

## ПАРАМЕТРЫ МГНОВЕННОГО ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ОБРАТНОМ РАБОЧЕМ ХОДЕ КЛЕТИ СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПИЛЬГЕРНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ

канд. техн. наук, доц. С.В. ПИЛИПЕНКО

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Приведены результаты исследований, касающиеся развития теоретических основ определения величины обжатия трубы по толщине стенки в мгновенном очаге деформации при обратном рабочем ходе клетки стана холодной пильгерной прокатки труб. Выведены упрощенные зависимости для расчета параметров обжатия при обратном рабочем ходе клетки. В предложенных зависимостях не учитываются упругие деформации клетки, с чем будет связано дальнейшее развитие метода расчета деформационных параметров рассматриваемого случая ведения процесса холодной пильгерной прокатки.

**Ключевые слова:** холодная прокатка, пильгерная прокатка, трубы, обжатие, толщина стенки, вытяжка.

**Введение.** Производительность станов холодной пильгерной прокатки труб и точность готовых труб, прокатываемых в стане, – в большинстве случаев противоположные понятия. С ростом линейного сдвига трубы за двойной ход точность труб, как правило, ухудшается [1–3]. В то же время с уменьшением величины подачи, например, – условие для получения более точных труб, – уменьшается линейный сдвиг трубы за двойной ход клетки, снижается производительность стана. Один из способов повышения его производительности без ухудшения качества труб – применение поворота и подачи трубы в обоих положениях клетки. Таким образом, деформационные возможности процесса холодной пильгерной прокатки можно использовать более эффективно [4]. Однако пильгерный процесс в таких условиях деформации до конца не изучен. В частности, в достаточной мере не исследованы зависимости, описывающие изменение параметров трубы в мгновенном очаге деформации (МОД) при обратном ходе клетки.

**Цель работы** – развитие теоретических основ определения величины обжатия трубы по толщине стенки в мгновенном очаге деформации при обратном рабочем ходе клетки, вывод формул для расчета величин вытяжки и обжатия по толщине стенки в сечениях рабочего конуса при обратном рабочем ходе клетки.

**Основная часть. Методы исследования.** Первый этап заключался в анализе работ, связанных с методом расчета деформационных параметров процесса холодной пильгерной прокатки. Исходя из выделенных в ходе анализа зависимостей и особенностей процесса холодной пильгерной прокатки в различных ее подвидах, будет произведен синтез зависимостей, позволяющих определить обжатие по толщине стенки и вытяжку в мгновенном очаге деформации при рабочем обратном ходе клетки. Адекватность выведенных зависимостей будет проверена на расчете силовых параметров, основой для которого являются правильно рассчитанные деформационные параметры. Данные расчетов будут сверены с данными замеров силы прокатки на действующем оборудовании, взятыми из литературных источников. В конце сделаны выводы о перспективах дальнейшего развития теоретических основ метода расчета деформационных параметров рассматриваемого в работе процесса.

**Анализ исследований.** При холодной прокатке труб клетка движется возвратно-поступательно относительно неподвижно зажатого конуса деформации (рисунок 1, поз. 4).

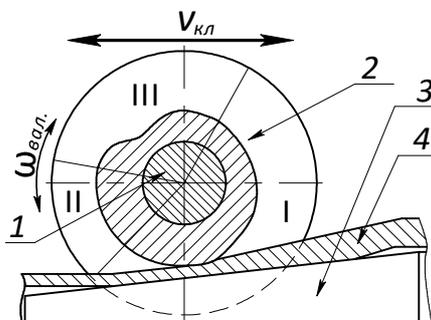


Рисунок 1. – Схема деформации трубы в стане холодной пильгерной валковой прокатки

Валок стана холодной пильгерной валковой прокатки (ХПГ) состоит из непосредственно вала (см. рисунок 1, поз. 1) и калибра переменной радиусности (см. рисунок 1, поз. 2). Труба деформируется между раствором, образованным ручьем калибра, и оправкой (конусной либо с криволинейной образующей рабочей поверхно-

