

$q_0$  – начальная интенсивность фрикционного тепловыделения;  $q_1, q_2$  – тепловые потоки в фрикционную накладку и диск (барабан);  $S_T$  – тормозной путь;  $t$  – время;  $t_T$  – полное время торможения;  $v_0$  – начальная скорость торможения машины;  $v_1$  – конечная скорость притормаживания машины;  $\alpha$  – угол наклона дороги к горизонту;  $\alpha'$  – коэффициент теплоотдачи со стороны  $z_2 = h_2$ ;  $\alpha_T$  – коэффициент распределения тепловых потоков;  $\beta$  – часть работы силы тяжести, приходящаяся на тормоза;  $\varphi$  – коэффициент сцепления;  $\lambda_{1,2}, c_{1,2}, \rho_{1,2}, a_{1,2}$  – теплопроводность, теплоемкость, плотность, температуропроводность фрикционной накладки и диска (барабана);  $\vartheta_2$  – температура диска (барабана);  $\vartheta_0$  – начальная температура.

#### Литература

1. Балакин В.А., Сергиенко В.П. Тепловые расчеты тормозов и узлов трения. – Гомель: ИММС НАН РБ, 1999.
2. Балакин В.А., Сергиенко В.П., Родзевич П.Е., Лысенко Ю.В. Сравнительный анализ тепловой нагруженности тормозов грузовых автомобилей //Трение и износ. – 22 (2001). – № 2, С. 123-126.
3. Балакин В.А., Сергиенко В.П., Лысенко Ю.В. Тепловой режим работы тормозов карьерных самосвалов БелАЗ в условиях их экстренного торможения //Трение и износ. – 22 (2001). – № 5, С. 520-526.
4. Балакин В.А., Сергиенко В.П., Лысенко Ю.В. Теплофизические процессы в зоне фрикционного контакта //Трение и износ. – 22 (2001). – № 1. – С. 3-7.
5. Балакин В.А., Сергиенко В.П., Лысенко Ю.В. Температурные задачи трения //Трение и износ. – 23 (2002). – № 3. С. 258-267.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДЕФОРМАЦИОННЫХ И СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ

А.В. Кухаренко

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь

Научный руководитель Ю.Л. Бобарикин

В практике существует проблема точной оценки деформационных и силовых параметров холодной прокатки труб. В настоящей работе представлена методика расчета этих параметров.

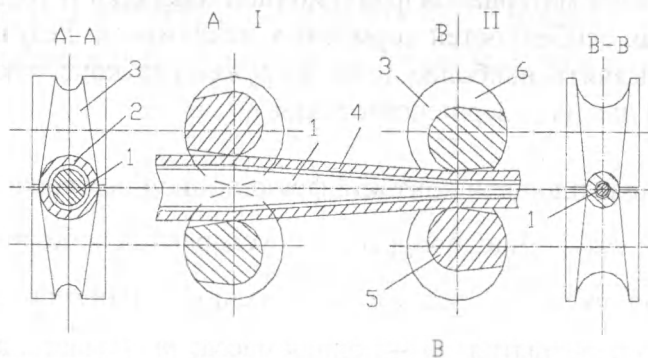


Рис. 1. Схема прокатки труб на стане ХПТ: 1 – коническая оправка; 2 – кольцевой зазор; 3 – ручей калибров; 4 – прокатываемая труба; 5 – рабочие валки (I-переднее и II-заднее положения клетки)

Процесс холодной прокатки труб производится на двухвалковом стане периодического действия ХПТ (рис. 1). Он заключается в том, что деформация участка металла валками происходит на неподвижной конической оправке при неподвижной заготовке и возвратно-поступательном движении рабочей клетки.

Формоизменение заготовки происходит следующим образом. В исходном положении рабочей клетки производится подача заготовки, при этом внутренняя поверхность рабочего конуса отходит от поверхности оправки, образуя зазор. При движении клетки вперед и перекачивании калибров, имеющих рабочий ручей переменного постепенно уменьшающегося сечения, происходит деформация металла. В крайнем заднем положении рабочей клетки происходит поворот прокатываемой заготовки вместе с оправкой на  $1,05 \dots 1,57$  рад и клеть начинает двигаться обратно. В исходном положении рабочей клетки заканчивается прокатка участка трубы, получаемого за цикл работы стана.

Метод расчета калибровки инструмента станов ХПТ включает в себя определение размеров оправки, выбор длин участков рабочей части ручья, определение допустимой конусности ручья, редуцирования и расчет профиля гребня и развала ручья. Основными данными для расчета калибровки являются наружный диаметр и толщина стенки заготовки и готовой трубы ( $D_3, t_3, D_T, t_T$ ), а также параметры стана ХПТ.

**Определение подачи металла за цикл.** Важнейшим параметром периодической прокатки является подача металла за цикл, от которого во многом зависит ход прокатки в целом. Подача металла за цикл прокатки ограничивается допустимой величиной усилия на валки  $P_\Sigma$  и величиной осевого усилия на винт подачи  $Q_\Sigma$ .

