

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ НА ИЗМЕНЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ Q -ФАКТОРА ВДОЛЬ КОНУСА ДЕФОРМАЦИИ

© 2019 г. С.В. Пилипенко

Полоцкий государственный университет (ПГУ), Респ. Беларусь

Статья поступила в редакцию 26.11.18 г., доработана 25.01.19 г., подписана в печать 29.01.19 г.

Приведены результаты исследования влияния технологических факторов процесса холодной прокатки труб на изменение распределения Q -фактора вдоль конуса деформации. Величина Q -фактора (т.е. отношения действительной деформации по толщине стенки к действительной деформации по среднему диаметру трубы) и характер его распределения вдоль конуса деформации являются контролируемыми показателями при прокатке труб из титановых и циркониевых сплавов определенного сортамента. От Q -фактора зависит, как будут ориентироваться зерна металла – радиально или тангенциально. Желательно, чтобы Q -фактор колебался относительно определенного его значения с небольшой амплитудой вдоль всего конуса деформации. Определено, что выбор метода расчета распределения толщины стенки трубы вдоль конуса деформации играет существенную роль в распределении Q -фактора вдоль конуса деформации. Подтверждены преимущества применения оправок с криволинейной образующей профиля рабочей поверхности. Выясненные в статье зависимости могут использоваться при расчетах маршрутов прокатки и калибровок инструмента станов холодной прокатки труб.

Ключевые слова: холодная пильгерная валковая прокатка труб, технологические факторы, Q -фактор.

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

Для цитирования: Пилипенко С.В. Анализ влияния технологических факторов процесса холодной прокатки труб на изменение распределения Q -фактора вдоль конуса деформации. *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 2019. No. 3. С. 30–35. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-3-30-35.

Pilipenko S.V.

Analysis of the influence of cold pipe rolling technological factors on the change in Q -factor distribution along the deformation cone

The paper provides the results of studying the effect of technological factors of the cold pipe rolling process on the changing of Q -factor distribution along the deformation cone. The Q -factor value, which is the relationship between actual deformation on the wall thickness and actual deformation on the pipe mean diameter, and the pattern of its distribution along the deformation cone are controlled values when rolling pipes from titanium and zirconium alloys of a certain range. The Q -factor defines whether metal grains will be oriented radially or tangentially. It is desirable that Q -factor fluctuate around its definite value with low amplitude along the entire deformation cone. It is determined that the method used to calculate the pipe wall thickness distribution along the deformation cone has a significant effect on the change in the Q -factor distribution along the deformation cone. The advantages of using mandrels with a curvilinear generatrix of the working surface profile are confirmed. Dependences ascertained in the article can be used to calculate the schedules of rolling and calibration of cold pilgering mill tools.

Keywords: cold pilger rolling of pipes, technological factors, Q -factor.

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

Citation: Pilipenko S.V. Analysis of the influence of cold pipe rolling technological factors on the change in Q -factor distribution along the deformation cone. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2019. No. 3. P. 30–35 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-3-30-35.

Введение

Анизотропия текстуры металла труб из титановых и циркониевых сплавов оказывает большое влияние на надежность их работы [1–4]. Учитывая

то, что данный вид трубопрокатной продукции широко используется в атомной (оболочки ТВЭЛ из циркониевых труб [5] и пр.) и авиакосмической

(титановые трубы для гидросистем самолетов и пр.) отраслях, то требования к обеспечению наличия определенного типа текстуры являются одними из самых высоких, и любые исследования в этом направлении являются актуальными [3–7].

Анализ исследований

Холодной пильгерной валковой прокаткой труб производят прецизионные трубы с повышенными требованиями к чистоте наружной и внутренней поверхностей, точности их геометрических размеров, микро- и макроструктуре, механическим свойствам их материала и пр. [8–11]. Одним из параметров режима деформации, оказывающих значительное влияние на механические свойства и текстуру металла труб, является Q -фактор (отношение действительной деформации по толщине стенки к действительной деформации по средней величине диаметра трубы) [1–4]:

$$Q = \frac{\ln(S_{i-1}/S_i)}{\ln[(D_{i-1} - S_{i-1})/(D_i - S_i)]}, \quad (1)$$

где S_{i-1} , S_i — толщина стенки трубы соответственно до и после деформации в мгновенном очаге деформации (МОД); D_{i-1} , D_i — диаметр трубы соответственно до и после деформации в МОД.

