

№ 1287

А.Д. Зобнин  
Н.А. Чиченев  
А.Ю. Зарапин

# **Технологические основы проектирования прокатных комплексов**

Расчет параметров листовой прокатки

Учебное пособие

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

№ 1287

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Кафедра машин и агрегатов металлургических предприятий

А.Д. Зобнин

Н.А. Чиченев

А.Ю. Зарапин

# **Технологические основы проектирования прокатных комплексов**

Расчет параметров листовой прокатки

Учебное пособие

Допущено учебно-методическим объединением по образованию в области металлургии в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 150400 – Технологические машины и оборудование, специальность 150404 – Металлургические машины и оборудование

УДК 621.771.07  
З-78

Рецензент  
канд. техн. наук *С.М. Ионов*

**Зобнин А.Д., Чиченев Н.А., Зарапин А.Ю.**

З-78      Технологические основы проектирования прокатных комплексов: Расчет параметров листовой прокатки: Учеб. пособие. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2009. – 124 с.  
ISBN 978-5-87623-261-8

Изложены алгоритмы решения и примеры задач по основным разделам листовой прокатки: геометрия и кинематика очага деформации, условия захвата полосы валками, особенности напряженно-деформированного состояния и формоизменения полосы, внешнее трение, энергосиловые параметры, температура полосы при горячей прокатке.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальностям 150404 «Металлургические машины и оборудование», но может быть полезно студентам направления 150100 «Металлургия», которые специализируются в области обработки металлов давлением. Пособие может быть также использовано в курсовом и дипломном проектировании при разработке технологии и оборудования продольной прокатки.

**УДК 621.771.07**

**ISBN 978-5-87623-261-8**

© Национальный исследовательский  
технологический университет  
«МИСиС», 2009

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	4
Введение.....	5
1. Очаг деформации.....	6
1.1. Алгоритм расчета характеристик очага деформации.....	6
1.2. Примеры расчета.....	7
2. Условия захвата полосы валками.....	15
2.1. Алгоритм расчета и проверки условий захвата полосы валками.....	15
2.2. Примеры расчета.....	15
3. Кинематика процесса прокатки.....	23
3.1. Алгоритм расчета скорости движения полосы и средней скорости деформации.....	23
3.2. Расчет скорости движения полосы при свободной и непрерывной прокатке.....	24
3.3. Расчет скоростей движения полосы и окружной скорости валков при непрерывной прокатке в двухклетевой группе прокатного стана.....	26
3.4. Примеры расчета.....	26
4. Напряженно-деформированное состояние и уширение полосы.....	39
4.1. Особенности расчета уширения полосы при прокатке.....	39
4.2. Примеры расчета.....	39
5. Внешнее трение при прокатке.....	43
5.1. Определение коэффициента трения между полосой и валками.....	43
5.2. Примеры расчета.....	45
6. Энергосиловые параметры прокатки.....	48
6.1. Методика расчета усилия и момента прокатки.....	48
6.2. Примеры расчета.....	54
7. Температура полосы при горячей прокатке.....	75
7.1. Расчет температурного баланса полосы.....	75
7.2. Примеры расчетов.....	77
8. Расчет скоростных и энергосиловых параметров прокатки.....	95
8.1. Особенности технологии и расчета параметров прокатки толстых листов.....	95
8.2. Примеры расчета.....	99
Библиографический список.....	123

## Предисловие

При подготовке инженеров-механиков по специальности 150404 «Металлургические машины и оборудование» проблемы выбора рациональной конструкции прокатных станов и определения оптимальных технологических режимов пластического формоизменения металла рассматриваются в дисциплинах, посвященных теории и технологии процессов прокатки. Данное учебное пособие написано в соответствии с программой курса «Технологические основы проектирования прокатных комплексов».

Данное пособие является логическим продолжением изданного в 2008 г. учебного пособия, посвященного основам теории продольной прокатки. Изложены алгоритмы решения и примеры задач по основным разделам листовой прокатки: геометрия и кинематика очага деформации, условия захвата полосы валками, особенности напряженно-деформированного состояния и формоизменения полосы, внешнее трение, энергосиловые параметры, температура полосы при горячей прокатке.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности 150404 «Металлургические машины и оборудование», и может быть использовано при проведении практических занятий и выполнении курсовых и дипломных проектов. Оно может быть полезно инженерам-технологам для разработки рациональных режимов получения качественного проката, а также для инженеров-механиков, занимающихся эксплуатацией прокатных станов.

