

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ НЕПРЕРЫВНОЙ РАСКАТКИ ГИЛЬЗ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА

М.Ж.М. Аль-Джумаили¹, А.В. Выдрин^{1, 2}, Е.А. Шкуратов³

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

² ОАО «Российский научно-исследовательский институт

трубной промышленности» (ОАО «РосНИТИ»), г. Челябинск, Россия,

³ ООО «Научно-технический центр ТМК» (ООО «ТМК НТЦ»), г. Москва, Россия

Развитие трубопрокатного производства привело к широкому использованию непрерывных станов с удерживаемой оправкой и 3-валковыми калибрами для раскатки гильз. В свою очередь это потребовало уточнения ряда теоретических положений, связанных с изменением кинематики процесса. В рамках данного исследования на основе энергетической теории разработана методика определения энергосиловых параметров процесса. С целью выявления закономерностей влияния параметров процесса прокатки на угол охвата оправки и величину уширения раската проведено экспериментальное исследование. При составлении уравнения равновесия проекций сил на продольную ось определены величины среднего давления на контакте с рабочими валками и оправкой. Разработанные математические модели и алгоритм расчета энергосиловых параметров процесса раскатки гильзы в непрерывном стане позволили с достаточно высокой точностью определить усилия прокатки труб в непрерывном стане. Полученные зависимости могут быть использованы как в исследовательских целях, так и при расчете таблиц прокатки на трубопрокатных агрегатах с непрерывными раскатными станами.

Ключевые слова: непрерывная прокатка, трубы, экспериментальное исследование, кинематика, усилие прокатки, уширение, охват оправки.

Введение

В настоящее время в производстве бесшовных труб все более широкое применение в мире находят трубопрокатные агрегаты с раскатными станами нового поколения типа PQF и FQM [1–5]. Особенности этих станов является применение рабочих клетей с 3-валковыми калибрами и удерживаемой оправки [6–9]. Отмеченные особенности в первую очередь приводят к изменению кинематики процесса прокатки, что в свою очередь оказывает влияние на все остальные параметры технологического процесса. Соответственно, возникает необходимость уточнения теоретического описания процесса непрерывной продольной прокатки труб с учетом отмеченных изменений. Для анализа процесса непрерывной продольной прокатки труб, прежде всего, необходимо наличие математических моделей для определения энергосиловых параметров процесса и их связи со скоростным режимом прокатного стана. В настоящее время известен ряд методик расчета силовых параметров процесса раскатки гильз в непрерывных раскатных станах [10–12].

Основным недостатком этих методик является то, что они не учитывают влияние на энергосиловые параметры продольных усилий, возникающих в межклетевых промежутках. Учесть этот недостаток позволяет методика, основанная на рассмотрении условий равновесия проекций сил, действующих на очаг деформации в радиальном и продольном направлении, и условия баланса мощностей [13]. При этом условия равновесия проекций сил на продольную ось позволяет определить величину среднего давления на контакте с рабочими валками, а условия равновесия сил в радиальном направлении позволяют определить величину среднего давления на оправку. Условия баланса мощностей в свою очередь позволяют определить величину межклетевых продольных усилий [14].

Однако точность расчета технологических параметров при этом во многом зависит от корректного определения площадей контакта деформируемого металла с технологическим инструментом. Для определения контактных поверхностей, в свою очередь, необходимо рассчитывать уширение металла и

величину охвата металлом оправки. Аналитический вывод этих зависимостей в принципе возможен, но его трудоемкость будет существенно выше, чем получаемый уточняющий эффект. Поэтому для определения зависимостей для расчета уширения и угла охвата оправки металлом более предпочтительным является получение эмпирических зависимостей.

1. Экспериментальное оборудование и материалы

Экспериментальные исследования процесса раскатки полых заготовок на оправке осуществлялось в условиях ОАО «РосНИТИ» на лабораторном прокатном стане. Лабораторный прокатный стан представляет из себя раму сварной конструкции с установленными

на ней клетями с 3-валковыми калибрами и приводом.

Передача крутящего момента между валками осуществляется через конические шестерни. Общий вид установки и валкового узла представлены на рис. 1.

