

На правах рукописи

**Комратов Юрий Сергеевич**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
УНИВЕРСАЛЬНО-БАЛОЧНОГО СТАНА НА ОСНОВЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ СТОЙКОСТИ ВАЛКОВ И ДИНАМИКИ  
ПРИВОДА**

Специальность: 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы  
металлургического производства

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

г. Екатеринбург

2002 г.

Работа выполнена на кафедре "Механика" Российского государственного профессионально-педагогического университета

Научный руководитель:

– профессор, доктор технических наук      Лехов Олег Степанович

Официальный оппоненты:

– доктор технических наук, профессор      Колмогоров Герман Леонидович  
– кандидат технических наук, доцент      Некрасов Игорь Иванович

Ведущее предприятие

– УРАЛГИПРОМЕЗ г. Екатеринбург

Защита состоится 27 декабря 2002 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д212.285.10 при Уральском государственном техническом университете - УПИ, ауд. М-323.

Ваш отзыв, заверенный печатью, просим направлять по адресу: 620002, г. Екатеринбург, К-2, УГТУ-УПИ, Ученому секретарю совета института, тел. (3432) 744-574, 754-694

Автореферат разослан 26 ноября 2002 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



Ю.Б. Чечулин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

### **Актуальность проблемы**

Переход к рыночной экономике, падение спроса на металлопродукцию и усиление конкуренции поставили задачи по ускоренной реконструкции металлургического производства и определению стратегических направлений его дальнейшего развития. Важнейшими в данном направлении являются работы по внедрению новой техники и технологии и достижение на этой основе коренного повышения прочностных и других служебных характеристик металлопродукции и обеспечение опережающих темпов роста производства экономичных видов проката, особенно двутавровых профилей. Нижне-Тагильский металлургический комбинат является основным предприятием по производству широкополочных балок и колонных профилей для строительства и машиностроения. В связи с этим весьма актуально повышение эффективности использования универсально-балочного стана на основе увеличения стойкости прокатных валков, снижения нагруженности главных приводов и освоение новых видов проката, обладающих повышенной конкурентоспособностью.

Настоящая работа выполнялась согласно программе, которая одобрена и поддержана специальным распоряжением Правительства РФ от 27 октября 1992 г. "О мерах по социально-экономическому развитию Нижне-Тагильского металлургического комбината". Основные мероприятия по НТМК вошли в федеральную программу технического перевооружения и развития металлургии России до 2000 г.

### **Цель работы**

Разработка теоретических основ технологии изготовления многослойных валков универсальных клетей, обладающих повышенной стойкостью, получение рекомендаций по снижению динамических нагрузок главной линии обжимной клетки 1300, создание технологий прокатки, обеспечивающих выпуск конкурентоспособной продукции и на этой основе повышение эффективности использования универсально-балочного стана.

### **Научная новизна**

Разработана математическая модель нестационарного процесса, происходящего при послойной заливке металлом и затвердевании бандажей рабочих валков УБС, выполненных из различных между слоями сталей. Использование модели позволяет определять поля температур, находить распределение термоупругих и остаточных напряжений, выбирать толщины слоев бандажа и моменты времени для заливки металлом внутреннего слоя бандажа и на этой основе создавать сжимающие тангенциальные остаточные напряжения по всему радиусу наружного слоя бандажа, что является наиболее благоприятным для получения высокой стойкости рабочих валков.

Создана математическая модель, описывающая динамику главной линии обжимной клетки 1300 УБС с учетом зазоров в передаточных механизмах и демпфирования, характеристики электропривода, а также изменения момента прокатки в функции углов поворота рабочих валков и рассогласовывания угловых положений верхней и нижней приводных линий и позволяющая исследовать динамические нагрузки при захвате слитка, анализировать влияние зазоров на динамику, найти неравномерность загрузки верхней и нижней линий привода и на основе системы ограничений и целевой функции выполнить выбор компоновки линии привода и подобрать ее параметры, при которых динамические нагрузки минимальны.

### **Практическая ценность**

Теоретические и экспериментальные исследования позволили получить следующие практические результаты:

- определить основные направления повышения эффективности использования универсально-балочного стана в современных условиях;
- найти рациональные конструктивные параметры двухслойных бандажей рабочих валков универсальных клетей УБС и разработать технологию их изготовления, позволяющую получать валки повышенной стойкости;
- получить рекомендации по снижению динамической нагруженности, выбору компоновки привода валков и оптимальных конструктивных параметров линии привода обжимной клетки 1300 УБС;
- разработать ряд новых технологий, позволяющих повысить эффективность использования и загруженность заказами универсально-балочного стана, в частности, технологию прокатки квадратной заготовки;
- разработать технологию получения на универсально-балочном стане горячекатаных широкополочных двутавровых балок для конструкций "северного" исполнения из новой стали.

### **Реализация результатов работы**

Результаты работы по повышению эффективности использования универсально-балочного стана были внедрены на Нижне-Тагильском металлургическом комбинате. Разработанная технология изготовления составных прокатных валков внедрена на Уфалейском заводе металлургического машиностроения.

Экономический эффект получен за счет снижения стоимости эксплуатации рабочих валков УБС вследствие повышения их стойкости, применения новой технологии изготовления многослойных валков, повышения загруженности стана заказами, производства продукции, обладающей повышенной конкурентоспособностью.

Результаты работы используются в учебном процессе при курсовом и дипломном проектировании в Уральском государственном техническом университете.

Работа по созданию и внедрению оборудования и технологических процессов производства составных валков удостоена Государственной премии СССР 1991 г.

Работа по созданию стального проката повышенной прочности и хладостойкости для строительной индустрии, машиностроения и транспорта удостоена Государственной премии РФ 1997 г.

