

ГИПОТЕЗА О ХАРАКТЕРЕ ИСКАЖЕНИЯ ФОРМЫ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ РУЧЬЯ КАЛИБРА В СТАНАХ ПРИ БЕЗЭМУЛЬСИОННОЙ ПРОКАТКЕ ТРУБ

© 2021 г. С.В. Пилипенко

Полоцкий государственный университет, г. Новополоцк, Республика Беларусь

Статья поступила в редакцию 14.04.20 г., доработана 23.10.20 г., подписана в печать 17.11.20 г.

Аннотация: Представлены результаты по развитию метода расчета тепловыделений в ходе пластической деформации в ее мгновенном очаге при холодной прокатке труб (ХПТ), которые влияют на искажение формы деформирующего инструмента в станах ХПТ и изменение физических характеристик деформируемого металла труб. Определено, что уменьшение глубины поперечного сечения ручья калибра стана ХПТ из-за термических искажений (теплового эффекта), вызванных пластической деформацией трубы в мгновенном очаге деформации, прямо пропорционально расстоянию рассматриваемого продольного сечения ручья калибра до края бочки калибра. Выявлено, что сечения, лежащие ближе к бочке ручья, получают меньшие термические искажения. Предложен метод компенсации термических искажений в ходе расчета калибровки ручья калибра. Эксперименты по нанесению рисок на поверхности бочки вала рядом с выпуском калибра показали, что максимальное их истирание происходит непосредственно вблизи выпусков. Это указывает на локальный характер теплового расширения. Приведены зависимости, позволяющие определить величину изменения геометрических параметров инструмента как функцию температуры нагрева. Указанные зависимости были протестированы экспериментально и положены в основу развития метода расчета параметров поперечного ручья калибра стана ХПТ с учетом термического локального расширения в районе мгновенного очага деформации. Предложенный закон позволяет учесть влияние особенностей процесса ХПТ на изменение геометрических параметров поперечного сечения проходного паза в стане холодной прокатки труб и рабочих параметров ведения процесса.

Ключевые слова: холодная прокатка, пластическая деформация, мгновенный очаг деформации, тепловыделения, прокатка без эмульсии, искажение формы.

Пилипенко С.В. — канд. техн. наук, доцент кафедры автомобильного транспорта
Полоцкого государственного университета (211440, Республика Беларусь, Витебская обл., г. Новополоцк, ул. Блохина, 29).
E-mail: 44-08@mail.ru.

Для цитирования: Пилипенко С.В. Гипотеза о характере искажения формы поперечного сечения ручья калибра в станах при безэмульсионной прокатке труб. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2021. Т. 27. № 2. С. 49–55.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-2-49-55.

Hypothesis of the nature of cross-sectional shape distortion of the cold-pilgering mill die groove during dry pipe rolling

S.V. Pilipenko

Polotsk State University, Novopolotsk, Republic of Belarus

Received 14.04.2020, revised 23.10.2020, accepted for publication 17.11.2020

Abstract: The paper provides results on the further development of a method for calculating heat emissions during plastic strain in its instantaneous deformation zone in the course of cold pilgering of pipes, such as the ones that affect the working tool deflection in cold-pilgering mills and mechanical properties of wrought pipe metal. It was determined that a decrease in the cross-sectional depth of the cold-pilgering mill die groove due to thermal distortions (thermal effect) caused by plastic strain of a pipe in the instantaneous deformation zone is in direct proportion to the distance of the die groove longitudinal section considered to the roll barrel edge. It was found that sections located closer to the roll barrel receive thermal distortion of a lesser degree. A method is proposed for thermal distortion compensation in roll-pass design calculation. Experiments on applying marks on the roll barrel surface near the groove taper showed that the maximum galling of marks takes place directly near tapers. This indicates the local nature of thermal expansion. Dependencies are presented to determine the value of tool geometry variation depending on the heating temperature. The presented dependencies were tested experimentally and were introduced as a basis for developing the method of calculating the transversal die groove parameters for the cold-pilgering mill taking into account local thermal expansion in the instantaneous deformation zone. The inferred law allows taking into account the influence of cold

pilgering peculiarities on the variation of the die groove cross-section geometry in the cold-pilgering mill, pipe dimensions and performance parameters.

Keywords: cold pilgering, plastic strain, instantaneous deformation zone, heat emissions, dry rolling, shape distortion.