## Введение

В современных условиях возрастает важность задач и ответственность металлургической промышленности за обеспечение предприятий и организаций страны высококачественной металлопродукцией. В планах развития металлургической промышленности намечено строительство новых цехов и отделений прокатки листовой и сортовой стали, а также реконструкция ряда действующих прокатных станов с целью внедрения более эффективных способов производства.

Прокатное производство представляет собой большой и сложный комплекс машин и агрегатов, обеспечивающих выполнение непрерывного технологического процесса, и успешная работа которых невозможна без квалифицированного персонала. Возрастающие требования к качеству листового и сортового проката вызывают необходимость подготовки специалистов, способных решать задачи по разработке или выбору рациональной конструкции прокатных станов и определению оптимальных технологических режимов пластического формоизменения металла.

Поэтому в основную образовательную программу подготовки инженеров-механиков по специальности 150404 «Металлургические машины и оборудование» введена дисциплина «Технологические основы проектирования прокатных комплексов».

В данном учебном пособии рассмотрены алгоритмы решения и примеры задач по основным разделам листовой прокатки.

# 1. ОЧАГ ДЕФОРМАЦИИ

## 1.1. Алгоритм расчета характеристик очага деформации

Алгоритм расчета размеров очага деформации представляет собой последовательность вычислений указанных ниже параметров.

1. Абсолютное обжатие полосы

$$\Delta h = h_0 - h_1.$$

2. Относительное обжатие

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0} = \frac{\Delta h}{h_0};$$

3. Угол захвата

$$\alpha = \sqrt{\frac{2\Delta h}{D}}.$$

4. Длина дуги захвата

$$l_d = \sqrt{\frac{\Delta h D}{2}} = \sqrt{\Delta h R}.$$

5. Ширина полосы после прохода  $b_1$  и величина уширения  $\Delta b$ :

$$b_1 = b_0 + \Delta b, \Delta b = \frac{0,4\Delta h l_d}{h_0} = 0,4 \varepsilon l_d.$$

6. Площадь контактной поверхности

$$A_k = 0,5 l_d (b_0 + b_1).$$

7. Коэффициент вытяжки (определяется из уравнения постоянства объемов)

$$\lambda = \frac{h_0 b_0}{h_1 b_1}.$$

8. Длина полосы после прохода

$$L_1 = \lambda L_0.$$

9. Коэффициенты уширения и обжатия

$$\xi = \frac{b_0}{b_1}; \quad \frac{1}{\eta} = \frac{h_0}{h_1}.$$

## 1.2. Примеры расчета

### Пример 1

Полосу толщиной 40 мм прокатали за один проход до толщины 32 мм. Определить абсолютное  $\Delta h$  и относительное  $\varepsilon$  обжатие полосы за проход.

#### Решение

1. Вычисляем абсолютное обжатие полосы:

$$\Delta h = h_0 - h_1 = 40 - 33,5 = 6,5 \text{ мм.}$$

2. Вычисляем относительное обжатие полосы:

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0} = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{6,5}{40} = 0,163 = 16,3 \text{ \%}.$$

### Пример 2

Полоса после первого прохода в чистовой клети толстолистого стана имела толщину 58 мм. Определить абсолютное обжатие полосы, толщину ее до прохода, если известно, что относительное обжатие за проход равнялось 10,8 %.

#### Решение

1. Определим толщину полосы до прохода:

$$h_0 = \frac{h_1}{1 - \varepsilon} = \frac{58}{1 - 0,108} = 65 \text{ мм.}$$

2. Определяем абсолютное обжатие полосы за проход:

$$\Delta h = h_0 - h_1 = 65 - 58 = 7 \text{ мм.}$$

### Пример 3

Толстый лист с поперечным сечением  $55 \times 2500$  мм и длиной 9,9 м после прокатки в чистовой клети ТЛС-3600 стал тоньше на 33,4 мм и удлинился на 15,1 м. Определить уширение листа.

#### Решение

1. Определяем конечные толщину  $h_k$  и длину  $L_k$  раската:

$$h_k = h_0 - \Delta h_{\Sigma} = 55 - 33,4 = 21,6 \text{ мм;}$$

$$L_k = L_0 + \Delta l_{\Sigma} = 9,9 + 15,1 = 25 \text{ м.}$$

2. Определяем конечную ширину листа, используя закон постоянства объема  $h_0 b_0 L_0 = h_k b_k L_k$ :



$$b_k = \frac{h_0 b_0 L_0}{h_k L_k} = \frac{55 \cdot 2500 \cdot 9,9}{21,6 \cdot 25} = 2521 \text{ мм.}$$

3. Находим уширение листа:

$$\Delta b_k = b_k - b_0 = 2521 - 2500 = 21 \text{ мм.}$$

#### Пример 4

Слиток с начальными размерами  $640 \times 800 \times 3200$  мм прокатали за один проход на блюминге 1150. Абсолютное обжатие в проходе составляло 70 мм, а полоса стала шире на 20 мм. Определить относительное обжатие и конечные размеры прокатанной заготовки.

