

УДК 621.774.353

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВИНТОВОЙ РАСКАТКИ ТРУБ В ЧЕТЫРЕХВАЛКОВОМ СТАНЕ

Романцев Б.А., д.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов давлением» (boralr@yandex.ru)
Харитонов Е.А., к.т.н. доцент кафедры «Обработка металлов давлением» (haritonov45@mail.ru)
Будников А.С., аспирант кафедры «Обработка металлов давлением» (fiar128@yandex.ru)
Ле Ван Чонг, студент кафедры «Обработка металлов давлением»
Чан Ба Хью, аспирант кафедры «Обработка металлов давлением» (tbh510@gmail.com)

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. Разработана и изготовлена, в том числе с помощью аддитивных технологий, модель четырехвалкового стана винтовой прокатки. Рабочие валки установлены: основные – по чашевидной, вспомогательные – по грибовидной схемам с углом раскатки $\pm 7^\circ$ при нерегулируемом угле подачи 15° . Основные и вспомогательные валки имеют длину бочки 70 мм. Диаметр основных валков в пережиме 50 мм, вспомогательных 36 мм. На выходном участке в сечении выхода трубы из валков их диаметры практически одинаковые и составляют 72 мм. Каждый из четырех валков приводится в движение индивидуальным приводом с мотор-редуктором мощностью 100 Вт и частотой вращения 60 об/мин по грибовидной схеме и 83 об/мин по чашевидной. Это позволяет минимизировать расхождение окружных скоростей по очагу деформации при разных диаметрах валков. На разработанной модели четырехвалкового стана проведена раскатка гильз из пластилина диаметром 25 мм с толщиной стенки 7,5; 5,5 и 3,5 мм. Соотношение диаметра к толщине стенки трубы составляло 3, 5 и 8. Раскатка труб осуществлялась на плавающих оправках диаметром 9, 13 и 17 мм. После прокатки проведены измерения диаметра и толщины стенки труб в пяти равноудаленных друг от друга поперечных сечениях. В каждом поперечном сечении диаметр измерялся в пяти, а толщина стенки в десяти точках. Конечно-элементным методом осуществлено моделирование процесса раскатки указанных труб в программе QForm. Оценка адекватности модели проводилась путем сравнения размеров труб и их точности после раскатки и по результатам компьютерного моделирования. При раскатке в четырехвалковом стане разностенность значительно уменьшается.

Ключевые слова: четырехвалковый раскатной стан, рабочие валки, пластилин, компьютерное моделирование, отношение диаметра к толщине стенки, модель, разностенность, точность труб.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-9-686-690

Макет четырехвалкового стана винтовой прокатки (рис. 1) состоит из станины закрытого типа 1 [1]. Рабочие валки, установленные по чашевидной схеме 2, условно обозначены как основные, а валки, установленные по грибовидной схеме 3 – вспомогательные. Угол подачи рабочих валков не регулируется и составляет

15° [2]. Основные и вспомогательные рабочие валки установлены с углом раскатки $\pm 7^\circ$ [3 – 4]. Совмещение чашевидной и грибовидной схем прокатки позволяет разместить привод валков на входной и выходной стороне стана. Основные и вспомогательные валки имеют одинаковую длину бочки 70 мм. Диаметр основных

