

УДК 621.771.23

Беликов Ю. М.
Головченко А. П.
Терещенко А. А.
Фролов Я. В.
Григоренко В. У.
Дехтярев В. С.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЖАТИЙ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПРОКАТКЕ ТРУБ НА СТАНАХ ХПТ ПРИ ПОДАЧЕ ЗАГОТОВКИ В ОБОИХ КРАЙНИХ ПОЛОЖЕНИЯХ КЛЕТИ

В последние годы все более широкое распространение получает прокатка труб на станах ХПТ с подачей и поворотом заготовки в обоих крайних положениях клетки. Так в последние годы фирмами «SMS Meer», Германия, ОАО «Институт Цветметобработка» и АХК «ВНИИМЕТМАШ», Россия изготавливаются станы моделей КРВ25LC, КРВ50LC, ХПТ 40–8, ХПТ 6–20, ХПТ 15–30 работающие по такому режиму [1].

Первые исследования способа прокатки на станах ХПТ с подачей и поворотом труб-заготовок при полном ходе рабочей клетки (далее двойная подача и поворот) были проведены сотрудниками ВНИТИ и Никопольского ЮТЗ в 70-х годах. Была показана эффективность этого способа за счет повышения производительности станов и точности прокатываемых труб. Прокатка была осуществлена в результате серьезной реконструкции, проведенной в условиях ЮТЗ, шестереночного распределительно-подающего механизма (РПМ), которыми оснащались станы ХПТ второй и третьей моделей производства ЭЗТМ. Однако в связи с неудовлетворительной работой реконструированных РПМ (подача в крайнем переднем, а поворот в заднем крайнем положениях клетки были нестабильны) такой процесс не получил широкого промышленного применения.

Модернизация станов ХПТ на ЗАО «СЕНТРАВИС ПРОДАКШН ЮКРЕЙН», выполненная в период 2001–2007 гг., с заменой шестереночных РПМ на устройства поворотноподдающие эпициклические (УППЭ) позволила внедрить этот прогрессивный способ прокатки труб на пяти станах ХПТ-32, двух ХПТ-55 и одном ХПТ-75, [2]. Распределение величин подач и поворота труб-заготовок в заданных соотношениях при прямом и обратном ходах рабочей клетки стана осуществляется механизмом пневматической системы УППЭ.

В связи с этим представляет интерес для исследования методика определения обжатия металла и его продольного (линейного) смещения за ход клетки, необходимого для расчета калибровок инструмента и обеспечения требуемого качества продукции, что и является целью данной работы.

Без учета упругой деформации валков и клетки обжатие сечения рабочей головки по толщине стенки при обратном ходе клетки определится в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1, но с учетом кинематических условий процесса, в результате которых обжатие возрастает на величину вытяжки в мгновенном очаге деформации μ_x , откуда:

$$\Delta t_{x_{обр}} = (t_{x-m} - t_x) \times \mu_x. \quad (1)$$

С достаточной для практических расчетов точностью можно записать:

$$\Delta t_{x_{обр}} = m_{обр} (tg \gamma_x - tg \alpha) \times \mu_x, \quad (1a)$$

где $\Delta t_{x_{обр}}$ – обжатие по стенке сечения рабочей прокат-головки при обратном ходе клетки; $m_{обр}$ – величина подачи перед обратным ходом клетки; $tg \gamma_x - tg \alpha$ – разность тангенсов углов наклона образующих гребня ручья калибров и оправки; $t_{x-m} - t_x$ – разность толщин

стенок в сечениях прокат-головки, расстояние между которыми равно величине подачи; μ_x – частная вытяжка, определяемая как: $\mu_x = 1 + \frac{(F_{x-m} - F_x)}{F_x}$, здесь $(F_{x-m} - F_x)$ – разность площадей сечений отстоящих одно от другого на расстоянии подачи.

