



Оригинальная статья

УДК 621.744.21

DOI 10.17073/0368-0797-2022-3-163-169



ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ДЛИННЫХ ОПРАВОК ТРЕХВАЛКОВОГО РАСКАТНОГО СТАНА

Н. М. Вавилкин, А. С. Будников

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

Аннотация. Разработана методика численного анализа теплового состояния длинных оправок трехвалкового раскатного стана с использованием современных программных средств компьютерного моделирования. Определены начальные и граничные условия, учитывающие особенности раскатки в трехвалковом стане винтовой прокатки на длинной оправке. Проведена качественная оценка теплового состояния длинной оправки, посредством визуализированного представления установлена его существенная неоднородность. Выявлено влияние температуры раскатки и диаметра длинной оправки. Оправки малого диаметра разогреваются до более высоких температур (577 °С) при существенно меньшем градиенте между осевой зоной и поверхностью. Увеличение диаметра оправки до 154 мм снижает температуру наружной поверхности до 530 °С и увеличивает температурный градиент в приповерхностных слоях до 18 °С/мм. Температура в приповерхностных слоях для оправки 154 мм на расстоянии 10 – 15 мм от поверхности снижается с 530 до 315 °С. Установлены особенности температурного поля в поперечном сечении с учетом теплового взаимодействия гильзы с оправкой в зоне контакта с горячим металлом и в зазорах между валками. Температура приповерхностных слоев в зоне контакта на 30 °С выше, чем в зазорах. Определены зависимости температуры характерных точек поперечного сечения от времени раскатки. Установлено, что в первые две секунды наблюдается интенсивный рост по параболическому, а далее по линейному закону. Температура центральных слоев радиусом 50 мм увеличивается с гораздо меньшей интенсивностью, примерно на 100 °С за весь период раскатки, тогда как за тоже время приповерхностные слои разогреваются на 300 – 400 °С.

Ключевые слова: винтовая прокатка, температура, длинная оправка, раскатка, бесшовная труба, трехвалковый стан, тепловое состояние, температурное поле

Для цитирования: Вавилкин Н.М., Будников А.С. Исследование теплового состояния длинных оправок трехвалкового раскатного стана // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 3. С. 163–169. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-3-163-169>

Original article

INVESTIGATION OF THERMAL STATE OF LONG MANDRELS ON THREE-ROLL ROLLING MILL

N. M. Vavilkin, A. S. Budnikov

National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

Abstract. A technique was developed for the numerical analysis of the thermal state of long mandrels of a three-roll rolling mill using modern computer simulation software. The initial and boundary conditions were determined taking into account the peculiarities of rolling in a three-roll screw rolling mill on a long mandrel. The authors carried out a qualitative assessment of the thermal state of a long mandrel by means of visualized representation and established its significant inhomogeneity. Influence of the rolling temperature and diameter of the long mandrel were revealed. Small diameter mandrels are heated to higher temperatures (577 °C) with a significantly lower gradient between the axial zone and the surface. An increase in the mandrel diameter to 154 mm lowers the temperature of the outer surface to 530 °C and increases temperature gradient in the near-surface layers up to 18 °C/mm. So the temperature in the near-surface layers for a mandrel of 154 mm at a distance of 10 – 15 mm from the surface decreases from 530 °C to 315 °C. Features of the temperature field in the cross section were established taking into account thermal interaction of the sleeve with the mandrel in the zone of contact with hot metal and in gaps between the rolls. Temperature of the near-surface layers in the contact zone is 30 °C higher than in the gaps. Dependences of temperature of the cross-section characteristic points on the rolling time were determined, it has been established that in the first two seconds there is an intense growth according to the parabolic, and then according to the linear laws. Temperature of the central layers with a radius of 50 mm increases with a much lower intensity, by about 100 °C during the entire period of rolling, while during the same time, the near-surface layers are heated by 300 – 400 °C.

Keywords: screw rolling, temperature, long mandrel, rolling, seamless pipe three-roll rolling mill, thermal state, temperature field

For citation: Vavilkin N.M., Budnikov A.S. Investigation of thermal state of long mandrels on three-roll rolling mill. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 3, pp. 163–169. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-3-163-169>

ВВЕДЕНИЕ

Трубопрокатные агрегаты (ТПА) с трехвалковым раскатным станом являются значимой составляющей трубопрокатного производства, обеспечивающего изготовление точных бесшовных труб из углеродистых и среднелегированных сталей.