Для дальнейших расчетов необходимо определить суммарный коэффициент вытяжки за один цикл:

$$\mu_\Sigma = \frac{(d_3 + t_3) \cdot t_3}{(d_T + t_T) \cdot t_T}.$$

Усредненное полное усилие металла на валки определяется по формуле:

$$P(m_1) = k_\sigma \cdot \sigma_{B50} \cdot (D_3 + D_T) \cdot \sqrt{m_1 \cdot \mu_\Sigma \cdot (t_3 - t_T) \cdot \frac{R_{cp}}{L_{раб} - 2,125 \cdot m_1 \cdot \mu_\Sigma}},$$

где  $k_\sigma$  – коэффициент, зависящий от характера упрочнения металла;  $\sigma_{B50}$  – временное сопротивление металла при 50% деформации;  $L_{раб}$  – длина рабочей части ручья;  $R_{cp}$  – средний радиус обжимной зоны ручья, которая определяется по следующей формуле:

$$R_{cp} = R_6 - 0,5 \cdot \left( \frac{d_3}{2} + \frac{d_T}{2} \right).$$

Значение подачи определяется решением уравнения при значении функции усилия на валке равной допустимому значению усилия.

Аналогично определяется подача исходя из допустимого осевого усилия на винт:

$$Q(m_2) = n_Q \cdot P(m_2).$$

За расчетную подачу  $m$  принимается наименьшая из полученных подач  $m_1$  и  $m_2$ .

Определение длин характерных участков калибра. Деформация металла при холодной прокатки осуществляется рабочей частью ручья  $L_{раб}$ , которая делится на следующие участки:

Зона редуцирования, где происходит уменьшение диаметра трубы до соприкосновения с оправкой,

$$l_{ред} = \frac{\Delta D_{ред}}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma_{ред}},$$

где  $\Delta D_{ред} = 2,25 \cdot t_3$  – заданное уменьшение трубы по диаметру;  $\operatorname{tg} \gamma_{ред}$  – конусность ручья на участки редуцирования.

Обжимная зона, где одновременно с уменьшением диаметра уменьшается толщина стенки,

$$l_{обж} = L_{раб} - l_{ред} - l_{пред} - l_{кал}.$$

Предотделочный участок, предназначенный для калибровки стенки трубы,

$$l_{пред} = \Pi_1 \cdot m \cdot \mu_{\Sigma},$$

где  $\Pi_1$  – коэффициент калибровки стенки трубы.

Калибрующий участок, предназначенный для калибровки трубы по наружному диаметру,

$$l_{кал} = \Pi_2 \cdot m \cdot \mu_{\Sigma},$$

где  $\Pi_2$  – коэффициент калибровки по наружному диаметру.

Определение профиля гребня ручья в обжимной зоне. Профиль гребня ручья должен выполняться по плавной кривой, и обеспечивать падение как абсолютных, так и относительных деформаций по длине обжимной зоны ручья. Профиль обжимного участка вала стана ХПТ определяется по формуле Ю.Ф. Шевакина, в основу которой положено изменение относительного обжатия по закону показательной функции.

Полученное на этой основе уравнение, для определения толщины стенки в любом сечении обжимной зоны, имеет вид:

$$t(x) = \frac{t_0}{\left( \frac{\mu_0 - 1}{1 - e^{-n}} \right) \cdot \left( 1 - e^{-n \cdot \frac{x}{l_{обж}}} \right)},$$

где  $t_0 = t_3 + \Delta t_{ред}$  - толщина стенки рабочего конуса в конце участка редуцирования, здесь  $\Delta t_{ред} = 0,75 \cdot \Delta D_{ред} \cdot \frac{t_3}{D_3}$  - утолщение стенки при редуцировании;  $\mu_0 = \frac{t_0}{t_T}$  - суммарная вытяжка по стенке трубы;  $n$  - коэффициент крутизны профиля обжимной зоны;  $x$  - текущая координата.

Определение конусности оправки. Длина рабочей части оправки без калибрующего участка:  $L_{опр} = L_{раб} - l_{кал}$ .

Диаметр цилиндрической части оправки:  $D_{ц} = D_3 - 2 \cdot t_3 - \Delta D_{ред}$ .

Конусность оправки:  $tg\alpha = \frac{D_{ц} - (D_T - 2 \cdot t_T)}{2 \cdot L_{раб1}}$ .

Построение развертки ручья калибра. Глубина ручья калибра определяется величиной конусностью оправки и толщиной стенки трубы по длине рабочей зоны.

Радиус оправки в любом сечении по длине рабочей зоны:  $R_{опр}(x) = \frac{D_{ц}}{2} - tg\alpha \cdot x$ .

Профиль ручья обжимной зоны:  $R_{обж}(x) = R_{опр}(x) + t(x)$ .

Профиль ручья зоны редуцирования:  $R_{ред}(x) = R_{обж}(l_{ред}) - tg\gamma_{ред} \cdot (x - l_{ред})$ .

Профиль ручья предотделочной зоны:  $R_{пред}(x) = R_{обж}(l_{пред}) - tg\alpha \cdot (x - l_{пред})$ .

Профиль ручья калибрующей зоны:  $R_{кал}(x) = R_{пред}(l_{кал})$ .