сти)<sup>1</sup> [5; 6]. В ручье, условно, можно выделить три основных зоны: зону обжатия (см. рисунок 1, I), зону калибровки (см. рисунок 1, II) и зону холостого участка (см. рисунок 1, III). Если используется калибр-полудиск, то зона холостого участка разделяется на зону подачи и зону поворота. В зоне деформации можно выделить участки: свободного редуцирования (труба, обжимаясь по диаметру, утолщается), обжатия стенки и предотделки. В участке обжатия стенки деформируются и диаметр, и толщина стенки. В участке предотделки калибруется толщина стенки. В зоне калибровки калибруется диаметр трубы. Здесь внутренняя стенка не касается оправки.

В отличие от стана ХПТ стан холодной пильгерной роликовой прокатки (ХПТР) деформирует трубу между роликами с диаметром ручья, равным диаметру готовой трубы (рисунок 2, поз. 2), и цилиндрической оправкой (рисунок 2, поз. 1). Диаметр цилиндрической оправки равен внутреннему диаметру готовой трубы. В стане клеть также движется возвратно-поступательно, и в ходе процесса образовывается конус деформации (рабочий конус, пильгерголова, рисунок 2, поз. 4). Ролики в этом стане опираются своими цапфами на опорную планку. Форма рабочей поверхности опорной планки схожа с разверткой ручья калибра стана ХПТ. В начале конуса ролики максимально раздвинуты относительно линии прокатки, в конце конуса ролики сжимаются, образуя тесный ручей. На станах ХПТР прокатывают трубы особой точности. Особенности привода движения клетки при верной настройке кулисного механизма привода позволяют максимальным образом нивелировать действие осевых сил. В стане типа ХПТ кинематикой процесса деформации управляют подбором ведущей шестерни с необходимым начальным радиусом и подбором диаметра калибра (последнее – если калибр кольцевой).

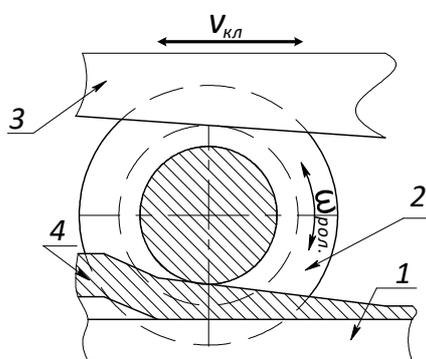


Рисунок 2. – Схема деформации трубы в стане холодной пильгерной роликовой прокатки

Весь процесс деформации в станах холодной пильгерной прокатки можно представить как движущийся вдоль рабочего конуса мгновенный очаг деформации, параметры которого изменяются непрерывно. Среди параметров мгновенного очага следует выделить обжатие по толщине стенки и вытяжку. В самом мгновенном очаге деформации также разделяют угол редуцирования (зону редуцирования) и угол обжатия стенки (зону обжатия стенки).

В процессе ХПТ разделяют обжатие вдоль конуса деформации (рабочего конуса) и обжатие в мгновенном очаге деформации. Обжатие вдоль конуса довольно точно определяют по правилу П.Т. Емельяненко [7; 8]: величина обжатия вдоль конуса деформации равна разности между высотой рассматриваемого сечения и высотой такого сечения, которое отстоит от рассматриваемого на таком расстоянии, при котором объем трубы, заключенный между этими сечениями, равен объему ее подачи перед рабочим ходом клетки.

На рисунке 3 показана схема процесса деформации трубы в мгновенном очаге деформации стана ХПТ при обратном рабочем ходе клетки [3; 5; 6].