Длинные оправки раскатных станом являются важнейшим элементом рабочего инструмента ТПА, в значительной мере влияющим на издержки производства и себестоимость бесшовных труб. Они подвергаются циклическому тепловому воздействию при нагреве в период взаимодействия с горячим прокатываемым металлом и охлаждении после раскатки и транспортировки [1 – 3]. При этом величина и характер распределения температуры в оправках, влияющей на механические свойства их материала и величину термических напряжений, в значительной степени зависят от технологических факторов и, в конечном счете, существенно влияют на износостойкость. Постоянное увеличение требований к качеству внутренней поверхности труб, необходимость расширения сортамента изделий обуславливают повышенное внимание к их тепловому состоянию и делают его исследование весьма актуальным [4, 5].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Многочисленные и систематические исследования теплового состояния раскатных оправок, результаты которых приведены в работах [6 – 9], свидетельствуют о высокой эффективности метода конечных разностей (МКР) [10]. Вторым из наиболее распространенных численных способов исследования термических задач является метод конечных элементов (МКЭ) [11 – 14], реализуемый большинством современных программ-

ных средств компьютерного моделирования, таких как QForm, DEFORM, SolidWorks, COSMOSWorks и другие, является весьма привлекательным для решения задач исследования теплового состояния инструмента [15 – 19]. В связи с этим, для оценки теплового состояния длинной цилиндрической оправки, работающей в плавающем режиме на ТПА с трехвалковым раскатным станом, был выбран МКЭ. Проверка адекватности и верификация модели методом конечных элементов для процесса раскатки труб при решении температурного поля оправки представлена в работе [6], а также [20], где приведены сравнения экспериментальных и расчетных данных.

Исследование теплового поля осуществлялось в четырех поперечных сечениях, расположенных на расстоянии 2, 4, 6 и 9 м от наконечника оправки, а так же на заднем конце и для трех точек на расстоянии 50, 60 и 70 мм по радиусу от оси оправки.

Для оценки теплового состояния длинных оправок, работающих в «плавающем» режиме, был выбран раскатный стан ТПА 160 АО «Первоуральский новотрубный завод», техническая характеристика которого и исходные данные представлены в таблице.

При исследовании теплового состояния длиной оправки в процессе горячей винтовой прокатки гильзы в черновую трубу учитываются следующие характерные особенности:

- деформация гильзы производится на трехвалковом стане винтовой прокатки с применением длинной цилиндрической оправки;
- оправка перемещается вдоль очага деформации со скоростью гильзы;
- в зоне очага деформации и за ней теплообмен осуществляется через слой окалины и смазки;
- контакт оправки с горячим металлом в очаге деформации осуществляется с учетом зазоров между

Условия моделирования

Simulation conditions

Техническая характеристика раскатного стана		Исходные данные	
Диаметр рабочих валков, мм	440, 360, 490	Материал оправки	35ХН2Ф
Количество оборотов, об/мин	75 – 300	Температура гильзы, °С	1100 – 1150
Угол подачи максимальный, град.	12	Машинное время раскатки, с	8
Угол раскатки, град.	–7	Скорость, м/с	4,6
Диаметр оправки, мм	42 – 154	Начальная температура оправки, °С	100
Длина оправки, м	9,5 – 10,5	–	10,5
Диаметр гильзы, мм	105 – 231	–	40; 140; 154
Толщина стенки гильзы, мм	20,5 – 35	–	20,5; 31; 35
Диаметр черновой трубы, мм	78 – 207	–	78,9; 198,3; 207
Толщина стенки черновой трубы, мм	18 – 25	–	18; 21; 25
–	–	Смазка	Графитовая
–	–	Коэффициент теплопередачи смазки [21]	3000 Вт/м ² К

внутренней поверхностью гильзы и наружной поверхностью оправки в межвалковом пространстве.

При решении задачи принимаются следующие допущения:

– внутренняя теплота пластической деформации $q_{\text{деф}}$ равномерно выделяется по всему объему с постоянной мощностью;

– теплота трения $q_{\text{тр}}$ выделяется непрерывно и постоянно по времени на середине слоя смазки контактных поверхностей с оправкой [22 – 23].