### **Апробация работы**

Материалы работы излагались и обсуждались на второй международной конференции регионального Уральского отделения Академии инженерных наук РФ (Екатеринбург, 2000) и совещаниях специалистов черной металлургии и тяжелого машиностроения. По теме работы издано 2 монографии, опубликовано 7 статей, получено 6 патентов Российской Федерации.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 100 наименования и приложения. Работа изложена на 145 страницах, включая 30 рисунков и 18 таблиц.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

– математическая модель процесса изготовления многослойных бандажей рабочих валков УБС, позволяющая определить напряженное состояние и создавать благоприятные с точки зрения высокой стойкости сжимающие остаточные напряжения по всему радиусу наружного слоя бандажа;

– математическая модель динамики линии привода обжимной клетки 1300 УБС, учитывающая ее характерные особенности и позволяющая исследовать влияние параметров на динамическую нагруженность, выбирать компоновку главного привода и произвести минимизацию упругих моментов в связях;

– новые технологии прокатки на УБС, применение которых позволило повысить загруженность стана заказами;

– технология получения сортового проката "северного" исполнения из новой стали.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **1. Оборудование универсально-балочного стана и повышение эффективности его использования**

Универсально-балочный стан включает в свой состав обжимную реверсивную клеть 1300, две группы клетей, каждая из которых состоит из вспомогательной и универсальной и чистовую универсальную клеть. Стан

предназначен для производства балок сечением 100x200–400x1000 мм. Производительность стана 1,5 млн. т балок в год.

Обжимная клеть 1300 имеет валки с номинальным диаметром 1300 мм и длиной бочки 2800 мм. Привод валков индивидуальный и состоит из двух двигателей постоянного тока мощностью 5250 кВт каждый. Угловая скорость рабочих валков 0–65–100 об/мин.

Вспомогательная клеть предназначена для обжатия кромки полок при прокатке двутавровых балок. Она представляет дуореверсивную клеть с приводом горизонтальных валков от одного электродвигателя мощностью 3600 кВт через шестеренную клеть. Диаметр горизонтальных валков 1250–1100 мм. Угловая скорость валков 100–250 об/мин.

Универсальная клеть предназначена для получения готовых двутавровых профилей. Диаметр валков: горизонтальных–1550–1360 мм, вертикальных–1200–900 мм. Мощность приводного двигателя 8500 кВт. Угловая скорость рабочих валков 63–150 об/мин.

На универсально-балочном стане используются горизонтальные составные валки, бандажи которых выполнены двухслойными с наружным слоем из стали 150ХНМ и внутренним–из стали 100ХНМ (рис. 1). Благодаря высокому содержанию углерода (1,4–1,6%) и присутствию карбидосодержащих элементов (Cr, Mo) в стали 150ХНМ валки из этой стали имеют высокую износостойкость, а легирование этой стали никелем (0,9–1,1%) позволяет получить достаточную вязкость, несмотря на высокое содержание карбидов.

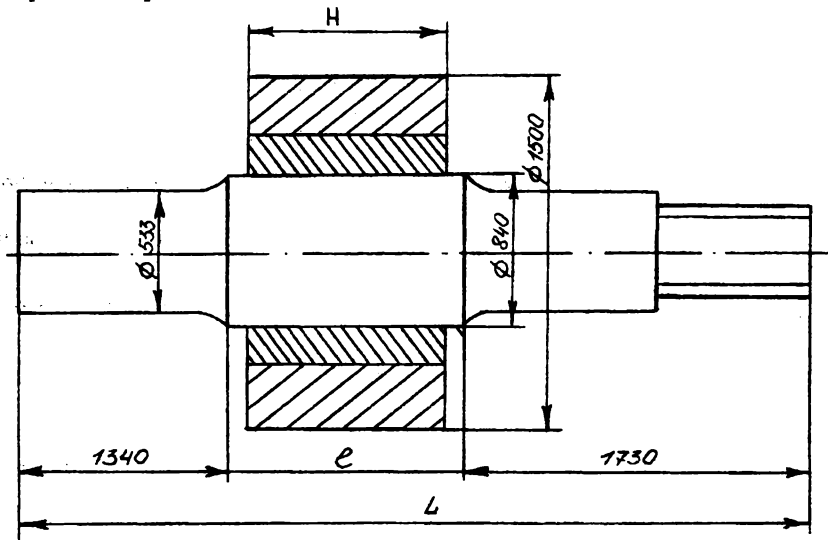


Рис. 1. Валок универсально-балочного стана

В результате интенсификации процесса прокатки, расширения сортамента двутавровых профилей, перехода универсально-балочного стана на работу с непрерывнолитой заготовкой и повышения требований, предъявляемых к свойствам и состоянию поверхности строительных профилей, значительно возросли нагрузки на прокатные валки и требования к качеству поверхности валков. В связи с этим основным условием повышения производительности прокатных станов является улучшение качества валков и увеличения их стойкости. Это особенно важно в связи с тем, что стоимость валков в стоимости прокатного стана составляет в среднем 6%. Кроме того, доля затрат на валки горячей прокатки в расходах по переделу составляет 1,3–12,9% и может достигать 15%.

Условия эксплуатации составных валков на универсально-балочном стане выдвинули ряд существенных требований по обеспечению их надежности. Первоочередной задачей является как создание надежной составной конструкции валка в целом, так и создание прогрессивной технологии изготовления, обеспечивающей не только износостойкие свойства, но и способность противостоять циклическим нагрузкам при воздействии термоциклических, механических и остаточных напряжений.

При переводе универсально-балочного стана на работу с непрерывнолитой заготовкой и исключении из его состава блюминга 1500 очень важно оценить нагруженность механического оборудования и приводов и обоснованно выбрать параметры и компоновку привода с целью повышения его работоспособности. Определяющим ограничением при внедрении новых режимов прокатки являются динамические нагрузки, возникающие в переходных стадиях процесса прокатки.

Решение данной проблемы, направленной на устранение причин и снижение уровня динамических нагрузок требует совершенствования методов динамического расчета и оптимизации параметров главных линий, при которых следует учитывать зазоры в подвижных соединениях и связь валков через прокатываемый металл.

