервов повышения эффективности производства на Московском заводе ОЦМ лент из бериллиевой бронзы БрБ2 выполнен статистический анализ качества листового проката, который позволил определить реальные диапазоны изменений механических свойств и разнотолщинности лент. При этом имеется значительный разброс механических свойств от партии к партии – так в твердом состоянии  $\sigma_b=486-880$  МПа,  $\delta=1,1-6,1\%$ , микротвердость 172,8-286,0 НV, глубина вытяжки по Эриксену  $t=3,1-4,7$  мм. Выход годного по продольной разнотолщинности лент толщиной 0,15 – 0,30 составляет не более 88,8%. Установлена область влияния технологических параметров на эти показатели.
2. Определены реологические свойства сплава БрБ2. На торсионном пластометре исследовано влияние температуры, степени и скорости

деформации на сопротивление деформации. Получено уравнение для расчета сопротивления деформации сплава применительно к условиям прокатки полосовых заготовок на двухвалковом стане 700×1300. Определена зависимость предельной пластичности сплава от температуры и скорости деформации. Установлена область температур и скоростей деформации, в которой повышается предельная пластичность сплава, что позволило разработать рациональный режим прокатки.

3. Выполненное на торсионном пластометре физическое моделирование процесса дробной горячей деформации применительно к условиям прокатки полосовой заготовки из сплава БрБ2 на двухвалковом стане 700×1300, позволило уточнить модель сопротивления деформации и установить, что разупрочнение между обжатиями протекает лишь частично, а остаточный деформационный наклеп последовательно суммируется по проходам.
4. Определены количественные характеристики изменения входной разнотолщинности, сопротивления металла деформации и эксцентриситета рабочих и опорных валков на продольную разнотолщинность ленты из сплава БрБ2 при прокатке на стане 125/380×320, позволяющие с учетом установленного коэффициента выравнивания входной разнотолщинности ( $k_v=1,22$ ) определять их влияние и обоснованно устанавливать управляющие воздействия (изменение раствора валков и скорости перемещения нажимных устройств) для повышения точности проката.
5. Получено уравнение для расчета времени нахождения ленты в лентокалочной печи в зависимости от ее толщины, позволяющее достигать регламентированный размер зерна в микроструктуре и однородное распределение дисперсной фазы.
6. Разработаны температурные и временные режимы старения, позволяющие с учетом исходного состояния по твердости ленты



получить более широкую гамму механических свойств в соответствии с международными стандартами.

7. Разработанные технологические и технические решения внедрены в производство лент из бериллиевых бронз и обеспечили улучшение качества проката по механическим свойствам и продольной разнотолщинности с увеличением на МЗ ОЦМ выхода годного проката на 8,8%.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Зисельман В.Л., Кудин М.В., Лаврищев Ю.Д. Бериллиевые бронзы. Проблемы и перспективы // Национальная металлургия. – 2002. - №4. – С. 21-25.
2. Патент РФ на изобретение 2223157. Способ прокатки лент из бериллиевых бронз / Зисельман В.Л., Кудин М.В., Босхамджиов Н.Ш. и др. // Бюл. - 2004 - №4.
3. Шаталов Р.Л., Зисельман В.Л., Босхамджиов Н.Ш. Технологические методы повышения качества лент из бериллиевых бронз при прокатке // Высокотехнологичное оборудование для металлургической промышленности. Сб. трудов. –М.: ВНИИМЕТМАШ, 2004. –С. 221-227.
4. Зисельман В.Л., Шаталов Р.Л., Алдунин А.В. Особенности технологии и основные проблемы производства плоского проката из бериллиевых бронз // Цветные металлы. -2004. -№11. –С. 107-110.
5. Зисельман В.Л., Шаталов Р.Л., Алдунин А.В. Совершенствование режимов горячей деформации полосовой заготовки из бериллиевых бронз на основе пластометрического моделирования // Теория и практика производства листового проката. Сб. научн. трудов. Часть 1. –Липецк: ЛГТУ, 2005. –С. 90-93.
6. Определение зависимости сопротивления пластической деформации бериллиевой бронзы от технологических параметров для условий горячей прокатки / Зисельман В.Л., Шаталов Р.Л., Алдунин А.В. и др. //

Состояние, проблемы и перспективы развития металлургии и обработки металлов давлением. Сб. трудов МГВМИ. Вып. 5. –М.: МГВМИ, 2005, с. 94-96.

7. Исследование и разработка технологии и режимов прокатки лент из бериллиевых бронз для улучшения качества проката / Шаталов Р.Л., Полухин В.П., Алдунин А.В., Зисельман В.Л. –В сб. «Труды шестого конгресса прокатчиков». Т.1. –М.: Объединение прокатчиков, 2005, с. 92-98.
8. Совершенствование технологии производства и качество лент из бериллиевых бронз / Зисельман В.Л., Босхамджиев Н.Ш., Шаталов Р.Л. и др. // Цветные металлы. -2005. -№12. –С. 86-89.
9. Усовершенствование режимов прокатки лент из бериллиевой бронзы на основе пластометрического исследования реологических свойств сплава / Шаталов Р.Л., Алдунин А.В., Зисельман В.Л. и др. // Цветные металлы. - 2006. -№1. –С. 74-77.
10. Зисельман В.Л., Шаталов Р.Л., Алдунин А.В. Разработка рациональных режимов термомеханической обработки для получения качественных лент из бериллиевых бронз // Металлург.- 2006.- №2. – С. 72-75.