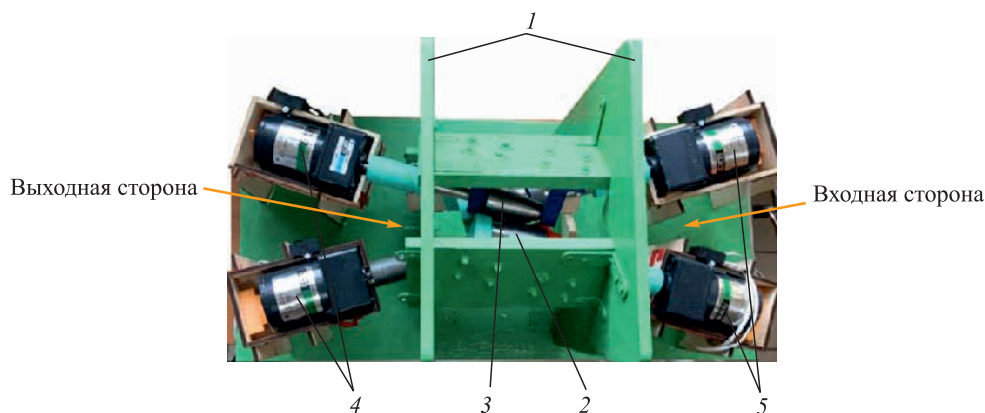


Рис. 1. Макет четырехвалкового стана винтовой раскатки

Fig. 1. Model of a four-high screw rolling mill

валков в пережиме 50 мм, а вспомогательных 36 мм. На выходном участке в сечении выхода трубы из валков их диаметры практически одинаковые и составляют 72 мм. Каждый из четырех валков приводится в движение индивидуальным приводом с мотор-редуктором мощностью 100 Вт и частотой вращения 60 об/мин для основных валков 4 и 83 об/мин для вспомогательных 5. Это позволяет минимизировать расхождение окружных скоростей по очагу деформации, характерное при совмещении чашевидной и грибовидной схем прокатки из-за различия в диаметрах валков [5 – 6].

На рис. 2 представлена схема очага деформации четырехвалкового стана с основными размерами валков и их калибровкой [7 – 8]. Данная калибровка предназначена для исследования процесса прошивки, поэтому углы наклона образующей валка к оси прокатки на входном и выходном участках составляют 2 и 3° соответственно. Диаметр калибра в пережиме 23 мм, наружный диаметр на входе 25 мм, что позволяет осуществлять прокатку с обжатием по диаметру 9 % [9 – 10]. Отсутствие гребня, который применяется при раскатке, не позволяет увеличить обжатие как по диаметру, так и по толщине стенки [2 – 3].

С целью исследования процесса раскатки труб в четырехвалковом стане винтовой прокатки осуществлена деформация гильз из пластилина диаметром 25 мм с толщиной стенки 7,5; 5,5 и 3,5 мм. В виду особенностей реологических свойств пластилина, таких как большая вязкость, склонность к налипанию на валки, низкая механическая прочность, выбраны пониженные значения соотношения диаметра к толщине стенки трубы (D_T/S_T), равные 3, 5 и 8. Раскатка труб осуществлялась на плавающих оправках диаметром 9, 13 и 17 мм [11 – 12]. Оправки изготавливались на 3D прин-

тере из пластика типа ABS. Длина исходных гильз составляла 60 мм. Обжатие по толщине стенки в процессе раскатки 0,5 мм.

Проведены измерения диаметра и толщины стенки в пяти равноудаленных друг от друга поперечных сечениях [13]. В каждом поперечном сечении диаметр измерялся в пяти, а толщина стенки в десяти точках (рис. 3).

Для эффективного анализа геометрических параметров труб, полученных в процессе четырехвалковой раскатки, с помощью программы QForm [13 – 17] осуществлено конечно-элементное [14, 16, 18] моделирование процесса раскатки труб тех же размеров в условиях, приближенных к условиям прокатки в четырехвалковом стане. Реологические свойства пластилина, необходимые для расчета формоизменения заготовки, задавались в соответствии с данными работы [15].

Для осуществления конечно-элементного моделирования, в программе SolidWorks разработана сборка, состоящая из валков, заготовки и оправки. С помощью редактора геометрии QShape на каждом объекте сборки генерировалась сетка конечных элементов. Моделирование осуществлялось без смазки с отсутствием проскальзывания на контактной поверхности заготовки и валка.