Переход к ресурсосберегающим и безотходным технологиям, в частности при переводе универсально-балочного стана на работу с непрерывнолитой заготовкой, особенно важен для массового производства двутавровых профилей, которые находят широкое применение в строительстве и машиностроении. В связи с этим, актуально освоение на универсально-балочном стане новых видов проката, обладающих повышенной конкурентоспособностью не только по качеству, но и стоимости. Для этого имеются все возможности, в частности использование на НТМК в качестве рудного сырья чистых по вредным примесям ванадийсодержащих руд и применение новых технологий раскисления и микролегирования стали обеспечило производство особо чистой так называемой первородной стали и высококачественного проката. Кроме того, использование непрерывного литья не просто эффективно, оно улучшает общее качество стали за счет более однородного химического состава и структуры полученных непрерывным литьем заготовок. Таким образом,

повышение эффективности использования универсально-балочного стана в первую очередь связано с исследованиями для получения высоких механических, эксплуатационных и технологических свойств широкополочных двутавров.

Таким образом, основными направлениями повышения эффективности использования универсально-балочного стана являются следующие:

- увеличение стойкости прокатных валков;
- снижение динамической нагруженности главных приводов;
- освоение новых видов проката, обладающих повышенной конкурентоспособностью.

## **2. Теоретические исследования напряженного состояния при изготовлении многослойных валков**

Целью теоретического исследования является создание методики расчета двухслойных бандажей и определение напряженного состояния как во внутреннем, так и наружном слоях при изготовлении бандажа методом центробежного литья, а также и выдачи рекомендаций по рациональному соотношению толщин внутреннего и наружного слоев для обеспечения во внешнем слое, сжимающих тангенциальных напряжений.

Основой исследования являлся вычислительный эксперимент на базе решения нестационарной задачи теплопроводности, теории упругости и термоупругости методом конечных элементов в объемной постановке.

За основу был принят двухслойный бандаж со следующими размерами литой заготовки: внутренний диаметр бандажа 860 мм, наружный – 1620 мм, толщина внутреннего вязкого слоя, изготавливаемого из стали 100ХНМ – 170 мм, а внешнего рабочего – 210 мм (сталь 150ХНМ) (рис. 1).

При создании математической модели принималось, что первоначально в форму заливается внешний рабочий слой бандажа из стали 150ХНМ, который остывает в течении заданного времени, затем заливается внутренний слой бандажа из стали 100ХНМ, после чего оба слоя бандажа остывают в форме. Материал принимался однородным и изотропным, также не учитывались фазовые превращения.

В системе координат XYZ схематично показано (рис. 2) расположение бандажа в форме и приведены принятые обозначения радиусов бандажа. Для упрощения задачи бандаж в направлении оси Z принимался в виде бесконечного цилиндра, т. е. краевыми эффектами пренебрегали. Кроме того, для упрощения расчета в модель не включалась форма (слой от  $R_4$  до  $R_3$ ). Влияние формы на бандаж при этом заменялось введением по внешнему радиусу ( $R_3$ ) бандажа граничных условий третьего рода с соответствующими коэффициентами теплоотдачи, обеспечивающими остывание всего бандажа до температуры 300° С в течении 5 часов. Одним из основных вопросов при моделировании процесса изготовления двухслойных бандажей методом



центробежного литья являлось подтверждение положения о том, что сжимающие тангенциальные напряжения во внешнем слое бандажа возникают за счет так называемого обратного натяга.

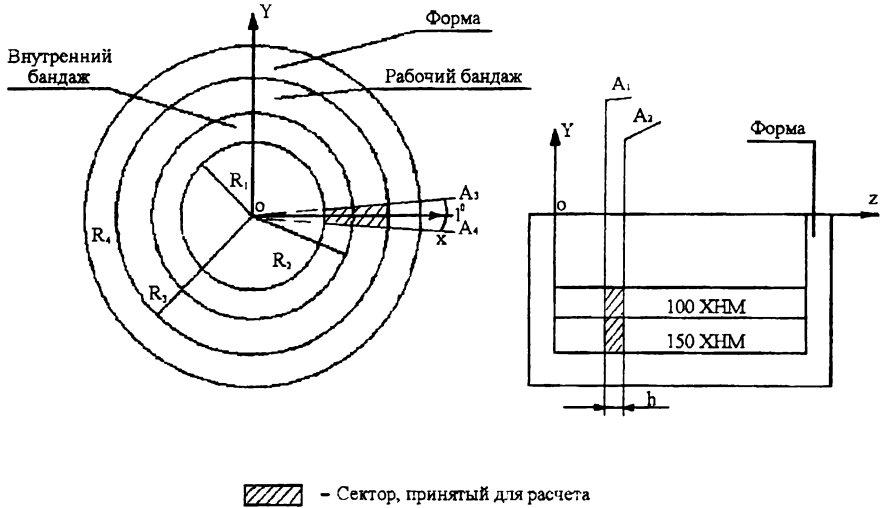


Рис. 2.0 Схема к математической модели

Для математического описания нестационарного температурного поля в бандаже запишем уравнение нестационарной теплопроводности вместе с соответствующими начальными условиями:

$$c\rho \frac{dT}{dt} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right), \quad (1)$$

где  $c$  – теплоемкость;

$\rho$  – плотность;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Начальное условие для функции  $T(\vec{x}, t)$  имеет вид

$$T(\vec{x}, t) = T_0(\vec{x}), \quad (2)$$

Для внешней и внутренней поверхности бандажа принимаются граничные условия третьего рода, представляющими собой заданный тепловой обмен по закону Ньютона

$$\begin{cases} \lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -a(T - \bar{T}), S_0, \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial n} = 0, S_1, \end{cases}, \quad (3)$$

где  $a$  – коэффициент теплоотдачи,

$S_0$  – внешняя граница бандажа,

$S_1$  – внутренняя граница бандажа,

$\bar{T}$  – температура окружающей среды).

