

УДК 621.774

doi:10.20998/2413-4295.2016.42.16

## РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЙ ОТ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПИЛЬГЕРНОЙ ПРОКАТКЕ ТРУБ

**С. В. ПИЛИПЕНКО**

Докторант кафедры УП НМетАУ, Днепр, УКРАИНА  
e-mail: 44-08@mail.ru

**АННОТАЦИЯ** Процесс холодной пильгерной валковой прокатки широко применяется для производства холодно - и теплодеформированных прецизионных труб широкого спектра марок сталей и сплавов. В процессе ХПТ применяют холодную, теплую, безэмульсионную виды прокатки. Процесс ХПТ характеризуется большой динамичностью, в современных станах количество двойных ходов достигает 280 и более ходов в минуту. Даже при относительно небольших величинах подачи (2-4 миллиметра), учитывая длину конуса деформации (300-500 мм), металл деформируется в достаточно жестких условиях. Это может вызывать значительные тепловыделения от пластической деформации. Причем эта температура выделяется в мгновенном очаге деформации за считанные доли секунды. Все это необходимо учитывать при расчете силовых и деформационных параметров этого процесса.

В статье рассмотрены основные существующие на данный момент зависимости, позволяющие правильно рассчитать тепловыделения от пластической деформации при данном виде ОМД. Также рассмотрены зависимости, позволяющие учесть тепловые потери от конвекции и теплопередачи. На основе имеющихся зависимостей предложен свой метод расчета тепловыделений, позволяющий более точно учитывать особенности процесса ХПТ. Результаты расчетов проверены в ходе практики холодной пильгерной валковой прокатки и доказывают действенность метода.

**Ключевые слова:** Холодная пильгерная прокатка; пластическая деформация; мгновенный очаг деформации; тепловыделения; безэмульсионная прокатка.

## CALCULATION METHOD FOR HEAT EMISSION DURING PLASTIC SHAPING IN COLD PILGER ROLLING OF PIPES

**S. V. PILIPENKO**

Doctoral student in Project Management NMetAU, Dnepr, UKRAINE

**ABSTRACT** The process of cold pilger rolling is widely used for manufacturing cold and hot deformed precision pipes of a wide range of alloys and steel grades. Cold and hot rolling as well as rolling without emulsion are used in the cold pilger rolling, process. It is very dynamic nowadays and modern mill permit lip to more than 280 double movements per minute. In spite of relatively small feed (2 -4 mm) and considering the deformation cone length (300 - 500 mm), metal is shaped in rather tough conditions. That can cause a considerable amount of heat in the plastic shaping process and the temperature in the deformation site rises in a split second, which should be considered in calculating force and deformation parameters of the process.

The article gives the detailed analysis of the main existing relations, which permits to calculate properly the amount of heat emitted in plastic shaping process under OMD. The relations which allow to take into account heat losses caused by convection and heat transmission, have been analyzed as well. The new calculation method is based on these relations. The method proposed permits to reckon more precisely peculiarities of cold pilger rolling process. The calculations results have been checked in practice process of cold pilger rolling and prove the method efficiency.

**Keywords:** Cold pilger rolling; plastic shaping; instantaneous deformation site; heat emission; rolling without emulsion.

### Постановка проблемы

Холодная пильгерная валковая прокатка (ХПТ) является процессом периодического действия, параметры которого изменяются вдоль конуса деформации в следствие изменения геометрических параметров деформируемого инструмента. Этот процесс широко применяется для производства холодно - и теплодеформированных прецизионных труб широкого спектра марок сталей и сплавов. 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.

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 ходов в минуту, это может вызывать значительные тепловыделения от пластической деформации. Причем эта температура выделяется в мгновенном очаге деформации за считанные доли секунды.

При применении эмульсии эти тепловыделения отбираются, и температура конуса не превышает 60-70 градусов, однако в мгновенном очаге вызванные тепловыделения могут значительно повлиять на силовые и деформационные параметры процесса

деформации. Кроме этого, скорость деформации, в свою очередь влияет на изменение механических характеристик.