Таким образом можно сформулировать следующую задачу: два цилиндрических тела, оправка и гильза, с начальной температурой T_0 и $T_г$ в начальный момент времени вступают в тепловое взаимодействие. В процессе раскатки происходит обжатие гильзы по диаметру и толщине стенки. Теплообмен между телами на недеформирующемся участке (в зазоре между валками) осуществляется через воздушный зазор, а на деформирующимся – через слой окалины и смазки. После охлаждения оправки водой тепловое воздействие на нее циклически повторяется.

Математическое описание теплопроводности представляется дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности в виде:

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_{\text{вн}} + q_{\text{дт}} = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где k – коэффициент теплопроводности, Вт/(м²·К); T – температурное поле; $q_{\text{вн}}$ – мощность внешнего источника тепла, которая характеризуется тепловым взаимодействием между гильзой и оправкой через воздушный слой технологического зазора, Вт/м²; $q_{\text{дт}}$ – плотность теплового потока, обусловленного выделением теплоты при пластической деформации $q_{\text{деф}}$ и за счет работы сил

трения $q_{\text{тр}}$, Вт/м²; ρ – плотность, кг/м³; c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); τ – время цикла взаимодействия оправки с гильзой. В качестве объекта исследования использовалась длинная оправка диаметром 140 мм, как наиболее массово применяемая на ТПА рассматриваемого типа. Решение тепловой задачи осуществлялось в программе SolidWorks. Сначала была построена трехмерная модель длинной оправки, а далее устанавливались требуемые граничные и начальные условия задачи, которые были представлены ранее.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В начале была проведена качественная оценка по средствам визуализированного представления температурного поля оправки диаметром 140 мм, как наиболее массово применяемой на ТПА-160.

Качественная оценка температурного поля в поперечном сечении середины оправки (на расстоянии 6 м от наконечника) для процесса раскатки гильзы с исходной температурой 1150 и 1100 °С представлена на рис. 1. Выбранные температуры соответствуют большинству режимов раскатки труб из шарикоподшипниковой и углеродистой марок стали. Тепловые поля поперечных сечений оправки (см. рис. 1) отличаются только значениями температур в наиболее разогретых приповерхностных слоях. На глубине 5 – 6 мм от поверхности наблюдается максимальная температура, которая в зависимости от условия теплового взаимодействия с гильзой составляет 480 – 530 °С. На расстоянии 10 – 15 мм от поверхности оправки температура снижается до 315 °С, а на 20 – 25 мм и в середине составляет 210 – 100 °С соответственно. Температурный градиент по радиусу оправки в приповерхностных слоях на глубине 10 мм наибольший и равен 18 °С/мм, на

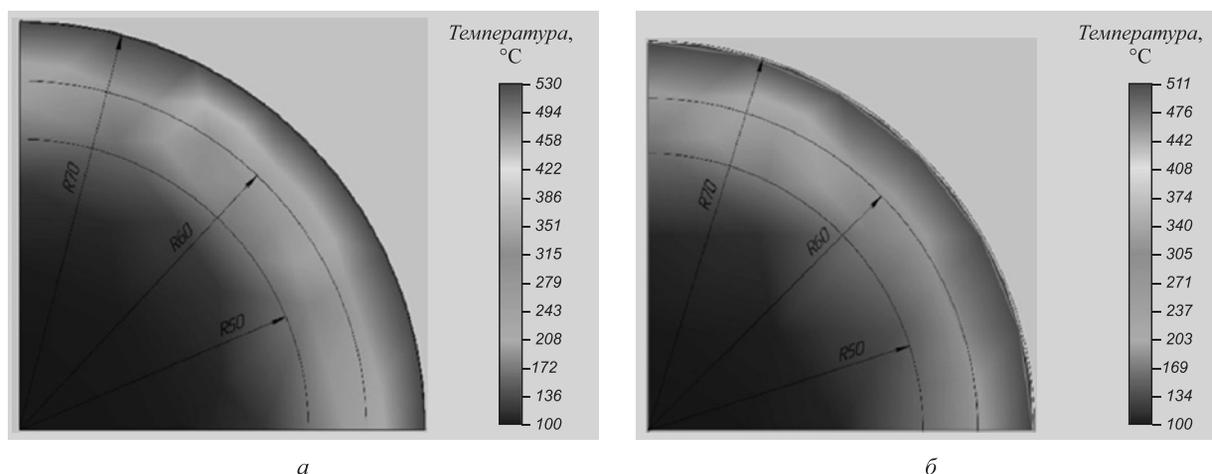


Рис. 1. Визуализированное представление температурного поля раскатной плавающей оправки при исходной температуре гильзы, °С: а – 1100; б – 1150