#### Решение

1. Определяем относительное обжатие слитка за проход:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{70}{640} = 0,109 = 10,9 \text{ \%}.$$

2. Находим толщину и ширину заготовки после прохода:

$$h_1 = h_0 - \Delta h = 640 - 70 = 570 \text{ мм;}$$

$$b_1 = b_0 + \Delta b = 800 + 20 = 820 \text{ мм.}$$

3. Вычисляем длину заготовки после прохода, используя закон постоянства объема  $h_0 b_0 L_0 = h_1 b_1 L_1$ :

$$L_1 = \frac{h_0 b_0 L_0}{h_1 b_1} = \frac{640 \cdot 800 \cdot 3200}{570 \cdot 820} = 3505 \text{ мм.}$$

#### Пример 5

На шестиклетевом полунепрерывном полосовом стане 810 горячей прокатки прокатали полосу толщиной  $h_1 = 1,5$  мм. Определить толщину полосы перед последней клетью, абсолютное и относительное обжатие полосы, если известно, что коэффициент вытяжки  $\lambda = h_5/h_6 = 1,12$ .

Так как при прокатке тонких полос, когда радиус валков  $R$  значительно больше, чем толщина прокатываемых полос, уширение практически отсутствует, поэтому весь металл, обжимаемый по толщине, идет в удлинение.

#### Решение

1. Находим начальную толщину полосы:

$$h_5 = \lambda h_6 = 1,12 \cdot 1,5 = 1,68 \text{ мм.}$$

2. Вычисляем абсолютное  $\Delta h$  и относительное  $\varepsilon$  обжатие полосы:

$$\Delta h = h_5 - h_6 = 1,68 - 1,5 = 0,18 \text{ мм};$$

$$\varepsilon = \frac{h_5 - h_6}{h_5} = \frac{\Delta h}{h_5} = \frac{0,18}{1,68} = 0,107 = 10,7 \text{ \%}.$$

### Пример 6

Лист с начальными размерами  $48 \times 1250 \times 10660$  мм прокатали в валках диаметром 900 мм за один проход, при этом коэффициент уширения равен 1 и коэффициент вытяжки  $\lambda = h_0/h_1 = 1,25$ . Определить размеры очага деформации и геометрические размеры листа до прохода.

#### Решение

1. В связи с тем что коэффициент уширения равен 1, можно сделать вывод, что весь металл, обжимаемый по толщине, идет в удлинение. Поэтому можем найти начальную толщину полосы:

$$h_0 = \lambda h_1 = 1,25 \cdot 48 = 60 \text{ мм}.$$

2. Вычисляем абсолютное  $\Delta h$  и относительное  $\varepsilon$  обжатие полосы:

$$\Delta h = h_0 - h_1 = 60 - 48 = 12 \text{ мм}.$$

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0} = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{12}{60} = 0,2 = 20 \text{ \%}.$$

3. Определяем длину дуги захвата металла валками:

$$l_d = \sqrt{\Delta h R} = \sqrt{12 \cdot 450} = 73,78 \text{ мм}.$$

4. Вычисляем угол захвата:

$$\alpha = \sqrt{\Delta h / R} = \sqrt{12 / 450} = 0,1633 \text{ рад}.$$

5. Определяем фактор формы очага деформации:

$$\frac{l_d}{h_{cp}} = \frac{2l_d}{h_0 + h_1} = \frac{2 \cdot 73,78}{60 + 48} = 1,37.$$

6. Вычисляем площадь контакта металла с валком (при  $b_0 = b_1$ ):

$$A_k = \frac{l_d (b_0 + b_1)}{2} = 73,78 \cdot 1250 = 92\,225 \text{ мм}^2 = 0,0922 \text{ м}^2.$$

7. Находим длину полосы до прохода:

$$L_0 = \frac{L_1}{\lambda} = \frac{10\,660}{1,25} = 8528 \text{ мм.}$$

*Ответ.* Начальные размеры полосы  $60 \times 1250 \times 8528$  мм.