При высоких значениях Q -фактора зерна металла трубы после деформации и последующей термообработки будут ориентироваться радиально, при низких его значениях — тангенциально (рис. 1) [3–7].

Трубы с радиальной текстурой металла имеют более благоприятное сочетание прочности и пластичности, отмечаются повышенной усталостной прочностью и пр. [2–4].

Необходимым является достижение стабильного по величине распределения Q -фактора вдоль конуса деформации без значительного падения

его уровня в зоне предотделки. При этом значения Q -фактора не должны быть очень высокими, так как слишком большое количество зерен будет иметь радиальное ориентирование и трубы не пройдут испытания на механические характеристики.

На характер распределения Q -фактора вдоль конуса деформации влияет множество параметров процесса холодной прокатки труб (ХПТ) [1–4]: тип используемой оправки; ее конусность; начальная конусность и степень крутизны рабочего профиля оправки (при применении оправки с криволинейной образующей рабочего профиля); заложенный в распределении диаметров калибра и диаметров оправки режим деформации по толщине стенки; величина и характер колебаний толщины стенки трубы-заготовки и пр.

В работах [1, 4] определено, что наиболее оптимальными являются калибровки с использованием оправки с криволинейной образующей формы рабочей поверхности. Начальная конусность оправки (конусность перед ее пережимом) должна быть минимально возможной. При исследовании влияния степени крутизны изменения профиля оправки выявлено преимущество оправок с более высокой степенью крутизны. Толщина стенки заготовки должна колебаться ближе к максимальным значениям допуска на точность передельных труб. При расчете калибровок необходимо учитывать тот факт, что при настройке стана на нужную толщину стенки в калибровку должна быть заложена возможность изменения положения оправки именно движением против прямого хода клетки (это важно учитывать и при назначении допусков на геометрические параметры рабочего инструмента стана ХПТ).

Поскольку в формулу определения Q -фактора входят величины обжатий по среднему диаметру трубы и по толщине стенки, то все факторы, на-

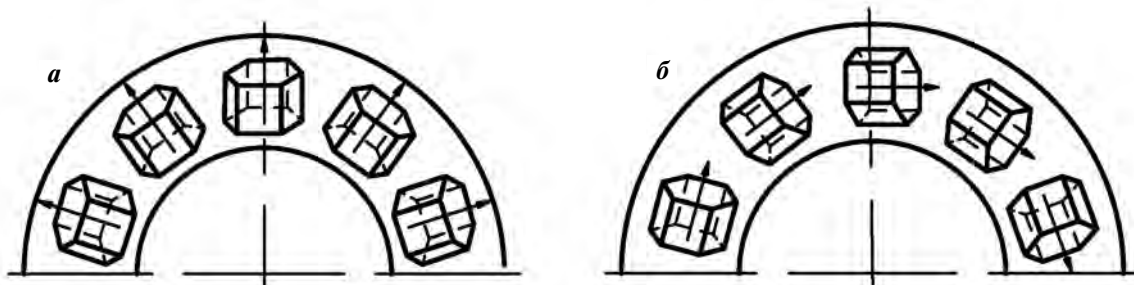


Рис. 1. Влияние распределения значений Q -фактора на текстуру металла труб

a — высокое значение Q -фактора, радиальная структура; *б* — низкое значение Q -фактора, тангенциальная структура [3–6]

прямую влияющие на эти показатели (даже температурные искажения геометрических параметров рабочего инструмента), играют большую роль. Важным является то, в какой степени каждый из факторов процесса ХПТ влияет на величину и характер распределения Q -фактора и в какой мере этим процессом можно управлять.