Соотношение для определения температурных напряжений можно записать в виде:

$$\sigma_{ij} = 2G \left( \varepsilon_{ij} + \frac{\mu}{1-2\mu} e \delta_{ij} - \frac{1+\mu}{1-2\mu} \alpha \Delta T \delta_{ij} \right), \quad (4)$$

где  $G$  – модуль сдвига;

$\varepsilon_{ij}$  – деформация;

$\mu$  – коэффициент Пуассона;

$\delta_{ij}$  – символ Кронекера;

$e$  – объемное расширение,  $e = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$ ;

$\alpha$  – коэффициент термического расширения;

$\Delta T$  – изменение температуры.

Расчет напряженного состояния в слоях бандажа от воздействия на него величины обратного натяга выполнен на основе решения объемной задачи теории упругости методом конечных элементов (МКЭ).

В систему уравнений входят:

– уравнение равновесия

$$\sum_{j=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i = 0 \quad (i = \overline{1,3}); \quad (5)$$

где  $\sigma_{ij}$  – напряжение;

$f_i$  – объемные силы;

– геометрические соотношения Коши, связывающие компоненты малого перемещения и тензора деформаций,

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (i, j = \overline{1,3}); \quad (6)$$

где  $\varepsilon_{ij}$  – деформации;

$u_i, u_j$  – перемещения;

– физические соотношения линейной теории упругости

$$\sigma_{ij} = \sum_{k,l=1}^3 C_{ijkl} \varepsilon_{kl} + \sigma_{ij}^{(0)} \quad (i, j = \overline{1,3}); \quad (7)$$

где  $C_{ijkl}$  – упругие постоянные;

$\sigma_{ij}^{(0)}$  – начальные напряжения;

– граничные условия

$$\begin{aligned} \sum n_j \sigma_{ij} &= \hat{i}_i \quad \text{на } S_1 \quad (i = \overline{1,3}); \\ u_i &= \hat{U}_i \quad \text{на } S_2 \quad (i = \overline{1,3}). \end{aligned} \quad (8)$$

где  $n_j$  – векторы единичной внешней к поверхности нормали;

$\hat{i}_i$  – поверхностные силы;

$\hat{U}_i$  – заданные перемещения.

Поскольку задача осесимметричная и принято, что цилиндр имеет бесконечную длину, то в качестве расчетной модели принимался сектор,

указанный на рис. 3, высота которого ( $h$ ) для минимизации число конечных элементов принималась равной 30 мм. Минимальный размер элемента по радиусу принимался равным от 1 мм до 5 мм. Для обеспечения точности задачи минимальный шаг по времени принят равным 0,1 сек, а максимальный – 30 сек. Решение выполнялось по программе ANSYS, установленной на ПК PENTIUM III.

При расчете в каждый момент времени остывания бандажа определялась температура в каждом узле элемента, а также перемещения, деформации и температурные напряжения из соотношений и температурные напряжения из соотношений (1)–(4). Полученные результаты подтвердили достоверность отсутствия термоупругих напряжений в отливке, превышающих предел текучести материала при ее остывании за весь период времени.

Для определения поля напряжений в двухслойном бандаже от величины обратного натяга был использован следующий алгоритм.

На первом этапе решается задача нестационарной теплопроводности остывания только для одного рабочего слоя бандажа. Определяется величина перемещения в процессе остывания внутреннего радиуса рабочего слоя ( $U_{r2}$ , 150XНМ). На втором этапе решается аналогичная задача, но для внутреннего слоя, и определяется величина перемещений внешнего радиуса этого слоя ( $U_{r2}$ , 100XНМ). За счет различных теплофизических параметров величина  $U_{r2}$ , 100XНМ должна быть больше величины  $U_{r2}$ , 150XНМ, что и мело место.

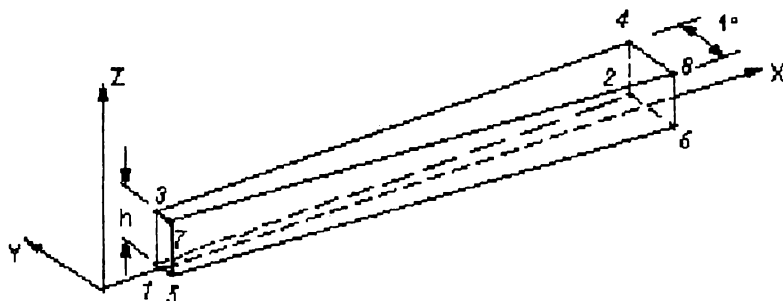


Рис. 3. Сектор бандажа, принятый для расчета

Таким образом, в результате получается, что между внутренним диаметром внешнего слоя и внешним диаметром внутреннего слоя возникает зазор, который и определяет максимальную величину обратного натяга. Теперь остается определить, какая часть этого обратного натяга должна принадлежать внутреннему слою, а какая – внешнему, т. к. в реальности этот зазор между слоями должен отсутствовать. Для определения этих параметров

рассматривается третий этап, где решается задача остывания совместно для двух слоев бандажа.

После определения величин обратного натяга напряженное состояние каждого слоя бандажа определяется уже на основе решения объемной задачи теории упругости (зависимости (5)–(8)).

Эпюры радиальных  $\sigma_r$  и тангенциальных  $\sigma_t$  напряжений показаны на рис. 4. Характер напряжений на данном рисунке свидетельствует о том, что во внешнем слое бандажа возникают сжимающие тангенциальные напряжения, а во внутреннем слое – растягивающие.

По указанной методике был выполнен расчет напряжений в двухслойных бандажах при различных толщинах внутреннего и внешнего слоев бандажа. Установлено, что для обеспечения максимальных сжимающих напряжений в рабочем слое двухслойного бандажа целесообразно уменьшать толщину рабочего слоя. Однако выбор толщины рабочего слоя составного валка должен определяться как величиной сжимающих тангенциальных напряжений, так и величинами его переточки.