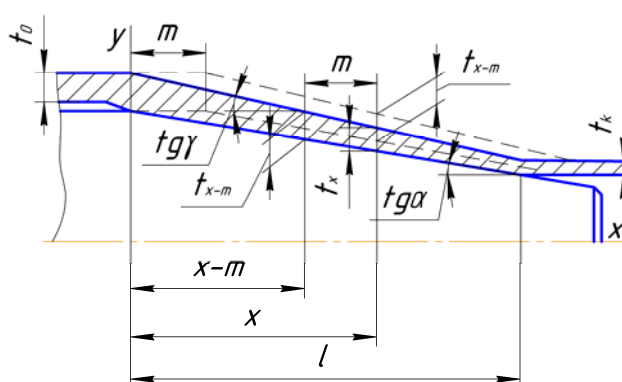


Рис. 1. Схема для определения обжатия трубы при обратном ходе клетки (обозначения в тексте)

Продольное смещение металла при обратном ходе клетки определится из уравнения:

$$L_{обр} = \int_0^l \left(\frac{\Delta F_{xобр}}{F_{xобр}} \right) dl, \quad (2)$$

где $\Delta F_{xобр}$ и $F_{xобр}$ – обжатие площади и текущая площадь поперечного сечения прокат-головки; l – длина обжимной зоны.

При обратном ходе клетки обжатие $\Delta F_{xобр}$ определяется как разность площадей сечений отстоящих одно от другого на расстоянии подачи $(F_{x-m} - F_x)$, с учетом кинематических условий оно составит:

$$\Delta F_{xобр} = (F_{x-m} - F_x) \times \mu_x, \quad (3)$$

где $\mu_x' = 1 + \frac{(F_{x-m} - F_x)}{F_x}$.

При подстановки уравнения (3) в уравнение (2) получаем следующее выражение:

$$L_{обр} = \int_0^l \frac{F_{x-m} - F_x}{F_x} \left(1 + \frac{F_{x-m} - F_x}{F_x} \right) dl. \quad (4)$$

Так как продольное смещение металла при деформации за ход клетки не зависит от формы развертки гребня ручья калибров, для упрощения принимается одноконусная калибровка валков где $(tg \gamma_x = tg \gamma)$.

Решение выражения (4) при точном определении F_{x-m} и F_x весьма громоздко. Однако с несущественной ошибкой разность $F_{x-m} - F_x = \Delta F_x$ можно найти, принимая площадь равную произведению периметра сечения прокат-головки на толщину стенки в этом сечении:

$$F_{x-m} = \pi(D_{x-m} - t_{x-m}) \times t_{x-m} \text{ и } F_x = \pi(D_x \times t_x).$$

где D_x , D_{x-m} и t_x , t_{x-m} – соответственно, диаметры прокат-головки и толщины стенок в сечениях, отстоящих одно от другого на величину подачи.

В этом случае из геометрических соображений следует:

$$F_{x-m} - F_x = \Delta F_x = \pi \left[D_{x-m} m_{обр} (tg\gamma_x - tg\alpha) + 2t_x m_{обр} tg\alpha + 2m_{обр}^2 (tg^2\gamma_x - tg\gamma tg\alpha) \right]. \quad (5)$$

В полученном выражении (5) последнее слагаемое в квадратной скобке незначительно, и с ошибкой до 2 % его можно отбросить. Тогда, решение выражения (4) с учетом этого упрощения дает следующее выражение:

$$L_{обр} = m_{обр} \ln \mu_{\Sigma} + m_{обр}^2 (tg\gamma - tg\alpha) \left(\frac{1}{t_k} - \frac{1}{t_0} \right) + \frac{2m_{обр}^2}{t_0} \frac{D_0}{(tg\gamma_x - tg\alpha) - 2tg\gamma} \times$$

$$\times \left[\ln \frac{l - t_0}{\frac{(tg\gamma_x - tg\alpha)(l - D_0)}{2tg\gamma}} - \ln \frac{2t_0 tg\alpha}{D_0 (tg\gamma - tg\alpha)} \right] + 2m_{обр}^2 tg\gamma \left(\frac{1}{D_k} - \frac{1}{D_0} \right), \quad (6)$$

где μ_{Σ} – суммарная вытяжка за проход, определяемая как: $\mu_{\Sigma} = \frac{(D_0 - t_0)t_0}{(D_k - t_k)t_k}$, здесь:

t_0 – толщина стенки заготовки; D_0 – наружный диаметр заготовки в начале обжимной зоны; t_k – толщина стенки готовой трубы; D_k – наружный диаметр готовой трубы; l – длина обжимной зоны.