В табл. 1 представлены исходные геометрические параметры гильз $D_G \times S_G$ и полученных труб $D_T \times S_T$. Сравнение результатов геометрических параметров труб, полученных на четырехвалковом стане, с их компьютерным моделированием показало, что разностенность труб с соотношением диаметра к толщине стенки 3 и 5 составляет 4 – 4,1 %, а по результатам компьютерного моделирования 3,2 – 4,9 %. Расхождение результатов – не более 20 %. Наименьшее отклонение экспериментальных данных от компьютерных получены на трубах с $D_T/S_T = 8$, а наибольшее расхождение между экспериментальными и компьютерными данными наблюдается при оценке точности по диаметру, что объясняется большой погрешностью измерения диаметра на пластилиновых образцах.

Для исследования изменения разностенности в процессе раскатки на четырехвалковом стане осуществле-

Таблица 1

Геометрические размеры гильз и труб

Table 1. Geometric dimensions of sleeves and tubes

$D_G \times S_G$ мм	$D_T \times S_T$ мм	D_T/S_T	Отклонение по диаметру, %		Разностенность, %	
			эксперимент	моделирование	эксперимент	моделирование
25×7,5	23×7	3	0,6	0,1	4,1	4,9
25×5,5	23×5	5	0,7	0,2	4,0	3,2
25×3,5	23×3	8	0,7	0,7	10,2	10,2