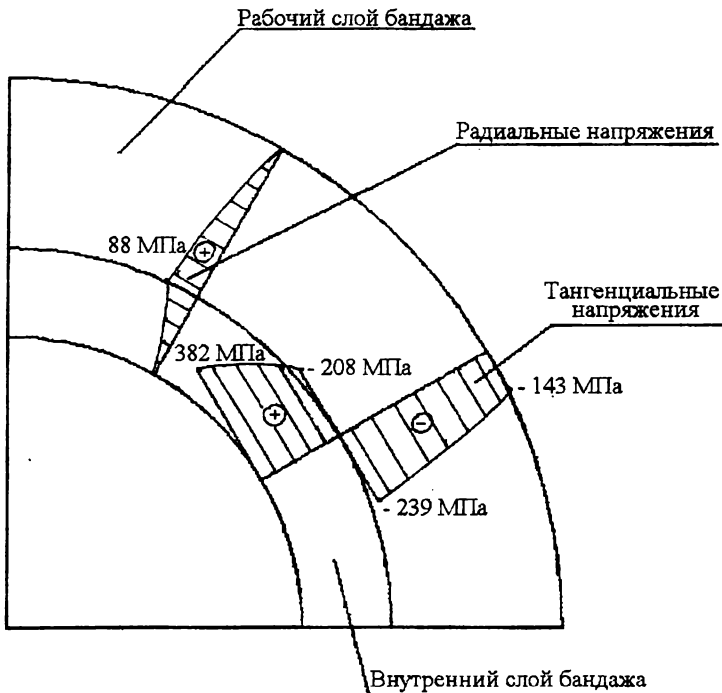


Рис. 4. Эпюры радиальных и тангенциальных напряжений в бандаже. (Внутренний радиус бандажа – 430 мм; наружный радиус бандажа – 810 мм; толщина рабочего слоя 250 мм; толщина внутреннего слоя – 130 мм).

### 3. Динамика линии привода обжимной клетки 1300 универсально-балочного стана

При переводе универсально-балочного стана на работу с непрерывнолитой заготовкой необходимо оценить нагруженность механического оборудования и приводов. Определяющим ограничением при внедрении новых режимов прокатки являются динамические нагрузки, возникающие в переходных стадиях процесса прокатки.

Решение данной проблемы, направленной на устранение причин или снижения уровня динамических нагрузок, требует совершенствования методов динамического расчета и оптимизации параметров главных линий.

Математическая модель линии привода обжимной клетки 1300 включает в себя модель очага деформации, модель упругой механической системы приводных линий и модель электропривода.

Основу математической модели очага деформации составляет описание изменения момента прокатки по длине полосы и его распределение между валками в зависимости от технологических параметров процесса прокатки и скоростных параметров привода.

Зависимость для момента прокатки имеет вид,

$$M = 2l \cdot P_{ст} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{1}{\alpha + \alpha'} \left( \frac{\varphi_{1B} + \varphi_{1H}}{2} \right) \right) \right] \times \\ \times \left\{ 1 - (1 - \psi_{ст}) \cdot \left[ 1 - \exp \left( - \frac{1}{\alpha + \alpha'} \left( \frac{\varphi_{1B} + \varphi_{1H}}{2} \right) \right) \right] \right\}$$

где  $P_{ст}$  – сила деформации, кН;  $\psi_{ст}$  – коэффициент плеча;  $l$  – длина очага деформации, м.;  $\alpha'$  – угол поворота валков, соответствующий образованию передней внешней зоны;  $\varphi_{1B}$ ,  $\varphi_{1H}$  – соответственно углы поворота первой приведенной массы верхнего и нижнего валков.

Связь между моментами верхней и нижней линий индивидуального привода необходимо знать для того, чтобы правильно учитывать неравномерность распределения моментов между валками и ее влияние на процессы, происходящие в очаге деформации и линии привода. Введем в математическую модель зависимость относительной разности моментов от относительной разности угловых скоростей валков:

$$\frac{\Delta M}{M} = 2K_v \frac{\dot{\varphi}_{1H} - \dot{\varphi}_{1B}}{\dot{\varphi}_{1H} + \dot{\varphi}_{1B}}$$

где  $\Delta M = M_H - M_B$ ;  $M = M_H + M_B$ ;

$K_v$  – передаточный коэффициент

Отсюда моменты на верхнем и нижнем валках могут быть определены по формуле:

$$M_{B(H)} = M \left( \frac{1}{2} \pm 2K_v \frac{\dot{\phi}_{1H} - \dot{\phi}_{1H}}{\dot{\phi}_{1H} + \dot{\phi}_{1H}} \right)$$

Для описания движения масс динамической системы главной линии обжимной клетки 1300 при захвате слитка записали систему дифференциальных уравнений, учитывающую особенности этого стана. В частности учтено наличие зазоров в верхней и нижней приводных линиях, неравномерность распределения внешних моментов между ними, демпфирование, пропорциональное относительной скорости движения масс расположенных на концах упругой связи, а также зависимость электромагнитного момента двигателей от скорости вращения якоря. Кроме того, учтена инерция прокатываемого слитка при разгоне, который осуществляет связь верхней и нижней приводных линий. Предложена новая методика учета зазоров при моделировании динамических нагрузок, для этого использована зависимость

$$\Delta \dot{\phi} = \omega \left( 1 - \cos^3 \sqrt{\frac{6\Delta_0 \cdot \beta}{\omega}} \right), \text{ где } \beta = \sqrt{\frac{R^2 \cdot B_c \cdot P \cdot \text{tg} \alpha}{J_{1B(H)} + mR^2/2}},$$

где  $\Delta \dot{\phi}$  – скорость соударения масс в зазоре,  $\text{с}^{-1}$ ;  $m$  – масса заготовки, т;  $\omega$  – угловая скорость вала в момент захвата слитка валками,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\Delta_0$  – зазор линии привода, рад;  $\alpha$  – угол захвата, рад;  $I_1$  – момент инерции сосредоточенной массы,  $\text{тм}^2$ ;  $P$  – удельная сила деформации, МПа;  $B_c$  – средняя ширина слитка, м;  $R$  – радиус вала, м.

Решение системы дифференциальных уравнений проводили методом Рунге-Кутты. Для этой цели была использована стандартная компьютерная программа, которая содержит подпрограмму печати графиков упругих моментов и моментов двигателя. Подпрограмма графического вывода информации дает возможность наглядно представить распределение динамических нагрузок в линиях привода обжимной клетки.