Целью статьи является определение влияния метода расчета величины толщины стенки в контрольных сечениях на изменение величины Q -фактора вдоль конуса деформации.

Результаты и их обсуждение

Для расчета толщины стенки в контрольных сечениях конуса деформации станом ХПТ разработан целый ряд методик, использующих те или иные зависимости [12–20]. Для определения характера влияния метода расчета толщины стенки на распределение величины Q -фактора вдоль конуса деформации из множества зависимостей выбраны три (все они проверены автором в практике расчета калибровок для прокатки труб из титановых и циркониевых сплавов).

Первая — кривая Безье второго порядка [19–21]. Для расчета толщины стенки в контрольных сечениях используется зависимость [22, 23]

$$S_i = S_{\text{ред}} - \frac{\Delta S_{\Sigma} a_0 (1 - k_i)^2 + 2C \Delta S_{\Sigma} a_1 (1 - k_i) k_i}{a_0 (1 - k_i)^2 + 2a_1 (1 - k_i) k_i + a_2 k_i^2}, \quad (2)$$

где $\Delta S_{\Sigma} = (S_{\text{ред}} - S_{\text{тр}})$ — абсолютное обжатие по толщине стенки за проход; $S_{\text{ред}}$, $S_{\text{тр}}$ — толщина стенки соответственно в зоне редуцирования и готовой трубы; $k_i = x_i / x_{3.обж}$ — относительная координата сечения зоны обжатия стенки; x_i — координата i -го сечения (от конца зоны обжатия стенки); $x_{3.обж}$ — длина зоны обжатия стенки; a_0 , a_1 , a_2 — управляющие коэффициенты (0,1–1,0); C — коэффициент крутизны профиля развертки значений толщины стенки вдоль зоны обжатия (0,5–1,0).

Второй способ — калибровка с экспоненциальным законом изменения частных деформаций (по Ю.Ф. Шевакину) [16, 17]:

$$S_i = \frac{S_{\text{ред}}}{\frac{\mu_{\Sigma} - 1}{1 - e^n} \left(1 - e^{-n \frac{x_i}{x_{3.обж}}} \right)}, \quad (3)$$

где $\mu_{\Sigma} = S_3 / S_{\text{тр}}$ — общий коэффициент вытяжки по толщине стенки; S_3 и $S_{\text{тр}}$ — толщина стенки трубы-заготовки и готовой трубы соответственно;

$S_{\text{ред}}$ — толщина стенки трубы в конце зоны редуцирования конуса деформации; $x_{3.обж}$ — длина зоны обжатия стенки; $n = 0,64$.

Третий способ — калибровка со степенной зависимостью изменения частных деформаций [17, 18]:

$$S_i = S_{\text{тр}} + (S_{\text{ред}} - S_{\text{тр}}) (x_i / x_{3.обж})^z, \quad (4)$$

где z — коэффициент крутизны профиля развертки значений толщины стенки вдоль зоны обжатия (1,75–3,5).

Диаметр оправки для всех случаев рассчитывался по методике КПО (калибровка пропорциональных обжатий) [17, 18]:

$$d_i = d_{\text{пер}} + (d_{\text{ц}} - d_{\text{пер}} - \alpha_{\min} l_0) (x_{\text{опр.}i} / l_{\text{опр}})^n + \alpha_{\min} x_{\text{опр.}i}, \quad (5)$$

где $d_{\text{ц}}$, $d_{\text{пер}}$ — диаметры оправки соответственно в цилиндрической части и в пережиме; l_0 — длина рабочего конуса; $\alpha_{\min}$ — начальная конусность ручья и оправки (0,005–0,03); $x_{\text{опр.}i}$ — текущая координата рабочей зоны оправки (от пережима); $l_{\text{опр}}$ — общая длина рабочей зоны оправки (пережим–цилиндр); n — коэффициент крутизны профиля оправки, изменяющийся в пределах 2,5–4,0.