Fig. 1. Visualized representation of temperature field of rolled floating mandrel at sleeve initial temperature of: а – 1100 °С; б – 1150 °С

расстоянии от 10 до 20 мм от поверхности оправки – 15 °С/мм, а на 50 мм – 3,3 °С/мм. В осевой зоне радиусом 20 мм температура оправки практически не изменяется и составляет около 100 °С. Таким образом, наблюдается квазистационарное состояние температурного поля в осевой зоне. Если сравнить полученные результаты с данными, представленными в работе [22], где максимальная температура на поверхности оправки составляет около 700 °С с максимальным градиентом 40 °С/мм, то установленные значения температуры и градиента в данном случае существенно ниже и не создают значительных термических напряжений, которые могли бы привести к разрушению инструмента, что подтверждается и длительной практикой применения рассмотренных оправок.

Значительный интерес представляет оценка температурного поля в зависимости от условий теплового взаимодействия с гильзой в зоне контакта с разогретым металлом и в зазорах между рабочими валками. Наибольшая разность температур оправки в этих зонах наблюдается на глубине 5 – 6 мм от поверхности оправки и составляет около 30 °С, что следует из рис. 2. На расстоянии 10 – 15 мм от поверхности эта разность уменьшается до 10 °С, а на 20 мм и более становится незначительной. В трех остальных поперечных сечениях центральной части длинной оправки наблюдается подобная картина температурного поля. Разность между значениями температур зоны контакта с металлом и в зазоре между валками в поперечных сечениях незначительна (см. рис. 2), однако наблюдается тенденция к ее увеличению на концевых участках оправки на расстоянии 2 м от переднего и заднего торцов. Так, раз-

ность между температурами на заднем конце составляет 50 °С.

На рис. 3 представлены кривые разогрева оправки в процессе раскатки в течение 8 с. На первых двух секундах закономерность изменения температуры приповерхностных слоев имеет параболический характер, а далее – линейный. Температура центральных слоев радиусом 50 мм увеличивается с гораздо меньшей интенсивностью, примерно на 100 °С за весь период раскатки, тогда как за то же время приповерхностные слои разогреваются на 300 – 400 °С.

На рис. 4 представлены температурные поля для оправки диаметром 42 и 154 мм.

Как видно из рис. 4, а, температура наружных слоев оправки меньшего диаметра составляет 577 °С, а внутренних на расстоянии 10 – 15 мм от поверхности – 275 °С. За время раскатки центральная часть оправки успевает прогреться на 175 °С, это существенно снижает температурный градиент в поперечном сечении. Разность между максимальной температурой на поверхности оправки и минимальной в осевой зоне составляет 302 °С. Как видно, оправка диаметром 157 мм имеет температурное поле, подобное оправке диаметром 140 мм. На поверхности из-за воздействия внутренних непрогретых слоев ее температура чуть меньше и составляет 525 °С, а в осевой зоне остается практически постоянной. В целом, разность между максимальной и минимальной температурой составляет 425 °С.

Выводы

С применением МКЭ проведен численный анализ температурного поля длинных оправок, работающих в условиях ТПА с трехвалковым раскатным станом, которое является существенно неоднородным. Максимальное значение температуры для оправок малого

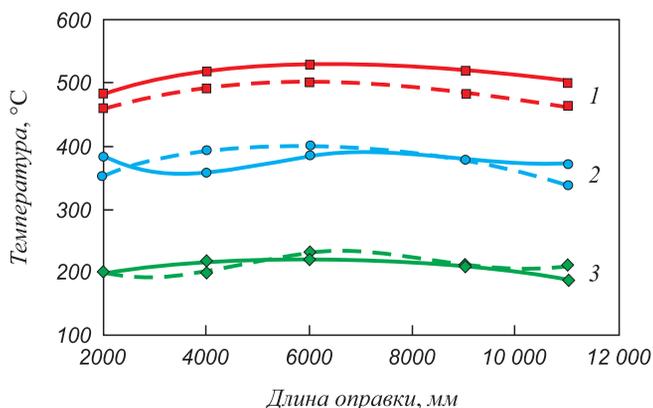


Рис. 2. Распределение температуры по длине оправки в характерных точках:

1 – на расстоянии 70 мм от оси оправки; 2 – на расстоянии 60 мм от оси оправки; 3 – на расстоянии 50 мм от оси оправки; — в зоне контакта с металлом; - - - в зазорах между валками

Fig. 2. Temperature distribution along the length of mandrel at characteristic points:

1 – at a distance of 70 mm from the mandrel axis; 2 – at a distance of 60 mm from the mandrel axis; 3 – at a distance of 50 mm from the mandrel axis; — in the zone of contact with metal; - - - in gaps between the rolls

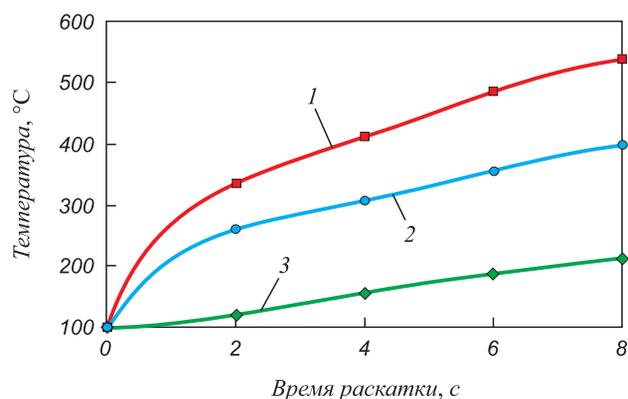


Рис. 3. Зависимость температуры оправки от времени раскатки:

1 – на расстоянии 70 мм от оси прокатки; 2 – на расстоянии 60 мм от оси прокатки; 3 – на расстоянии 50 мм от оси прокатки

Fig. 3. Dependence of mandrel temperature on rolling time: 1 – at a distance of 70 mm from the rolling axis; 2 – at a distance of 60 mm from the rolling axis; 3 – at a distance of 50 mm from the rolling axis

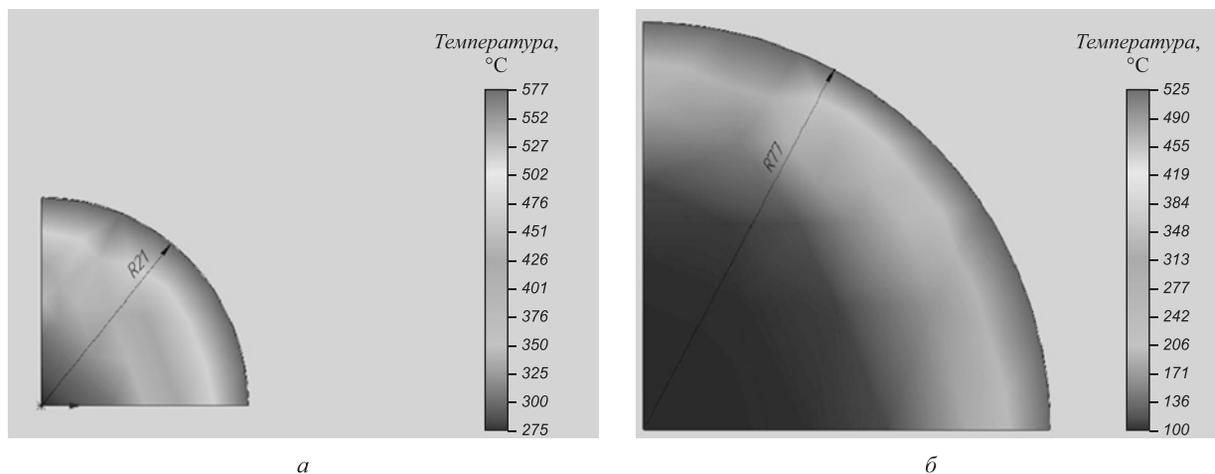


Рис. 4. Температурное поле в поперечном сечении оправок диаметром:
а – 42 мм; б – 154 мм

Fig. 4. Temperature field in cross-section of mandrels with a diameter of:
а – 42 mm; б – 154 mm

диаметра (577 °C) и большого (530 °C) наблюдается в приповерхностных слоях на глубине 5 – 6 мм. В осевой зоне оправок большого диаметра на расстоянии 10 мм от оси температурное поле имеет квазистационарный характер.

