

УДК 621.774

doi:10.20998/2413-4295.2017.53.01

## МИНИМИЗАЦИЯ ВЕЛИЧИНЫ ОСЕВЫХ УСИЛИЙ НА СТАНАХ ХПТ

С. В. ПИЛИПЕНКО

Кафедра теории, технологии и автоматизации металлургических процессов Никопольского факультета НметАУ, Никополь, УКРАИНА  
e-mail: 44-08@i.ua

**АННОТАЦИЯ** Цель. Дальнейшее развитие метода расчета кинематических параметров процесса деформации труб в станах холодной пильгерной валковой прокатки труб с целью уменьшения величины осевых усилий. **Методика.** В основу развития метода расчета кинематических параметров процесса деформации труб в станах холодной пильгерной валковой прокатки труб положен новый метод выбора рационального соотношения значений принудительного катающего радиуса и радиуса бочки вала стана КРВ (метод минимума работ). **Результаты.** В статье рассмотрены основные известные на данный момент зависимости, которые применяются для расчета величины естественного катающего радиуса, радиуса бочки валков, рассмотрены также основные способы, служащие для снижения величины осевых усилий на станах ХПТ. Предложен новый метод расчета кинематических параметров процесса деформации труб в станах холодной пильгерной валковой прокатки труб (метод минимума работ). На основе результатов промышленной эксплуатации метода сделан вывод о его действенности. **Научная новизна.** На основе известных зависимостей предложено развитие метода расчета рационального соотношения принудительного катающего радиуса калибра и радиуса бочки валков станов холодной прокатки труб, базирующееся на глубоком анализе осевых усилий, определяемых исходя из всех основных параметров процесса. **Практическая значимость.** Предложенный метод позволяет оптимизировать не только максимальные величины осевых усилий при прямом и обратном ходах клетки, но также интенсивность их распределения вдоль конуса деформации. Описанный метод был применен при расчете ряда калибровок для прокатки труб из титановых сплавов на стане КРВ-25.

**Ключевые слова:** холодная пильгерная прокатка; пластическая деформация; кинематика процесса деформации; величина осевых усилий.

## MINIMIZING THE VALUE OF AXIAL FORCES IN THE COLD TUBE ROLLING MILLS

S. V. PILIPENKO

Department of the theory, technology and automatization of the metallurgical processes in the Nikopol faculty of the National metallurgical Academy of Ukraine, Nikopol, UKRAINE

**ABSTRACT** **The aim.** Subsequent development of procedure for calculation of the kinematic parameters of the process of tube deformation in the cold tube pilger roll rolling mills with purpose of decreasing the value of axial forces. **Methods.** The new method (procedure) for the choice of the rational relationship of values of the forced rolling radius and the roll barrel radius in the mill КРВ (method of the work minimum) had been assumed as the basis of development of the procedure for calculating the kinematic parameters of the tube deformation process in the cold tube pilger roll rolling mills. **The outcome.** The main dependencies known for now, which are used for calculating the value of the natural rolling radius and the roll barrel radius had been considered in the present paper, as well as the main practice used for decreasing the value of axial forces in the CTR mills. A procedure had been proposed for calculating the kinematic parameters of the tube deformation process in the mills of the cold tube pilger roll rolling (the method of the work minimum). Basing on the outcomes of industrial exploitation of the given method one drew the conclusion as to effectiveness of the proposed procedure. **The scientific novelty.** Basing on existing dependencies, the development of procedure had been proposed for calculating the rational relationship of the forced rolling groove radius and the roll barrel radius in the cold tube rolling mills. The procedure is based on the intimate analysis of axial forces, which are determined proceeding from all the basic parameters of the process. **The practical importance.** The given method allows optimizing not only the maximum values of axial forces at the direct and reverse stroke of the stand, but also the intensity of forces distribution along the cone of deformation. The method (procedure) had been used while calculating a number of roll pass designs for rolling tubes of titanium alloys in the mill КРВ-25.

