

# Обработка металлов давлением. Технологии и машины обработки давлением Metal forming. Technology and equipment of metal forming

Научная статья  
УДК 621.774.32  
DOI: 10.14529/met220406

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОСЕВОЙ НАСТРОЙКИ НА ПРОЧНОСТЬ ОПРАВОК РАСКАТНОГО СТАНА

*И.Т. Билан*<sup>1</sup>, [BillanIT@tagmet.ru](mailto:BillanIT@tagmet.ru)

*К.В. Трубников*<sup>1</sup>, [TrubnikovKV@tagmet.ru](mailto:TrubnikovKV@tagmet.ru)

*Д.Ю. Звонарев*<sup>2,3</sup>, [ZvonarevDY@tmk-group.com](mailto:ZvonarevDY@tmk-group.com)

*М.Н. Носкова*<sup>2,3</sup>, [Noskova@rosniti.ru](mailto:Noskova@rosniti.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8764-1008>

<sup>1</sup> АО «Таганрогский металлургический завод» (АО «ТАГМЕТ»), Таганрог, Россия

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

<sup>3</sup> АО «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (АО «РусНИТИ»), Челябинск, Россия

**Аннотация.** Современные трубопрокатные агрегаты, как правило, оснащаются станами продольной прокатки с удерживаемой оправкой типа станов PQF (Premium quality finishing) и FQM (Fine Quality Mill). Используемая оправка, как правило, достигает 10–12 м и изготавливается из специальных марок стали, стойких к истиранию, с повышенной прочностью. В процессе эксплуатации оправка при заполнении очага деформации проходит через все клетки и фиксируется на определенном расстоянии. При прокатке труб большое внимание уделяют настройке стана как по технологическим режимам, так и по расположению клеток относительно оси прокатки. За время эксплуатации стана в силу наличия люфтов, вибраций и других негативных факторов ось клеток может смещаться, что приведет к изгибу оправки, повышенному износу инструмента, а также накоплению остаточных напряжений в оправке. Все это создаст условия к снижению эксплуатационного ресурса дорогостоящего инструмента. В связи с этим в работе рассмотрено влияние осевой настройки клеток стана PQF на величину напряжений в оправке. В ходе выполнения работы были получены регрессионно значимые уравнения влияния осевой настройки на уровень напряжений в оправке.

**Ключевые слова:** непрерывный стан PQF, компьютерное моделирование, напряжения, QForm, регрессионный анализ

**Для цитирования:** Оценка влияния осевой настройки на прочность оправок раскатного стана / И.Т. Билан, К.В. Трубников, Д.Ю. Звонарев, М.Н. Носкова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2022. Т. 22, № 4. С. 56–63. DOI: 10.14529/met220406

## EVALUATION OF THE EFFECT OF AXIAL ADJUSTMENT ON THE STRENGTH OF THE ROLLING MILL MANDRELS

I.T. Bilan<sup>1</sup>, BilanIT@tagmet.ru

K.V. Trubnikov<sup>1</sup>, TrubnikovKV@tagmet.ru

D.Yu. Zvonarev<sup>2,3</sup>, ZvonarevDY@tmk-group.com

M.N. Noskova<sup>2,3</sup>, Noskova@rosniti.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8764-1008>

<sup>1</sup> Taganrog Metallurgical Plant JSC (TAGMET JSC), Taganrog, Russia

<sup>2</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

<sup>3</sup> The Russian Research Institute of the Tube & Pipe Industries, Joint Stock Company (RusNITI JSC), Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** Modern tube mills are usually equipped with mandrel mounted longitudinal mills such as PQF (Premium Finishing) and FQM (Thin Roll Mill) mills. The used mandrel, as a rule, reaches 10–12 m and is made of special grades of steel, resistant to abrasion, increased strength. During operation, the mandrel, when filling the deformation zone, passes through all the stands and is fixed at a certain distance. When rolling pipes, great attention is paid to setting up the mill both in terms of technological modes and in terms of the location of the stands relative to the rolling axis. During the operation of the mill, due to backlashes, vibrations and other negative factors, the axes of the stands can shift, which will lead to bending of the mandrel, increased tool wear, and accumulation of residual stresses in the mandrel. All this will create conditions for reducing the operational life of an expensive tool. In this regard, the article considers the effect of axial adjustment of PQF stands on the stress in the mandrel. In the course of the work, regression-significant equations of the influence of axial fit on the stress level in the mandrel were obtained.