Установлена разность температур в зазорах между валками и в зоне контакта с разогретым металлом, кото-

рая в приповерхностных слоях составляет около 30 °C, а в осевой зоне незначительна.

Проведенная оценка закономерности разогрева оправки при раскатке показала параболический характер изменения температуры в течение двух секунд в приповерхностных слоях и линейный в остальное время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Вавилкин Н.М., Бухмиров В.В. Прошивная оправка. Москва: МИСиС, 2000. 128 с.
2. Goncharuk A.V., Fadeev V.A., Kadach M.V. Seamless pipes manufacturing process improvement using mandreling // *Solid State Phenomena*. 2021. Vol. 316. P. 402–407.
3. Орлов Д.А., Гамин Ю.В., Гончарук А.В., Романцев Б.А. Разработка и исследование процесса прошивки с использованием охлаждаемых направляющих линеек // *Металлург*. 2021. № 4. С. 26–32.
4. Mashekov S.A., Absadykov B.N., Masheкова A.S. Investigation of the kinematics of rolling ribs and pipes on a continuous radial-shifting mill of a new construction // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. 2018. Vol. 3. No. 430. P. 98–109.
5. Wang F.X., Du F.S., Yu H. The thermal-mechanical coupled fem analysis on 3-roll continual tube rolling PQF deformation process // *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 193. P. 1670–1674. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.1670>
6. Вавилкин Н.М., Грачев М.В. Особенности теплового состояния коротких оправок обкатного стана // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*. 2019. № 10. С. 12–16.
7. Yin Y.D., Li S.Z., Kang Y.L., Hu L.W. Analysis of metal flow and deformation features during continuous tube rolling process with mandrel mill // *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 193. P. 2376–2381. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.2376>
8. Гамин Ю.В., Романцев Б.А., Пашков А.Н., Патрин П.В., Быстров И.А., Фомин А.В., Кадач М.В. Получение полых полуфабрикатов изделий из медных сплавов электротехнического назначения в приповерхностных слоях составляет около 30 °C, а в осевой зоне незначительна.
9. Vavilkin N.M., Bukhmirov V.V. *Piercing Mandrel*. Moscow: MISiS, 2000, 128 p. (In Russ.).
10. Goncharuk A.V., Fadeev V.A., Kadach M.V. Seamless pipes manufacturing process improvement using mandreling. *Solid State Phenomena*. 2021, vol. 316, pp. 402–407.
11. Orlov D.A., Gamin Yu.V., Goncharuk A.V., Romantscev B.A. Development and investigation of piercing process using cooled guide shoes. *Metallurgist*. 2021, no. 65, pp. 389–399. <https://doi.org/10.1007/s11015-021-01168-z>
12. Mashekov S.A., Absadykov B.N., Masheкова A.S. Investigation of the kinematics of rolling ribs and pipes on a continuous radial-shifting mill of a new construction. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. 2018, vol. 3, no. 430, pp. 98–109.
13. Wang F.X., Du F.S., Yu H. The thermal-mechanical coupled fem analysis on 3-roll continual tube rolling PQF deformation process. *Advanced Materials Research*. 2011, vol. 193, pp. 1670–1674. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.1670>
14. Vavilkin N.M., Grachev M.V. Features of thermal state of rolling mill short mandrels. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniem*. 2019, no. 10, pp. 12–16. (In Russ.).
15. Yin Y.D., Li S.Z., Kang Y.L., Hu L.W. Analysis of metal flow and deformation features during continuous tube rolling process with mandrel mill. *Advanced Materials Research*. 2011, vol. 193, pp. 2376–2381. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.2376>
16. Gamin Yu.V., Romantsev B.A., Pashkov A.N., Patrin P.V., Bystrov I.A., Fomin A.V., Kadach M.V. Obtaining hollow semifinished products based on copper alloys for electrical purposes by means of