В этом выражении первый член соответствует около 98 % суммарной величины смещения металла при обратном ходе клетки, поэтому в практических расчетах допустимо определять $L_{обр}$ по упрощенной формуле:

$$L_{обр} \approx m_{обр} \ln \mu_{\Sigma}, \quad (7)$$

которая может быть получена также аналитически при определении обжатия без учета влияния вытяжки в мгновенном очаге деформации, характерного для обратного хода.

Величина $L_{обр}$, определенная по формулам (6) и (7), значительно отличается от величины линейного смещения металла, полученной на основании равенства объемов металла – объема подачи и объема, выходящего из очага деформации за одинарный ход клетки. Все дело в том, что после обратного хода клетки, объем металла, заключенный в прокат-головке больше, чем после прямого хода (где он определяется разверткой гребня ручья), и соответственно меньше объем металла, выходящего из клетки.

Если же рассматривать в совокупности обратный и последующий прямой ходы клетки, то можно констатировать постоянство объема прокат-головки после прямого хода, поэтому суммарное линейное смещение металла при деформации L_{Σ} должно соответствовать суммарному объему подачи:

$$L_{\Sigma} = (m_{пр} + m_{обр}) \times (\mu_{\Sigma} - 1), \quad (8)$$

где $m_{пр}$, $m_{обр}$ – подача перед прямым и обратным ходами клетки.

Зная суммарное линейное смещение металла за полный ход клетки и смещение при обратном ходе, можно найти смещение при прямом ходе $L_{пр}$:

$$L_{пр} = (m_{пр} + m_{обр}) \times (\mu_{\Sigma} - 1) - m_{обр} \ln \mu_{\Sigma}. \quad (9)$$

Определить обжатие при прямом ходе клетки ΔF_x можно, используя зависимость:

$$\int \frac{\Delta F_x}{F_x} dx = (m_{np} + m_{обр}) \times \left(\frac{F_0}{F_x} - 1 \right) - m_{обр} \ln \frac{F_0}{F_x} + C, \quad (10)$$

где C – постоянная интегрирования для реальных условий, равная нулю.

Обжатие площади поперечного сечения ΔF_x можно найти, продифференцировав выражение (10).

Принимая для одноконусных калибровок $D_x = D_0 - 2xtg\gamma$ и $t_x = t_0 - x(tg\gamma - tg\alpha)$,

а также что для реальных значений $\frac{t_x}{D_x}$ с достаточной степенью точности справедливо равен-

ство $F_x = \pi D_x \times t_x$, обжатие площади поперечного сечения можно определить по формуле:

$$F_x = \pi \left[(m_{np} + m_{обр}) \mu_x - m_{обр} \right] \times \left[2t_0 tg\gamma + D_0 (tg\gamma - tg\alpha) - 4xtg\gamma (tg\gamma - tg\alpha) \right]. \quad (11)$$

Для многоконусных калибровок и калибровок с криволинейной образующей профиля оправки в формулу (11) следует ввести множитель $\frac{tg\gamma_x}{tg\gamma_{cp}}$ – отношение тангенсов текущего

угла наклона образующей гребня ручья и среднего угла от начала обжимной зоны до данного сечения.

Для определения обжатия по стенке при прямом ходе Δt_x величину ΔF_x следует выразить как функцию от Δt_x и обжатия по внутреннему диаметру $\Delta D_{x_{вн}}$:

$$\Delta F_x = \Delta t_x \pi (D_x - \Delta D_{x_{вн}}) + \pi \times t_x \Delta D_{x_{вн}} - t_x^2. \quad (12)$$

Поскольку $\Delta D_{x_{вн}} = (2\Delta t_x tg\alpha) / \delta$, где для упрощения записи введено обозначение $tg\gamma_x - tg\alpha = \delta$, из двух значений Δt_x , являющихся корнями квадратного уравнения (12), нужно выбрать корень:

$$\Delta t_x = \frac{D_x + \frac{2t_x tg\alpha}{\delta} - \sqrt{\left(D_x + \frac{t_x \cdot 2tg\alpha}{\delta} \right)^2 - 4 \cdot \frac{tg\gamma_x + tg\alpha}{\pi \delta} \Delta F_x}}{2(tg\gamma_x + tg\alpha) / \delta}. \quad (13)$$

В формуле (13) величина ΔF_x определяется по формуле (11).