**Анализ публикаций**

Вопросам величины учета тепловыделений входе пластической уделялось значительное внимание. Известно, что выделение тепла при адиабатических условиях пластического течения пропорционально накоплению пластической деформации [1 - 4]:

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

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

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

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

При этом, в условиях адиабатического процесса:

$$\Delta T_{\text{оэф}} = \frac{Q_{\text{оэф}}}{\rho \cdot C_T} \quad (3)$$

Из [4], компоненты тензора деформации для осесимметричного напряженного состояния можно посчитать из зависимостей:

$$\epsilon_x = a \quad (4)$$

$$\epsilon_\rho = \frac{a}{2} \left( 1 + \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right) \quad (5)$$

$$\epsilon_\theta = \frac{a}{2} \left( 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right) \quad (6)$$

где  $a$  - вытяжка;  $r$  и  $R$  - внешний и внутренний диаметр трубы.

Интенсивность скорости деформации при объемном осесимметричном НДС можно определить по формуле [5]:

$$\dot{\epsilon}_i = \epsilon_x \sqrt{1 + \frac{K^2}{3}} \quad (7)$$

где  $K = (\epsilon_x - \epsilon_\theta) / \epsilon_r$

Температура выделяемая от работы сил поверхностного трения:

$$\Delta T_{\text{тр}} = \frac{f \cdot F_k \cdot V_{\text{мет}} P_{\text{ср}}}{2(D_{\text{ов}} - D_i)\lambda} \quad (8)$$

где  $f$  - к-т. трения;  $F_k$  - площадь контакта;  $\lambda$  - теплопроводность.

В ходе пластической деформации наблюдаются тепловые потери - это потери от теплоизлучения, потери от теплопередачи на рабочий инструмент и, в случае применения охлаждения, тепло отбирается охлаждающей жидкостью. Величину этих потерь можно учесть в той или иной степени.

Из [7] потери от теплоизлучения равны:

$$\Delta T_{\text{ном}} = 1,07 \frac{C_u \cdot C_0 \frac{T}{100} F_u (\tau_u - \tau_n)}{3600 \rho \cdot M_{\text{мет}}} \quad (9)$$

где  $C_u$  - степень черноты металла;  $C_0$  - к-т. излучения абсолютно черного тела;  $F_u$  - площадь излучения;  $M_{\text{мет}}$  - масса металла;  $\tau_u$  - время двойного хода.

Падение температуры от теплопередачи на валки [6]:

$$\Delta T_{\text{ном}} = \frac{2 \cdot F_k (T_{\text{мет}} - T_{\text{вал}}) (\tau_u - \tau_n) \alpha}{M_{\text{мет}} C_T} \quad (10)$$

где  $S_i$  - толщина стенки в сечении;  $\alpha$  - к-т. теплоотдачи;  $P$  - удельный вес (кг/см<sup>3</sup>).

Как показывают исследования авторов, температура калибров при безэмульсионной прокатке ниже температуры поверхности конуса на 30-45 градусов, при применении эмульсии температура калибров находится в пределах 40-50 градусов.

Целью исследований является дальнейшее развитие метода расчета тепловыделений от пластической деформации при холодной пыльгерной прокатке труб с целью более точного учета особенностей этого процесса деформации.

**Основной материал**

Как известно, при пыльгерной прокатке соблюдается следующее основное правило: обжатие трубы вдоль конуса деформации за цикл равно разнице геометрических параметров в рассматриваемом сечении, и сечении, которое отстает от него на такое расстояние ( $\Delta x$ ), при котором объем металла, помещающийся между этими сечениями, равен объему подачи: (рис. 1) [1-3, 10].

Величина  $\Delta x$  в начале конуса равна величине подачи, а в конце конуса - полному линейному смещению за цикл. Изменение величины  $\Delta x$  вдоль

конуса деформации (рис. 2) можно определить из зависимости [8]:

$$\Delta x = \frac{\sqrt{S_x + 2(\operatorname{tg} \gamma - \operatorname{tg} \alpha) \frac{m S_3 (S_3 - D_3)}{D_x - S_x}} - S_x}{\operatorname{tg} \gamma - \operatorname{tg} \alpha} \quad (11)$$

где  $S_x$  – толщина стенки трубы в сечении;  $\operatorname{tg} \gamma$  и  $\operatorname{tg} \alpha$  – конусности развертки калибра и оправки на участке.