- чения способом винтовой прокатки // Известия вузов. Цветная металлургия. 2020. № 1. С. 27–38.
9. Гончарук А.В., Гамин Ю.В., Шарафаненко И.К., Алешченко А.С. Особенности прошивки заготовок в стане с направляющими дисками // Технология металлов. 2020. № 3. С. 57–63.
 10. Amirgaliyev Y., Wójcik W., Ospanova T., Jetpisov K. 3D modelling of distribution of temperature field in the rolling mill // Journal of Ecological Engineering. 2017. Vol. 18. No. 6. P. 1–7. <http://doi.org/10.12911/22998993/76895>
 11. Орлов Д.А., Гончарук А.В., Кобелев О.А., Комарницкая О.Г., Буниц Н.С. Анализ особенностей процесса прошивки труб на ТПА 70-270 с применением метода конечных элементов // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 10. С. 848–855. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-10-848-855>
 12. Akopyan T.K., Gamin Y.V., Galkin S.P., Prosviryakov A.S., Ale-shchenko A.S., Noshin M.A., Koshmin A.N., Fomin A.V. Radial-shear rolling of high-strength aluminum alloys: finite element simulation and analysis of microstructure and mechanical properties // Materials Science and Engineering: A. 2020. Vol. 786. Article 139424. <http://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139424>
 13. Cao Q., Hua L., Qian D. Finite element analysis of deformation characteristics in cold helical rolling of bearing steel-balls // Journal of Central South University. 2015. Vol. 22. No. 4. P. 1175–1183. <https://doi.org/10.1007/s11771-015-2631-6>
 14. Rout M., Pal S.K., Singh S.B. Finite element simulation of a cross rolling process // Journal of Manufacturing Processes. 2016. Vol. 24. Part 1. P. 283–292. <http://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.09.012>
 15. Deng G.Y., Zhu H.T., Tieu A.K., Zhu Q., Su L.H., Reid M., Wei P.T., Zhang L., Wang H., Zhang J., Li J.T., Ta T.D., Wu Q. Numerical evaluation of a high speed steel work roll during hot strip rolling process // Material Science Forum. 2017. Vol. 904. P. 55–60. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.904.55>
 16. Gao J.F., Li Q., Zhao W. Thermal stress analysis for local heating variable cross-section roll forming // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 683. P. 599–603. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.683.599>
 17. Domazet Ž., Lukša F. Influence of rolling temperature on fatigue life of calibrated rolls // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 742. P. 482–487. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.742.482>
 18. Кошмин А.Н., Зиновьев А.В., Часников А.Я., Грачев Г.Н. Исследование напряженно-деформированного состояния и трансформации микроструктуры медных электротехнических шин в очаге деформации при непрерывном прессовании // Известия вузов. Цветная металлургия. 2021. Т. 27. № 1. С. 36–48. <https://doi.org/10.3103/S1067821221020085>
 19. Fadeev V., Kondrushin A. Special aspects of determining parameters for continuous deformation of pipe billets for the specified pipes size range // Materials Today: Proceedings. 2020. Vol. 38. Part 4. P. 1322–1325. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.093>
 20. Калинина В.В., Иванченко А.Б. Моделирование теплового состояния оправки непрерывного раскатного стана трубопрокатного производства // Вестник магистратуры. 2014. № 4. С. 45–52.
 21. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи: Учебное пособие для вузов. 3-е издание, репринтное. Москва: ООО «ИД "БАСТЕТ"», 2010. 344 с.
 22. Вавилкин Н.М., Красиков А.В. Исследование и совершенствование режимов работы длинных оправок непрерывных трубных станов // Черные металлы. 2012. № 4. С. 13–17.
 23. Zeng B., Wu J., Zhang H. Numerical simulation of multi-pass rolling force and temperature field of plate steel during hot rolling // Journal of Shanghai Jiaotong University (Science). 2011. Vol. 16. No. 2. P. 141–144. <https://doi.org/10.1007/s12204-011-1109-4>
 9. Goncharuk A.V., Gamin Yu.V., Sharafanenko I.K., Aleshchenko A.S. Piercing of a billet in a mill with guide disks. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020, no. 13, pp. 1637–1642. <https://doi.org/10.1134/S003602952013011X>
 10. Amirgaliyev Y., Wójcik W., Ospanova T., Jetpisov K. 3D modelling of distribution of temperature field in the rolling mill. *Journal of Ecological Engineering*. 2017, vol. 18, no. 6, pp. 1–7. <http://doi.org/10.12911/22998993/76895>