Для станов ХПТР, учитывая незначительные деформации по диаметру, выражение (10) можно представить в виде:

$$\int \frac{\Delta t_x}{t_x} dx = (m_{np} + m_{обр}) \left(\frac{t_0}{t_x} - 1 \right) - m_{обр} \ln \frac{t_0}{t_x}. \quad (14)$$

Откуда получается выражение для обжатия по толщине стенки:

$$\Delta t_x = tg\gamma_x \left[(m_{np} + m_{обр}) \mu_{t_x} - m_{обр} \right]. \quad (15)$$

Зависимость $\Delta t_x = f(\Delta F_x)$ в выражении (12) можно упростить, отбросив последний член, что дает погрешность менее 1%. Тогда, формула (13), при этом, примет вид:

$$\Delta t_x = \Delta F_x / \pi \left[D_x - \Delta D_{x_{вн}} + (2t_x tg\alpha) / \delta \right]. \quad (16)$$

Расчеты показывают большое различие в величине обжатий по формуле (13) и по обычным формулам, не учитывающим влияние смещения металла при предшествующем обратном ходе. Следует отметить также большое различие величин обжатий при прямом и обратном ходах клетки, причем с увеличением вытяжки это различие возрастает (показатели рассчитаны для случая прокатки с одинаковой подачей перед прямым и обратным ходами клетки $m_{np} + m_{обр} = 5 + 5$ мм), см. табл. 1.

Таблица 1

Значения величин обжатий при прямом и обратном ходах клетки в зависимости от вытяжки

μ_{Σ}	$tg\gamma_x - tg\alpha$	$\Delta t_{X_{ПР}}$, мм	$\Delta t_{X_{ОБР}}$, мм	x/l
1,4	0,032	0,29	0,143	10/240
2,25	0,014	0,25	0,058	130/240
2,9	0,006	0,186	0,024	190/240

Анализ полученных данных (табл. 1) свидетельствует о необходимости корректировки калибровки при прокатке с двойной подачей. Впрочем, упругая деформация клетки в значительной степени выравнивает обжатия, способствуя тем самым более равномерному распределению давления металла по длине обоих ходов.

Определение обжатий по линейному смещению металла за одинарный ход клетки позволяет определить их значение для различных вариантов деформации металла в станах периодической прокатки. Так, в случае деформации металла только при прямом ходе обжатия в сечении $x-x$ можно получить аналитически из выражения (10), приняв $m_{обр} = 0$. С учетом ранее принятых допущений для многоконусных калибровок можно записать:

$$\Delta F_x = \pi \times m \times \mu_x (tg\gamma_x / tg\gamma_{cp}) (D_0 \delta + 2tg_0 tg\gamma_x - 4xtg\gamma_x \delta). \quad (17)$$

Обжатие по толщине стенки Δt_x можно определить, подставляя в выражение (13) найденное значение ΔF_x .

Аналогичная зависимость для определения обжатия получается при деформации металла только при обратном ходе клетки. В этом случае объем металла, выходящий за обратный ход, также равен объему подачи, поэтому исходное выражение для определения обжатия получается таким же, как и для прямого хода. Причем, отмеченная выше особенность деформации при обратном ходе сохраняется – обжатие равно разности площадей сечений прокат-головки, отстоящих одно от другого на расстоянии подачи.

Идентичность зависимостей для определения обжатий в обоих случаях обуславливается тем, что профили прокат-головок перед подачей различны. При деформации только во время прямого хода этот профиль соответствует развертке гребня ручья калибра. При деформации только во время обратного хода линейное смещение металла при предшествующем обратном ходе приводит к относительному увеличению площадей сечений прокат-головки, причем пропорционально суммарной вытяжке μ_x в данном сечении. Этим компенсируется уменьшение обжатия и сокращения расстояния между сечениями прокат-головки, определяющими обжатие при обратном ходе.

На рис. 2 показан профиль прокат-головки для прямого и обратного ходов клетки.