**Keywords:** PQF continuous machine, computer simulation, stress, QForm, regression analysis

**For citation:** Bilan I.T., Trubnikov K.V., Zvonarev D.Yu., Noskova M.N. Evaluation of the effect of axial adjustment on the strength of the rolling mill mandrels. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2022;22(4):56–63. (In Russ.) DOI: 10.14529/met220406

### Цель работы

При производстве горячедеформированных труб наиболее массовым способом является прокатка на трубoproкатных агрегатах (ТПА) с непрерывным станом. При этом к качеству готовой продукции предъявляются жесткие требования по разнотолщинности, овальности и др.

Качество готовых труб напрямую зависит от заготовки (гильзы), однако немаловажным параметром является и точность настройки раскатного стана.

Под точностью настройки понимается соответствие осей калибров стана друг относительно друга, а также соответствие скоростных параметров стана. При несоответствии скоростных параметров стана на трубе могут наблюдаться дефекты формы, разрывы металла и др. При несоответствии осевой настройки стана на трубах может наблюдаться, например, повышенная разнотолщинность.

Также при несоответствии осевой настройки повышается износ на валках, износ

на оправке, увеличивается изгиб оправки в продольном направлении [1, 2]. В силу того, что оправка является дорогостоящим инструментом, вызывает интерес работа по проведению оценки влияния осевой настройки на прочностные характеристики оправок.

Данное исследование возможно выполнить с использованием математического моделирования и планирования эксперимента [3–5].

### 1. Компьютерное моделирование

На рис. 1 представлена общая схема прокатки заготовки на оправке в непрерывном стане.

В процессе прокатки на оправку действуют растягивающие силы, сжимающие, возникающие при деформировании заготовки со стороны валков, а также момент изгиба, действующий со стороны смещения валков клетки относительно оси оправки.

На рис. 2 представлена общая схема приложения нагрузки на оправку со стороны валков.

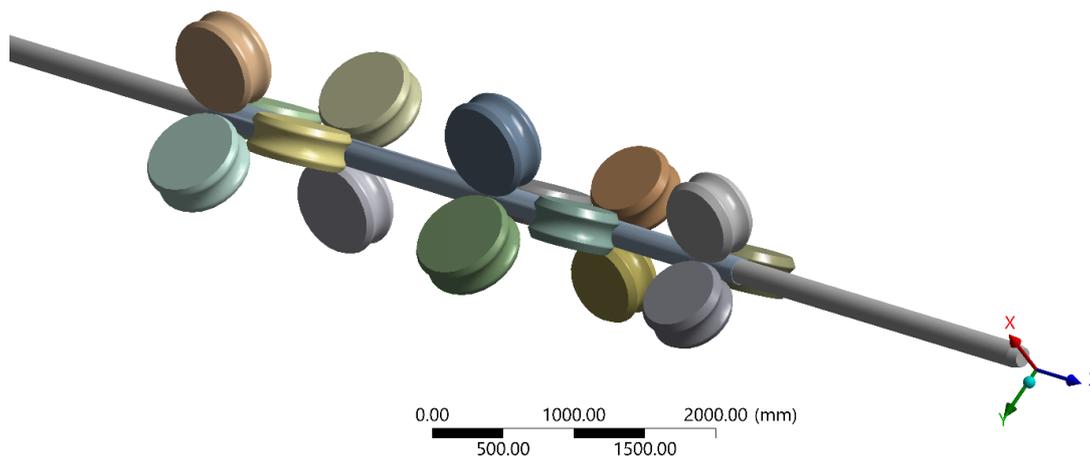


Рис. 1. Общий вид модели для расчета  
Fig. 1. General view of the model for calculation

