

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ НА СТАНЕ FQM В ПРОГРАММЕ DEFORM-3D

**В.А. Топоров<sup>1</sup>, П.А. Ибрагимов<sup>2</sup>, О.А. Панасенко<sup>1</sup>,  
А.О. Халезов<sup>3</sup>, Д.Ш. Нухов<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> ПАО «Северский трубный завод», г. Полевской, Россия,

<sup>2</sup> ПАО «Трубная металлургическая компания», г. Москва, Россия,

<sup>3</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Современные непрерывные станы типа PQF (Premium quality finishing) и FQM (Fine Quality Mill) являются высокопроизводительными агрегатами, обеспечивающими высокое качество бесшовных труб различного сортамента. На данном оборудовании используется длинная удерживаемая оправка, которая имеет определенную скорость перемещения в очаге деформации. Для извлечения оправки в конце технологического цикла проката применяется трехклетевый стан-извлекатель. Ввиду скоростных и деформационных условий такого процесса возможно образование поверхностных дефектов на черновой трубе. В работе были поставлены и решены задачи численного моделирования процесса непрерывной прокатки труб на стане FQM. Решение задач позволило оценить характер влияния отклонения осей прокатки непрерывного стана и стана-извлекателя вследствие плохого удержания оправки габитами между клетями на качество черновой трубы. По результатам численного моделирования процесса непрерывной прокатки было установлено, что точность размеров труб снижается с ростом отклонения от оси прокатки. При величине отклонения в 3 мм отклонения по диаметру и толщине стенки от номинальных значений составляют  $(\Delta D/D_{ном}) \cdot 100 = 7,19 \%$ , а  $(\Delta S/S_{ном}) \cdot 100 = 19,45 \%$ , что выводит геометрические размеры труб за нормативные значения любого стандарта. Наблюдаются увеличение времени снятия оправки с трубы и пиковые нагрузки на оправку, что может говорить о нестабильном протекании процесса снятия оправки и ее сильном воздействии на внутреннюю поверхность трубы, приводящем к появлению видимого дефекта. Результаты решения задач позволили сформулировать технические рекомендации, направленные на снижение вероятности образования поверхностных дефектов при производстве труб на стане FQM.

*Ключевые слова: непрерывный стан FQM, производство бесшовных труб, компьютерное моделирование, поверхностные дефекты, критерий разрушения Кокрофта – Латама, численный эксперимент, формоизменение и вероятность разрушения.*

### Введение

Трубопрокатные агрегаты с непрерывным станом получили широкое применение при производстве бесшовных труб широкого сортамента [1, 2]. На предприятии ПАО «Северский трубный завод» (г. Полевской) в 2014 г. была запущена технологическая линия по производству бесшовных труб на ТПА с непрерывным станом FQM (Fine Quality Mill) фирмы Danieli. [3]. При производстве труб на стане FQM применяется технология непрерывной прокатки в трехвалковых клетях, которая, по сравнению с двухвалковой прокаткой, имеет целый ряд преимуществ [4]. Непрерывный стан FQM отличается высокими показателями производительности, уровня автоматизации, а также качества готовых

труб. На агрегате используется длинная удерживаемая оправка. Применение в линии механизма удержания оправки позволяет снизить скольжение металла в очаге деформации и получать тонкостенные трубы с высокой точностью размеров [5]. Но в то же время в процессе снятия трубы с оправки станом-извлекателем возможно образование поверхностных дефектов трубы, в том числе дефекта типа «риска» [5, 6]. В качестве причин возникновения дефектов следует отметить рассинхронизацию скоростей непрерывного стана FQM и стана-извлекателя [7], недостаточное время удержания оправки в крайней ее позиции (возврат оправки до снятия с нее трубной заготовки), а также отклонение осей прокатки непрерывного стана и стана-извле-

кателя вследствие плохого удержания оправки габитами (опорными роликами) между клетями [8–10].