В качестве модельного материала, имитирующего прокатку нагретой стали, используется свинец марки С1, исключая фактор неравномерного нагрева. Под необходимый размер литые заготовки обтачивались и раскатывались на токарном станке. Экспериментальные исследования процесса раскатки на цилиндрической оправке проведены для гильз с разным отношением наружного диаметра к толщине стенки (рис. 2). Геометрические параметры заготовок представлены в табл. 1.

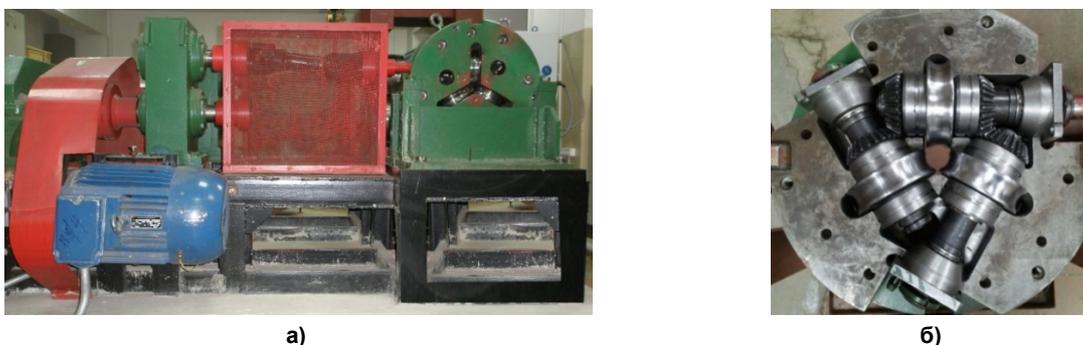


Рис. 1. Общий вид лабораторного прокатного стана (а) и валкового узла (б)



Рис. 2. Исходные полые заготовки (гильзы) с разным отношением D/S : а – 14,2; б – 12,1; в – 10,9

Геометрические параметры гильзы

Таблица 1

№ эксперимента	№ гильзы	Наружный диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Длина, мм	D/S
1	1	41,2	2,9	90	14,2
	2				
	3				
2	4	42,4	3,5	90	12,1
	5				
	6				
3	7	43,4	4,0	90	10,9
	8				
	9				

Обработка металлов давлением...

Зазор между оправкой и внутренним диаметром гильзы принят постоянной величиной 1,9 мм. Прокатка патрубков в 3-валковом калибре осуществлялась на цилиндрической оправке диаметром $31,6 \pm 0,1$ мм, с частотой вращения валков 5,0 об/мин. Эксперимент проведен с тройной кратностью повторения опытов. Параметры калибровки валков представлены на рис. 3 и в табл. 2.

Гильзы последовательно раскатывали в трехвалковом калибре в 2 прохода (с учетом кантовки раската на угол 60° после 1 прохода). Причем после каждого прохода осуществлялась обрезка некондиционных концевых участков и далее сканирование поперечного

сечения раската с целью последующей обработки в системе автоматизированного проектирования Компас-2D (рис. 4).

По результатам экспериментального исследования осуществлялась качественная и количественная оценка параметров формоизменения раската.

Основные контролируемые параметры:

– показатель уширения раската, определен в соответствии с формулой

$$B_{\%} = \left| \frac{B_{i-1} - B_i}{B_{i-1}} \right| \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где B_i, B_{i-1} – ширина раската в i -й и $i-1$ -й клетки;