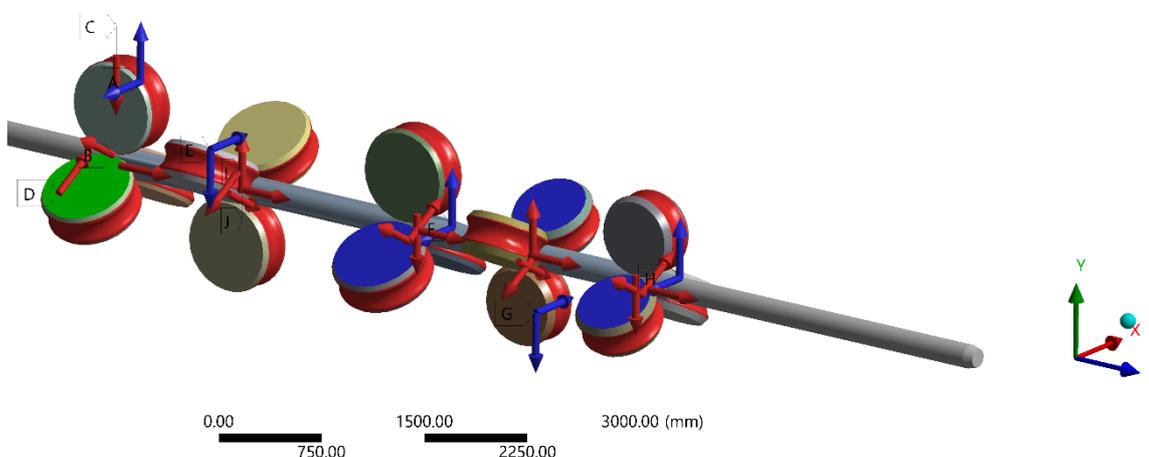


Рис. 2. Направление приложенных нагрузок  
Fig. 2. Direction of applied loads

На начальном этапе с использованием программного комплекса QForm были получены значения усилий, действующие на оправку в радиальном и осевом направлениях при идеальной настройке стана (рис. 3).

Исходя из представленных значений усилий, были рассчитаны напряжения, возникающие на оправке при идеальной настройке стана (рис. 4). Следует отметить, что рассчитанные значения были увеличены на 50%. Маркой стали оправки при моделировании была выбрана 4X5MФ1С.

Как видно из рис. 4, максимальные напряжения возникают в области приложения нагрузки от 1-й клетки.

## 2. Методика анализа

Для того чтобы оценить влияние смещения осей клеток на напряжения, возникающие в оправке, был разработан полнофакторный эксперимент (ПФЭ) [6], в котором изменялось

вертикальное перемещение оси валков и фиксировалось максимальное напряжение в очаге деформации. Смещение каждой клетки варьировалось на 3 уровнях значений:  $-7$ ,  $0$  и  $+7$  мм.

На рис. 5 представлено распределение напряжений в очаге деформации 3-й клетки относительно изменения оси по клетям.

Как видно из рис. 5, на напряжения в оправке в очаге деформации 3-й клетки влияют изменения осевой настройки во 2, 3 и 4-й клетях. Остальные клетки практически не оказывают влияния. Аналогичные картины были получены и по другим очагам деформации.

Для оценки влияния каждого фактора на напряжения в оправке были получены регрессионные уравнения, представленные ниже. Значимость фактора оценивалась на основе критерия p-Value [7]. С использованием такого подхода были получены регрессионно значимые уравнения с коэффициентом достоверности свыше  $0,8$  [8].