В данном случае то, что применимо к деформационным параметрам, можно применить к тепловым (рис. 3). Рассчитывая приращение температуры от цикла к циклу вдоль всего конуса (с учетом потерь), суммируя данные величины от сечения к сечению (рис. 3), можно довольно точно определить изменение температуры металла в ходе ведения процесса периодической прокатки:

$$T_x = T_{x-\Delta x} + \Delta T_x - \Delta T_{nom} \quad (12)$$

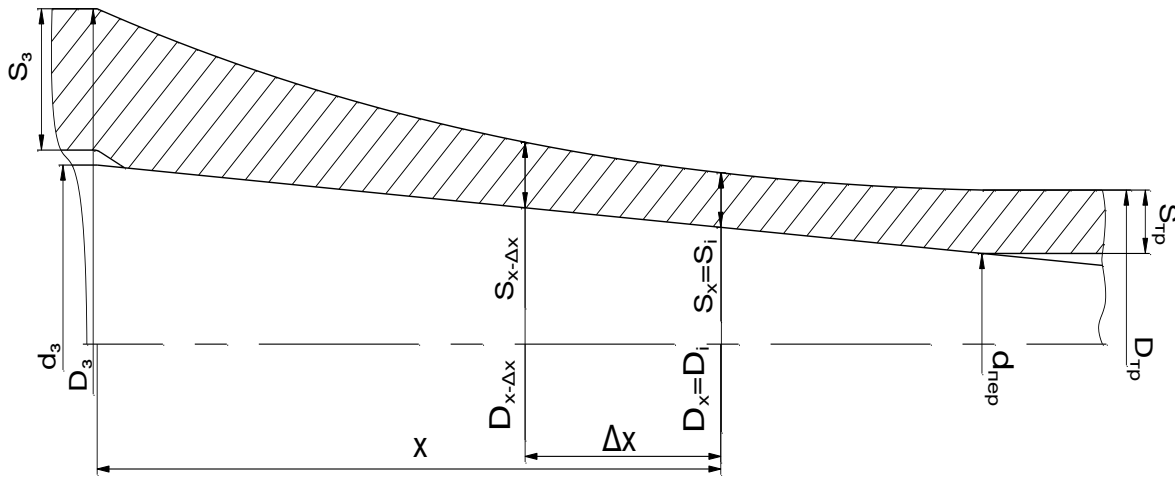


Рис. 1. – Схема к расчету величины обжатия вдоль конуса деформации при пильгерном процессе [10]

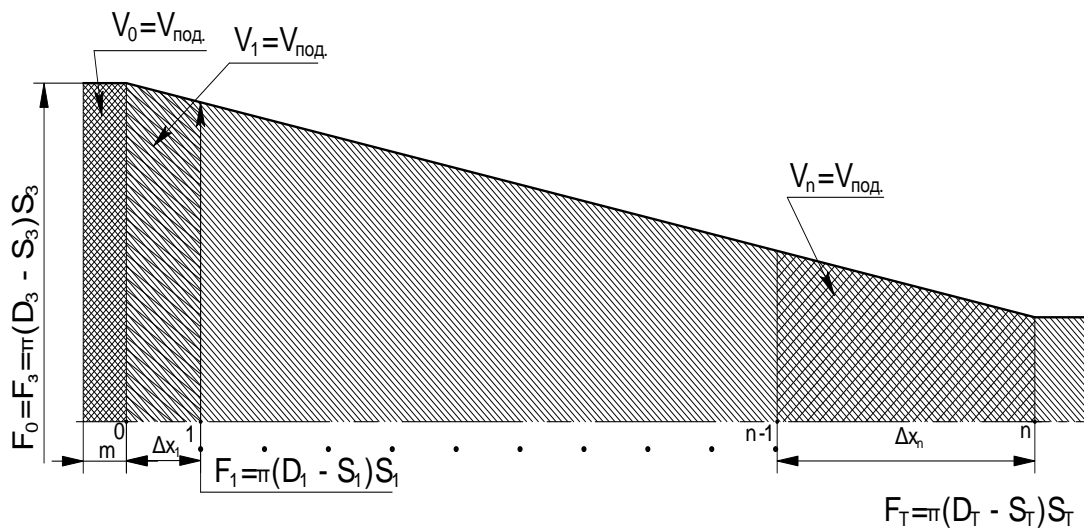


Рис. 2. – К определению числа циклов обжатий при периодической прокатке [10]