До деформации в МОД некое сечение бесконечно малой протяженности  $\Delta x$ , сдвинутое перед обратным рабочим ходом на величину подачи  $m$ , имеет диаметр  $D_{x-a}$  и толщину стенки  $S_{x-a}$  (рисунок 3, а). После обжатия (рисунок 3, б) сечение получает вытяжку величиной  $\mu_{\Delta x}$  и приобретает значение диаметра  $D_x$  с толщиной стенки  $S_x$ . Расстояние между сечением рабочего конуса, которое будет иметь параметры толщины стенки и диаметра  $S_{x-a}$  и  $D_{x-a}$ , и сечением конуса с полученными параметрами  $S_x$  и  $D_x$  равно

$$a = m + \Delta x \cdot \mu_{\Delta x} . \quad (1)$$

Другими словами, величина  $a$  близка к величине подачи и ее значение зависит от обжатия трубы в МОД. Исходя из этого, в источниках [5; 6] величину обжатия по толщине стенки в МОД при обратном рабочем ходе клетки для рассматриваемого случая пильгерной прокатки определили как

$$\Delta S_{x,обр} = (S_{x-m} - S_x) \mu_{об,x} , \quad (2)$$

<sup>1</sup> Отчет ВНИТИ № 84-77. Рук. НИР Б.Ю. Меликов, Н.Н. Король. Разработать, исследовать и внедрить процесс прокатки труб на станах ХПТР 8-15 и ХПТР 15-30 конструкции ВНИИМЕТМАШ с увеличением хода клетки на стане ХПТР 8-15 с двойной подачей заготовки на станах обеих типоразмеров.

где  $\mu_{об.х}$  – вытяжка в мгновенном очаге деформации данного сечения,

$$\mu_{об.х} = \frac{F_{x-m}}{F_x};$$

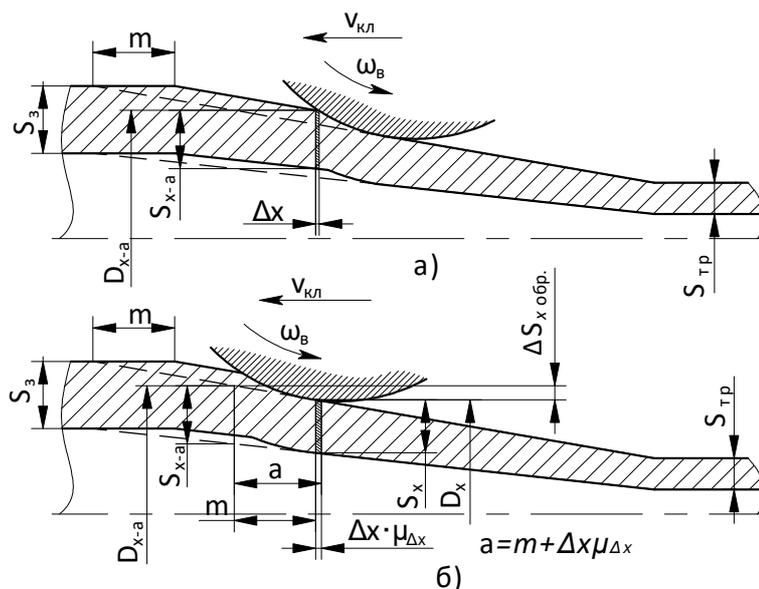
$S_{x-m}$  – толщина стенки в сечении  $x-m$ ;

$S_x$  – толщина стенки в сечении  $x$ ;

$m$  – подача перед обратным ходом;

$F_x$  – площадь трубы в сечении  $x$  конуса деформации;

$F_{x-m}$  – площадь трубы в сечении  $x-m$  конуса деформации.



$a$  – положение клетки до обжатия сечения  $\Delta x$  мгновенным очагом деформации;

$b$  – положение клетки после обжатия сечения  $\Delta x$  мгновенным очагом деформации;

$V_{кл}$  – скорость и направление движения клетки при обратном ходе;  $S_{заг}$  – толщина стенки трубы-заготовки;

$S_{заг}$  – толщина стенки готовой трубы

Рисунок 3. – Схема обжатия металла в мгновенном очаге деформации при обратном рабочем ходе клетки стана холодной пильгерной валковой прокатки