В результате моделирования установлено, что высокие динамические нагрузки в элементах главной линии обжимного стана возникают при ударе в шпиндельных соединениях (рис. 5). Из анализа результатов моделирования следует, что на неравномерность распределения нагрузок между верхней и нижней линиями привода оказывают существенное влияние зазоры в линии привода (различие в зазорах верхней и нижней линиях, раскрытие зазоров на разную величину).

Проведенное исследование позволяет определить промежутки времени, по истечении которых необходима замена изношенных деталей, т. е. назначать межремонтные сроки.

Достоверность результатов оптимизации конструктивных параметров линии привода обжимного стана зависит от точности математической

модели, обоснованности выбора целевой функции и системы ограничений, а также от выбора эффективного метода оптимизации.

В связи с этим задача оптимизации конструктивных параметров главной линии обжимного стана может быть сформулирована следующим образом:

При параметрических ограничениях:

$$C_{i1} \leq C_i \leq C_{i2}; J_{i1} \leq J_i \leq J_{i2};$$

$$0 \leq \Delta_i \leq \Delta_{i \max};$$

где  $F$  – целевая функция системы главной линии.  
минимизировать

$$F(C_i, J_i, \Delta_i).$$

Предложенная методика расчета оптимальных параметров главных линий прокатных станов может быть использована для одновременного решения задач выбора схемы компоновки и определения конструктивно реализуемых параметров главной линии с целью минимизации динамических нагрузок. В этом случае для линии привода обжимной клетки 1300 целевая функция принимает вид

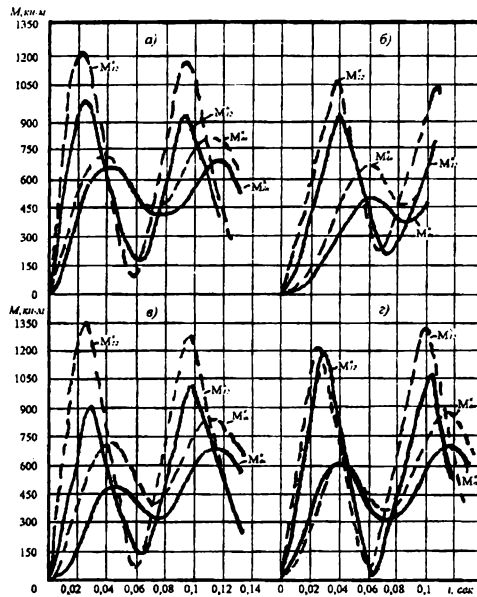


Рис. 5. Графики изменения упругих и электромагнитных моментов в переходной стадии захвата для линии привода обжимной клетки 1300:

- а) симметричный удар в обеих линиях привода  $\Delta\phi_{B(H)} = 1,5$  1/сек;
- б) захват полосы при выбранных зазорах в линии привода  $\Delta\phi_{B(H)} = 0$ ;
- в) удар в нижней линии привода  $\Delta\phi^H = 1,5$  1/сек;
- г) удар в верхней линии привода  $\Delta\phi^B = 1,5$  1/сек.

$$F = \left( M_{12B}^{\partial} + M_{12H}^{\partial} + M_{23B}^{\partial} \right) + K_1 \left( M_{12B}^{\partial} - M_{12H}^{\partial} \right)^2 + \\ + K_2 \left( M_{12B}^{\partial} - M_{23B}^{\partial} \right)^2$$

где  $K_1, K_2$  – постоянные коэффициенты.

Данная целевая функция позволяет при оптимизации как уменьшить, так и равномерно распределить динамические нагрузки по несущим звеньям привода обжимной клетки 1300.

Задача решена для наиболее тяжелого режима нагружения главной линии обжимной клетки 1300 – одновременного удара в шпиндельных соединениях верхней и нижней линии со скоростью соударения  $\Delta\dot{\phi} = 1,5 \text{ с}^{-1}$ . Время переходного процесса захвата полосы валками  $t_n = 0,1 \text{ с}$ . В качестве варьируемых параметров использованы жесткости упругих связей:  $C_{12B}, C_{23B}, C_{12H}$ . В результате решения задачи оптимизации удалось в 1,4 раза снизить максимальные динамические нагрузки. Кроме того, существенно снижена неравномерность распределения динамических нагрузок в верхней и нижней линии привода.

Существенное влияние на уровень ударных нагрузок в линии привода обжимного стана оказывает жесткости шпинделей, величина на которых в процессе оптимизации снижена в 1,7 раза. Это возможно осуществить путем уменьшения диаметра шпинделя с 0,58 м до 0,5 м.

#### 4. Промышленные исследования и внедрение

Для обеспечения качественными валками универсально-балочного стана были проведены специальные конструкторские и технологические разработки. Конструктивный выбор был остановлен на составном исполнении как самого валка, так и бандажа, наиболее полно обеспечивающих требуемую надежность каждого из его элементов (рис. 1). Реализация результата теоретических исследований по определению рациональных конструкторских параметров двухслойных бандажей была осуществлена при организации бандажей на Уфалейском заводе металлургического машиностроения. Двухслойные заготовки бандажа получали способом центробежного литья. Причем последовательно заливки и условия кристаллизации наружного, более твердого и износостойкого слоя, и внутреннего (пластичного), способствовали созданию предварительно-напряженного состояния бандажа, со сжимающими напряжениями в его наружном слое.

Опыт использования бандажированных валков, в том числе и импортных, и исследования показали, что наибольшая стойкость составных валков наблюдается при толщине износостойкого слоя бандажа ( $t_{\text{TB}}$ ), составляющего в среднем  $0,2R$ , где  $R$  – радиус валка. Далее необходимо определить толщину составного бандажа, при которой сопротивление



прокручиванию и смещению вдоль оси максимальны. Эта величина в среднем составляет 0,33R. Отсюда толщина вязкого (внутреннего) слоя  $t_{\text{вяз}} = 0,13R$ .