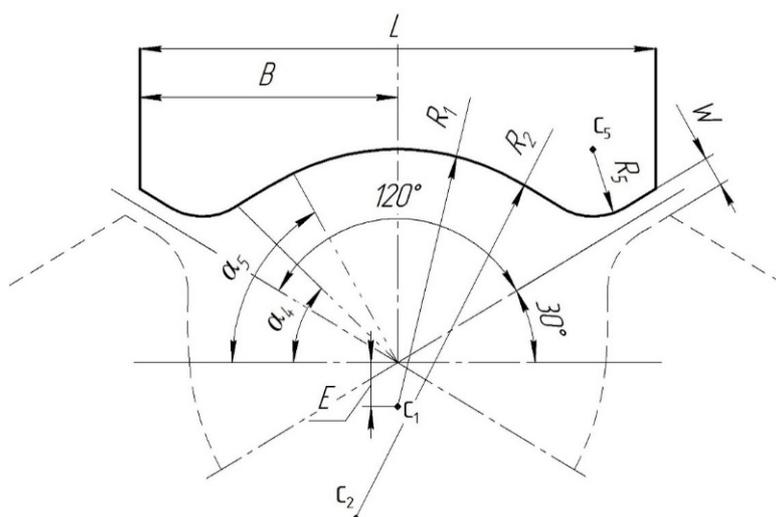


Рис. 3. К построению калибровки валков

Таблица 2

Геометрические параметры калибра, мм

Параметр	Величина
Координаты центра радиуса галтели R_5	16,7828
	16,2580
Координаты центра радиуса выпуска R_2	-18,3429
	-31,8912
Координаты центра радиуса обжимной зоны R_1	0,00
	-0,1205
Эксцентриситет	0,1205
Радиус галтели	4,5714
Радиус выпуска	55,0286
Радиус обжимной зоны	18,3429
Угол сопряжения	41,69
Угол выпуска	60,00
Межвалковый зазор	2,46
Половина ширины валка	20,00
Ширина валка	40,00
Диаметр калибра	36,44
Диаметр по дну валка	134,16
Номинальный диаметр валка	170,60



Рис. 4. Результаты сканирования поперечного сечения раската:
а – после первого прохода; б – после второго прохода

– угол охвата оправки металлом, определяемый в поперечном сечении тела раската после обрезки переднего и заднего некондиционных участков, и удаления заусенцев. Поскольку угол охвата со стороны разных валков, образующих калибр, может быть разным, для дальнейшей обработки результатов вычисляется среднее значение угла по формуле

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i}{3}, \quad (2)$$

где α_i – угол охвата оправки со стороны каждого валка.

2. Результаты экспериментального исследования

Результаты экспериментального исследования представлены на рис. 5.

В соответствии с данными, представленными на рис. 5а, можно сделать вывод, что основное влияние на величину угла охвата оказывает коэффициент вытяжки, а влияние

степени тонкостенности трубы выражено в меньшей степени. Кроме того, характер расположения экспериментальных точек на графике показывает, что зависимость угла охвата от коэффициента вытяжки близка к степенной.

Как видно из рис. 5б, степень тонкостенности труб также не оказывает существенное влияние на уширение. При этом зависимость уширения от коэффициента вытяжки имеет вид близкий к гиперболическому.

С учетом этого выполнена статистическая обработка полученных результатов, которая позволила получить уравнения регрессии для угла охвата и коэффициента уширения в виде:

– для угла охвата:

$$\bar{\alpha} = 1,004(\mu - 1)^{0,331}; \quad (3)$$

– для коэффициента уширения:

$$\frac{\Delta b}{b} = -0,223 + \frac{0,296}{\mu}. \quad (4)$$

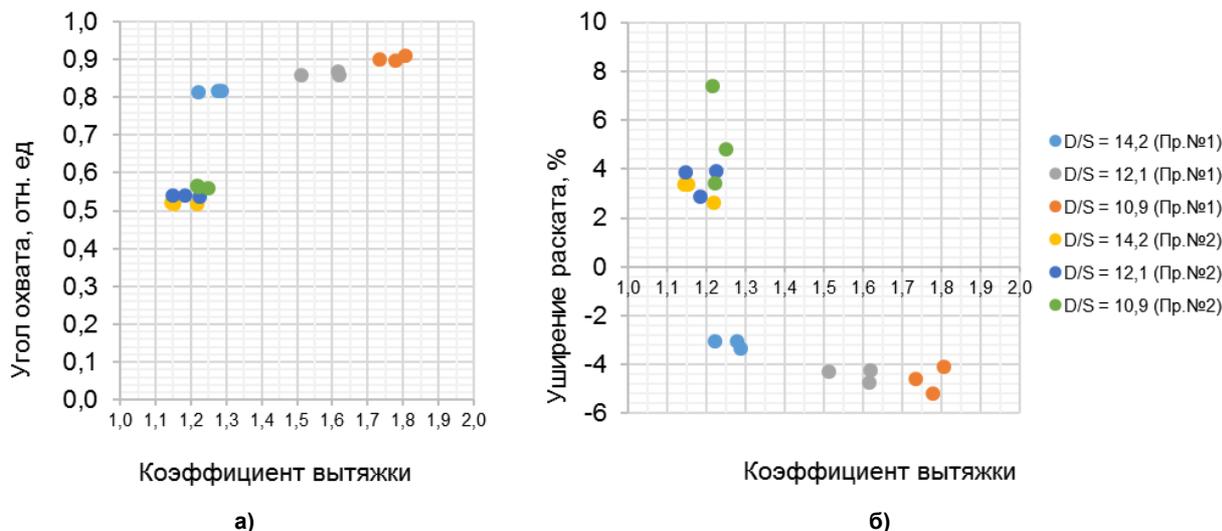


Рис. 5. Изменение угла охвата оправки (а) и величины уширения (б)
в зависимости от коэффициента вытяжки

Полученные зависимости, в свою очередь, позволили уточнить формулы для расчета площади контактной поверхности с оправкой и валками:

$$F_{\text{ко}} = l_{\text{од}} \left[\frac{\pi R_{\text{к}}}{90} \cdot 1,004(\mu - 1)^{0,331} \right]; \quad (5)$$

$$F_{\text{кв}} = \frac{1}{2} b \cdot l_{\text{од}} \left[1,77 + \frac{0,296}{\mu} \right]. \quad (6)$$

Полученные формулы (5) и (6) после подстановки в математическую модель расчета параметров процесса непрерывной раскатки труб на оправке позволяют уточнить получаемые результаты. Последовательность расчета при этом следующая.

1. Принимаем скорость выхода трубы из стана равной средней линейной скорости валков последней клетки.

2. Через общий коэффициент вытяжки определяется скорость входа трубы в 1-ю клетку.

3. Определяется переднее натяжение в 1-й клетки (с учетом того, что заднее натяжение равно нулю) как показано в работе [14].

4. Уточняется коэффициент вытяжки в первой клетки с учетом уширения и определяется скорость выхода металла из первой клетки.

5. Поскольку переднее натяжение на выходе из первой клетки является задним натяжением для второй клетки, по описанному выше алгоритму определяется переднее натяжение и скорость выхода металла для второй клетки.

6. Далее последовательность расчета по-

вторяется вплоть до последней клетки непрерывного раскатного стана.

7. Выполненные расчеты позволяют определить скоростной режим и режим натяжений в непрерывном раскатном стане при заданном скоростном режиме валков.

8. После этого определяется давление на валки и оправку в каждой из клеток стана с учетом разработанных формул, уточняющих методику [14].

9. Момент на валках определяется по известным зависимостям, например, представленным в работе [15]:

$$M = PR_{\text{в}} \sin \frac{\alpha_0}{2} \pm (T_0 - T_1) R_{\text{в}}, \quad (6)$$

где P – усилие, действующее на валок;

T_0 – заднее продольное усилие;

T_1 – переднее продольное усилие;

$R_{\text{в}}$ – радиус валка, соответствующий координате $z_{\text{вс}}$ (катающий радиус).

Для проверки адекватности разработанных формул, уточняющих методику расчета энергосиловых параметров процесса прокатки труб, проведено сопоставление расчетных данных с данными, полученными непосредственно на промышленном раскатном непрерывном стане. Результаты сопоставления представлены на рис. 6.

Как видно из рис. 6, уточненная методика позволяет получать более близкие к реальным значения усилия прокатки. Оставшаяся погрешность при этом для клеток 1, 2, 3 составляет примерно 0,55 %. Первоначально разработанная методика уточнена на 6 %.