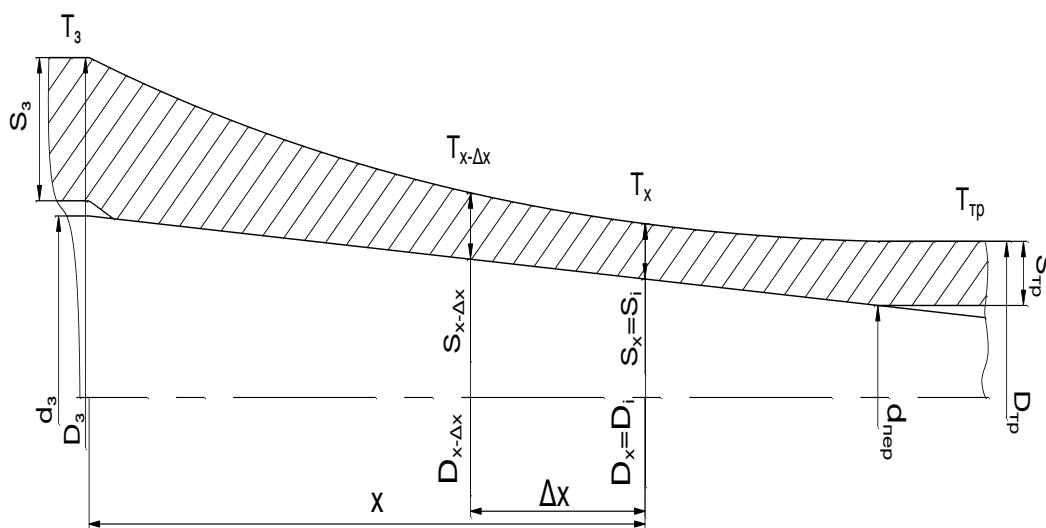


Рис. 3. – Схема к расчету величины приращения температуры металла в сечениях конуса деформации при пильгерном процессе

Расчет температуры в сечениях конуса деформации с применением формулы (12) выглядит следующим образом: рассчитываются изменения всех геометрических и деформационных параметров вдоль конуса деформации [9, 10]; рассчитываются изменения величины  $\Delta x$  (ф. 11) от сечения 0 (входа металла в конус деформации) до сечения  $n$  (рис. 3) (выхода металла из конуса деформации); определяются приращения температуры от тепловыделений из-за пластической деформации (ф. 1 или ф. 3) и поверхностного трения в сечениях  $x$  (ф. 8); пошагово, от сечения  $x-\Delta x$  до соответствующего ему сечению  $x$  (рис. 3), начиная от сечения входа рассчитываются значения температуры (ф. 12) начиная от заданной величины температуры заготовки; корректируются величины потерь на конвекцию, и теплопередачу (ф. 9 и 10).

Для анализа корректности работы модели выбран маршрут прокатки труб из титанового сплава Gr-2 на стане ХПТ-32 - 25x3-16,15x1,63. Использовалась безэмульсионная прокатка. Была

рассчитана калибровка, на станках с ЧПУ изготовлен инструмент.

В ходе прокатки, пирометром с лазерным прицелом, произведены замеры температуры наружной поверхности конуса в трех характерных для калибровки точках (табл. 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.

Далее, из параметров калибровки, согласно предложенного метода, рассчитано все необходимые геометрические, кинематические и силовые параметры, и как результат – смоделировано изменение величины температуры конуса деформации в контрольных сечениях зоны редуцирования и обжатия стенки (рис. 4).

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

Таблица 1 - Температура в зонах конуса деформации при прокатке труб из сплава Gr 2 по маршруту 25x3-16,15x1,63 (подача 4 мм, 60 дв. ход.)

№ трубы от начала процесса прокатки	Колебания температуры поверхности трубы в зонах конуса деформации °С			
	Зона редуцирования (40-45 мм*)	Зона обжатия стенки (90-95мм*)	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.