**Keywords:** cold pilger rolling; plastic deformation; kinematics of deformation process; value of axial forces.

### Вступлення

Деформация трубы в станах пильгерной прокатки совершается в непрерывно изменяющемся мгновенном очаге деформации (МОД), который движется вдоль неподвижно зажатого конуса деформации [1-3]. При этом, кинематические условия деформации создаются искусственно. Они задаются

зависимостью величины принудительного катающего радиуса (начального радиуса ведущей шестерни, рис.1) от радиуса бочки калибра. Катающий радиус следует определять, исходя из условия отсутствия осевых сил. Рациональным катающим радиусом следует считать тот, при котором скольжение металла по поверхности калибра будет минимальным [4-7]. Такой радиус принято называть естественным

катающим радиусом. Чем больше разница между величинами естественного и принудительного катающих радиусов, тем большие осевые силы действуют на конус деформации и оправку. Это негативным образом влияет на качество труб, увеличивает расход инструмента и повышает температуру металла в мгновенном очаге деформации [6-8]. В определённых случаях процесс ХПТ вообще становится невозможным.

**Цель работы**

Дальнейшее развитие метода расчета кинематических параметров процесса деформации труб в станах холодной пильгерной валковой прокатки труб с целью уменьшения величины осевых усилий.

**Анализ исследований**

Как видно из рис. 1а, возвратно-поступательное движение клетки относительно конуса деформации, одновременно с вращательным движением валков с калибрами, в станах ХПТ задается движением ведущей шестерни по шестеренной рейке. При этом величина катающего радиуса, во всех сечениях конуса деформации, равна величине начального радиуса ведущей шестерни ( $\rho_{ш}$ ). То-есть, она задается принудительно и по своей величине должна равняться естественной величине катающего радиуса, необходимой для данного случая прокатки во всех сечениях конуса деформации (рис. 1 б,  $\rho_{к.е.}$ ).

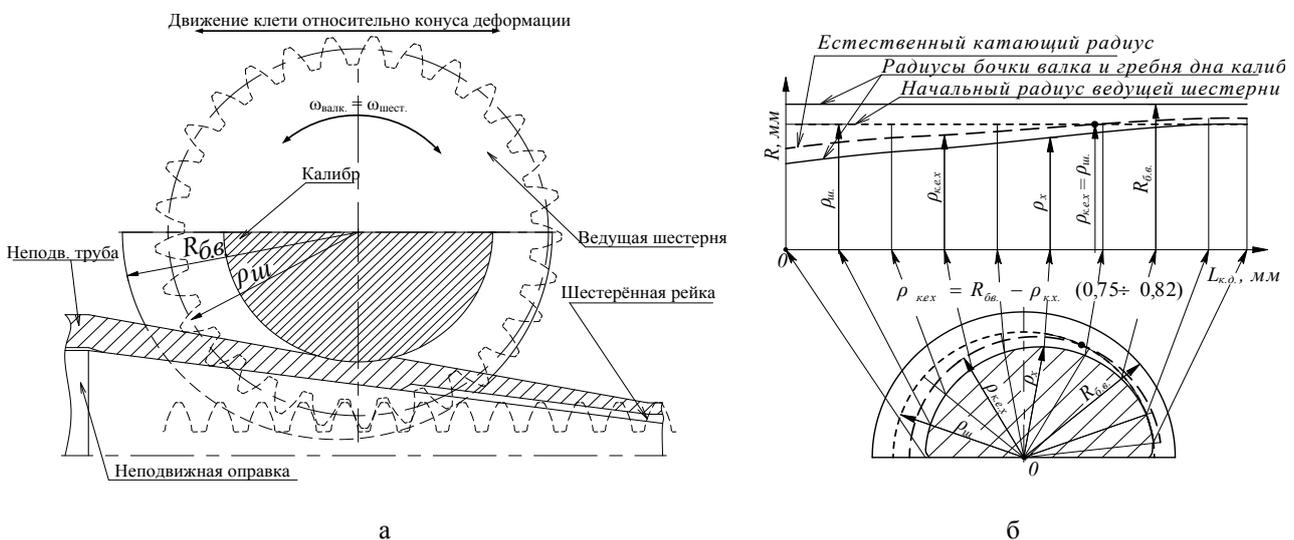


Рис. 1 – Схема привода клетки станов ХПТ (а) и распределение принудительного и естественного катающих радиусов вдоль конуса деформации (б)

Определение рациональных параметров ведущей шестерни дополнительно осложняется тем, что радиус гребня калибра меняется вдоль конуса деформации, меняется и естественный катающий радиус, тогда как радиус ведущей шестерни остается постоянным (рис. 1). При  $\rho_{ш} > \rho_{к.е.}$  зона опережения увеличивается, при  $\rho_{ш} < \rho_{к.е.}$  наблюдается обратная зависимость [3, 6].