### 1. Численное моделирование процесса непрерывной прокатки труб

В работе с целью изучения оценки влияния величины отклонения осей прокатки и оправки на характер деформации и опасности разрушения металла были поставлены и решены задачи компьютерного моделирования процесса непрерывной прокатки труб на стане FQM. Решение задач осуществлялось в программе конечно-элементного (КЭ) моделирования DEFORM-3D. В качестве базовой была разработана модель 5-клетевого 3-валкового стана с 3-клетевым 3-валковым станом-извлекателем (рис. 1). Калибровка валков и оправки, а также технологические режимы прокатки соответствовали техническим условиям (СТЗ 004-024-2019) [11], принятым для производства труб размером  $\varnothing 245 \times 8$  мм в цехе № 1 ПАО «Северский трубный завод».

При постановке задачи были введены следующие допущения:

- материал заготовки – сплошной, изотропный, несжимаемый, выбрана сталь марки AISI 1045 (аналог стали 45);
- длина заготовки – 2000 мм, расстояние между последней чистой клетью FQM и станом-извлекателем – 800 мм;
- на поверхностях контакта заготовки с инструментом задан закон трения по Зибелю, показатель трения на контактной поверхности с валками принят равным 0,8, а с оправкой – 0,4 [12, 13].

Для исследования характера влияния качества удержания оправки габитами в линии стана FQM в работе моделировали несоосность оправки с осью прокатки с момента выхода заднего конца трубы из четвертой клетки стана FQM (рис. 2а). Шаг отклонения  $\Delta$  был принят равным 1 мм, с варьированием от 0 до 4 мм (рис. 2б). Модель без отклонения принималась за базовую, и результаты сравнивались с ней (см. таблицу).

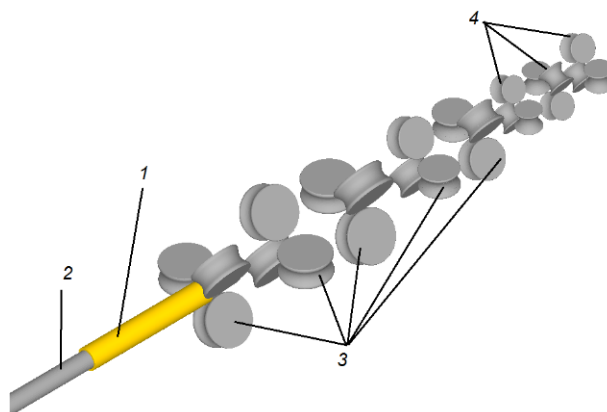


Рис. 1. Твёрдотельная модель непрерывного стана FQM со станом-извлекателем: 1 – заготовка; 2 – оправка; 3 – валки стана FQM; 4 – валки стана-извлекателя

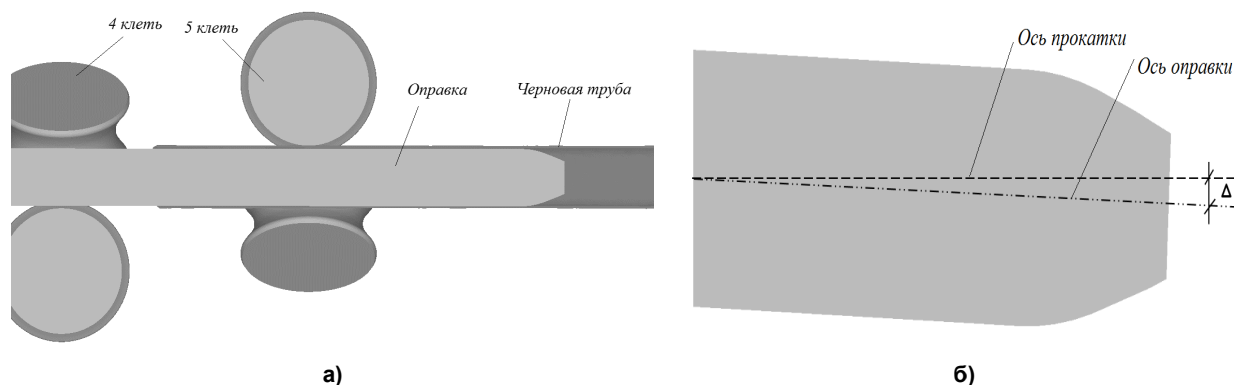


Рис. 2. Исходные условия моделирования: момент выхода заднего конца трубы из четвертой клетки стана FQM (а) и несоосность оправки с осью прокатки (б)