Для исследования была выбрана калибровка инструмента стана КРВ-25, которая использовалась для изготовления рабочего инструмента при прокатке титановых труб из сплава Gr-2 по маршруту 18×1,9–12,75×1,31. При расчете значений диаметров оправки в контрольных сечениях зоны деформации применяли методику КПО (оправка с криволинейной образующей: $n = 2$, $\alpha_{\min} = 0,005$), при расчете толщины стенки — формулу (2). На рис. 2 показан график распределения значений ди-

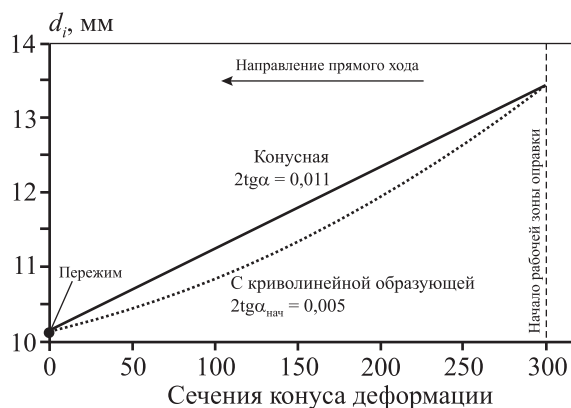


Рис. 2. Распределение значений диаметра оправки стана КРВ-25 вдоль рабочей зоны (сплав Gr-2, маршрут 18×1,9–12,75×1,31)

аметра оправки вдоль рабочей зоны (в сравнении с возможной в этом случае конусной оправкой).

Для анализа того, как влияет метод расчета толщины стенки на распределение Q -фактора вдоль конуса деформации, были также рассчитаны калибровки инструмента с использованием, при определении распределения толщины стенки, формул (3) и (4). После расчета калибровок и всех деформационных характеристик были построены графики распределения Q -фактора вдоль зоны обжатия конуса деформации. Были рассмотрены случаи применения как конусной оправки, так и оправки с криволинейной образующей (распределение величины толщины стенки вдоль конуса при этом не изменялось, рис. 3).

На рис. 4 показаны графики распределения Q -фактора при использовании оправки с криволинейной образующей. Видно, что расчет по формуле (3) (по Ю.Ф. Шевакину) дает линейное распре-

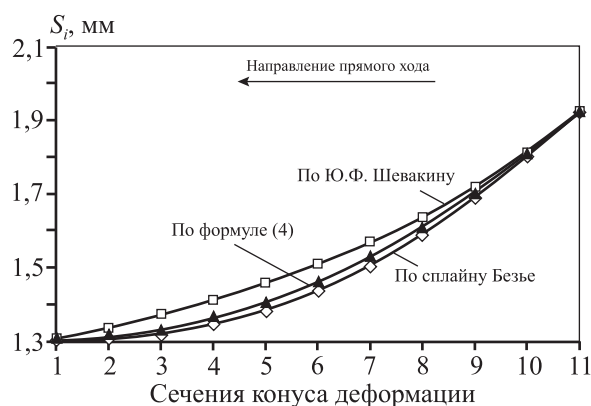


Рис. 3. Распределение значений толщины стенки вдоль зоны обжатия стана КРВ-25 (сплав Gr-2, маршрут 18×1,9–12,75×1,31)

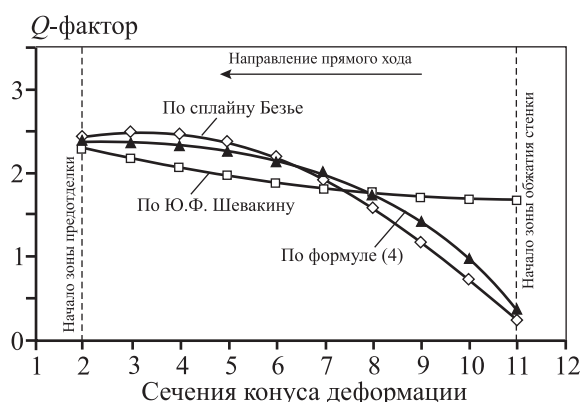


Рис. 4. Графики распределения Q -фактора при использовании оправки с криволинейной образующей (стан КРВ-25, сплав Gr-2, маршрут 18×1,9–12,75×1,31)