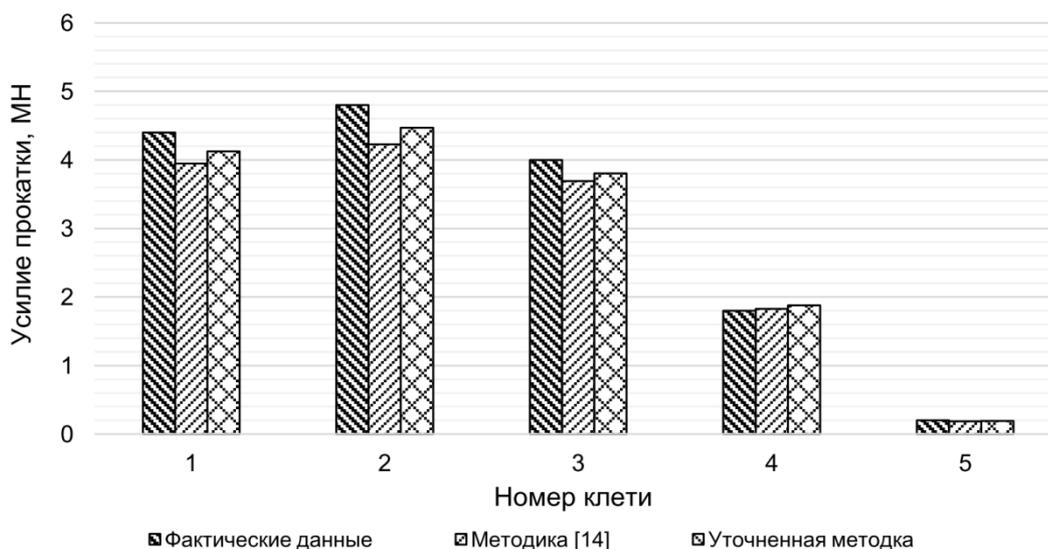


Рис. 6. Распределение усилий по клетям стана

Заключение

На основе энергостатического метода и эмпирических зависимостей разработана уточненная методика расчета энергосиловых параметров процесса непрерывной раскатки гильз в многоклетевом раскатном стане, позволяющая с высокой степенью точности определять усилие прокатки в чистовых клетях и с погрешностью менее 1 % определять усилие прокатки в черновых клетях стана.

Литература

1. Теоретические и практические проблемы процесса раскатки гильз на современном непрерывном стане / А.В. Выдрин, Д.О. Струин, И.Н. Черных и др. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2015. – С. 72–82.

2. Шкуратов, Е. А. Оптимизация процесса непрерывной раскатки гильз с целью повышения точности горячекатаных бесшовных труб: дис. ... канд. техн. наук / Е.А. Шкуратов. – Челябинск, 2017. – 166 с.

3. Струин, Д.О. Совершенствование технологии продольной прокатки труб на основе создания и использования новых научно обоснованных технических решений: дис. ... канд. техн. наук / Д.О. Струин. – Челябинск, 2017. – 170 с.

4. Development of Structure of 3-roll Mandrel Pipe Mills and Relevant Comparative Analysis / H. Ku, G. Xiao, Y. Chang, P. Zhang // *Steel Pipe*. – 2015. – Vol. 44, no. 3. – P. 59–62.

5. Optimization of process Equipment and production Practice of $\phi 460$ mm PQF Plant / X. Wang, W. Yang, F. Hu et al. // *Steel Pipe*. – 2014. – Vol. 43, no. 3. – P. 49–54.

6. Wu, J. Characteristics of Manufacturing Process and Equipment of $\phi 508$ mm PQF 3 Roll Mandrel Pipe Mill / J. Wu. // *Steel Pipe*. – 2013. – Vol. 42, no. 3. – P. 44–50.

7. Optimized Design and Application of Rolls of $\phi 258$ mm PQF Mandrel Mill / X. Li, Q. Bai, X. Zhou, X. Yin. // *Steel Pipe*. – 2012. – Vol. 41, no. 1. – P. 64–68.

8. Development of technology of PQF process for rolling Heavy-wall, Extra-sort tube / Sh. Sun, X. Guan, H. Ding, Sh. Ma. – *Steel Pipe*. – 2016. – Vol. 45, no. 4. – P. 42–45.