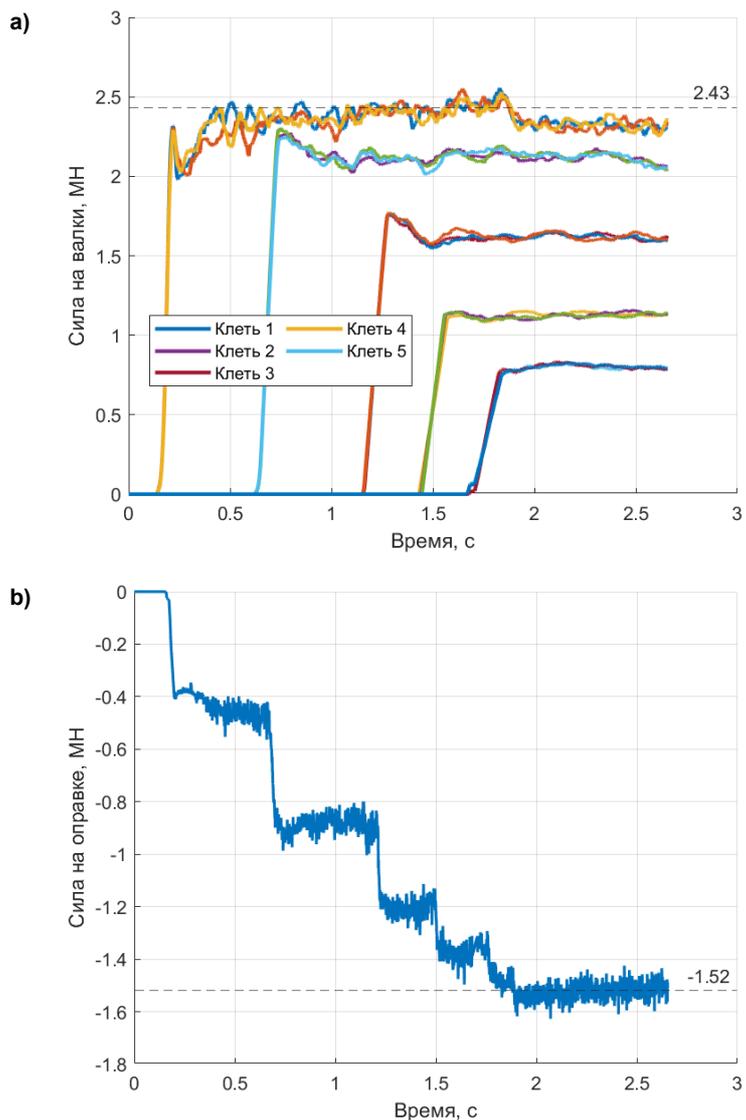


Рис. 3. Усилия, действующие на оправку в процессе прокатки:  
 а – усилия, действующие на валки стана; б – усилия, действующие на оправку  
 Fig. 3. Efforts acting on mandreling during the rolling process:  
 а – the forces acting on the rolling of the mill; б – efforts in effect on the mandrel