Описание материала исследования. Из определенного выше линейное смещение металла в МОД при обратном рабочем ходе клетки можно вычислить из зависимости

$$a = \Delta x = m \frac{F_{x-m}}{F_x}. \quad (3)$$

Толщина стенки трубы до деформации в МОД при обратном ходе клетки для случая рабочего прямого хода

$$S_{x-m} = S_x + a \cdot (\operatorname{tg}\gamma_i - \operatorname{tg}\alpha_i) = S_x + m \frac{F_{x-m}}{F_x} (\operatorname{tg}\gamma_i - \operatorname{tg}\alpha_i), \quad (4)$$

где  $F_{x-m} = \pi \cdot S_{x-m} (2r_{x-m} + S_{x-m})$ ;

$r_{x-m}$  – внутренний диаметр трубы в сечении конуса деформации (для ХПТР – готовой трубы);

$\operatorname{tg}\gamma_i$  – конусность развертки ручья калибра в рассматриваемом сечении;

$\operatorname{tg}\alpha_i$  – конусность оправки в рассматриваемом сечении (для стана ХПТР  $\operatorname{tg}\alpha_i = 0$ ).

Подставляя значение  $F_{x-m}$  в формулу (4), получаем квадратное уравнение, решив которое можно найти значение толщины стенки до деформации обратным рабочим ходом клетки стана холодной пильгерной прокатки труб:

$$S_{x-m} = \frac{1}{2A_i} \left( F_i - 2A_i \cdot r - \sqrt{4A_i (A_i \cdot r^2 - F_i (r + S_i)) + F_i^2} \right), \quad (5)$$

где  $A_i = \pi \cdot m \cdot (\operatorname{tg}\gamma_i - \operatorname{tg}\alpha_i)$  (для стана ХПТР  $A_i = \pi \cdot m \operatorname{tg}\gamma_i$ ).

Зная  $S_{x-m}$ , обжатие стенки в МОД находим из разницы  $S_{x-m}$  и  $S_x$ .

Отсюда обжатие в МОД при обратном ходе клетки в стане ХПТР в случаи обратного рабочего хода клетки

$$\Delta S_{x.обп} = \left( \frac{1}{2A_i} \left( F_i - 2A_i \cdot r - \sqrt{4A_i(A_i \cdot r^2 - F_i(r + S_i)) + F_i^2} \right) - S_x \right) \mu_{об.х}. \quad (6)$$

Вытяжка в сечении при обратном рабочем ходе клетки стана ХПТР находится из выведенной зависимости

$$\mu_{об.х} = \frac{F_{x-m}}{F_x} = (S_x + m \cdot \operatorname{tg}\gamma_x) \frac{2r + S_x + m \cdot \operatorname{tg}\gamma_x}{S_x(2r + S_x)}. \quad (7)$$

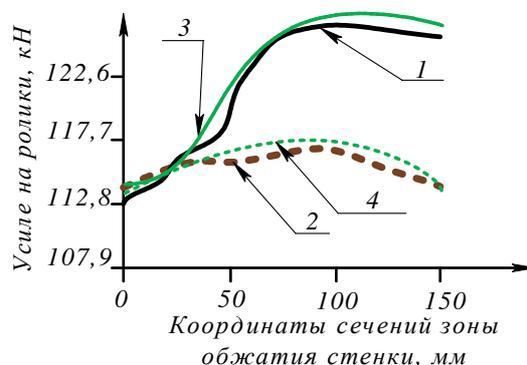
Аналогичным образом выводится формула для определения вытяжки в МОД при обратном рабочем ходе клетки в стане ХПТ:

$$\mu_{об.х} = \frac{F_{x-m}}{F_x} = (S_x + m \cdot (\operatorname{tg}\gamma_x - \operatorname{tg}\alpha_x)) \frac{D_x + m \operatorname{tg}\gamma_x - S_x - m \cdot (\operatorname{tg}\gamma_x - \operatorname{tg}\alpha_x)}{S_x(D_x + S_x)}. \quad (8)$$

В качестве проверки работы данных формул сделан расчет усилий деформации при прямом и обратном ходах клетки стана ХПТР для случая прокатки трубы из стали 0X18H10T по маршруту 21x1,7-20x0,6 мм.