В одном и том же сечении конуса деформации величина естественного катающего радиуса для прямого и обратного хода разная [6]. Наиболее простым является решение путем установки среднего радиуса ведущей шестерни для прямого и обратного ходов [5, 6]. Большое влияние на осевые усилия имеет степень заполнения ручья калибра, которая, в свою очередь, зависит от развалки калибра, условий трения и др. С учетом того, что приведенные величины сильно меняются в зависимости от величин подачи, поворота и др. [3-10], окончательно предложено

определять катающий радиус по упрощенным зависимостям типа [4, 6-9]:

$$D_k \approx D_i - 0.75 \cdot D_p; \quad R_k \approx R_i - 0.7 \frac{D_p}{2}; \quad (1-2)$$

$$D_k = D_i - 0.75 \cdot D_p; \quad R_k \approx R_6 - \frac{3}{4} H, \quad (3-4)$$

где  $R_i$  и  $D_i$  – идеальные радиус и диаметр валка;  $D_p$  – диаметр калибра;  $H$  – глубина ручья калибра.

В практике прокатки подбор диаметров шестерен тоже производится по формулам, подобным приведенным в [4, 6-9]:

$$D_{ш} = D_6 \cdot k \cdot (D_3 + D_1) \cdot 0.45; \quad D_{ш} = D_6 \cdot (D_3 + D_1) \cdot 0.35. \quad (5-6)$$

Здесь  $D_z$  и  $D_m$  - диаметры заготовки и трубы;  $D_b$  - диаметр бочки калибра;  $k = 0,7-0,9$ - поправочный эмпирический коэффициент.

Фирмой Маннесман-Мейер предложена методика расчета параметров ведущей шестерни и калибра (метод SKW) в зависимости от коэффициента скольжения по формуле:

$$F_{SL} = \frac{D_W - D_R}{(D_L + D_F)0,45}, \quad (7)$$

где  $F_{SL}$  - коэффициент скольжения (0,7-0,9);  $D_W$  - диаметр валков [мм];  $D_R$  - начальный диаметр шестерни [мм];  $D_L$  - наружный диаметр заготовки [мм];  $D_F$  - наружный диаметр готовой трубы [мм].

Изменение величины радиуса ведущей шестерни приводит к значительному изменению не только величины, но и знака осевой силы во всех сечениях вдоль конуса деформации (рис. 2).

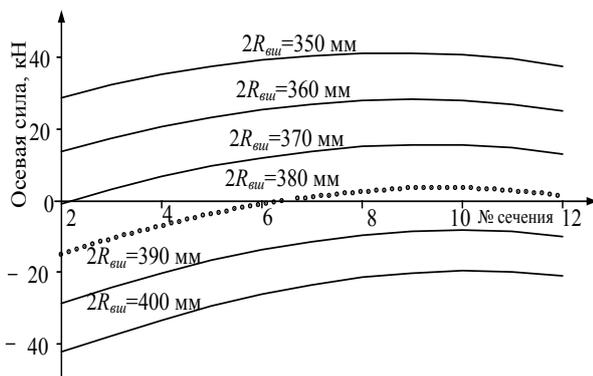


Рис. 2 - Влияние величины радиуса ведущей шестерни на интенсивность распределения величины осевых сил в МОД вдоль конуса деформации (ХПТ-75, маршрут - 85x14,5-60x7, сплав Gr 2,  $m = 6$  мм)

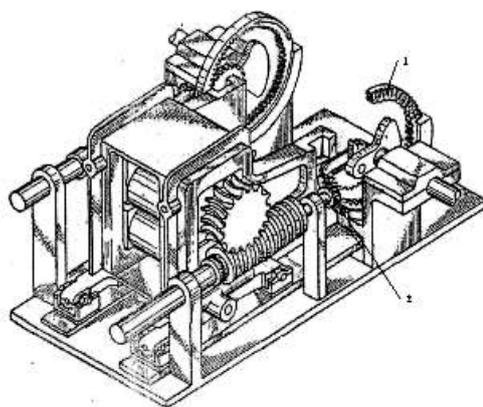
Для снижения величины осевых усилий предложен ряд конструктивных решений [10-11]:

1. Перемещение рейки в направлении движения клетки с целью уменьшения значения относительной скорости.
2. Применение червячного механизма привода клетки (рис. 3, а).
3. Изменение скорости вращения валков гидроцилиндрами (рис. 3, б).
4. Эксцентричная установка обычных шестерен (рис. 4, а).
5. Применение ведущих шестерен с радиусом начальной окружности, изменяющимся по логарифмическому закону (рис. 4, б).
6. Применение регулируемого рычажного механизма привода перемещения клетки (типа ХПТР).
7. Использование реечно-зубчатого привода валков с изменяющимся шагом и наклоном зубьев неподвижной зубчатой рейки.