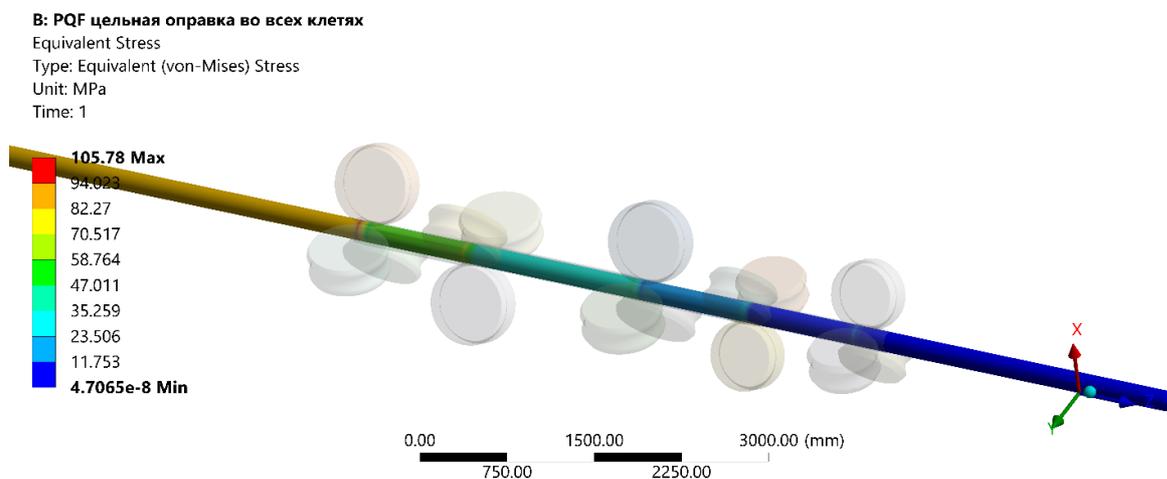


Рис. 4. Распределение напряжений в оправке раскатного стана  
 Fig. 4. Stress distribution in the mandrel of the rolling mill

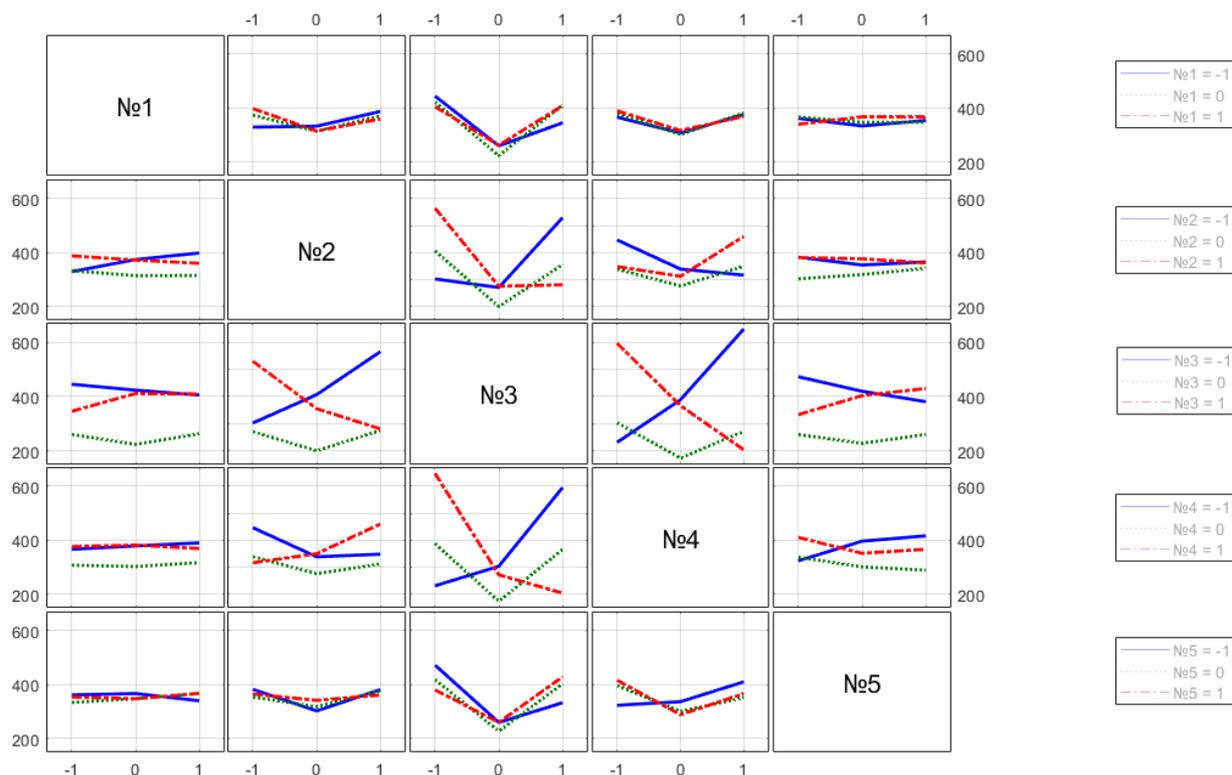


Рис. 5. Распределение напряжений на оправке в зоне очага деформации 3-й клетки в зависимости от взаимного влияния факторов  
Fig. 5. Distribution of stresses on the mandrel in the zone of the focus of deformation of 3 cells, depending on the mutual influence of factors