9. Fan, Q. Advanced technologies and equipment applied to $\phi 159$ FQM 3-roll mandrel mill plant / Q. Fan // *Sichuan Metallurgy*. – 2015. – Vol. 29, no. 1. – P. 19–22.

10. Потапов, И.Н. Теория трубного производства / И.Н. Потапов, А.П. Коликов, В.М. Друян. – М.: Металлургия, 1991. – 424 с.

11. Выдрин, А.В. Компьютерное моделирование скоростного режима непрерывной прокатки труб / А.В. Выдрин, В.В. Широков // *Сталь*. – 2011. – № 2. – С. 56–58.

12. Технология и оборудование трубного производства / В.Я. Осадчий, А.С. Вавилин, В.Г. Зимовец, А.П. Коликов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2007. – 560 с.

13. Выдрин, В.Н. Процесс непрерывной прокатки / В.Н. Выдрин, А.С. Федосиенко, В.И. Крайнов. – М.: Металлургия, 1970. – 456 с.

14. Выдрин, А.В. Алгоритм расчета энергосиловых параметров процесса раскатки гильзы в непрерывном стане / А.В. Выдрин, Аль-джумаили Мохаммед Жасим Мохаммед, Е.А. Шкуратов // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2019. – Т. 17, № 2. – С. 32–37.

15. Коликов, А.П. Теория обработки металлов давлением / А.П. Коликов, Б.А. Романцев. – М.: Издат. Дом МИСис, 2015. – 451 с.

Аль-Джумаили Мохаммед Жасим Мохаммед, аспирант кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; aljumailimohamad@gmail.com.

Выдрин Александр Владимирович, д-р техн. наук, чл.-корр. Российской академии естественных наук (РАЕН), заместитель генерального директора по научной работе, ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (ОАО «РосНИТИ»); профессор кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; vydrinav@rosniti.ru.

Шкуратов Евгений Александрович, канд. техн. наук, заведующий лабораторией цифровизации технологий, ООО «Научно-технический центр ТМК» (ООО «ТМК НТЦ»), г. Москва; ShkuratovEA@tmk-group.com.

Поступила в редакцию 10 января 2020 г.

INFLUENCE OF THE CONDITIONS OF THE CONTINUOUS CAPTURE OF THE SLEEVES ON THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE PROCESS

M.J.M. Al-Jumaili¹, *aljumailimohamad@gmail.com*,

A.V. Vydrin^{1,2}, *Chelyabinsk; vydrinav@rosniti.ru*,

E.A. Shkuratov³, *ShkuratovEA@tmk-group.com*

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

² JSC "Russian Research Institute for the Tube and Pipe Industries" (JSC "RosNITI"), Chelyabinsk, Russian Federation,

³ LLC "Scientific and Technical Center TMK" (LLC "TMK STC"), Moscow, Russian Federation

The development of pipe production has led to the widespread use of continuous mills with a holding mandrel and 3-roll passes for rolling sleeves. This required a refinement of a number of theoretical principles related to a change in the process kinematics. A methodology for determining the energy-power process parameters based on the energy theory has been developed. In order to identify influence patterns of the rolling process parameters on the angle of the mandrel coverage and the broadening magnitude of the roll conducted an experimental study. The average pressure values at the contact with the work rolls and the mandrel are determined by compiling the equation of equilibrium of the force projections on the longitudinal axis. The developed mathematical models and the algorithm for calculating the energy-power parameters of the rolling process of the sleeves in a continuous mill. This model made it possible to determine the efforts of rolling pipes in a continuous mill with sufficient accuracy. The obtained dependences can be used both for research purposes and for calculating the rolling tables on tube rolling units with continuous rolling mills.

Keywords: continuous rolling, pipes, experimental research, kinematics, rolling force, metal broadening, mandrel wrap angle.