деление Q -фактора с небольшим подъемом значений вдоль прямого хода клетки (от 1,69 до 2,31). В случае применения формул (2) и (4) значения Q -фактора в начале конуса деформации лежат значительно ниже отметки 1,69 (0,26 и 0,39 соответственно), однако затем наблюдается значительное повышение этого показателя по кривым 2-го порядка. В итоге при расчете по формуле (4) в начале зоны предотделки достигается значение Q -фактора, равное 2,44, при использовании сплайн-линии Безье — 2,88. Таким образом, наибольшее значение Q -фактора дает расчет по формуле (2), при этом отмечается постоянный рост его значений вдоль зоны обжатия, причем ни одна из формул не выдала слишком большой величины Q -фактора, что может быть чревато наведением на материал труб брака по механическим характеристикам [3–7].

На рис. 5 представлены графики распределения Q -фактора при использовании конусной оправки. В этом случае при расчете по формуле (3) снова наблюдается линейное распределение Q -фактора, но с более интенсивным подъемом значений вдоль прямого хода клетки (от 1,027 до 3,077). Зависимости по формулам (2) и (3) так же имеют характер резкого подъема, но по кривым 2-го порядка. Наибольшие значения Q -фактора составляют 3,22 — по сплайну Безье и 3,167 — по формуле (4).

В итоге, применяя конусную оправку в проходе с небольшой конусностью перепада внутреннего диаметра трубы за проход, мы получаем большие значения Q -фактора, чем в случае оправки с криволинейной образующей (при прочих равных факторах). Однако, как известно, слишком большие значения Q -фактора могут привести к браку

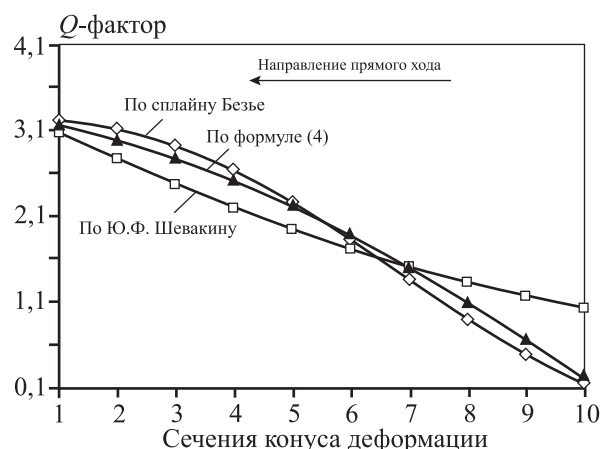


Рис. 5. Графики распределения Q -фактора при использовании конусной оправки ($2\text{tg}\alpha = 0,011$, стан КРВ-25, сплав Gr-2, маршрут 18×1,9–12,75×1,31)

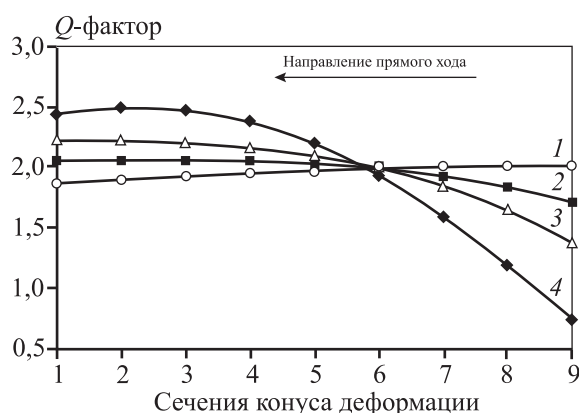


Рис. 6. Графики распределения Q -фактора при использовании конусной оправки и распределении толщины стенки вдоль конуса деформации по сплайн-линии Безье ($2\text{tg}\alpha = 0,011$, стан КРВ-25, сплав Gr-2, маршрут $18 \times 1,9 - 12,75 \times 1,31$)