Pilipenko S.V. — Cand. Sci. (Eng.), Associate prof., Department of automobile transport, Polotsk State University (211440, Republic of Belarus, Vitebsk region, Novopolotsk, Blokhin str., 29). E-mail: 44-08@mail.ru.

For citation: Pilipenko S.V. Hypothesis of the nature of cross-sectional shape distortion of the cold-pilgering mill die groove during dry pipe rolling. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2021. Vol. 27. No. 2. P. 49–55 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-2-49-55.

Введение

Трубы из титановых сплавов используются в теплообменниках, гидравлических системах аэрокосмической отрасли и пр. [1–5]. При производстве такой продукции трубопрокатным предприятиям необходимо обеспечить особые требования к точности геометрических размеров труб, качеству их поверхностей, гарантированному уровню механических свойств [6–9]. Использование безэмульсионного метода при холодной прокатке труб (ХПТ) из титановых сплавов (до 45 % труб) и тенденция к увеличению частоты двойных ходов клетей станов ХПТ (даже с подачей эмульсии в зону деформации) приводят к повышению тепловыделения от пластической деформации. Термические искажения формы ручья калибра вызывают изменения в выбранном (для обеспечения гарантированного уровня механических свойств) режиме деформации. В таких условиях сложно обеспечить точность труб.

Таким образом, компенсация термического искривления поперечного сечения ручья калибра при расчете параметров ХПТ является актуальной научной проблемой. При этом важно знать как характер термических искажений поперечного сечения ручья калибра, так и их абсолютную величину.

При прокатке труб из титановых сплавов на станах ХПТ используется безэмульсионный способ (прокатка на солевых маслах, без охлаждения валков и конуса деформации). При этом из-за термического воздействия происходит изменение размеров поперечного сечения ручья калибра, что вызывает трудности при настройке станов для прокатки особо точных труб, а также искажается распределенный вдоль конуса деформации режим деформирования.

Известные на данный момент исследования освещают вышеупомянутый вопрос недостаточно широко. В работах [10–13] предложено учитывать изменение радиуса ручья калибра под влиянием

термических искажений (термический эффект) по следующей зависимости:

$$2\rho_{ii} = D_i + \beta\Delta t_i (D_b + \Delta - D_i), \quad (1)$$

где ρ_{ii} — радиус ручья калибра с учетом разогрева; D_i — диаметр ручья калибра в соответствии с калибровкой [14, 15, 17]; D_b — диаметр валка; Δ — зазор между калибрами [16]; β — коэффициент теплового расширения; Δt_i — изменение температуры ручья калибров.

Как показала практика, данный метод, изменяя величину радиуса ручья калибра, создает другой режим деформации, вызывающий совершенно иной характер распределения термических искажений поперечного сечения ручья вдоль конуса деформации. Влияние теплового эффекта на необходимый режим деформации компенсировать не удается. Кроме того, экспериментальные исследования варьирования температуры в очаге деформации, термического расширения металла прокатного инструмента, а также закона изменения формы поперечного сечения очага деформации в достаточной мере не проводились.

В работах [10–13] предложен новый метод расчета геометрических параметров ручья калибра станов холодной пильгерной валковой прокатки труб с компенсацией термического изменения формы поперечного сечения геометрии ручья, который проверен практикой расчета калибровок для прокатки труб из титановых сплавов. В его основе — расчет изменения размеров диаметров конуса деформации (а не калибра) в контрольных сечениях из-за разогрева калибра. Предложена зависимость, позволяющая рассчитывать величину диаметра конуса (а не ручья калибра) в контрольных сечениях ($D_{i\text{кон}}$) с учетом разогрева калибра:

$$D_{i\text{кон}} = D_i - \beta_k \Delta t_i (D_b + \Delta - D_i), \quad (2)$$

где D_i — диаметр ручья в сечении согласно калиб-

ровке, β_k — коэффициент изменения диаметров конуса деформации в контрольных сечениях из-за разогрева калибра.

В ходе экспериментальных исследований изменения геометрических параметров трубы под действием термического эффекта [10—13] выявлено, что при безэмульсионном ведении процесса ХПТ увеличение температуры конуса деформации с 50 до 200 °С

вызвало уменьшение максимальной по толщине стенки на 14,5 %, а минимальной — на 1,5 %, т.е. в среднем на 7,97 %. Во время разогрева изменения толщины стенки трубы могут быть значительными и могут вывести ее размеры за пределы допуска на этот параметр (рис. 1). Следует заметить, что температура конуса измерялась не в мгновенном очаге деформации, а при выходе сечения конуса из него.