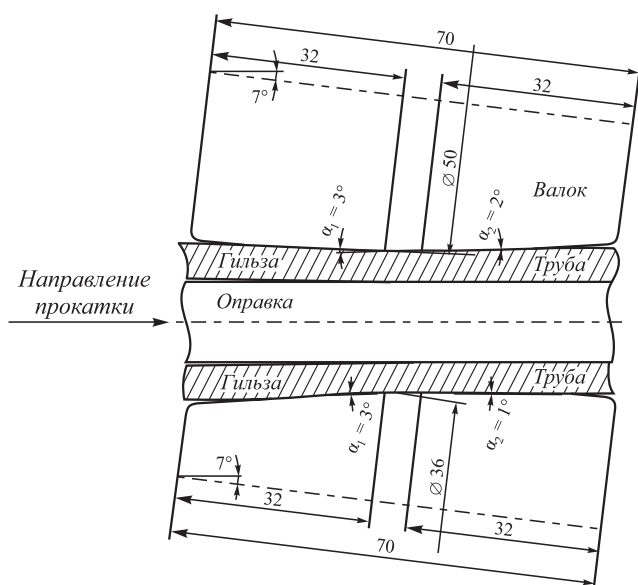


Рис. 2. Схема очага деформации

Fig. 2. Scheme of the deformation region

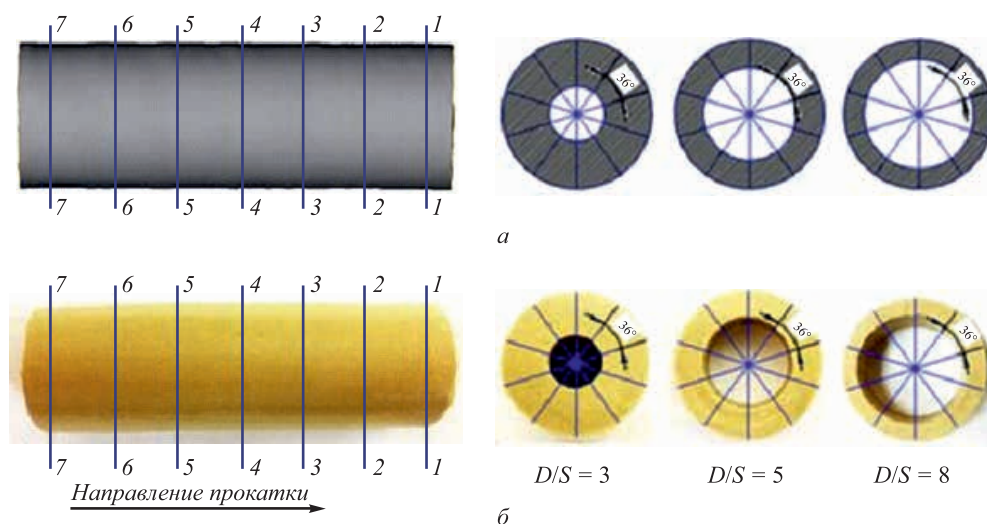


Рис. 3. Схема измерения образцов:
 а – моделирование в Qform; б – эксперимент

Fig. 3. Measurement scheme of the samples:
 a – Qform simulation; б – experiment

на деформация партии гильз с $D/S = 4$ диаметром 29 мм с минимальной и максимальной толщиной стенки 6 и 8 мм, что соответствует исходной разностенности 26 %. Раскатка осуществлялась на оправке диаметром 13 мм. В результате раскатки получена труба средним диаметром 23 мм и средней толщиной стенки 5 мм. Зазор между внутренней поверхностью гильзы и оправкой равен 1 мм. Результаты измерений представлены в табл. 2.

После раскатки разностенность центральной части трубы, соответствующая установившемуся процессу, уменьшилась до 4 %, в результате чего точность труб повысилась на 80 %. Существенное снижение разностенности объясняется увеличением числа циклов деформации по сравнению с раскаткой труб в двух- и трехвалковых станах [18 – 20]. Число циклов деформации можно определить по формуле

$$N = \frac{\Delta D}{S \operatorname{tg}(\varphi) \left(1 + \frac{1}{\mu_{\Sigma}}\right)},$$

где ΔD – суммарное обжатие по диаметру, мм; S – шаг подачи за $1/t$ – оборота заготовки, мм; t – число рабочих валков; φ – угол наклона образующей валка к оси прокатки; μ_{Σ} – суммарный коэффициент вытяжки.

Согласно данной формуле число циклов деформации для процесса раскатки данных образцов в четырехвалковом стане составляет 15. Если раскатку производить в трехвалковом стане, то число циклов уменьшается до 11, а в двухвалковом – до 7,5 [18]. Число циклов деформации в четырехвалковом стане по сравнению с двухвалковым увеличивается в два раза, а с трехвалковым – в 1,3 раза. Увеличение числа циклов деформации за счет добавления валков делает равномерным обжатие толщины стенки раската по его периметру, а так же способствует лучшей проработки толщины стенки раската, что приводит к существенному снижению разностенности.

Выводы. Проведен анализ раскатки образцов из пластилина и сравнение результатов геометрических параметров труб с D_T/S_T , равным 3; 5 и 8, полученных на четырехвалковом стане, с их компьютерным моделиро-

Таблица 2

Измерения толщины стенки и разностенности труб

Table 2. Measurements of wall thickness, mm and wall variation, % of pipes

Образец	Передний конец			Установившийся режим			Задний конец		
	макс., мм	мин, мм	разностенность, %	макс., мм	мин, мм	разностенность, %	макс., мм	мин, мм	разностенность, %
1	5,1	4,8	6,1	5,0	4,8	4,1	5,1	4,7	8,2
2	5,1	4,9	4,0	5,1	4,9	4,0	5,1	4,8	6,1
3	5,2	4,7	10,1	5,1	4,9	4,0	5,1	4,8	6,1

ванием. Разностенность труб с D_t/S_t , равным 3 и 5, полученных на стане, составляет 4,0–4,1 %, а с помощью компьютерного моделирования равна 3,2–4,9 %. Расхождение результатов составляет не более 20 %.

