

УДК 621.774

## РАЗВИТИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЙ ОТ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПИЛЬГЕРНОЙ ПРОКАТКЕ ТРУБ

канд. техн. наук, доц. С.В. ПИЛИПЕНКО

(Национальная металлургическая академия Украины, Днепр, Украина);

канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН

(Полоцкий государственный университет)

Рассмотрены основные существующие на данный момент зависимости, позволяющие правильно рассчитать тепловыделения от пластической деформации при холодной пильгерной валковой прокатке труб. На основе имеющихся зависимостей предложено дальнейшее развитие метода расчета тепловыделений, позволяющее учитывать особенности представленного процесса. Результаты проверены расчетом параметров рабочих поверхностей деформационного инструмента станов холодной пильгерной валковой прокатки с последующей прокаткой промышленных партий труб из титановых сплавов, что доказывает действенность метода.

**Ключевые слова:** пластическая деформация, тепловыделения, деформационный инструмент, рабочая поверхность, холодная пильгерная валковая прокатка.

**Введение.** Холодная прокатка труб на станах (ХПТ) – процесс периодического действия, параметры которого изменяются вдоль конуса деформации вследствие изменения геометрических параметров деформирующего инструмента. Этот процесс широко применяется для производства холодно- и теплодеформированных прецизионных труб широкого спектра марок сталей и сплавов [1]. Кроме холодной и теплой прокатки в процессе ХПТ применяют безэмульсионную прокатку, когда трубы прокатываются без применения охлаждающей эмульсии, а только лишь с нанесением солевой смазки вне стана.

**Постановка задачи.** Процесс ХПТ характеризуется большой динамичностью, даже в станах старой конструкции имелась возможность прокатки труб со скоростью 100...120 двойных ходов клетки в минуту. В современных станах количество двойных ходов достигает 280 и более в минуту, что может вызывать значительные тепловыделения от пластической деформации. Причем этот процесс происходит в мгновенном очаге деформации за считанные доли секунды. Применение охлаждающей эмульсии значительно снижает тепловыделения – температура конуса не превышает 60...70 °С.

В мгновенном очаге вызванные тепловыделения могут оказать существенное влияние на силовые и деформационные параметры процесса деформации. В свою очередь, скорость деформации влияет на изменение механических характеристик.

**Анализ исследований.** Вопросам учета тепловыделений в ходе пластической деформации уделялось значительное внимание. Известно, что выделение тепла при адиабатических условиях пластического течения пропорционально накоплению пластической деформации [2–5]:

$$\Delta T_{\text{оэф}} = \frac{\sigma_T \dot{\epsilon}_i \tau_n}{c \cdot \rho}, \quad (1)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость металла заготовки Дж/(кг·град);  $\rho$  – плотность металла;  $\dot{\epsilon}_i$  – интенсивность скорости деформации;  $\tau_n$  – время процесса;  $\sigma_T$  – предел текучести деформируемого металла.

В процессах остаточной пластической деформации, по существу, вся энергия деформации превращается в тепло, поэтому такие процессы необратимы [6]. Энергия упругой деформации в данном случае очень мала и может быть приравнена к нулю. Поэтому можно считать

$$Q_{\text{оэф}} = \frac{1}{A} \int_{\epsilon_0}^{\epsilon_i} \sigma_i d\epsilon. \quad (2)$$

Согласно [5], компоненты тензора деформации для осесимметричного напряженного состояния (где положение любой точки определяется радиус-вектором  $\rho$ , полярным углом  $\theta$  и аппликатай  $x$ ) можно рассчитать из зависимостей:

$$\epsilon_x = \mu, \quad (3)$$

$$\epsilon_\rho = \frac{a}{2} \left( 1 + \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right), \quad (4)$$

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{a}{2} \left( 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right), \quad (5)$$

где  $\mu$  – вытяжка;  $r$  и  $R$  – внешний и внутренний диаметр трубы соответственно.

Интенсивность скорости деформации при объемном осесимметричном напряженно-деформированном состоянии можно определить по следующей формуле [7]:

$$\dot{\varepsilon}_i = \varepsilon_x \sqrt{1 + \frac{K^2}{3}}. \quad (6)$$

Здесь  $K = (\varepsilon_x - \varepsilon_{\theta}) / \varepsilon_p$ .

Изменение температуры в результате работы сил поверхностного трения:

$$\Delta T_{mp} = \frac{f \cdot F_k \cdot V_{мет} p_{cp}}{2(D_{об} - D_i)\lambda}, \quad (7)$$

где  $f$  – коэффициент трения;  $F_k$  – площадь контакта;  $\lambda$  – теплопроводность;  $p_{cp}$  – среднее удельное давление;  $V_{мет}$  – объём деформируемого металла.