References

1. Vydrin A.V., Struin D.O., Chernyh I.N., Shkuratov E.A., Bunjashin M.V. [Theoretical and practical problems of rolling process on modern liners continuous mill]. St. Petersburg, Polytechnic University Publ., 2015, pp. 72–82. (in Russ.)
2. Shkuratov E.A. *Optimizatsiya protsessa nepreryvnoy raskatki gil'z s tsel'yu povysheniya tochnosti goryachekatanykh besshovnykh trub: dis. kand. tekhn. nauk* [Optimization of continuous rolling shell casings with a view to improving the accuracy of hot-rolled seamless pipes. Cand. sci. diss.]. Chelyabinsk, 2017. 166 p.
3. Struin D.O. *Sovershenstvovaniye tekhnologii prodol'noy prokatki trub na osnove sozdaniya i ispol'zovaniya novykh nauchno obosnovannykh tekhnicheskikh resheniy: dis. kand. tekhn. nauk* [Improved technology based on pipe lengthwise-rolled sections for the creation and use of new science-based technical solutions. Cand. sci. diss.]. Chelyabinsk, 2017. 170 p.
4. Ku H., Xiao G., Chang Y., Zhang P. Development of Structure of 3-roll Mandrel Pipe Mills and Relevant Comparative Analysis. *Steel Pipe*, 2015, vol. 44, no. 3, pp. 59–62.
5. Wang X., Yang W., Hu F., Xia K., Bai C. Optimization of process Equipment and production Practice of $\varnothing 460$ mm PQF Plant. *Steel Pipe*, 2014, vol. 43, no. 3, pp. 49–54.
6. Wu J. Characteristics of the Manufacturing Process and Equipment of $\varnothing 508$ mm 3 roll Pipe Mandrel PQF Mill. *Steel Pipe*, 2013, vol. 42, no. 3, pp. 44–50.
7. Li X., Bai Q., Zhou X., Yin X. Optimized Design and Application of Rolls of $\varnothing 258$ mm Mandrel PQF Mill. *Steel Pipe*, 2012, vol. 41, no. 1, pp. 64–68.
8. Sun Sh., Guan X., Ding H., Ma Sh. Development of technology of process for PQF rolling Heavy-wall, extra sort-tube. *Steel Pipe*, 2016, vol. 45, no. 4, pp. 42–45.
9. Fan Q. Advanced technologies and equipment applied to $\varnothing 159$ FQM 3-roll mandrel mill plant. *Sichuan Metallurgy*, 2015, vol. 29, no. 1, pp. 19–22.

10. Potapov I.N., Kolikov A.P., Druyan V.M. *Teoriya trubnogo proizvodstva* [Theory tube production]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1991. 424 p.
11. Vydrin A.V., Shirokov V.V. [Computer modeling speed continuous rolling of pipes]. *Steel*, 2011, no. 2, pp. 56–58. (in Russ.)
12. Osadchiy V.J., Vavilin A.S., Zimovec V.G., Kolikov A.P. *Tekhnologiya i oborudovaniye trubnogo proizvodstva* [Pipe production technology and equipment]. Moscow, Internet Engineering Publ., 2007. 560 p.
13. Vydrin A.V., Fedosienko A.S., Krainov V.I. *Protsess nepreryvnoy prokatki* [Process of continuous rolling]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 456 p.
14. Vydrin A.V., Al-Jumaili M.J.M., Shkuratov E.A. [Algorithm for calculating the energy parameters of the process of rolling hollow billets on a continuous mill]. *Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2019, vol. 17, no. 2, pp. 32–37. (in Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2019-17-2-32-37
15. Kolikov A.P., Romantsev B.A. *Teoriya obrabotki metallov davleniyem* [Theory of metal forming]. Moscow, MISIS Publ., 2015. 451 p. (in Russ.)

Received 10 January 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Аль-Джумаили, М.Ж.М. Влияние условий непрерывной раскатки гильз на технологические параметры процесса / М.Ж.М. Аль-Джумаили., А.В. Выдрин, Е.А. Шкуратов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 60–67. DOI: 10.14529/met200107

FOR CITATION

Al-Jumaili M.J.M., Vydrin A.V., Shkuratov E.A. Influence of the Conditions of the Continuous Capture of the Sleeves on the Technological Parameters of the Process. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 60–67. (in Russ.) DOI: 10.14529/met200107