Матрица эксперимента

| Модель / Параметр | Диаметр гильзы $d_r$ , мм | Толщина стенки гильзы $S_r$ , мм | Температура гильзы $\Theta$ , °C | Диаметр оправки $d_{оп}$ , мм | Отклонение от оси прокатки $\Delta$ , мм |
|-------------------|---------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|--|
| 1 – базовая       | 328                       | 20,5                             | 1100                             | 273,7                         | 0  |
| 2                 | 328                       | 20,5                             | 1100                             | 273,7                         | 1  |
| 3                 | 328                       | 20,5                             | 1100                             | 273,7                         | 2  |
| 4                 | 328                       | 20,5                             | 1100                             | 273,7                         | 3  |
| 5                 | 328                       | 20,5                             | 1100                             | 273,7                         | 4  |

## 2. Анализ результатов численного эксперимента

Результаты решение задач КЭ-моделирования позволили оценить точность размеров черновой трубы после прокатки на стане FQM с последующим извлечением трубы с оправки на стане-извлекаете. Было установлено, что точность размеров труб снижается с ростом отклонения от оси прокатки. На рис. 3 показаны результаты замеров геометрических характеристик труб с увеличением отклонения от оси прокатки.

При величине отклонения в 3 мм наблюдаются серьезные величины отклонения по диаметру и толщине стенки от номинальных значений:  $(\Delta D/D_{ном}) \cdot 100 = 7,19\%$ , а  $(\Delta S/S_{ном}) \cdot 100 = 19,45\%$ , что определенно выводит геометрические размеры труб за нормативные значения любого стандарта. При этом отклонение в 1 мм вносит значительный вклад в отклонение геометрических параметров труб от их номинальных значений, но это отклонение находится в пределах действующих нормативных документов ПАО «Северский трубный завод».

В работе была проведена оценка вероятности поврежденности металла в соответ-

ствии с матрицей вычислительного эксперимента. Критерием разрушения, применяемым в работе, являлся критерий Кокрофта – Латема (Cockroft – Latham). Критерий основан на вычислении потенциальной энергии пластической деформации, т. е. площади фигуры, ограниченной кривой «деформация – напряжение» [13, 14]. Оценка вероятности поврежденности металла также демонстрирует негативное влияние неосности процесса прокатки, а именно: наблюдается рост поврежденности в точках, соответствующих выпускам и дну калибров.

Для оценки характера силового воздействия на оправку в момент снятия ее с черновой трубы был произведен расчет усилия прокатки на оправку при снятии с нее металла. На рис. 4 приведены результаты моделирования, из которых можно заметить значительное увеличение усилия прокатки с ростом величины отклонения (усилие превышает 1000 кН).

Также в ходе моделирования установлено, что при скачке нагрузки выше 1150 кН наблюдается единичное несистемное образование дефекта «риска» (см. рис. 4). Кроме того, наблюдаются увеличение времени снятия