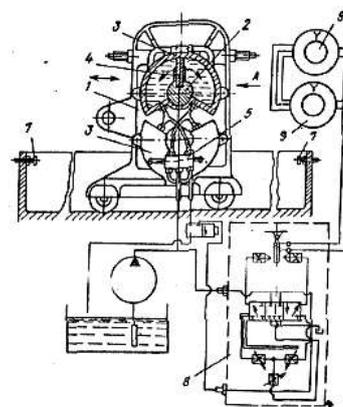
### Основной материал

В настоящее время наиболее распространенным способом оптимизации величины осевых усилий является заложенная в конструкцию клетки стана возможность изменять не только диаметр ведущей шестерни, но также и диаметр бочки валки (рис. 5).

Столь простое решение позволяет более точно создавать необходимые кинематические условия процесса ХПТ, минимизируя таким образом величину осевых усилий. Однако сама конструкция станом (применение полимерных зажимных кулачков) требует более точного расчета величины катающего радиуса. Автором работы в соавторстве предложен [5, 12] метод расчета рационального соотношения принудительного катающего радиуса калибра и радиуса бочки валков станом холодной прокатки труб, базирующийся на глубоком анализе осевых усилий, определяемых на основе всех основных параметров процесса (метод минимума работ).

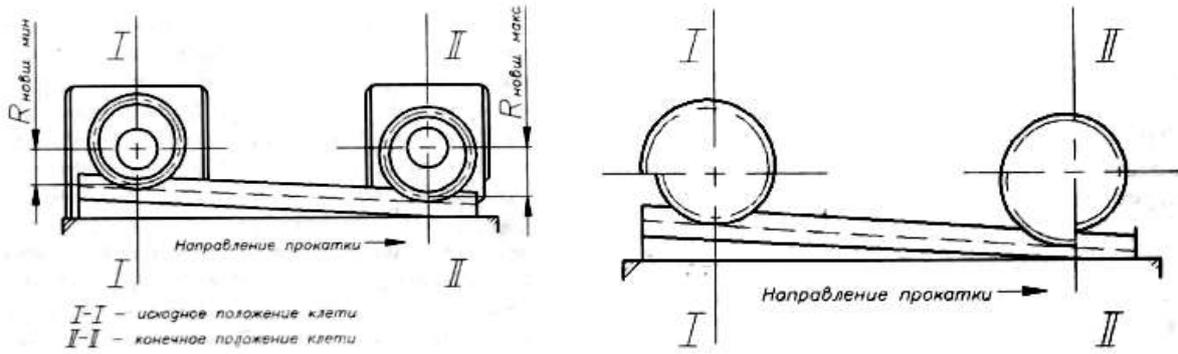


а



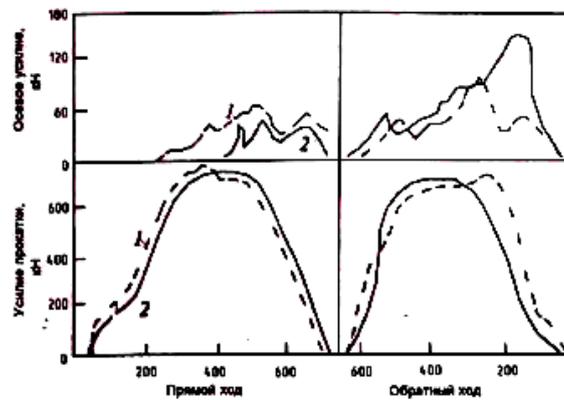
б

Рис. 3 - Стан холодной прокатки с червячным механизмом привода (а), с возможностью изменять скорость вращения валков гидроцилиндрами (б) [11]