Разработанная технология изготовления горизонтальных валков универсально-балочного стана включает в частности горячую посадку двухслойного бандажа, полученного центробежным литьем, на ось из стали с высокой прочностью.

Износ валков при эксплуатации оценивается по изменению их линейных размеров, первоначальной геометрии и состояния поверхности, а также повреждаемостью поверхностных слоев (трещинообразование, разрушение карбидов, изменение структурных составляющих). Интенсивность износа за кампанию валка определяется величиной его перешлифовки при ремонте  $-(D_{\text{нач}} - D_{\text{кон}})$ . Для оценки стойкости валков используется количество прокатанного металла  $Q$ , приходящегося на один миллиметр съема – показатель сопротивления изнашиванию (или износостойкость)  $b$

$$b = \frac{Q}{D_{\text{нач}} - D_{\text{кон}}} \quad \text{или} \quad b = \frac{Q}{D_{\text{max}} - D_{\text{min}}}$$

Вторым показателем стойкости является расходный коэффициент  $a$ : отношение массы израсходованных валков  $G$  к массе прокатанного металла  $Q$ :  $a = G/Q$ , кг/т. Произведение расходного коэффициента  $a$  и показателя износостойкости  $b$  характеризует величину "изношенной" массы валка (в кг), приходящейся на 1 мм съема:

$$a \times b = \frac{G}{D_{\text{нач}} - D_{\text{кон}}}, \text{ кг/мм.}$$

Величина  $n$ , обратная величине изменения линейных размеров бочки валка количественно характеризует сопротивление валка изнашиванию:

$$n = \frac{1}{D_{\text{нач}} - D_{\text{кон}}} = \frac{1}{\Delta D_a + \Delta D_T},$$

где  $\Delta D_a$  и  $\Delta D_T$  – уменьшение размеров валка из-за абразивного и теплового износа (например, сетка и трещины разгара) соответственно.

Таким образом, в предлагаемом методе оценка эксплуатационного потенциала валков впервые комплексно учтены как показатели качества технологии их изготовления, так и эксплуатации. Количественно эту комплексную оценку можно выразить следующим образом:

$$a \times b = G \times n$$

Полученные выражения позволяют при постоянных начальной массе и размерах валков, существующих условиях эксплуатации анализировать причины их изнашивания. В результате анализа взаимосвязи расходных коэффициентов с показателем сопротивления изнашиванию впервые было

установлено, что интенсивность окислительного и абразивного изнашивания в несколько раз меньше теплового:  $\Delta D_a < \Delta D_T$ .

Исследование стойкости отечественных составных валков на универсально-балочном стане показало, что разработанная технология производства составных валков обеспечивает получение необходимых различий физико-механических свойств по толщине двухслойного бандажа и оптимально-напряженное состояние бандажа в соответствии с эксплуатационными требованиями и заданными температурно-силовыми параметрами прокатки, что в совокупности позволяет существенно повысить стойкость отечественных составных валков.

При изготовлении строительных металлических конструкций в последние годы обычно применяют горячекатаные широкополочные двутавровые балки из марганцовистых сталей 09Г2С или 12Г2С, имеющие повышенную прочность ( $\sigma_T \geq 315 \text{ Н/мм}^2$ ). В настоящее время в связи с дефицитностью марганца были предложены стали повышенной прочности с меньшим его содержанием. На НТМК разработаны ТУ-14-1-5140-92 на сталь 18САТЮ, прокат из которой должен иметь механические характеристики, свойственные стали С345:  $\sigma_T = 490 \text{ Н/мм}^2$ ;  $\sigma_B = 345 \text{ Н/мм}^2$ .

При исследовании сталь 18САТЮ выплавляли в условиях конверторного цеха НТМК. Расплав раскисляли и микролегировали в ковше с использованием брикетов из порошков необходимых ферросплавов, азотсодержащего органического вещества и связующего материала. При прокатке на универсально-балочном стане получали балки номеров 24ДБ1 и 36ДБ1. Химический состав металла профилей соответствовал требованиям ТУ, в частности содержание фосфора P = 0,026...0,030%, серы S = 0,022...0,025%, углерода C = 0,16...0,20%, марганца Mn = 0,50...0,61%.

Результаты испытания на растяжение широкополочных двутавров показали, что прокат полностью соответствует требованиям, предъявляемым к сталям С345, при этом стенка профиля значительно прочнее полки.

Хладностойкость проката оценивали при испытаниях на ударный изгиб в интервале температур от минус 70°С до нормальной. Установлено, что прокат соответствует по ударной вязкости лучшим сортам хладностойких строительных сталей.

В целом, анализ свойств фасонного проката из стали 18САТЮ показал, что дополнительное легирование малоуглеродистой стали типа ст3сп кремнием при условии формирования в прокате достаточно мелкого зерна обеспечивает повышенную прочность и хладностойкость металла.

Разработана и внедрена технология прокатки квадратной заготовки со стороной 100–200 мм в клетях универсально-балочного стана. Это позволило обеспечить существующие заказы на качественную заготовку, особенно на экспорт, и сократить простой стана из-за отсутствия заказов. Способ прокатки квадратных заготовок предусматривает прокатку исходной заготовки в вытяжных калибрах, а также прокатку в группе предчистовых калибров и чистой проход в квадратном калибре, причем в последних

четырёх проходах чередуют прокатку в ящичных калибрах и прокатку в универсальных калибрах с гладкой бочкой.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате теоретических и экспериментальных исследований определены основные направления повышения эффективности использования универсально-балочного стана в современных условиях.