В ходе пластической деформации наблюдаются тепловые потери от теплоизлучения, теплопередачи на рабочий инструмент (валки) и от теплопередачи охлаждающей жидкости в случае её применения.

Величину этих потерь можно учесть в той или иной степени.

Потери от теплоизлучения [8]:

$$\Delta T_{пот} = 1,07 \frac{C_u \cdot C_0 \cdot \frac{T_{мет}}{100} \cdot F_u \cdot (\tau_u - \tau_n)}{3600\rho \cdot M_{мет}}. \quad (8)$$

Здесь  $C_u$  – степень черноты металла;  $C_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $F_u$  – площадь излучения;  $M_{мет}$  – масса металла;  $T_{мет}$  – температура металла трубы;  $\tau_u$  – время двойного хода;  $\tau_n$  – время, на протяжении которого рассматриваемая площадь излучения контактирует с поверхностью валков (т.е. деформируется в мгновенном очаге деформации).

Потери от теплопередачи на инструмент [6]:

$$\Delta T_{пот} = \frac{2 \cdot F_k (T_{мет} - T_{вал}) \tau_n \alpha}{M_{мет} C_T}, \quad (9)$$

где  $F_k$  – площадь контакта металла с инструментом;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $P$  – удельный вес ( $\text{кг}/\text{см}^3$ );  $T_{вал}$  – температура металла валков.

Как показывают результаты ранее проведённого исследования [9], температура калибров при безэмульсионной прокатке ниже температуры поверхности конуса на 30...45 °С; при использовании эмульсии температура калибров находится в пределах 40...50 °С.

Цель представляемого исследования – развитие метода расчета тепловыделений от пластической деформации при холодной пильгерной прокатке труб с целью более точного учета особенностей процесса такой деформации.

**Основная часть.** Известно, что при пильгерной прокатке соблюдается следующее основное правило: обжатие трубы вдоль конуса деформации за цикл равно разнице геометрических параметров в рассматриваемом сечении и сечении, которое отстоит от него на таком расстоянии ( $\Delta x$ ), при котором объём металла, находящийся между этими сечениями, равен объёму подачи (рисунок 1) [2–4; 10].

Величина  $\Delta x$  в начале конуса равна величине подачи, а в конце конуса – полному линейному смещению за двойной ход клетки. Изменение величины  $\Delta x$  вдоль конуса деформации (рисунок 2) можно определить из зависимости [11]:

$$\Delta x = \frac{\sqrt{S_x + 2(\text{tg}\gamma_x - \text{tg}\alpha_x) \frac{mS_3(S_3 - D_3)}{D_x - S_x}} - S_x}{\text{tg}\gamma_x - \text{tg}\alpha_x}. \quad (10)$$

Здесь  $S_x$  – толщина стенки трубы в сечении;  $\text{tg}\gamma_x$  и  $\text{tg}\alpha_x$  – конусность развертки калибра и оправки на участке.

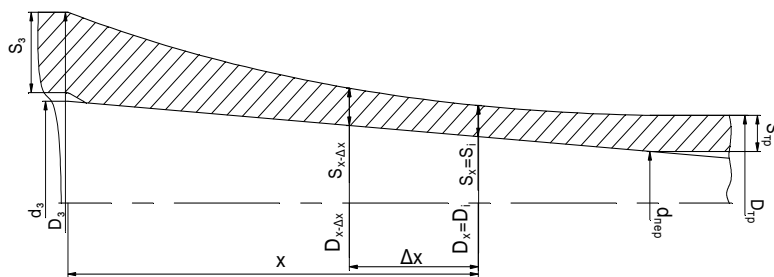


Рисунок 1. – Схема к расчету величины обжатия вдоль конуса деформации при пильгерном процессе [12]

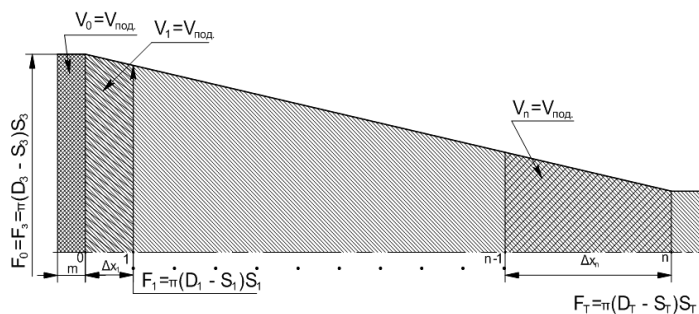


Рисунок 2. – Схема к определению числа циклов обжатий при периодической прокатке [12]