Исследование изменения разностенности в процессе четырехвалковой раскатки показало, что точность труб при раскатке увеличивается. В проведенном эксперименте разностенность труб уменьшилась с 26 % у гильз до 4 % у труб в установившемся режиме прокатки. В целом можно отметить, что процесс раскатки труб в четырехвалковом стане, благодаря особенностям геометрии очага деформации и формоизменению, благоприятно воздействует на конечные геометрические параметры получаемых труб.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Романцев Б.А., Гамин Ю.В., Гончарук А.В., Алещенко А.С. Инновационное оборудование для производства экономичных полых заготовок деталей машиностроения малого диаметра // *Металлург*. 2017. № 3. С. 53 – 57.
2. Никулин А.Н. Винтовая прокатка. Напряжения и деформации. – М.: *Металлургиздат*, 2015. – 380 с.
3. Пат. 2635685 РФ. Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Чан Ба Хюи // *Способ прошивки в стане винтовой прокатки*; заявл. 02.12.2016; опубл. 15.11.2017. Бюл. № 32.
4. Chiluveru S. Computational Modeling of Crack Initiation in Crossroll Piercing: PhD thesis. Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2007. – 89 p.
5. Bartnicki J., Pater Z. Numerical simulation of three-rolls cross-wedge rolling of hollowed shaft // *Journal of Materials Processing Technology*. May 2005. Vols. 164 – 165. P. 1154 – 1159.
6. Романенко В.П., Степанов П.П., Гончарук А.В. и др. Перспективная технология производства полых вагонных осей из поллой заготовки // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2016. № 2. С. 27 – 34.
7. Бретшнайдер Э., Мюллер Г., Фрикке Ю. Планетарный стан с коническими валками // *Черные металлы*. 1973. № 22. С. 29 – 35.
8. Man-sooJoun, Jangho Lee, Jae-min Cho etc. Quantitative study on Mannesmann effect in roll piercing of hollow shaft // *Procedia Engineering*. 2014. No. 81. P. 197 – 202.
9. Vaidyanathan P.V., Blazynski T.Z. Deformation and its rate as two concepts of design of tools for the secondary tube-piercing operation // *Proceedings of the 13th Int. Machine Tool Design and Research Conf.* – Palgrave, London, 1973. P. 509 – 514.
10. Jiang Y., Tang H. Method for improving transverse wall thickness precision of seamless steel tube based on tube rotation // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2015. Vol. 22. No. 10. P. 924 – 930.
11. Pater Z., Bartnicki J., Kazanecki J. 3d finite elements method (fem) analysis of basic process parameters in rotary piercing mill // *Metallurgija*. 2012. Vol. 51. No. 4. P. 501 – 504.
12. Buchely M., Maranon A., Silberschmidt V. Material model for modeling clay at high strain rates // *International Journal of Impact Engineering*. 2016. Vol. 90. P. 1 – 11.
13. Berazategui D.A., Cavaliere M.A., Montelatici L., Dvorkin E.N. On the modelling of complex 3D bulk metal forming processes via the pseudo-concentrations technique. Application to the simulation of the Mannesmann piercing process // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2006. Vol. 65. No. 7. P. 1113 – 1144.
14. Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Скрипаленко М.Н. и др. Компьютерное моделирование прошивки заготовок в четырехвалковом стане винтовой прошивки // *Металлург*. 2017. № 9. С. 19 – 24.
15. Ammerling W.-J., Surmund J. The KOCKS Rotation Mill (KRM): The Ideal Planetary Cross Rolling Process for Copper Tube Production. Germany presented 29.10.2007 at the “DANIELI ECT™ Forum” in Buttrio, Italy.
16. Fu-jie Wang, Yuan-hua Shuang, Jiab-hua Hu etc. Explorative study of tandem skew rolling process for producing seamless steel tubes // *Journal of Materials Processing Technology*. 2014. Vol. 214. No. 8. P. 1597 – 1604.
17. Романенко В.П., Золотарев А.А. Моделирование технологического процесса формовки заготовок для железнодорожного колеса методом конечных элементов // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2013. № 5. С. 63 – 66.
18. Романенко В.П., Фомин А.В., Никулин А.Н. Влияние предварительной деформации литой заготовки на служебные свойства колесной стали // *Металлург*. 2013. № 4. С. 63 – 68.
19. Akopyan T.K., Aleshchenko A.S., Belov N.A. Effect of radial-shear rolling on the formation of structure and mechanical properties of Al-Ni and Al-Ca aluminum-matrix composite alloys of eutectic type // *Physics of metals and metallography*. 2018. Vol. 119. No. 3. P. 241 – 250.
20. Gorbatyuk S.M. Screw-rolling mill design based on kinematic analysis // *Steel in Translation*. 2000. Vol. 30. No. 9. P. 52 – 55.