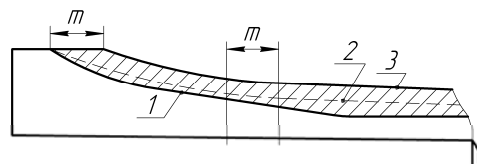


Рис. 2. Профиль прокат-головки:

1 – после прямого хода клетки; 2 – после обратного хода клетки; 3 – перед прямым или обратным ходом в случае деформации только во время обратного хода

Для станов ХПТР выражение (10) при $m_{обр}$ можно представить в виде:

$$\int \frac{\Delta t_x}{t_x} dx = m \left(\frac{t_0}{t_x} - 1 \right) = m (\mu_{t_x} - 1), \quad (18)$$

где μ_{t_x} – частная вытяжка по стенке, определяемая как $\mu_{t_x} = \frac{t_x - m}{t_x}$.

В этом случае для обжатия Δt_x получается формула:

$$\Delta t_x = m\mu_{t_x}(tg\gamma_x - tg\alpha), \quad (19)$$

Достоверность полученных зависимостей для определения линейных смещений и соответствующих обжатий при прямом и обратном ходах клети производилась при прокатке свинцовых труб, т. е. в условиях практического отсутствия упругой деформации моментов клети. Свинцовые трубы прокатывали на стане ХПТР 15–30 по маршруту $21 \times 2,1 \rightarrow 18 \times 0,7$ с двойной подачей заготовки $6 + 6$ мм. Линейное смещение металла при прямом ходе клети составило 17,5 мм, а при обратном ходе 6,5 мм, а расчет по формулам (9) и (7) дал, соответственно, 17 и 6,1 мм, что вполне удовлетворительно. Это позволяет рекомендовать применение выведенных формул (1), (13) и (17) для практических расчетов обжатий металла в случае прокатки с двойной подачей заготовки.

Нужно заметить, что упругая деформация системы валки – клеть уменьшает указанное различие обжатий. Так, фактическое соотношение суммарного линейного смещения металла при прямом и обратном ходах клети при равных подачах составляет, в процентном отношении, в среднем, 55:45 и уточненные зависимости для определения текущих обжатий имеют вид [3]:

для прямого хода:

$$\Delta t_{np} = m_{np}\mu_x(tg\gamma_x - tg\alpha_x) - (\Delta_{np} - \Delta_{об}); \quad (20)$$

для обратного хода:

$$\Delta t_{об} = m_{об}(tg\gamma_x - tg\alpha_x) + (\Delta_{np} - \Delta_{об}), \quad (21)$$

где Δ_{np} и $\Delta_{об}$ – упругая деформация системы валки – клеть, соответственно, при прямом и обратном ходах клети в данном поперечном сечении прокат-головки.

ВЫВОДЫ

В работе получены зависимости для практических расчетов обжатий металла при периодической прокатке труб на станах ХПТ/ХПТР при подаче заготовки в обоих крайних положениях клети. Экспериментально подтверждено, что расчетные данные по полученным зависимостям и данные эксперимента при прокатке свинцовых труб практически совпадают, при этом, погрешность составляет не более 3 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов М. В. Совершенствование процесса периодической прокатки труб / М. В. Попов, С. В. Атанасов, Ю. М. Беликов. – Днепропетровск : ООО «Дива», 2008. – 192 с.
2. Модернизация станов холодной прокатки труб на ЗАО «НЗНТ» / В. Г. Воронько, А. А. Терещенко, Е. В. Чудный // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2007. – № 3. – С. 60–61.
3. Усовершенствование способа прокатки на станах ХПТ с подачей и поворотом труб-заготовок в обоих крайних положениях клети / Беликов Ю. М., Терещенко А. А., Головченко А. П. и [др.] // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2007. – № 4. – С. 57–59.

Беликов Ю. М. – канд. техн. наук, консультант ЗАО «СПЮ»;
Головченко А. П. – нач. гр. проката отдела разработки технологий ЗАО «СПЮ»;
Терещенко А. А. – нач. отдела разработки технологий ЗАО «СПЮ»;
Фролов Я. В. – канд. техн. наук, доц. НМетАУ;
Григоренко В. У. – проф., НМетАУ;
Дехтярев В. С. – канд. техн. наук, доц. НМетАУ.

ЗАО «СПЮ» – Закрытое Акционерное Общество «СЕНТРАВИС ПРОДАКШН
ЮКРЕЙН», г. Никополь;
НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: yafrolov@gmail.com
TeretchenkoA@centravis.com
Golovchenko@centravis.com
grivlaus@gmail.com