Заметим, что рассуждения относительно деформационных параметров, можно применить и к тепловым (рисунок 3). Рассчитывая приращение температуры от цикла к циклу вдоль всего конуса (с учетом потерь) и суммируя данные величины от сечения к сечению (см. рисунок 3), можно достаточно точно определить изменение температуры металла в ходе ведения процесса периодической прокатки:

$$T_x = T_{x-\Delta x} + \Delta T_x - \Delta T_{ном}. \quad (11)$$

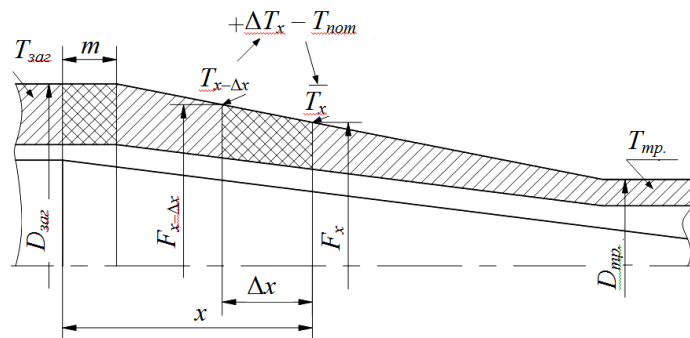


Рисунок 3. – Схема к расчету величины приращения температуры металла в сечениях конуса деформации при пильгерном процессе

Расчет температуры в сечениях конуса деформации с применением формулы (11) выглядит следующим образом: рассчитываются изменения всех геометрических и деформационных параметров вдоль конуса деформации [11; 12]; рассчитываются изменения величины  $\Delta x$  (формула (10)) от нулевого сечения до сечения  $n$  (см. рисунок 3); определяются приращения температуры от тепловыделений из-за пластической деформации (формула (1)) и поверхностного трения в сечениях  $x$  (формула (7)); пошагово, от сечения  $x - \Delta x$  до соответствующего ему сечения  $x$  (см. рисунок 3), начиная от сечения входа, рассчитываются значения температуры (формула (11)) начиная от заданной величины температуры заготовки; корректируются величины потерь на конвекцию и теплопередачу (формулы (8) и (9)).

Для анализа корректности работы модели выбран маршрут прокатки труб из титанового сплава Gr-2 на стане ХПТ-32 – 25×3...16,15×1,63.

Использовалась безэмульсионная прокатка.

В ходе прокатки пирометром с лазерным прицелом произведены замеры температуры наружной поверхности конуса в трех характерных для калибровки точках (таблица 1): начале конуса деформации; двух точках вдоль зоны обжатия и в центре зоны калибровки. Точки выбраны из расчета более точного определения их места расположения на конусе деформации (были расставлены метки).

Таблица 1. – Температура металла в зонах конуса деформации при прокатке труб из сплава Gr 2 по маршруту 25×3...16,15×1,63 (подача 4 мм, 60 дв. ход.)

№ прокатываемой трубы от начала процесса прокатки (после простоя стана)	Колебания температуры поверхности трубы в зонах конуса деформации, °С			
	зона редуцирования (40...45 мм*)	зона обжатия стенки (90...95 мм*)	зона обжатия стенки (200...205 мм*)	зона калибровки (середина зоны)
4 и далее	120...132	207...219	242...259	101...112
* – расстояние от начала конуса деформации.				

Далее, из параметров калибровки согласно предложенному методу рассчитаны все необходимые геометрические, кинематические и силовые параметры. Как результат – смоделировано изменение величины температуры конуса деформации в контрольных сечениях зоны редуцирования и обжатия стенки (рисунок 4).