 11. Orlov D.A., Goncharuk A.V., Kobleev O.A., Komarnitskaya O.G., Bunits N.S. Analysis of pipe piercing on PRP 70-270 with FEM modeling. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 10, pp. 848–855. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-10-848-855>
 12. Akopyan T.K., Gamin Y.V., Galkin S.P., Prosviryakov A.S., Ale-shchenko A.S., Noshin M.A., Koshmin A.N., Fomin A.V. Radial-shear rolling of high-strength aluminum alloys: finite element simulation and analysis of microstructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*. 2020, vol. 786, article 139424. <http://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139424>
 13. Cao Q., Hua L., Qian D. Finite element analysis of deformation characteristics in cold helical rolling of bearing steel-balls. *Journal of Central South University*. 2015, vol. 22, no. 4, pp. 1175–1183. <https://doi.org/10.1007/s11771-015-2631-6>
 14. Rout M., Pal S.K., Singh S.B. Finite element simulation of a cross rolling process. *Journal of Manufacturing Processes*. 2016, vol. 24, part 1, pp. 283–292. <http://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.09.012>
 15. Deng G.Y., Zhu H.T., Tieu A.K., Zhu Q., Su L.H., Reid M., Wei P.T., Zhang L., Wang H., Zhang J., Li J.T., Ta T.D., Wu Q. Numerical evaluation of a high speed steel work roll during hot strip rolling process. *Material Science Forum*. 2017, vol. 904, pp. 55–60. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.904.55>
 16. Gao J.F., Li Q., Zhao W. Thermal stress analysis for local heating variable cross-section roll forming. *Advanced Materials Research*. 2013, vol. 683, pp. 599–603. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.683.599>
 17. Domazet Ž., Lukša F. Influence of rolling temperature on fatigue life of calibrated rolls. *Advanced Materials Research*. 2013, vol. 742, pp. 482–487. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.742.482>
 18. Koshmin A.N., Zinoviev A.V., Chasnikov A.Ya., Grachev G.N. Investigation of the stress-strain state and microstructure transformation of electrotechnical copper buses in the deformation zone during continuous extrusion. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2021, vol. 62, no. 1, pp. 179–189. <https://doi.org/10.3103/S1067821221020085>
 19. Fadeev V., Kondrushin A. Special aspects of determining parameters for continuous deformation of pipe billets for the specified pipes size range. *Materials Today: Proceedings*. 2020, vol. 38, part 4, pp. 1322–1325. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.093>
 20. Kalinina V.V., Ivanchenko A.B. Simulation of thermal state of the mandrel of a continuous rolling mill for pipe rolling production. *Vestnik magistratury*. 2014, no. 4, pp. 45–52. (In Russ.).
 21. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. *Fundamentals of Heat Transfer. Manual for Universities*. Moscow: ООО “ИД “БАСТЕТ””, 2010, 344 p. (In Russ.).
 22. Vavilkin N.M., Krasikov A.B. Research and improvement of operating modes of long mandrels for continuous pipe mills. *Chernye metally*. 2012, no. 4, pp. 13–17. (In Russ.).
 23. Zeng B., Wu J., Zhang H. Numerical simulation of multi-pass rolling force and temperature field of plate steel during hot rolling. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*. 2011, vol. 16, no. 2, pp. 141–144. <https://doi.org/10.1007/s12204-011-1109-4>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Николай Михайлович Вавилкин, д.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов давлением», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

E-mail: vavilkin.nm@misis.ru

Алексей Сергеевич Будников, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

E-mail: budnikov.as@misis.ru

Nikolai M. Vavilkin, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair “Metal Forming”, National University of Science and Technology “MISIS”

E-mail: vavilkin.nm@misis.ru

Aleksei S. Budnikov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Metal Forming”, National University of Science and Technology “MISIS”

E-mail: budnikov.as@misis.ru

Поступила в редакцию 29.11.2021
После доработки 17.01.2022
Принята к публикации 24.02.2022

Received 29.11.2021
Revised 17.01.2022
Accepted 24.02.2022