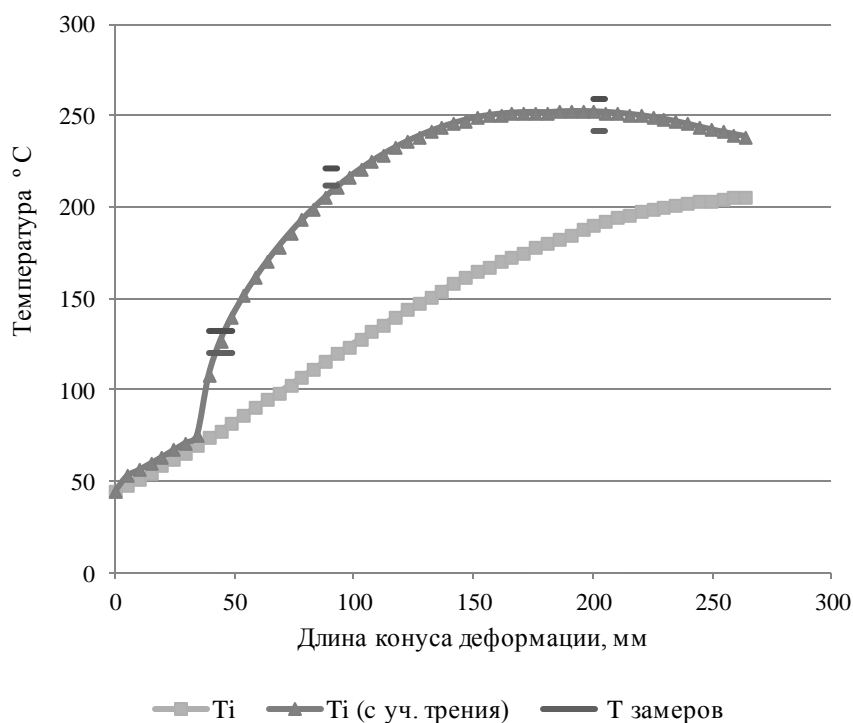


Рис. 4. – Результаты моделирования изменения температуры наружной поверхности конуса деформации в зонах редуцирования и обжатия стенки при прокатке трубы из титанового сплава Gr-2 на стане ХПТ-32 по маршруту - 25x3-16,15x1,63

### Выводы

В статье предложено новый путь развития метода расчета тепловыделений от пластической деформации при холодной пильгерной прокатке труб. На основе имеющихся зависимостей предложен свой метод расчета тепловыделений, позволяющий более точно учитывать особенности процесса ХПТ. Результаты расчетов проверены в ходе практики холодной пильгерной валковой прокатки труб из титановых сплавов, что доказывают действенность метода. Из результатов моделирования величины тепловыделений можно сделать выводы, что при применении безэмульсионной прокатки значительная часть тепловыделений происходит от воздействия сил трения.

### Список литературы

1. Журавлев, Г. М. Расчет температурного поля в зоне пластической деформации / Г. М. Журавлев, Дао Тиен Той // Известия ТулГУ. Технические науки. Сталь. – 2012. – №2. – С. 221-227.
2. Смирнов, В. С. Теория обработки металлов давлением. М.: Металлургия. – 1973. – 796 с.
3. Томленов, А. Д. Теория деформирования металлов. М.: Металлургия. – 1972. – 402 с.
4. Колмогоров, В. Л. Напряжения, деформации, разрушение. М.: Металлургия. – 1970. – 229 с.
5. Онищенко, И. И. Механика сплошной среды. Теория пластичности. К.: Издательство КР «Политех». – 1996. – 274 с.

6. Томсен, Э. Механика пластических деформаций при обработке металлов / Э. Томсен, Ч. Янг, Ш. Кобаяши // М.: Машиностроение. – 1969. – 504 с.
7. Яловой, Н. И. Тепловые процессы при обработке металлов и сплавов давлением. М.: Издательство «Высшая школа». – 1973. – 631 с.
8. Орро, П. И. Производство стальных тонкостенных труб: [Монография] / П. И. Орро, Я. Е. Осада. – М. Харьков: Металлургиздат. – 1951. – 416 с.
9. Шевакин, Ю. Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб / Ю. Ф. Шевакин. – М.: Металлургиздат. – 1963. – 269 с.
10. Тетерин, П. К. Теория периодической прокатки / П. К. Тетерин. – М.: Металлургия. – 1978. – 256 с.