1–4 — линии распределения Q -фактора при разных возможных значениях коэффициентов a_0 , a_1 , a_2 и C

труб (см. выше). Выбрав конусную оправку, мы не имеем такой возможности в регулировке режима деформации, как с оправкой с криволинейной образующей. При использовании конусной оправки все изменения режима распределения значений Q -фактора выполняются управляющими распределением толщины стенки вдоль рабочего конуса коэффициентами. Тут преимущество явно на стороне сплайн-линии Безье — изменяя величины коэффициентов a_0 , a_1 , a_2 и C , можно получить значительную гамму кривых различного характера распределения величины Q -фактора вдоль конуса деформации (см. рис. 6).

Как видно из рис. 6, возможность распределения Q -фактора по сплайну Безье при разных возможных значениях коэффициентов a_0 , a_1 , a_2 и C ограничивается только само собой получающимся равенством площади криволинейной трапеции между горизонтальной осью и вновь полученной линией распределения. Это равенство определяется параметрами обжатия по толщине стенки и диаметру, задаваемыми распределением режимов деформации по проходам технологического маршрута, и требует дальнейшего исследования.

Заключение

Результаты анализа литературных источников свидетельствуют, что величина и характер распределения Q -фактора вдоль конуса деформации станов ХПТ оказывают значительное влияние на

механические свойства и текстуру труб из титановых и циркониевых сплавов, причем трубы с радиальной текстурой металла имеют более благоприятное сочетание прочности и пластичности. Величина Q -фактора определяется параметрами процесса ХПТ, которые напрямую или опосредованно влияют на уровень обжатия по толщине стенки и величину редуцирования трубы в мгновенном очаге деформации стана ХПТ.

При оценке того, как сказывается метод расчета толщины стенки в контрольных сечениях на распределении значений Q -фактора вдоль конуса деформации, выяснено, что применение при расчете деформационных параметров процесса ХПТ сплайн-линий Безье позволяет в более полной мере использовать заложенные при расчете маршрута прокатки труб режимы обжатия труб из прохода в проход (с точки зрения благоприятного характера распределения Q -фактора вдоль конуса деформации в каждом отдельном проходе). Дополнительно подтверждены преимущества применения оправок с криволинейной образующей профиля рабочей поверхности.

Литература/References

1. Houghon A.C., Bowen A.W. Aspects of texture control with TI—3Al—2,5V seamless cold worked aircraft hydraulic tube. *Ironmaking Steelmaking*. 1995. No. 1. P. 68—70.
2. 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 J.* 2016. No. 1. P. 94—97.
3. Abe H., Furugen M. Method of evaluating workability in cold pilgering. *J. Mater. Process. Technol.* 2012. Vol. 212. No. 8. P. 1687—1693.
4. 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. Новополоцк, 19—20 апр. 2018 г). Новополоцк: 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.-techn. conf. with intern. participation (Novopolotsk, 19—20 April 2018). Novopolotsk: Polotsk. gos. univ., 2018. P. 247—251 (In Russ.).
5. 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.