Таблица 1. Основные типы поперечных сечений ручьев калибров станов ХПТ [18–21]

Table 1. Main cross-section types of cold-pilgering mill die grooves [18–21]

№ п/п	Схема	Форма основного контура	Форма выпуска	Дуга основного контура
1		Круглый	Радиальный	$\pi - 2\alpha$
2		Круглый	Прямой	$\pi - 2\alpha$
3		Овальный	Выпуска нет	$\pi - 2\alpha$
4		Овальный	Радиальный	π

Примечание. АСС – дуга, ограничивающая общий контур калибра; АВ – дуга, ограничивающая контур дна калибра; ВС – дуга, ограничивающая контур выпуска калибра.

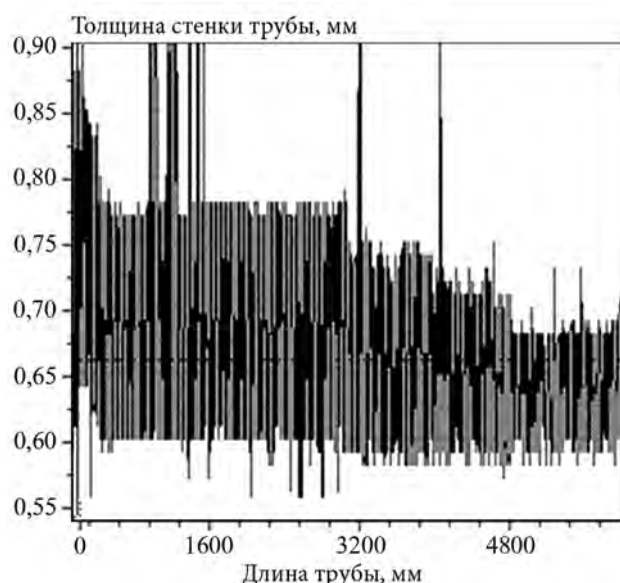


Рис. 1. Изменение толщины стенки трубы из сплава VT1-0 под действием термического эффекта. Труба прокатана для «разогрева» стана ХПТ-32 перед прокаткой основной партии труб (маршрут 28×1,82 – 19×0,65 мм)

Fig. 1. Thickness variation of VT1-0 alloy pipe under thermal effect

The pipe was rolled for KhPT-32 cold-pilgering mill «preheating» before rolling the main pipe batch (Schedule 28×1.82 – 19×0.65 mm)

В станах ХПТ используются калибры с разными поперечными сечениями ручьев (см. табл. 1), наиболее часто — круглый калибр с выпусками по радиусу. Не ясно, как вследствие действия термического эффекта происходит искажение поперечной формы ручья калибра в плане (от его вершины до края бочки). Это усложняет компенсацию величины термического эффекта вдоль конуса деформации при проектировании параметров поперечного сечения формы ручья калибра в каждой контрольной точке калибровки. Если величина термического эффекта изменяется вдоль поперечного сечения ручья калибра, то из-за этого, возможно в меньшей мере, изменяется ширина калибра, а в большей — его глубина (или наоборот). Данный факт требует дополнительного экспериментального исследования с выведением соответствующего закона.

В связи с вышесказанным цель настоящей работы состояла в исследовании закона изменения формы поперечного сечения ручья калибра станов ХПТ под действием термического эффекта.

Методика эксперимента

Для изучения характера изменения формы поперечного сечения ручья калибра под действием термического эффекта были проведены исследования степени стирания параллельных меток, нанесенных в виде царапин достаточной глубины на бочке ручья калибра. Для эксперимента выбраны калибры станов ХПТ-55 и ХПТ-75, которые использовались для прокатки труб из титановых сплавов по рядовым маршрутам (табл. 2). Поперечное сечение ручья было круглым с выпусками по радиусу (см. табл. 1, п. 1). Прокатка осуществлялась безэмульсионным способом.

Калибры исследовались до установки на прокатный стан и после крайнего износа ручья, не позволяющего получить на нем трубу с требуемой точностью поперечного сечения.