### Bibliography (transliterated)

1. Zhuravlyov, G. M., Dao Tiyen Toy Raschyot temperaturnogo polia v zone plasicheskoy deformatsii [Calculation of the temperature field in zone of the plastic deformation] *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki. Stal*, 2012, 2, 221-227.
2. Smirnov, V. S. Teoriya obrabotki metallov davleniyem [Theory of metal forming]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 796 p.
3. Tomlyonov, A. D. Teoriya deformirovaniya metallov [Theory of metal deforming]. Moscow: Metallurgiya, 1972, 402 p.
4. Kolmogorov, V. L. Napryazheniya, deformatsii, razrusheniye [Stresses, deformations, destruction]. Moscow: Metallurgiya, 1970, 229 p.
5. Onishtshenko, I. I. Mekhanika sploshnoj sredy. Teoriya plastichnosti. [Mechanics of continuous medium. Theory of plasticity]. Kyiv: Izd-vo KR "Polytekh", 1996, 274 p.
6. Thomsen, E., Yuang, Ch., Kobayashi, Sh. Mekhanika

- plasticheskikh deformatsij pri obrabotke metallov [Mechanics of plastic deformations at processing of metals] Moskow: Mashinostroyeniye, 1969, 504 p.
7. **Yalovoj, N. I.** Teplovy protsessy pri obrabotke metallov i splavov davleniyem [Heat processes at the forming of metals and alloys]. Moskow: Izd-vo "Vysshaya shkola", 1973, 631 p.
  8. **Orro, P. I., Osada, Ya. Ye.** Proizvodstvo stalnykh tonkostennykh trub: Monografiya [Manufacture of the steel thin-walled tubes: Monography]. Moskow, Kharkov: Metallurgizdat, 1951, 416 p.
  9. **Shevakin, Yu. F.** Kalibrovka i usiliya pri kholodnoj prokatke trub [Roll pass design and forces at the cold tube rolling]. Moskow: Metallurgizdat, 1963, 269 p.
  10. **Teterin, P. K.** Teoriya periodicheskoy prokatki [Theory of the die forging]. Moskow: Metallurgiya, 1978, 256 p.

## Сведения об авторах (About authors)

**Пилипенко Станислав Владимирович** – кандидат технических наук, докторант кафедры Управления проектами Национальной металлургической академии Украины; Днепр, Украина; E-mail: 44-08@mail.ru.

**Pylypenko Stanislav Vladimirovich** – Candidate of Technical Sciences, National Metallurgical Academy of Ukraine, doctoral student in project management of the Dnipro, Ukraine.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Пилипенко, С. В.** Расчет тепловыделений от пластической деформации при холодной пильгерной прокатке труб / **С. В. Пилипенко** // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 42 (1214). – С. 97-102. – doi:10.20998/2413-4295.2016.42.16.

*Please cite this article as:*

**Pylypenko, S. V.** Calculation method for heat emission during plastic shaping in cold pilger rolling of pipes. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **42** (1214), 97–102, doi:10.20998/2413-4295.2016.42.16.

*Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Пилипенко, С. В.** Розрахунок тепловиділень від пластичної деформації при холодній пильгерній прокатці труб / **С. В. Пилипенко** // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 42 (1214). – С. 97-102. – doi:10.20998/2413-4295.2016.42.16.

**АНОТАЦІЯ** Процес холодної пильгерної валкової прокатки широко застосовується для виробництва холодно - і теплодеформованих прецизійних труб широкого спектру марок сталей і сплавів. В процесі ХПТ застосовують холодну, теплу, беземульсійну види прокатки. Процес ХПТ характеризується великою динамічністю, в сучасних станах кількість подвійних ходів сягає 280 і більше ходів в хвилину. Навіть при відносно невеликих величинах подачі (2-4 міліметра), з огляду на довжину конуса деформації (300-500 мм), метал деформується в досить жорстких умовах. Це може викликати значні тепловиділення від пластичної деформації. Причому ця температура виділяється в миттєвому осередку деформації за лічені частки секунди. Все це необхідно враховувати при розрахунку силових і деформаційних параметрів цього процесу. У статті розглянуті основні існуючі на даний момент залежності, що дозволяють правильно розрахувати тепловиділення від пластичної деформації при даному виді ОМД. Також розглянуті залежності, що дозволяють врахувати теплові втрати від конвекції і теплопередачі. На основі наявних залежностей запропонований свій метод розрахунку тепловиділень, що дозволяє більш точно враховувати особливості процесу ХПТ. Результати розрахунків перевірені в ході практики холодної пильгерної валкової прокатки і доводять дієвість методу.

**Ключові слова:** Холодна пильгерна прокатка; пластична деформація; миттєвий вогнище деформації; тепловиділення; беземульсійна прокатка.

Поступила (received) 21.12.2016