Расчетные данные по полученным зависимостям сравнивались с экспериментальными, изложенными в работе<sup>2</sup>. Кроме прочего, в этой работе производились замеры усилий деформации при прямом и обратном ходах клетки стана ХПТР. Рассматривался случай именно с подачей заготовки в обоих крайних положениях клетки. Прокатка осуществлялась с подачей  $m = 8 + 8$  мм. Поскольку на точность расчета силовых параметров напрямую влияет точность определения деформационных, то по полученным расчетным значениям силовых параметров можно судить о точности расчета величины обжатия по толщине стенки при обратном рабочем ходе клетки.

По данным калибровки инструмента (методика расчета уточнялась отдельно) были рассчитана деформационные, а затем и силовые параметры обжатия трубы в зоне деформации стенки. Расчет параметров деформации в зоне редуцирования и калибровки не производился, поскольку значения усилий деформации в этих зонах заведомо значительно меньше, чем в зоне обжатия стенки. Зона предотделки по известным причинам в калибровке рабочего инструмента стана ХПТР не выполняется, т.к. используется цилиндрическая оправка. Результаты расчетов силовых параметров показаны на рисунке 4.



1 – измеренное распределение усилия деформации при прямом ходе клетки; 2 – измеренное распределение усилия деформации при обратном ходе; 3 – расчетное распределение усилия деформации при прямом ходе клетки; 4 – расчетное распределение усилия деформации при обратном ходе

Рисунок 4. – Расчетные графики и графики замеров<sup>2</sup> усилий деформации при прямом и обратном ходах клетки стана ХПТР при подаче заготовки в обоих крайних положениях клетки (маршрут 21x1,7-20x0,6, 0X18H10T,  $m = 8 + 8$  мм)

Сравнивая данные графиков, можно сделать вывод об адекватности полученных в ходе расчета данных о распределении силы деформации вдоль зоны обжатия. Они хорошо коррелируются с кривыми, полученными в результате экспериментов. Это прямое доказательство верности предложенных теоретических выкладок.

**Закключение.** В работе показаны дополнительные пути развития теоретических основ процесса холодной пильгерной прокатки труб. Рассмотрен случай ведения процесса при подаче заготовки в обоих крайних положениях клетки. Предложенные в статье зависимости для расчета величины обжатия по толщине стенки и вытяжки трубы в МОД при обратном рабочем ходе клетки станов типа станов ХПТР и ХПТ уточняют метод расчета параметров

<sup>2</sup> Отчет ВНИТИ № 84-77. Рук. НИР Б.Ю. Меликов, Н.Н. Король. Разработать, исследовать и внедрить процесс прокатки труб на станах ХПТР 8-15 и ХПТР 15-30 конструкции ВНИИМЕТМАШ с увеличением хода клетки на стане ХПТР 8-15 с двойной подачей заготовки на станах обеих типоразмеров.

деформации в этих станах. Результаты расчетов силовых параметров (выполненные на основании результатов расчетов деформационных параметров по выведенным зависимостям) косвенно доказывают верность теоретических выкладок. Полученные расчетные данные не идут в разрез с результатами более ранних исследований.

Предложенные упрощенные зависимости для расчета параметров обжатия при обратном рабочем ходе клетки дают небольшие погрешности и могут использоваться в инженерных расчетах. Однако они требуют дальнейшей проверки. Следует заметить, что в предложенных зависимостях не учитываются упругие деформации клетки. С этим, возможно, будет связано дальнейшее развитие метода расчета деформационных параметров рассматриваемого случая ведения процесса холодной пильгерной прокатки. Также следует уточнить влияние недеформируемой части металла, которая остается в выпусках калибра от предыдущего рабочего хода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Технология трубного производства: учеб. / В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев и др. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 640 с.
2. Столетний М.Ф., Клемперт Е.Д. Точность труб. – М.: Metallurgiya, 1975. – 239 с.
3. Шевакин Ю.Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб. – М.: Metallurgizdat, 1963. – 269 с.
4. Попов М.В., Атанасов С.В., Беликов Ю.М. Совершенствование процесса периодической прокатки труб. – Днепропетровск: Дива, 2008. – 192 с.
5. Осада Я.Е., Пляцковский О.А., Беликов Ю.М. Определение обжатий при периодической прокатке труб на станах ХПТ при подаче заготовки в обоих крайних положениях клетки // Сталь. – 1978. – № 5. – С. 452–454.
6. Определение обжатий при периодической прокатке труб на станах ХПТ при подаче заготовки в обоих крайних положениях клетки / Ю.М. Беликов, А.П. Головченко, А.А. Терещенко и др. // Обработка материалов давлением. – 2009. – № 2(21). – С. 294–299.
7. Пилипенко С.В. Теоретические основы холодной пильгерной прокатки труб. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2022. – 288 с.
8. A deformation mode in a cold rolling condition to provide the necessary texture of the Ti-3Al-2.5V alloy / S.V. Pilipenko, V.U. Grigorenko, V.A. Kozechko et al. // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2021. – № 1. – С. 078–083.