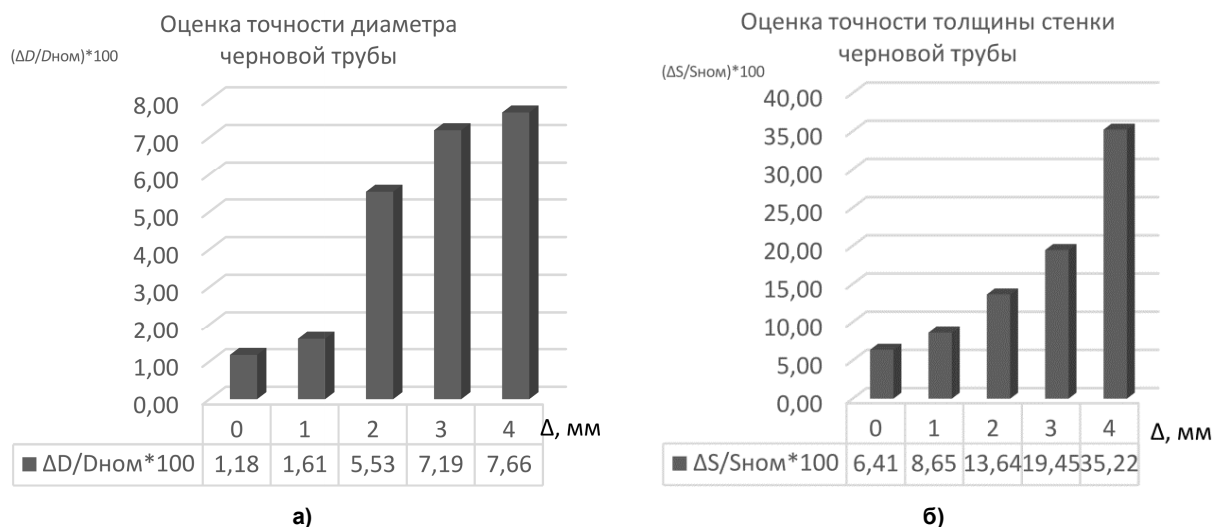
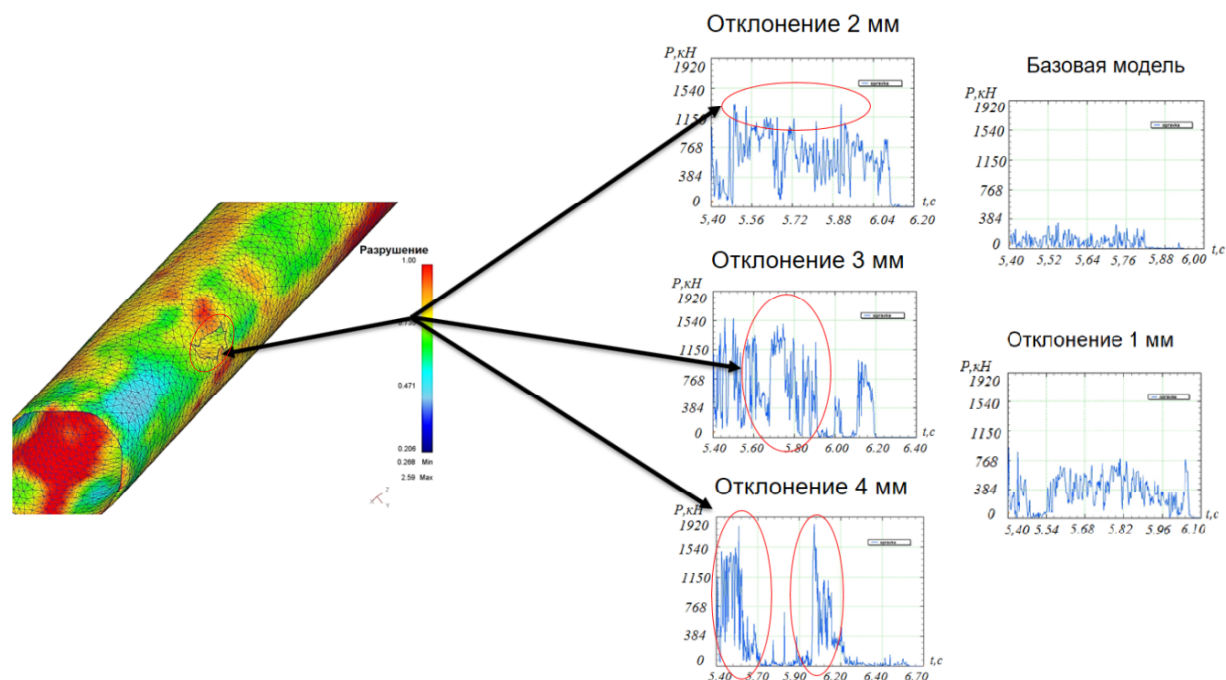


Рис. 3. Влияние отклонения от оси прокатки на геометрические характеристики труб: отклонения по диаметру (а) и толщине стенки (б) от номинальных значений



**Рис. 4. Рост силового воздействия на оправку при увеличении несоосности процесса прокатки и извлечении оправки станом-извлекателем**

оправки с трубы и пиковые нагрузки на оправку, что может говорить о нестабильном протекании процесса снятия оправки и ее сильном воздействии на внутреннюю поверхность трубы, приводящем к появлению видимого дефекта.