Таблица 2. Параметры ручьев исследуемых калибров с круглым поперечным сечением (см. табл. 1, п. 1)

Table 2. Groove parameters of circular dies under study (see Table 1, Section 1)

Тип стана	$D_{\text{заг}}$, мм	$D_{\text{тр}}$, мм	Длина* прокатанных труб до полного износа ручья, м	Кол-во пар
ХПТ-55	38	28	2200—2680	2
	42	26		2
	54	43		2
	50,8	33		1
	50,8	38,1		2
ХПТ-75	108	95	2000—2450	1
	102	89		1
	70	56		2
	87	38,1		3
Всего				16
* Для титановых сплавов норма — 1500 м.				

Результаты и их обсуждение

Эксперименты показали, что характер истирания рисок не зависит от маршрута прокатки: вблизи ручья метки стираются полностью, а вдали от него — частично. В большинстве исследуемых калибров, которые не получили максимального износа, метки на краю бочки остались практически

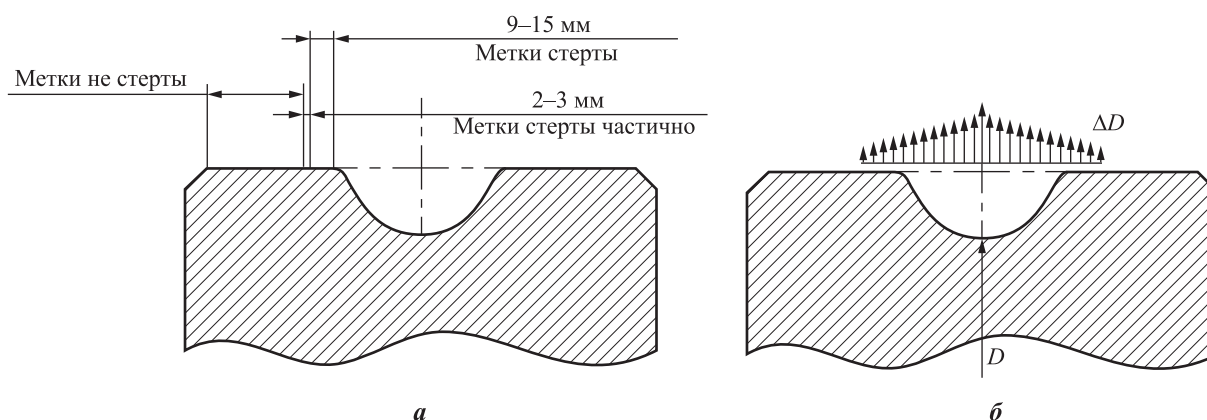


Рис. 2. Зоны стирания меток на калибре стана ХПТ (а) и возможное изменение диаметра валка в результате действия термического эффекта (б)

Fig. 2. Mark wiping zones on the cold-pilgering mill groove (а) and potential roll diameter variation under thermal effect (б)



Рис. 3. Латунная планка после замера зазора между валками на стане ХПТ-55 при прокатке трубы из стали 20 по маршруту 57×4,0–30×2,0 [22]

Fig. 3. Brass bar after roll gap measurement at the ХПТ-55 cold-pilgering mill during Steel 20 pipe rolling according to Schedule 57×4.0–30×2.0 [22]

в первоначальном виде (рис. 2). С обеих сторон ручья характер истирания меток на бочке был схож. В местах с максимальной деформацией в мгновенном очаге деформации (согласно калибровке), а значит, и наибольшей величиной тепловыделений в нем, метки истирались более интенсивно.

Таким образом, в результате термического эффекта и увеличения диаметра валка в зоне калибра и вблизи него наблюдалось защемление калибра (справа и слева от ручья), а на другой части бочки в то же время — достаточный зазор (0,15–0,22 мм).

Полученные данные подтверждают результаты работы [22], где исследован характер изменения величины зазора между калибрами вдоль конуса деформации. Замеры производились на бочках калибров латунных планок. При этом прокатка трубы из стали 20 в стане ХПТ-55 не прекращалась (маршрут 57×4,0–30×2,0, прямой ход клетки, подача — 6 мм). Форма поперечного сечения ручья была круглой с выпусками по радиусу (см. табл. 1,

п. 1). После прокатки планки приобретали характерную серпообразную форму (рис. 3).

Из представленных данных видно, что та часть планки, которая находилась ближе к ручью калибра, получила наибольшую величину обжатия и вытяжку, чем та, которая была у края калибра. Данный факт свидетельствует о наличии неравномерности зазора, из которого можно сделать выводы о характере термического искажения всего тела калибра (см. рис. 2, б).