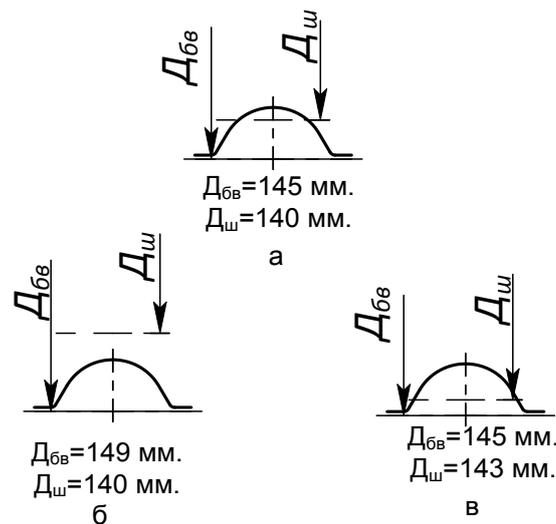
а

б



в

Рис. 4 - Схема работы стана с эксцентричными шестернями (а), с радиусом начальной окружности, изменяющимся по логарифмическому закону (б), осциллограмма осевых и вертикальных усилий при прокатке трубы из стали X18H10T с 108x6,5 до 76x3,5 мм (в): 1 - обычные шестерни; 2 - эксцентричные шестерни [10]



а

б

в

Рис. 5 - Изменение места прохождения катающего диаметра (равного  $D_{ш}$ ) относительно поперечного сечения ручья калибра при изменении диаметра бочки валка ( $D_{бв}$ ) и диаметра ведущей шестерни ( $D_{ш}$ ) (сечение зоны калибровки калибра стана КРВ-25, маршрут 8,9x0,75-6, 35x0,44 мм)

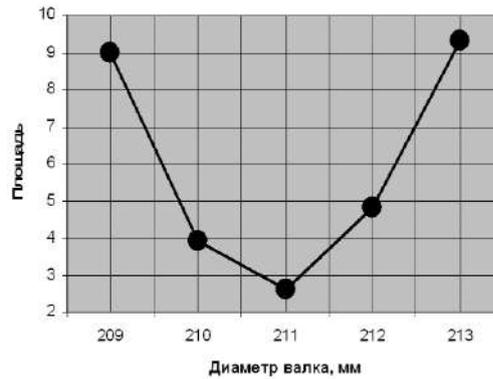


Рис. 6 - Зависимость величины суммы модулів площей криволинейных трапецій (образованных функциями изменения осевых усилий) от диаметра калибра при использовании шестерни диаметром 196 мм (маршрут 26x1,7-19,05x0,99, KPW -25)

Он включает следующие основные шаги [5,12]:

- рассчитываем калибровку, все параметры деформации и изменение механических свойств металла и, как результат, осевое усилие при прямом и обратном ходах для расчетных контрольных сечений рабочего конуса;

- находим для прямого и обратного хода площадь криволинейных трапецій, образованных функциями значений осевых усилий;

- суммируем модули значений вышеназванных площадей (далее "сумма площадей");

- изменяя радиус валков, находим минимум значения величины площадей вышеуказанных криволинейных трапецій.

Данный метод был применен при расчете рационального радиуса валка стана KPW -25 при прокатке трубы по маршруту 26x1,7-19,05x0,99.

При прокатке труб по вышеуказанному маршруту было отчетливо видно, что процесс прокатки протекал устойчиво без видимого воздействия осевых сил на стержень оправки и патрон подачи.

### Выводы

В работе исследованы основные конструктивные решения, применяемые для снижения величины осевых усилий в станах ХПТ. Рассмотрен новый метод выбора рационального соотношения значений принудительного катающего радиуса и радиуса бочки валка стана KPW. Ряд экспериментальных прокаток в заводских условиях на валках, радиус бочки которых определяли по такому методу, показал, что процесс прокатки протекал устойчиво без видимых воздействий осевых сил. Следует заметить, что описанный "интегральный метод" (или метод «метод минимума работ») позволяет учитывать не только максимальные величины осевых усилий, но также интенсивность их распределения вдоль конуса деформации. Данный метод был применен при расчете ряда калибровок для прокатки труб из титановых сплавов на стане KPW-5.