6. Ажажа В.М., Вахрушева В.С., Дергач Т.А., Ковтун К.В., Малыхин 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.
Azhazha 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 (review). Khar'kov: NNTs KhFTI, 1999 (In Russ.).
7. Furugen M., Hayashi C. Application of the theory of plasticity of the cold pilgering of tubes. *J. Mech. Work. Technol.* 1984. No. 10. P. 273—286.
8. Frolov I., Schaper M., Grydin O., Andreiev V., Tereschenko A. Propagation of surface defects at cold pilger rolling of tubes and pipes. *Metall. Min. Ind.* 2018. No. 9. P. 72—79.
9. Schulze H.D., Togler G., Bodmann E. Propagation of circumferential and longitudinal cracks in straight pipes and pipe bends. *Nucl. Eng. Design.* 1980. No. 58. P. 19—31.
10. Krishna Aditya Y.V. Complexity of pilgering in nuclear applications. *J. Eng. Res. Appl.* 2014. Vol. 4. No. 11. P. 41—46.
11. Frolov I., Mamuzić I., Danchenko V.N. The heat conditions of the cold pilger rolling. *Metalurgija — Sisak then Zagreb.* 2006. No. 45 (3). P. 179—184.
12. Заводчиков С.Ю., Лосицкий А.Ф., Комрехов В.А., Комиссаров В.А., Сафонов В.Н. Калибровка инструмента для холодной прокатки труб: Пат. 2156174 (РФ). 2000.
Zavodchikov S.Yu., Lositskii A.F., Kotrekhov V.A., Komissarov V.A., Safonov V.N. Calibration tool for cold rolling tubes: Pat. 2156174 (RF). 2000 (In Russ.).
13. Коробочкин И.Ю. Некоторые вопросы калибровки инструмента станов холодной периодической прокатки труб. В сб.: *Проблемы и перспективы получения конкурентоспособной продукции в горно-металлургическом комплексе Украины*. Днепропетровск: НМетАУ, 2001. С. 515—528.
Korobochkin I.Yu. Some issues of tool calibration for cold rolling mills of pipes. In: *Problems and prospects of obtaining competitive products in the mining and metallurgical complex of Ukraine*. Dnepropetrovsk: NMetAU, 2001. P. 515—528 (In Russ.).
14. Тетерин П.К. Рациональная калибровка валков станов холодной прокатки труб. *Сталь*. 1953. No. 12. С. 45—49.
Teterin P.K. Rational calibration rolls of cold rolling mill. *Stal'*. 1953. No. 12. P. 45—49 (In Russ.).
15. Кекух С.Н. Разработка и внедрение рациональных режимов деформации и параметров калибровки для производства труб из нержавеющей стали и сплавов с улучшенным качеством поверхности на станах холодной прокатки: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Днепропетровск: НМетАУ, 1996.
Kekukh S.N. Development and implementation of rational deformation modes and calibration parameters for the production of pipes from stainless steels and alloys with improved surface quality in cold rolling mills: Abstract of the dissertation of PhD. Dnepropetrovsk: NMetAU, 1996. (In Russ.).
16. Шевакин Ю.Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб. М.: Metallurgizdat, 1963.
Shevakin Yu.F. Calibration and effort during cold rolling of pipes. Moscow: Metallurgizdat, 1963 (In Russ.).
17. 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.).
18. Azizoglu Y. Modeling of cold pilgering of tubes. Lulea University of Technology: Graphic Production, 2017.
19. Christeresson M. How to make a cubic Bézier spline. URL: <http://www.malinc.se/m/MakingABezierSpline.php> (accessed: 28.11.2018).
20. Chen D., Wang G.J. Developable Bézier function surface. *Prog. Natur. Sci.* 2002. No. 12 (5). P. 383—387.
21. Building cubic B-spline URL: <https://www.ibiblio.org/e-notes/Splines/B-spline.htm> (accessed: 29.11.2018).
22. Пилипенко С.В., Григоренко В.У., Маркевич И.В. Развитие метода расчета параметров процесса холодной прокатки труб на станах ХПТ с использованием линий Безье. *Теория и практика металлургии*. 2012. No. 3. С. 28—30.
Pilipenko S.V., Grigorenko V.U., Markevich I.V. The development of a method for calculating the parameters of the process of cold rolling of pipes on HPT mills using Bezier lines. *Teoriya i praktika metallurgii*. 2012. No. 3. P. 28—30 (In Russ.).
23. Пилипенко С.В., Григоренко В.У. Развитие метода расчета параметров процесса холодной прокатки труб на станах ХПТ и ХПТР с использованием линий Безье при разработке продольного профиля рабочего конуса деформации. *Системные технологии*. 2011. No. 4. С. 35—40.
Pilipenko S.V., Grigorenko V.U. Development of a method for calculating the parameters of the process of cold rolling of pipes on CPR and CPRR mills using Bezier lines in the development of a longitudinal profile of the working deformation cone. *Sistemnye tekhnologii*. 2011. No. 4. P. 35—40 (In Russ.).