### Выводы

По результатам численного моделирования процесса непрерывной прокатки было установлено, что точность размеров труб снижается с ростом отклонения от оси прокатки. При величине отклонения в 3 мм отклонения по диаметру и толщине стенки от номинальных значений составляют  $(\Delta D/D_{\text{ном}}) \cdot 100 = 7,19\%$ , а  $(\Delta S/S_{\text{ном}}) \cdot 100 = 19,45\%$ , что выводит геометрические размеры труб за нормативные значения любого стандарта.

В качестве рекомендаций по снижению вероятности образования дефекта «риска» на внутренней поверхности черновой трубы целесообразны следующие меры: ограничить усилия при удержании оправки (в момент извлечения) непрерывного стана величиной 1150 кН; разработать систему оповещения на пульте управления, сигнализирующую о превышении усилия и необходимости изменения режима удержания, после срабатывания которой оператор пульта должен провести проверку фиксации габитами оправки непре-

рывного стана, а также откорректировать время удержания оправки в крайней позиции перед ее снятием.

**Исследование выполнено в рамках базовой части государственного задания № FEUZ-2020-0020.**

**Работа выполнена при финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.А03.21.0006.**

### Литература

1. *Технология и оборудование трубного производства* / В.Я. Осадчий, А.С. Вавилин, В.Г. Зимовец, А.П. Коликов; под ред. В.Я. Осадчего. – М.: Интермет Инжиниринг, 2007. – 560 с.
2. *Осадчий, В.Я. Производство и качество стальных труб: учеб. пособие для вузов* / В.Я. Осадчий, А.П. Коликов; под ред. В.Я. Осадчего. – М.: Изд-во МГУПИ, 2012. – 370 с.
3. *Топоров, В.А. Освоение ТПА с непрерывным станом FQM на Северском трубном заводе* / В.А. Топоров, В.Л. Пятков, Б.Г. Пьянков // *Инновации и импортозамещение в трубной промышленности (Трубы-2016): тр. XXII Междунар. науч.-практ. конф.* / под ред. И.Ю. Пышминцева. – 2016. – С. 16–19.
4. *Сравнительный анализ процесса оправочной продольной прокатки труб с использованием калибров, образованных разным ко-*

личеством валков / А.В. Выдрин, И.Н. Черных, Д.О. Струин и др. // Трубы-2014: тр. XXII науч.-практ. конф. – 2014. – Ч. 2 – С. 143–150.

5. Shkuratov, E.A. Improvement of the technology for hollow shell longitudinal rolling in continuous rolling mills / E.A. Shkuratov, A.V. Vydrin // *Chernye Metally*. – 2017. – No. 3. – P. 42–46.

6. Совершенствование методики определения технологических осей непрерывных станов ТПА 159–426 / Д.В. Лоханов, А.В. Никитин, В.В. Ананян и др. // Производство проката. – 2016. – № 1. – С. 34–38.

7. Вавилкин, Н.Н. Исследование деформационных и кинематических параметров раскатки труб на непрерывном стане / Н.Н. Вавилкин, А.В. Красиков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2009. – № 11. – С. 22–25.

8. Особенности определения технологической оси непрерывного трубопрокатного стана с трехвалковыми калибрами / Е.А. Шкуратов, Б.Г. Пьянков, Р.О. Бушин и др. // Трубы-2016: тр. XXII междунар. науч.-практ. конф. – Челябинск, 2016. – Ч. 2. – С. 206–210.

9. Alyutin, M.D. Push Benches and Prospects of Their Application / M.D. Alyutin, V.V. Shirokov // *Metallurgist*. – 2019. – Vol. 62, no. 9–10. – P. 1062–1067.

10. Совершенствование осевой настройки оборудования стана FQM на основе бесконтактных измерительных 3D-систем / О.А. Панасенко, Е.А. Шкуратов, О.И. Белов и др. // Металлург. – 2019. – № 7. – С. 26–29.