### **Пример 7**

Определить размеры очага деформации и угол захвата при прокатке полосы толщиной 50 мм в валках диаметром 800 мм, толщина и ширина полосы до прокатки 75 мм и 1500 мм соответственно.

#### **Решение**

1. Определяем абсолютное обжатие полосы:

$$\Delta h = h_0 - h_1 = 75 - 50 = 25 \text{ мм.}$$

2. Вычисляем угол захвата:

$$\alpha = \sqrt{\Delta h / R} = \sqrt{25 / 400} = 0,25 \text{ рад} = 14,3 \text{ град.}$$

3. Определяем длину дуги захвата:

$$l_d = \sqrt{\Delta h R} = \sqrt{25 \cdot 400} = 100 \text{ мм.}$$

4. Вычисляем уширение:

$$\Delta b = \frac{0,4 \Delta h l_d}{h_0} = \frac{0,4 \cdot 25 \cdot 100}{75} = 13,33 = 13 \text{ мм.}$$

5. Определяем ширину полосы после прокатки:

$$b_1 = b_0 + \Delta b = 1500 + 13 = 1513 \text{ мм.}$$

6. Вычисляем площадь контакта металла с валком:

$$A_{\text{к}} = \frac{l_d (b_0 + b_1)}{2} = \frac{100 \cdot (1500 + 1513)}{2} = 150\,665 \text{ мм}^2 = 0,1506 \text{ м}^2.$$

### **Пример 8**

Полоса толщиной 60 мм прокатана в рабочих валках диаметром 900 мм непрерывного двухклетьевого стана; на входе в первую клеть полоса имела размеры  $h_0 \times b_0 \times L_0 = 200 \times 1400 \times 10\,000$  мм, а на выходе  $h_1 = 100$  мм. Определить размеры очага деформации, коэффициенты деформации в клетях стана и конечные размеры полосы.

### Решение

1. Определяем абсолютные и относительные обжатия полосы в первой и второй клетях стана:

$$\Delta h_1 = h_0 - h_1 = 200 - 100 = 100 \text{ мм}; \quad \varepsilon_1 = \frac{\Delta h_1}{h_0} = \frac{100}{200} = 0,5 = 50 \%;$$

$$\Delta h_2 = h_1 - h_2 = 100 - 60 = 40 \text{ мм}; \quad \varepsilon_2 = \frac{\Delta h_2}{h_1} = \frac{40}{100} = 0,4 = 40 \%.$$

2. Вычисляем углы захвата:

$$\alpha_1 = \sqrt{\Delta h_1 / R} = \sqrt{100 / 450} = 0,4714 \text{ рад} = 27,01 \text{ град};$$

$$\alpha_2 = \sqrt{\Delta h_2 / R} = \sqrt{40 / 450} = 0,2981 \text{ рад} = 17,08 \text{ град}.$$

3. Определяем длину дуг захвата:

$$l_{d_1} = \sqrt{\Delta h_1 R} = \sqrt{100 \cdot 450} = 212,13 \text{ мм};$$

$$l_{d_2} = \sqrt{\Delta h_2 R} = \sqrt{40 \cdot 50} = 134,16 \text{ мм}.$$

4. Вычисляем уширение:

$$\Delta b_1 = \frac{0,4 \Delta h_1 l_{d_1}}{h_0} = 0,4 \varepsilon_1 l_{d_1} = 0,4 \cdot 0,5 \cdot 212,13 = 42,43 \approx 42 \text{ мм};$$

$$\Delta b_2 = \frac{0,4 \Delta h_2 l_{d_2}}{h_1} = 0,4 \varepsilon_2 l_{d_2} = 0,4 \cdot 0,4 \cdot 134,16 = 21,47 \approx 21 \text{ мм}.$$

5. Определяем ширину полосы после первой и второй клетей:

$$b_1 = b_0 + \Delta b_1 = 1400 + 42 = 1442 \text{ мм};$$

$$b_2 = b_1 + \Delta b_2 = 1442 + 21 = 1463 \text{ мм}.$$

6. Вычисляем площади контакта металла с валками:

$$A_1 = \frac{l_{d_1} (b_0 + b_1)}{2} = 0,5 \cdot 212,13 (1400 + 1442) = 301\,437 \text{ мм}^2 = 0,3014 \text{ м}^2.$$

$$A_2 = \frac{l_{d_2} (b_1 + b_2)}{2} = 0,5 \cdot 134,16 (1442 + 1463) = 194\,867 \text{ мм}^2 = 0,1949 \text{ м}^2.$$