Напряжения на оправке в очаге деформации 1-й клетки определяются по уравнению

$$\sigma_1 = 228,37 - 8,598 \cdot x_1 + 2,7114 \cdot x_2 - 150,38 \cdot x_1 \cdot x_2; \quad (1)$$

напряжения на оправке в очаге деформации 2-й клетки определяются по уравнению

$$\sigma_2 = 353,58 + 6,5925 \cdot x_1 + 1,7627 \cdot x_2 + 0,47915 \cdot x_3 - 185,34 \cdot x_1 \cdot x_2 + 40,204 \cdot x_1 \cdot x_3 - 113,61 \cdot x_2 \cdot x_3; \quad (2)$$

напряжения на оправке в очаге деформации 3-й клетки определяются по уравнению

$$\sigma_3 = 353,66 + 2,9932 \cdot x_2 - 16,472 \cdot x_3 - 0,12101 \cdot x_4 - 127,68 \cdot x_2 \cdot x_3 + 60,46 \cdot x_2 \cdot x_4 - 202,46 \cdot x_3 \cdot x_4; \quad (3)$$

напряжения на оправке в очаге деформации 4-й клетки определяются по уравнению

$$\sigma_4 = 402,33 + 19,689 \cdot x_3 - 16,035 \cdot x_4 - 8,2988 \cdot x_5 - 223,05 \cdot x_3 \cdot x_4 + 89,869 \cdot x_3 \cdot x_5 - 192,82 \cdot x_4 \cdot x_5; \quad (4)$$

напряжения на оправке в очаге деформации 5-й клетки определяются по уравнению

$$\sigma_5 = 111,36 - 21,182 \cdot x_4 + 12,271 \cdot x_5 - 100,64 \cdot x_4 \cdot x_5, \quad (5)$$

где  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  – смещения оси клетки в кодированном значении.

Анализируя уравнения, можно сделать вывод о том, что наиболее нагруженная область оправки возникает в очаге деформации 4-й клетки.

На рис. 6 представлено распределение напряжений на оправке в очаге деформации 4-й клетки при парном изменении осевого смещения в 4-й и 5-й клетях.

Из рис. 6 видно, что минимальные напряжения возникают при идеальной настройке стана. При превышении смещения клетей на 0,6 (абсолютное смещение 4,2 мм) напряжения на оправке могут превышать 400–500 МПа.

Стоит отметить, что даже при максимальных смещениях оси клетки напряжения на оправке не превышают предела текучести для стали марки 4Х5МФ1С (предел текучести составляет 1470 МПа).