11. Технологическая инструкция СТЗ 004-024-2019 «Прокатка бесшовных труб в линии непрерывного стана FQM». – Полевской, 2016. – 12 с.

12. Finite element simulation for hot continuous-rolled TC4 alloy seamless pipe / J. Shi, W. Yu, E. Dong, J. Wang // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – 2018. – P. 705–716.

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

14. Surface-crack formation in the manufacture of microalloyed steel pipe / N.G. Kolbasnikov, V.V. Mishin, I.A. Shishov et al. // *Steel in Translation*. – 2016. – Vol. 46, no. 9. – P. 665–670.

**Топоров Владимир Александрович**, технический директор, ПАО «Северский трубный завод», г. Полевской; ToporovVA@stw.ru.

**Ибрагимов Павел Александрович**, главный специалист отдела Главного прокатчика, Дирекция по технологии, ПАО «Трубная металлургическая компания», г. Москва; IbragimovPA@tmk-group.com.

**Панасенко Олег Александрович**, начальник трубопрокатной лаборатории научно-исследовательского центра, ПАО «Северский трубный завод», г. Полевской; PanasenkoOA@stw.ru.

**Халезов Александр Олегович**, магистрант кафедры обработки металлов давлением, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; alekssanja633@mail.ru.

**Нухов Данис Шамильевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры обработки металлов давлением, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; d.s.nukhov@urfu.ru.

Поступила в редакцию 10 января 2020 г.

**COMPUTATIONAL SIMULATION OF CONTINUOUS PIPE ROLLING ON A FQM MILL IN THE DEFORM-3D PROGRAM**

V.A. Toporov<sup>1</sup>, ToporovVA@stw.ru,  
P.A. Ibragimov<sup>2</sup>, IbragimovPA@tmk-group.com,  
O.A. Panasenko<sup>1</sup>, PanasenkoOA@stw.ru,  
A.O. Khalezov<sup>3</sup>, alekssanja633@mail.ru,  
D.Sh. Nukhov<sup>3</sup>, danis\_nuchov@mail.ru

<sup>1</sup> PJSC "Seversky Pipe Plant", Polevskoy, Russian Federation,

<sup>2</sup> PJSC "Pipe Metallurgical Company", Moscow, Russian Federation,

<sup>3</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

Modern continuous mills such as PQF (Premium quality finishing) and FQM (Fine Quality Mill) are high-performance units that ensure high quality of seamless pipes of various grades. This equipment uses a long-held mandrel, which has a certain speed of movement in the center of deformation. A three-mill extractor is used to extract the mandrel at the end of the technological cycle of rolled products. It is possible to form surface defects on the draft pipe due to the high-speed and deformation conditions of this process. We set and solved the problems of numerical simulation of the continuous rolling process of pipes on the FQM mill in this paper. The solution of the problems allowed us to assess the nature of the influence of the deviation of the rolling axes of the continuous mill and its extraction due to poor retention of the mandrel by gabions between the stands on the quality of the draft pipe. It was found that the accuracy of pipe sizes decreases with increasing deviation from the rolling axis, based on the results of numerical simulation of the continuous rolling process. When the deviation is 3 mm, the deviations in diameter and wall thickness from the nominal values are  $(\Delta D/D_N) \cdot 100 = 7,19 \%$ , and  $(\Delta S/S_N) \cdot 100 = 19,45 \%$ , which makes the geometric dimensions of the pipes beyond the normative values of any standard. There is an increase in the time of removing the mandrel from the pipe and peak loads on the mandrel, which may indicate that the process of removing the mandrel is not stable and its strong impact on the inner surface of the pipe. It leading to the appearance of a visible defect. The results of solving the problems allowed us to formulate technical recommendations aimed at reducing the probability of surface defects in the production of pipes at the FQM mill.

*Keywords: continuous FQM mill, production of seamless pipes, computer modeling, surface defects, Cockcroft-Latham fracture criterion, numerical experiment, shape change and probability of failure.*

The study was made within the base part of state job in the field of scientific activity № FEUZ-2020-0020.

The work was supported by Act 211 Government of the Russian Federation, contract № 02.A03.21.0006.