Поступила в редакцию 17 июля 2018 г.

После доработки 28 июля 2019 г.

Принята к публикации 1 августа 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 9, PP. 686–690.

SCREW ROLLING OF PIPES IN A FOUR-HIGH ROLLING MILL

*B.A. Romantsev, E.A. Kharitonov, A.S. Budnikov,
Le Van Chong, Chan Ba Khyui*

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS),
Moscow, Russia

Abstract. A model of four-high screw rolling mill was developed and manufactured with the help of additive technologies. The work rolls are installed: the main ones – by cup-shaped scheme and auxiliary – by mushroom scheme with an angle of rolling of ± 7 degrees, with an unregulated feed angle of 15 degrees. The main and auxiliary rolls have a barrel length of 70 mm. Diameter of the main rolls in pinching is 50 mm, of auxiliary rolls – 36 mm. At the exit in cross section of the tube outlet from the rolls, their diameters are almost the same and are

72 mm. Each of the four rolls is driven by an individual drive with a 100 W motor-reducer and a rotational speed of 60 rpm by a mushroom scheme and of 83 rpm by a cup-shaped one, which minimizes the divergence of peripheral speeds in the deformation zone at different roll diameters. On the developed model of four-high rolling mill, rolling of liners from plasticine with a diameter of 25 mm with a wall thickness of 7.5 was carried out; 5.5 and 3.5 mm, corresponding to the ratio of diameter to wall thickness 3; 5 and 8. Pipe rolling was carried out on floating mandrels with diameters of 9, 13 and 17 mm. After rolling, measurements of the diameter and wall thickness of the pipes were carried out in 5 cross sections that were equally spaced from each other. In each cross section, the diameter was measured at 5, and the wall thickness at 10 points. The finite element method has been used to simulate the process of rolling these pipes in the QForm program. As-

assessment of the model adequacy was carried out by comparing the size of pipes and their accuracy after rolling with the results of computer simulation. When rolling at a four-high rolling mill, the wall thickness is significantly reduced.

Keywords: four-roll rolling mill, work rolls, plasticine, computer simulation, diameter-to-wall thickness ratio, model, difference, pipe accuracy.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-9-686-690