#### REFERENCES

1. Danchenko, V.N., Kolikov, A.P., Romantsev, B.A. & Samusev, S.V. (2002). *Tekhnologiya trubnogo proizvodstva*. Moscow: Internet Inzhiniring. (In Russ.)
2. Stoletnii, M.F. & Klempert, E.D. (1975). *Tochnost' trub*. Moscow: Metallurgiya. (In Russ.)
3. Shevakin, Yu.F. (1963). *Kalibrovka i usiliya pri kholodnoi prokatke trub*. Moscow: Metallurgizdat. (In Russ.)
4. Popov, M.V., Atanasov, S.V. & Belikov, Yu.M. (2008). *Sovershenstvovanie protsessy periodicheskoi prokatki trub*. Dnepropetrovsk: Diva. (In Russ.)
5. Osada, Ya.E., Plyatskovskii, O.A. & Belikov, Yu.M. (1978). *Opreделение obzhatii pri periodicheskoi prokatke trub na stanakh KhPT pri podache zagotovki v oboikh krainikh polozheniyakh kleti*. *Stal'*, (5), 452–454. (In Russ.)
6. Belikov, Yu.M., Golovchenko, A.P., Tereshchenko, A.A., Frolov, Ya.V., Grigorenko, V.U. & Dekhtyarev, V.S. (2009). *Opreделение obzhatii pri periodicheskoi prokatke trub na stanakh KhPT pri podache zagotovki v oboikh krainikh polozheniyakh kleti [Determination of wringing out at the periodic rolling of pipes on the figures of CRP at the serve of purveyance in both extreme positions of cage]*. *Obrabotka materialov davleniem [Materials working by pressure]*, 2(21), 294–299. (In Russ., abstr. in Engl., in Ukrainian)
7. Pilipenko, S.V. (2022). *Teoreticheskie osnovy kholodnoi pil'gernoi prokatki trub*. Novopolotsk: Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk. (In Russ.)
8. Pilipenko, S.V., Grigorenko, V.U., Kozechko, V.A. & Bohdanov, O.O. (2021). A deformation mode in a cold rolling condition to provide the necessary texture of the Ti-3Al-2.5V alloy. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 078–083.

Поступила 08.07.2024

### PARAMETERS OF THE DEFORMATION CONTAINMENT VOLUME AT THE BACKWARD STROKE OF COLD-DIE-PILGERING AND COLD-ROLLER-PILGERING MILLS WHEN FEEDING THE BILLET IN EITHER POSITIONS OF THE STAND

S. PILIPENKO

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

*The results of research concerning the development of the theoretical foundations for determining the value of pipe compression by wall thickness in the deformation site, during the reverse working flow of the cage, the cold pilger rolling mill of pipes are presented. Simplified dependencies are derived in the work to calculate the compression parameters during the reverse working stroke of the rolling stand. The proposed dependencies do not take into account the elastic deformations of the rolling mill stand. This will be associated with the further development of the method for calculating the deformation parameters of the considered case of conducting the cold pilger rolling process.*

**Keywords:** cold rolling, pilger rolling, pipes, compression, wall thickness, extraction.