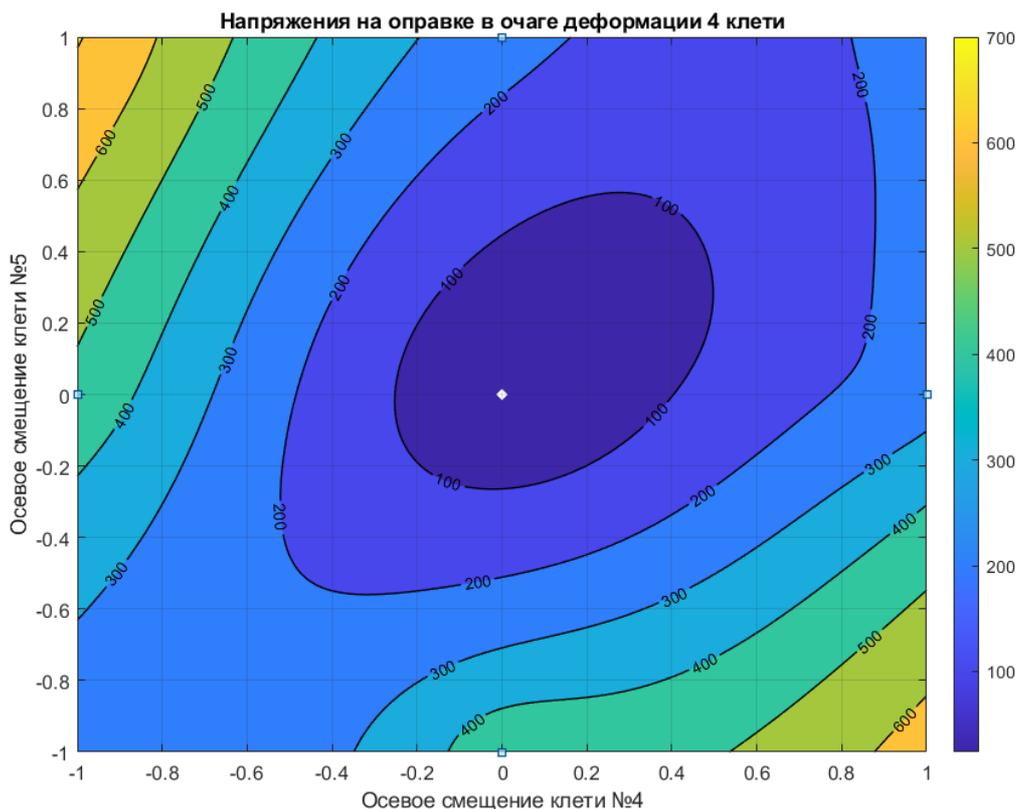


Рис. 6. Распределение напряжений на оправке в очаге деформации 4-й клетки при взаимном смещении осей 4-й и 5-й клетки  
Fig. 6. Distribution of stresses on the mandrel in the focus of deformation of the 4th cell with mutual displacement of the axes of the 4th and 5th cells

### Заключение

В ходе выполнения моделирования процесса раскатки гильзы в непрерывном стане и последующей обработки и анализа полученных данных были выявлены следующие закономерности.

1. Наибольшее напряжение на оправке возникает в области очага деформации 4-й клетки, которая является 1-й чистовой клетью. При смещении осей клетки напряжение на оправке может достигать порядка 600 МПа.

2. На величину напряжений в оправке в области очага деформации клетки оказывают влияние только смещения осей соседних клеток.

3. Получены достоверно значимые уравнения вычисления напряжений на оправке при смещении осей клеток и осевом, и радиальном нагружении при прокатке труб.

4. На основе вычислений были сделаны рекомендации об ужесточении значения максимально допустимого смещения осей прокатного стана.

### Список литературы

1. Совершенствование техники и технологии прокатки в многовалковых калибрах: учеб. пособие / С.П. Буркин [и др.]. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2010. 361 с.
2. Выдрин А.В., Широков В.В. Теоретические основы повышения точности размеров труб при прокатке на непрерывном стане // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2011. № 14 (231). С. 81–86.
3. Коликов А.П., Звонарев Д.Ю., Таупек И.М. Применение математического моделирования для расчета режимов пластического формоизменения толстолистовой заготовки и повышения качества труб большого диаметра // Черные металлы. 2018. № 11. С. 60–66.
4. Оценка точности формоизменения концов труб при калибровании / Д.А. Ахмеров, Д.Ю. Звонарев, А.В. Выдрин и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2020. Т. 20, № 4. С. 39–47. DOI: 10.14529/met200405

5. Бобарикин Ю.Л., Радькин Я.И. Определение оптимальной скорости оправки раскатного непрерывного прокатного стана с помощью численного моделирования // *Литьё и металлургия*. 2017. № 1 (86). С. 86–92.

6. Анализ влияния настроечных параметров прошивного стана на изменение диаметра и толщины стенки гильзы / А.В. Выдрин, В.Л. Нерозников, Д.Ю. Звонарев, К.В. Трубников // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. 2022. Т. 22, № 1. С. 42–52. DOI: 10.14529/met220105

7. Программный пакет MATLAB. Вычислительные методы и визуализация данных: лабораторный практикум / Ю.Б. Галеркин [и др.]. СПб.: Политех-Пресс, 2020. 33 с.