REFERENCES

- Romantsev. B.A., Gamin. Y.V., Goncharuk A.V., Aleshchenko. A.S. Innovative equipment for producing cost-effective hollow billets for mechanical-engineering parts of small diameter. *Metallurgist*. 2017, vol. 61, no. 3-4, pp. 217–222.
- Nikulin A.N. *Vintovaya prokatka. Napryazheniya i deformatsii* [Screw rolling. Stresses and strains]. Moscow: Metallurgizdat, 2015, 380 p. (In Russ.).
- Romantsev B.A., Skripalenko M.M., Chan Ba Khyui. *Sposob proshivki v stane vintovoi prokatki* [The method of piercing in a screw rolling mill]. Patent RF no 2635685 MPK B21B 19/04. *Bulleten' izobretenii*. 2017, no 32. (In Russ.).
- Chiluveru S. *Computational Modeling of Crack Initiation in Cross-roll Piercing: PhD thesis*. Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2007, 89 p.
- Bartnicki J., Pater Z. Numerical simulation of three-rolls cross-wedge rolling of hollowed shaft. *Journal of Materials Processing Technology*. May 2005, vols. 164-165, pp. 1154–1159.
- Romanenko V.P., Stepanov P.P., Goncharuk A.V., Kriskovich S.M., Illarionov G.P., Nikulin A.N., Filippov G.A. Perspective technology of hollow car axle production from hollow billet. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*. 2016, no. 2, pp. 27–34. (In Russ.).
- Bretshnaider E., Myuller G., Frikke Yu. Planetary mill with conical rollers. *Chernye metally*. 1973, no. 22, pp. 29–35. (In Russ.).
- Man-soo Joun, Jangho Lee, Jae-min Cho, Seung-won Jeong, Ho-keun Moon. Quantitative study on Mannesmann effect in roll piercing of hollow shaft. *Procedia Engineering*. 2014, no. 81, pp. 197–202.
- Vaidyanathan P.V., Blazynski T. Z. Deformation and its rate as two concepts of design of tools for the secondary tube-piercing operation. In: *Proceedings of the 13th Int. Machine Tool Design and Research Conf. Palgrave, London, 1973*, pp. 509–514.
- Jiang Y., Tang H. Method for improving transverse wall thickness precision of seamless steel tube based on tube rotation. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2015, vol. 22, no. 10, pp. 924–930.
- Pater Z., Bartnicki J., Kazanecki J. 3d finite elements method (fem) analysis of basic process parameters in rotary piercing mill. *Metallurgija*. 2012, vol. 51, no. 4, pp. 501–504.
- Buchely M., Maranon A., Silberschmidt V. Material model for modeling clay at high strain rates. *International Journal of Impact Engineering*. 2016, vol. 90, pp. 1–11.
- Berazategui D.A., Cavaliere M.A., Montelatici L., Dvorkin E.N. On the modelling of complex 3D bulk metal forming processes via the pseudo-concentrations technique. Application to the simulation of the Mannesmann piercing process. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2006, vol. 65, no. 7, pp. 1113–1144.
- Romantsev B.A., Skripalenko M.M., Skripalenko M.N., Chan Ba Khyui, Gladkov Yu.A., Gartvig A.A. Computer simulation of piercing in a four-high screw rolling mill. *Metallurgist*. 2018, vol. 61, no. 9-10, pp. 729–735.
- Ammerling W.-J., Surmund J. *The KOCKS Rotation Mill (KRM): The Ideal Planetary Cross Rolling Process for Copper Tube Production*. Germany presented 29.10.2007 at the “DANIELI ECT™ Forum” in Buttrio, Italy.
- Fu-jie Wang, Yuan-hua Shuang, Jiab-hua Hu, Qing-hua Wang, Jing-chao Sun. Explorative study of tandem skew rolling process for producing seamless steel tubes. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014, vol. 214, no. 8, pp. 1597–1604.
- Romanenko V.P., Zolotarev A.A., Sizov D.V. Romanenko V.P., Zolotarev A.A. Screw piercing of large-diameter billet in a two-roller mill. *Steel in Translation*. 2013, vol. 43, no. 5, pp. 249–253.
- Romanenko V.P., Fomin A.V., Nikulin A.N. Effect of preliminary deformation of the cast semifinished product on the service properties of wheel steel. *Metallurgist*. 2013, vol. 57, no. 3-4, pp. 303–309.
- Akopyan T.K., Aleshchenko A.S., Belov N.A. effect of radial-shear rolling on the formation of structure and mechanical properties of Al-Ni and Al-Ca aluminum-matrix composite alloys of eutectic type. *Physics of metals and metallography*. 2018, vol. 119, no. 3, pp. 241–250.
- Gorbatyuk S.M. Screw-rolling mill design based on kinematic analysis. *Steel in Translation*. 2000, vol. 30, no. 9, pp. 52–55.

Information about the authors:

B.A. Romantsev, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metal Forming” (boralr@yandex.ru)

E.A. Kharitonov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metal Forming” (haritonov45@mail.ru)

A.S. Budnikov, Postgraduate of the Chair “Metal Forming” (fiar128@yandex.ru)

Le Van Chong, Student of the Chair “Metal Forming”

Chan Ba Khyui, Postgraduate of the Chair “Metal Forming” (tbh510@gmail.com)

Received July 17, 2018

Revised July 28, 2019

Accepted August 1, 2019