Заключение

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод, что уменьшение глубины поперечного сечения ручья калибра под действием термических искажений (вызванных выделением тепла в ходе пластической деформации металла трубы в мгновенном очаге деформации стана ХПТ) прямо пропорционально расстоянию

рассматриваемого продольного сечения до края ручья калибра. Иными словами, те продольные сечения ручья калибра, которые лежат ближе к бочке калибра, получают меньшую величину термических искажений, чем сечения, лежащие у его гребня.

Таким образом, дальнейшие исследования в этом направлении дадут возможность более точно прогнозировать изменения формы поперечного сечения ручья калибра станов холодной пильгерной прокатки труб, что, в свою очередь, позволит компенсировать величину этих искажений точной корректировкой формы поперечного сечения ручья уже на стадии расчета калибровки и при шлифовке ручья калибра под готовый размер.

В подготовке материала статьи принимал участие канд. техн. наук А.С. Нагний.

Acknowledgments: A.S. Nagny, PhD in Engineering, participated in the preparation of article materials.

Литература/References

1. Balakin V.F., Pilipenko S.V. Influence of the parameters of the process of the cold pilger tube rolling on the Q-factor distribution along the cone of deformation. *ITAtube Journal*. 2016. No. 1. C. 94—97.
2. Abe H., Furugen M. Method of evaluating workability in cold pilgering. *J. Mater. Proces. Technol.* 2012. Vol. 212. No. 8. P. 1687—1693.
3. Пилипенко С.В. Исследование влияния параметров процесса ХПТ на распределение Q-фактора вдоль конуса деформации. В сб.: *Инновационные технологии в машиностроении*: Матер. науч.-техн. конф. с междунар. участием (г. Новополюцк, 19—20 апр. 2018 г.). Новополюцк: Полоцкий гос. ун-т, 2018. С. 247—251.
Pilipenko S.V. Investigation of the influence of the parameters of the HPT process on the distribution of the Q-factor along the deformation cone. In: *Innovative technologies in mechanical engineering*: Mater. Sci. Tech. Conf. (Novopolotsk, April 19—20, 2018). Novopolotsk: Polotsk State University, 2018. P. 247—251 (In Russ.).
4. Abe H., Furugen M. Method of evaluating workability in cold pilgering of zirconium alloy tube. *Mater. Trans.* 2010. Vol. 51. No. 7. P. 1200—1205.
5. Ажажа В.М., Вахрушева В.С., Дергач Т.А., Ковтун К.В., Малехин Д.Г., Петельгузов И.А., Соколенко В.И. Технология изготовления изделий из циркониевых сплавов для атомной энергетики и некоторые свойства сплавов циркония: Обзор. Харьков: ННЦ ХФТИ, 1999.
Azharzha V.M., Vakhrusheva V.S., Dergach T.A., Kovtun K.V., Malykhin D.G., Petel'guzov I.A., Sokolenko V.I. Manufacturing technology of products from zirconium alloys for atomic energy and some properties of zirconium alloys: Overview. Kharkiv: NSC KhIFT, 1999 (In Russ.).
6. Boriskin O.I., Larin S.N., Yamnikov A.S., Nuzhdin G.A., Blagoveshchenskiy D.I. Thin-walled steel billets production quality management. *J. Chem. Technol. Metal.* 2019. No. 6. P. 1305—1311.
7. Grigorenko V.U., Pilipenko S.V. Variation in wall thickness of cold-rolled pipe. *Steel Trans.* 2008. No. 9. P. 775—776.
8. Matveyev I.A., Yamnikov A.S., Yamnikova O.A. Accuracy of turning of the base surfaces of pipe-type thin-walled body parts. *J. Modern Technol.* 2016. No. 6. P. 56—62.
9. Yamnikov A.S., Boriskin O.I., Yamnikova O.A., Matveyev I.A. Technological inheritance of the properties of the initial billet in the accuracy parameters of extended axisymmetric parts. *Chernye Metally (Ferrous Metals)*. 2017. No. 12. P. 50—56.
10. Пилипенко С.В., Дудан А.В. Развитие метода расчета тепловыделений от пластической деформации при холодной пильгерной прокатке труб из титановых сплавов. *Вестник Полоцкого гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки*. 2018. No. 3. С. 13—17.
Pilipenko S.V., Dudan A.V. Development of a method for calculating heat from plastic deformation during cold pilger rolling of pipes from titanium alloys. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki*. 2018. No. 3. P. 13—17 (In Russ.).
11. Пилипенко С.В. Об учете величины термического эффекта при расчете параметров процесса ХПТ. В сб.: *Стратегия качества в промышленности и образовании*. Варна: ТУ-Варна, 2015. No. 1. С. 95—99.
Pilipenko S.V. On taking into account the magnitude of the thermal effect when calculating the parameters of the CPR process. In: *Quality strategy in industry and education*. Varna: TU-Varna, 2015. No. 1. P. 95—99 (In Russ.).
12. Григоренко В.У., Пилипенко С.В., Головченко А.П. Развитие метода розрахунку параметрів процесу холодної пильгерної прокатки труб і калібровки інструмента. Днепропетровск: Пороги, 2015.
Grigorenko V.V., Pilipenko S.V., Golovchenko A.P. Development of a method for calculating the parameters of the process of cold pilger tube rolling and tool calibration. Dnepropetrovsk: Porogi, 2015 (In Ukr.).
13. Пилипенко С.В., Григоренко В.У. Об изменении геометрических размеров поперечного сечения ручья калибров станов ХПТ под влиянием теплового расширения. *Системные технологии*. 2015. No. 5. С. 146—150.