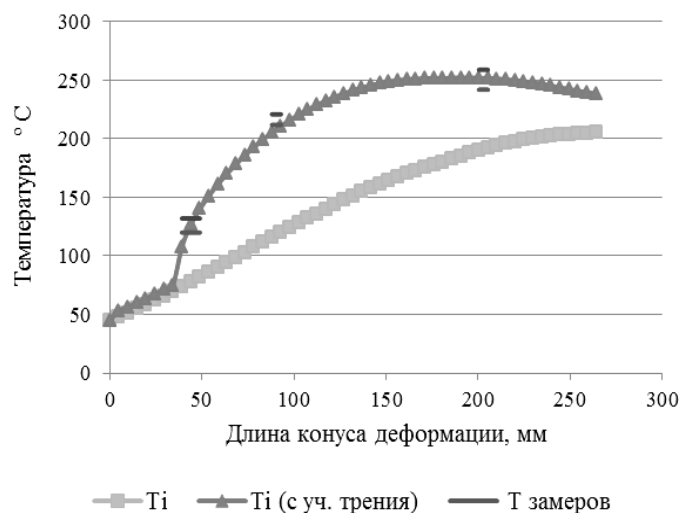


Рисунок 4. – Результаты моделирования изменения температуры наружной поверхности конуса деформации в зонах редуцирования и обжатия стенки при прокатке трубы из титанового сплава Gr-2 на стане ХПТ-32 по маршруту 25×3...16,15×1,63

Как видно из результатов моделирования (см. рисунок 4), линия тренда значений замеров совпадает с результатами моделирования в достаточной для использования предложенного метода мере.

**Заключение.** Исходя из результатов проведенного исследования предложено развитие метода расчета тепловыделений от пластической деформации при холодной пильгерной прокатке труб. На основе имеющихся зависимостей предложен метод расчета тепловыделений, позволяющий учитывать особенности процесса ХПТ. Результаты расчетов проверены в ходе экспериментального исследования холодной пильгерной валковой прокатки труб из титановых сплавов и доказали действенность метода.

По итогам моделирования величины тепловыделений сделан *вывод*: при применении безэмульсионной прокатки значительная часть тепловыделений происходит от воздействия сил трения.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Balakin, V.F. Influence of the parameters of the process of the cold pilger tube rolling on the Q-factor distribution along the cone of deformation / V.F. Balakin, S.V. Pilipenko // Itatube-journal. – 2016. – № 1. – P. 94–97.
- Журавлев, Г.М. Расчет температурного поля в зоне пластической деформации / Г.М. Журавлев, Дао Тиен Той // Изв. ТулГУ. Технические науки. Сталь. – 2012. – № 2. – С. 221–227.

3. Смирнов, В.С. Теория обработки металлов давлением / В.С. Смирнов. – М. : Metallurgy, 1973. – 796 с.
4. Томленов, А.Д. Теория деформирования металлов / А.Д. Томленов. – М. : Metallurgy, 1972. – 402 с.
5. Колмогоров, В.Л. Напряжения, деформации, разрушение / В.Л. Колмогоров. – М. : Metallurgy, 1970. – 229 с.
6. Томсен, Э. Механика пластических деформаций при обработке металлов / Э. Томсен, Ч. Янг, Ш. Кобаяши. – М. : Машиностроение, 1969. – 504 с.
7. Онищенко, И.И. Механика сплошной среды. Теория пластичности / И.И. Онищенко. – Киев : Изд-во КР «Политех», 1996. – 274 с.
8. Яловой, Н.И. Тепловые процессы при обработке металлов и сплавов давлением / Н.И. Яловой. – М. : Высш. шк., 1973. – 631 с.
9. Пилипенко, С.В. Развитие метода расчета параметров холодной пильгерной прокатки при заданном распределении развалки для получения регламентированной поперечной разностенности труб : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05 03 05 / С.В. Пилипенко. – Никополь, 2009. – 18 с.
10. Тетерин, П.К. Теория периодической прокатки / П.К. Тетерин. – М. : Metallurgy, 1978. – 256 с.
11. Орро, П.И. Производство стальных тонкостенных труб / П.И. Орро, Я.Е. Осада. – М. ; Харьков : Metallurgizdat, 1951. – 416 с.
12. Шевакин, Ю.Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб / Ю.Ф. Шевакин. – М. : Metallurgizdat, 1963. – 269 с.

Поступила 12.02.2018

#### DEVELOPMENT OF THE METHOD OF CALCULATION OF HEAT EXCHANGES FROM PLASTIC DEFORMATION AT COLD PILGRER ROLLER PIPE

*S. PILIPENKO, A. DUDAN*

*The main current dependencies are considered, which allow correctly calculate the heat release from plastic deformation during cold pilger roll rolling of pipes. On the basis of the available dependencies, it is proposed to further develop the method of calculating the thermal divisions, which makes it possible to take into account the features of the presented process. The results of the calculations are checked during the practice of calculating the working parameters of the working surfaces of the deformation tool for cold piston roller rolling and prove the validity of the method.*

**Keywords:** *plastic deformation, heat release, deformation tool, working surface, cold pilger rolling.*