Для достижения этих целей решены следующие научные и практические задачи:

– разработана методика и алгоритм расчета температурного поля и термонапряженно-деформированного состояния двухслойного банджа, его усадки, величины обратного натяга и напряжений, возникающих в бандже. Установлено, что в процессе изготовления двухслойных банджей во внешнем рабочем слое банджа возникают сжимающие тангенциальные напряжения, обусловленные величиной обратного натяга. Для обеспечения максимальных сжимающих напряжений целесообразно увеличить толщину внутреннего слоя, уменьшая при этом толщину рабочего слоя;

– на основе анализа напряженного состояния двухслойного банджа и опыта эксплуатации составных валков универсально-балочного стана определены конструктивные параметры двухслойного банджа, обеспечивающие повышенную стойкость прокатных валков. Это явилось основой отечественной технологии изготовления составных валков, которая внедрена на Уфалейском заводе металлургического машиностроения;

– на основе комплексного исследования износа валков предложена методика оценки стойкости валков, в которой впервые учтены как показатели качества технологии изготовления, так и их эксплуатации и установлены резервы повышения стойкости валков;

– создана математическая модель, описывающая динамику главной линии обжимной клетки 1300 УБС с учетом зазоров в передаточных механизмах и демпфирования, характеристики электропривода, а также изменения момента прокатки в функции углов поворота рабочих валков, и рассогласования угловых положений верхней и нижней приводных линий. При моделировании установлено, что высокие динамические нагрузки в линии привода возникают при ударе в зазорах шпиндельных соединений и неравномерность распределения динамических нагрузок между линиями индивидуального привода наиболее ярко выражена для схемы компоновки привода обжимного стана, когда верхняя линия индивидуального привода длиннее нижней;

– решена задача оптимизации конструктивных параметров линии привода обжимной клетки 1300 универсально-балочного стана. Предложена целевая функция, позволяющая при оптимизации как уменьшить, так и равномерно распределить динамические нагрузки по несущим звеньям привода обжимной клетки 1300. Установлено, что существенное влияние на

уровень динамических нагрузок и характер их распределения по звеньям линии привода оказывают жесткости шпинделей;

– разработана технология получения на универсально-балочном стане широкополочных двутавровых балок для конструкций "северного" исполнения из новых малоуглеродистых сталей;

– высокие механические, эксплуатационные и технологические свойства широкополочных двутавров из стали 18САНЮ, показанные при исследовании, подтверждены при массовом выпуске проката на универсально-балочном стане;

– предложен и внедрен способ получения качественного квадратного профиля со стороной 100–200 мм в клетях универсально-балочного стана, что позволило повысить его загруженность заказами.

### **Основное содержание диссертации изложено в следующих работах**

1. Комратов Ю. С., Лехов О. С. Реконструкция и развитие сталеплавильно-прокатного комплекса // Изд-во "Аква-пресс", 2001.–136 с.

2. Зудов Е. Г., Комратов Ю. С., Мардышкин Р. Е., Будеев А. В. Маркетинг и управление качеством продукции // НТФ УГТУ, 1995.–89 с.

3. Комратов Ю. С. Реконструкция – главное условие эффективной работы и развития // Сталь, 1995.–№ 1, С. 1–4.

4. Комратов Ю. С., Одесский П. Д., Паршин В. А. и др. Горячекатаный прокат класса С345 из стали с небольшим содержанием марганца // Сталь.–1995.–№ 1, С. 47–52.

5. Комратов Ю. С., Николаев В. А., Стариков В. В. Повышение стойкости валков универсально-балочных станков // Металлург.–1994.–№ 2.–С. 30–32.

6. Комратов Ю. С., Третьяков М. А., Николаев В. А., Стариков В. В., Прогрессивная технология изготовления составных балков УБС с обеспечением повышенной надежности в процессе эксплуатации // Металлург.–1994.–№ 7.–С. 35–36.

7. Лехов О. С., Комратов Ю. С. Оптимизация конструктивных параметров линии привода обжимной клетки 1300 универсально-балочного стана // На передовых рубежах науки и инженерного творчества. Труды второй международной конференции Регионального Уральского отделения Академии инженерных наук РФ.–Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2000.–С. 127–128.

8. Комратов Ю. С., Лехов О. С. Технико-экономическое состояние и перспективы развития сталеплавильно-прокатного комплекса НТМК // На передовых рубежах науки и инженерного творчества. Труды второй международной конференции Регионального Уральского отделения Академии инженерных наук РФ.–Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2000.–С. 107–109.

9. Патент РФ 2012431. Способ прокатки квадратных заготовок / Паутов А. Г., Руш А. Л., Калягин В. Н., Горфинкель Д. Г., Киричков А. А.,

Перепечаев В. И., Фейгин Г. Д., Комратов Ю. С. // Бюллетень изобретений, 1994. № 1–10.

10. Патент 2120477 РФ. Способ раскисления, модифицирования и микролегирования ванадием стали / Комратов Ю. С., Кузовков А. Я., Чернушевич А. В. и др. // Бюллетень изобретений, 1998. № 27–31.

11. Патент 2127322 РФ. Способ микролегирования низкоуглеродистой стали / Комратов Ю. С., Кузовков А. Я., Ильин В. И. и др. // Бюллетень изобретений, 1999. № 6–9.

12. Патент 2121896 РФ. Способ прокатки толстых листов / Калягин В. Н., Бородин В. В., Сурин П. К., Паутов П. К., Руш А. Л., Кузовков А. Я., Комратов Ю. С. и др. // Бюллетень изобретений, 1998. № 32–36.

13. Патент 2138843 РФ. Способ получения высококачественной стали / Комратов Ю. С., Кузовков А. Я., Полушин А. А. и др. // Бюллетень изобретений, 1999. № 1–6.

14. Патент 2073739 РФ. Конструкционная сталь / Александров Б. Л., Аршанский М. И., Беловодченко А. И., Заболотный В. В., Киричков Ю. С., Комратов Ю. С. и др. // Бюллетень изобретений, 1997. № 1–5.

15. Комратов Ю.С., Лехов О.С. Исследование напряженно-деформированного состояния двухслойного банджа прокатного валка // Производство проката, 2002.-№ 4, С. 36-39.

---

Подписано в печать		Формат 60x80	1/16
Бумага типографская	Офсетная печать		Усл. п.л.
Уч.-изд.л.	Тираж 100	Заказ	Бесплатно

---

Издательство УГТУ

620002, Екатеринбург, Мира, 19

Ризография НИЧ. 620002, Екатеринбург, Мира, 19