- Pilipenko S.V., Grigorenko V.U.* On the change in the geometric dimensions of the cross-section of calibers of HPT mills under the influence of thermal expansion. *Systemnye Tekhnologii*. 2015. No. 5. P. 146—150 (In Russ.).
14. *Frolov I., Schaper M., Grydin O., Andreiev V., Tereschenko A.* Propagation of surface defects at cold pilger rolling of tubes and pipes. *Metallurgical and Mining Industry*. 2018. No. 9. P. 72—79.
 15. *Данченко В.Н., Фролов Я.В., Фролов В.Ф.* Холодная пильгерная прокатка труб. Днепропетровск: Пороги, 2005.
Danchenko V.N., Frolov Ya.V., Frolov V.F. Cold pilger tube rolling. Dnepropetrovsk: Porogi, 2005 (In Russ.).
 16. *Шевакин Ю.Ф.* Калибровка и усилия при холодной прокатке труб М: Metallurgizdat, 1963.
Shevakina Yu.F. Calibration and effort during cold rolling of pipes. Moscow: Metallurgizdat, 1963 (In Russ.).
 17. *Mazur V.* Lubrication in cold rolling and drawing of pipe. *Steel Trans.* 2018. No. 48. P. 663—671.
 18. *Петраков Ю.В., Пасичник В.А.* Система автоматизированной подготовки производства для изготовления оснастки станов холодной прокатки труб. В сб.: *Прогрессивные технологии и системы машиностроения*. Донецк: ДонНТУ, 2007. No. 33. С. 189—200.
Petrakov Yu.V., Pasichnik V.A. Automated pre-production system for the manufacture of tooling for cold pipe rolling mills. In: *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya*. Donetsk: DonNTU, 2007. No. 33. P. 189—200 (In Russ.).
 19. *Петраков Ю.В., Паньків К.М.* Формирование геометрических моделей ручья калибров станов холодной прокатки труб. *Вестник Нац. техн. ун-та Украины «Киевский политехнический институт»*. Сер. Машиностроение. 2009. No. 57. С. 63—70.
Petrakov Yu.V., Pankiv K.M. The formation of geometric models of the stream of calibers of cold rolling mills. In: *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta Ukrainy «Kievskii politekhnicheskii institut»*. Seriya Mashinostroenie. 2009. No. 57. P. 63—70 (In Russ.).
 20. *Курмачев Ю.Ф.* Профиль холостой зоны калибра станов холодной прокатки труб. *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2016. No. 4. С. 61—65.
Kurmachev Yu.F. The profile of the non-working zone of the caliber of cold pipe rolling mills. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*. 2016. No. 4. P. 61—65 (In Russ.).
 21. *Krishna Aditya Y.V.* Complexity of pilgering in nuclear applications. *J. Eng. Res. Appl.* 2014. Vol. 4. No. 11. P. 41—46.
 22. *Григоренко В.У., Нагний А.С.* Экспериментальное исследование деформации при холодной пильгерной прокатке труб. *Системные технологии*. 2007. No. 2. С. 41—43.
Grigorenko V.U., Nagny A.S. An experimental study of deformation during cold pilger tube rolling. *Systemnye Tekhnologii*. 2007. No. 2. P. 41—43 (In Russ.).