**References**

1. Osadchy V.Ya., Vavilin A.S., Zimovets V.G., Kolikov A.P. *Tekhnologiya i oborudovaniye trubnogo proizvodstva* [Technology and equipment of pipe production]. Moscow, Internet Engineering Publ., 2007. 560 p.
2. Osadchy V.Ya., Kolikov A.P. *Proizvodstvo i kachestvo stal'nykh trub* [Production and quality of steel pipes]. Moscow, MGUPI Publ., 2012. 370 p.
3. Toporov V.A., Pyatkov V.L., Pyankov B.G. [The development of injection molding machines with a continuous mill FQM at the Seversky Pipe Plant]. *Proceedings of the XXII International Scientific and Practical Conference*, 2016, pp. 16–19. (in Russ.)
4. Vydrin A.V., Chernykh I.N., Struin D.O. et al. [A comparative analysis of the process of mandrel longitudinal rolling of pipes using calibers formed by a different number of rolls]. *Proceedings of the XXI International scientific and practical conference*, 2014, part 2, pp. 143–150. (in Russ.)

5. Shkuratov E.A., Vydrin A.V. Improvement of the technology for hollow shell longitudinal rolling in continuous rolling mills. *Chernye Metally*, 2017, no. 3, pp. 42–46.
6. Lohanov D.V., Nikitin A.V., Ananyan V.V. et al. [Improving the methodology for determining the technological axes of continuous mills TPA 159–426]. *Proizvodstvo prokata* [Rolled metal production], 2016, no. 1, pp. 34–38. (in Russ.)
7. Vavilkin N.N., Krasikov A.V. [Investigation of the deformation and kinematic parameters of pipe rolling in a continuous mill]. *Proceedings of Universities. Ferrous Metallurgy*, 2009, no. 11, pp. 22–25. (in Russ.)
8. Shkuratov E.A., Pyankov B.G., Bushin R.O. et al. [Features of determining the technological axis of a continuous tube rolling mill with three-roll calibers]. *Pipes-2016: Proceedings of the XXII International Scientific and Practical Conference*. Chelyabinsk, 2016, part 2, pp. 206–210. (in Russ.)
9. Alyutin M.D., Shirokov V.V. Push Benches and Prospects of Their Application. *Metallurgist*. 2019, vol. 62, no. 9–10, pp. 1062–1067. DOI: 10.1007/s11015-019-00754-6
10. Panasenko O.A., Shkuratov E.A., Belov O.I. et al. [Improving the axial adjustment of the equipment of the FQM mill based on non-contact 3D measuring systems]. *Metallurgist*, 2019, no. 7, pp. 26–29. (in Russ.)
11. *Tekhnologicheskaya instruktsiya STZ 004-024-2019 “Prokatka besshovnykh trub v linii nepre-ryvnogo stana FQM”* [Technological instruction STZ 004-024-2019 “Rolling seamless tubes in the line of a continuous mill FQM”]. Polevskoy, 2016, 12 p.
12. Shi J., Yu W., Dong E., Wang J. Finite element simulation for hot continuous-rolled TC4 alloy seamless pipe. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2018, pp. 705–716.
13. Kolikov A.P., Romantsev B.A. *Teoriya obrabotki metallov davleniyem* [Theory of metal forming]. Moscow, MISiS Publ., 2015. 451 p.
14. Kolbasnikov N.G., Mishin V.V., Shishov I.A., Matveev M.A., Korchagin A.M. Surface-crack formation in the manufacture of microalloyed steel pipe. *Steel in Translation*, 2016, vol. 46, no. 9, pp. 665–670. DOI: 10.3103/s0967091216090035

Received 10 January 2020

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Численное моделирование непрерывной прокатки труб на стане FQM в программе DEFORM-3D / В.А. Топоров, П.А. Ибрагимов, О.А. Панасенко и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 27–33. DOI: 10.14529/met200103

#### FOR CITATION

Toporov V.A., Ibragimov P.A., Panasenko O.A., Khalezov A.O., Nukhov D.Sh. Computational Simulation of Continuous Pipe Rolling on a FQM Mill in the Deform-3D Program. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 27–33. (in Russ.) DOI: 10.14529/met200103

---