Профиль внутренней стенки трубы:

зона редуцирования:  $r_{ред}(x) = \frac{d_3}{2} - \left( \frac{0,5 \cdot d_3 - R_{опр}(l_{ред})}{l_{ред}} \right) \cdot x$ ;

участок калибровки:  $r_{кал}(x) = R_{опр}(l_{кал})$ .

Определение контактных напряжений. Для определения контактных напряжений Ю.Ф. Шевакиным предложены следующие эмпирические формулы: при прямом ходе клетки:

$$P_{пр}(x) = \sigma_B \cdot \left[ n_{\omega} + f \cdot \left( \frac{t_3}{t(x)} - 1 \right) \cdot \frac{R(x)}{R_{ш}} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot R(x) \cdot \Delta S_{пр}}}{t(x)} \right];$$

при обратном ходе клетки:

$$P_{обр}(x) = \sigma_B \cdot \left[ n_{\omega} + (2 \dots 2,5) \cdot f \cdot \left( \frac{t_3}{t(x)} - 1 \right) \cdot \frac{R_{ш}}{R(x)} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot R(x) \cdot \Delta S_{обр}}}{t(x)} \right],$$

где  $\sigma_B$  - временное сопротивление прокатываемого металла при данной степени деформации;  $n_{\omega}$  - коэффициент, учитывающий влияние среднего главного напряжения;  $f$  - коэффициент внешнего трения;  $R(x)$  - глубина калибра в данном сечении;  $R_{ш}$  - радиус ведущей валковой шестерни;  $\Delta S_{пр}$  и  $\Delta S_{обр}$  - обжатие при прямом и обратном ходе клетки.

По предлагаемой методике могут быть рассчитаны деформационные и силовые параметры холодной периодической прокатки тр. Например, был приведен расчет прокатки трубы  $D_T = 30$  мм и  $t_T = 0,9$  мм Стали 10 из заготовки  $D_3 = 45$  мм и  $t_T = 2,9$  мм на стане ХПТ32-2. Анализ полученных расчетных данных позволил определить пути оптимизации прокатки, заключающегося в снижении давления на валки и повышении их ресурса с помощью изменения параметров, входящих в соответствующие формулы.

Профиль валка кантовальной зоны:  $R_{\text{кан}}(x) = R_{\text{ок}}(x) - (x - l_{\text{кан}}) \cdot (1 - l_{\text{кан}})$   
 Профиль валка передотделочной зоны:  $R_{\text{отд}}(x) = R_{\text{ок}}(x) - (x - l_{\text{отд}}) \cdot (1 - l_{\text{отд}})$   
 Профиль валка зоны реультивации:  $R_{\text{реу}}(x) = R_{\text{ок}}(x) - (x - l_{\text{реу}}) \cdot (1 - l_{\text{реу}})$   
 Профиль валка обжимной зоны:  $R_{\text{обж}}(x) = R_{\text{ок}}(x) + l(x)$

Профиль валка кантовальной зоны:  $R_{\text{кан}}(x) = R_{\text{ок}}(x) - (x - l_{\text{кан}}) \cdot (1 - l_{\text{кан}})$   
 Профиль валка передотделочной зоны:  $R_{\text{отд}}(x) = R_{\text{ок}}(x) - (x - l_{\text{отд}}) \cdot (1 - l_{\text{отд}})$   
 Профиль валка зоны реультивации:  $R_{\text{реу}}(x) = R_{\text{ок}}(x) - (x - l_{\text{реу}}) \cdot (1 - l_{\text{реу}})$   
 Профиль валка обжимной зоны:  $R_{\text{обж}}(x) = R_{\text{ок}}(x) + l(x)$

Профиль валка кантовальной зоны:  $R_{\text{кан}}(x) = R_{\text{ок}}(x) - (x - l_{\text{кан}}) \cdot (1 - l_{\text{кан}})$   
 Профиль валка передотделочной зоны:  $R_{\text{отд}}(x) = R_{\text{ок}}(x) - (x - l_{\text{отд}}) \cdot (1 - l_{\text{отд}})$   
 Профиль валка зоны реультивации:  $R_{\text{реу}}(x) = R_{\text{ок}}(x) - (x - l_{\text{реу}}) \cdot (1 - l_{\text{реу}})$   
 Профиль валка обжимной зоны:  $R_{\text{обж}}(x) = R_{\text{ок}}(x) + l(x)$

Профиль валка кантовальной зоны:  $R_{\text{кан}}(x) = R_{\text{ок}}(x) - (x - l_{\text{кан}}) \cdot (1 - l_{\text{кан}})$   
 Профиль валка передотделочной зоны:  $R_{\text{отд}}(x) = R_{\text{ок}}(x) - (x - l_{\text{отд}}) \cdot (1 - l_{\text{отд}})$   
 Профиль валка зоны реультивации:  $R_{\text{реу}}(x) = R_{\text{ок}}(x) - (x - l_{\text{реу}}) \cdot (1 - l_{\text{реу}})$   
 Профиль валка обжимной зоны:  $R_{\text{обж}}(x) = R_{\text{ок}}(x) + l(x)$