### Список литературы

1. **Ning, A.** Finite Element Analysis of Rolling Process for Pilger Mill / **A. Ning, H. Liu** // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Issue 881-883. – p.1420. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.881-883.1420.
2. **Nakanishi, H.** 3D simulations for cold pilgering process by explicit FEM / **H. Nakanishi, S. Toyoshima, M. Harada, A. Honda** // *10th International Conference on Computational Plasticity COMPLAS X*. – 2009. – Barcelona, Spain. CIMNE.
3. **Harada, M.** Simulation of Cold Pilgering Process by a Generalized Plane Strain FEM / **M. Harada, A. Honda, S. Toyoshima** // *Journal of ASTM International*. – 2005. – vol. 2, 3.– p. 233-247. – doi: 10.1520/JAI12334.
4. **Тетерин, П. К.** Теория периодической прокатки / **П. К. Тетерин**. – М.: Металлургия, 1978. - 256 с.
5. **Григоренко, В. У.** Расчет оптимального соотношения радиусов калибра и валка станов холодной прокатки труб / **В. У. Григоренко, С. В. Пилипенко** // *Сталь*. – 2012. – №8. - С. 37-39.
6. **Шевакин, Ю. Ф.** Калибровка и усилия при холодной прокатке труб / **Ю. Ф. Шевакин**. - М: Металлургиздат, 1963. - 269 с.
7. **Орро, П. И.** Производство стальных тонкостенных труб: [Монография] / **П. И. Орро, Я. Е. Осада**. - М. Харьков: Металлургиздат, 1951. - 416 с.
8. **Фролов, В. Ф.** Холодная пильгерная прокатка труб / **В. Ф. Фролов, В. Н. Данченко, Я. В. Фролов**. - Днепропетровск: Пороги, 2005. - 255 с.
9. **Гриншпун, М. И.** Станы холодной прокатки труб / **М. И. Гриншпун, В. И. Соколовский**. - М: Машиностроение, 1967. -239 с.
10. **Филатов, А. А.** Способы снижения осевых усилий на станах ХПТ / **А. А. Филатов, О. В. Соколов, Е. В. Лагошин, А. Г. Ушаков, А. И. Целиков** // *Производство проката*. – 2014. – №12. - С. 21-23.
11. **Данченко, В. М.** Аналіз механізмів зниження вісьових сил на станах ХПТ / **В. М. Данченко, В. Т. Вишинський, А. В. Сьомічев, Я. В. Фролов** // *Металургическая и горнорудная промышленность*. – 2007. – №1. - С. 46-49.
12. **Пилипенко, С. В.** Развитие метода расчета рационального соотношения величин принудительного и естественного катающего радиуса калибра станов холодной прокатки труб / **С. В. Пилипенко** //

*Обработка материалов давлением.* - № 4 (37): У 36. наук. праць. - Краматорськ, 2013. - С. 165 – 167.

#### Bibliography (transliterated)

1. **Ning, A., Liu, H.** Finite Element Analysis of Rolling Process for Pilger Mill. *Advanced Materials Research*; 2014, **881-883**, 1420 – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.881-883.1420.
2. **Nakanishi, H., Toyoshima, S., Harada, M., Honda, A.** 3D simulations for cold pilgering process by explicit FEM. *10th International Conference on Computational Plasticity COMPLAS X*, 2009, Barcelona, Spain. CIMNE.
3. **Harada, M., Honda, A., Toyoshima, S.** Simulation of Cold Pilgering Process by a Generalized Plane Strain FEM. *Journal of ASTM International*, 2005, **2**, 3, 233-247. – doi: 10.1520/JAI12334.
4. **Teterin, P. K.** Teoriya periodicheskoy prokatki. M.: Metallurgiya, 1978. 256 s.
5. **Grigorenko, V. U., Pilipenko, S. V.** Raschet optimal'nogo sootnosheniya radiusov kalibra i valka stanov kholodnoj prokatki trub. *Stal*, 2012, **8**, S.37 – 39.
6. **Shevakin, Yu. F.** Kalibrovka i usiliya pri kholodnoj prokatke trub. M.: Metallurgizdat, 1963, 269 s.
7. **Orro, P. I., Osada, Ya. Ye.** Proizvodstvo stalnykh tonkostennykh trub: Monografiya [ Manufacture of the steel thin-walled tubes: Monography]. M., Kharkov: Metallurgizdat, 1951. 416 s.
8. **Frolov, V. F., Danchenko, V. N., Frolov, Ya. V.** Kholodnaya pil'gernaya prokatka trub. Dnepropetrovsk: Porogi, 2005, 255 s.
9. **Grinshpun, M. I., Sokolovkij, V. I.** Stany Kholodnoj prokatki trub. M.: Mashinostroyeniye, 1967, 239 s.
10. **Filatov, A. A., Sokolov, O. V., Lagoshin, Ye. V., Ushakov, A. G., Tselikov, A. I.** Sposoby snizheniya osevkh usilij na stanakh CTR. *Proizvodstvo prokata*, 2014, **12**, S. 21–23.
11. **Danchenko, V. M., Vyshynskij, V. T., Sjomichev, A. V., Frolov, Ya. V.** Analiz mekhanizmiv znyzhennya visiovykh syl na stanakh CTR. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*, 2007, **1**, S.46 – 49.
12. **Pilipenko, S. V.** Ravitiye metoda rascheta ratsional'nogo sootnosheniya velichin prinuditelnogo i yestestvennogo katayushchego radiusa kalibra stanov kholodnoj prokatki trub. *Obrabotka materialov davleniyem*, N 4 (37): Zb. nauk. prats', Kramators'k, 2013, S. 165 – 167.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Пилипенко Станислав Владимирович** - кандидат технических наук, доцент кафедры теории, технологии и автоматизации металлургических процессов Никопольского факультета Института интегрированных форм обучения НметАУ, Никополь, Украина; e-mail: 44-08@i.ua.

**Stanislav Pylypenko** - candidate in engineering sciences, assistant professor in department of the theory, technology and automatization of the metallurgical processes in the Nikopol faculty of the Institute of integrated teaching forms of the National metallurgical Academy of Ukraine, NmetAU, Nikopol, Ukraine; e-mail: 44-08@i.ua.

*Пожалуйста, ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

**Пилипенко, С. В.** Минимизация величины осевых усилий на станах хпт / **С. В. Пилипенко** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 53 (1274). – С. 5-10. – doi:10.20998/2413-4295.2017.53.01.

*Please cite this article as:*

**Pilipenko, S. V.** Minimizing the value of axial forces in the cold tube rolling mills. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **53** (1274), 5–10, doi:10.20998/2413-4295.2017.53.01.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Пилипенко, С. В.** Мінімізація величини вісьових зусиль на станах ХПТ / **С. В. Пилипенко** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 53 (1274). – С. 5-10. – doi:10.20998/2413-4295.2017.53.01.

**АНОТАЦІЯ Мета.** Подальший розвиток методу розрахунку кінематичних параметрів процесу деформації труб в станах холодної пільгерної валкової прокатки труб з метою зменшення величини вісьових зусиль. **Методика.** В основу розвитку методу розрахунку кінематичних параметрів процесу деформації труб в станах холодної пільгерної валкової прокатки труб покладено новий метод вибору раціонального співвідношення значень примусового катаючого радіуса та радіуса бочки валка стана КРВ (метод мінімуму робіт). **Результати.** У статті розглянуті основні відомі на даний момент залежності, що їх використовують для розрахунку величини природного катаючого радіуса та радіуса бочки валків; розглянуті також основні способи, які служать для зниження величини вісьових зусиль на станах ХПТ. Запропоновано новий метод розрахунку кінематичних параметрів процесу деформації труб в станах холодної пільгерної валкової прокатки труб (метод мінімуму робіт). На основі результатів промислової експлуатації методу зроблено висновок щодо його дійовості. **Наукова новизна.** На основі існуючих залежностей запропоновано розвиток методу розрахунку раціонального співвідношення примусового катаючого радіуса калібру та радіуса бочки валків станів холодної прокатки труб, що базується на глибокому аналізі вісьових зусиль, які визначаються на основі усіх основних параметрів процесу. **Практична значимість.** Запропонований метод дозволяє оптимізувати не тільки максимальні величини вісьових зусиль при прямому та зворотному ходах кліті, але й інтенсивність їх розподілу уздовж конуса деформації. Описуваний метод було використано при розрахунку низки каліровок для прокатки труб з титанових сплавів на стані КРВ–25.

**Ключові слова:** холодна пільгерна прокатка; пластична деформація; кінематика процесу деформації; величина вісьових зусиль.

*Поступила (received) 05.12.2017*