8. Holland P.W., Welsch R.E. Robust regression using iteratively reweighted leastsquares // *Communications in Statistics-theory and Methods*. 1977. Vol. 6, no. 9. P. 813–827. DOI: 10.1080/03610927708827533

### References

1. Burkin S.P. et al. *Sovershenstvovaniye tekhniki i tekhnologii prokatki v mnogovalkovykh kalibrakh: ucheb. posobiye* [Improving the technique and technology of rolling in multi-roll calibers: a study guide]. Ekaterinburg: USTU-UPI, 2010. 361 p. (In Russ.)

2. Vydrin A.V., Shirokov V.V. Basic theory of improvement of pipe dimensions precision during rolling in mandrel mill. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2011;14(231):81–86. (In Russ.)

3. Kolikov A.P., Zvonarev D. Yu., Taupek I.M. Usage of mathematical simulation for calculation of conditions plastic deformation for heavy plate billets and quality improvement in large-diameter tubes. *Stahl und eisen*. 2018;(11):60–66. (In Russ.)

4. Akhmerov D.A., Zvonarev D.Yu., Vydrin A.V., Zinchenko M.A., Pavlova M.A. Estimation of the Accuracy of the Formation of the Ends of Pipes during Calibration. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2020;20(4):39–47. (In Russ.) DOI: 10.14529/met200405

5. Bobarikin Yu.L., Radkin Ya.I. Determination of the optimal speed of the mandrel in the continuous reeling mill using numerical simulation. *Lit'e i metallurgiya* [Foundry production and metallurgy]. 2017;1(86):86–92. (In Russ.)

6. Vydrin A.V., Neroznikov V.L., Zvonarev D.Yu., Trubnikov K.V. Analysis of the influence of setting parameters washing machine on the change of case wall diameter and thickness. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2022;22(1):42–52. (In Russ.) DOI: 10.14529/met220105

7. Galerkin Yu.B. et al. *Programmnyy paket MATLAB. Vychislitel'nyye metody i vizualizatsiya dannykh: laboratornyy praktikum* [MATLAB software package. Computational methods and data visualization: laboratory workshop]. St. Petersburg: Politekh-Press; 2020. 33 p. (In Russ.)

8. Holland P.W., Welsch R.E. Robust regression using iteratively reweighted leastsquares. *Communications in Statistics-theory and Methods*. 1977;6(9):813–827. DOI: 10.1080/03610927708827533

### Информация об авторах

**Билан Иван Тарасович**, заместитель начальника цеха, АО «Таганрогский металлургический завод» (АО «ТАГМЕТ»), Таганрог, Россия; BilanIT@tagmet.ru.

**Трубников Кирилл Вячеславович**, начальник лаборатории, АО «Таганрогский металлургический завод» (АО «ТАГМЕТ»), Таганрог, Россия; TrubnikovKV@tagmet.ru.

**Звонарев Дмитрий Юрьевич**, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; заведующий лабораторией моделирования технологических процессов, АО «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (АО «РусНИТИ»), Челябинск, Россия; ZvonarevDY@tmk-group.com.

**Носкова Мария Николаевна**, магистрант кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; инженер лаборатории моделирования технологических процессов, АО «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (АО «РусНИТИ»), Челябинск, Россия; Noskova@rosniti.ru.

***Information about the authors***

**Ivan T. Bilan**, Deputy Head of the Department, Taganrog Metallurgical Plant JSC (TAGMET JSC), Taganrog, Russia; BilanIT@tagmet.ru.

**Kirill V. Trubnikov**, Head of Laboratory, Taganrog Metallurgical Plant JSC (TAGMET JSC), Taganrog, Russia; TrubnikovKV@tagmet.ru.

**Dmitriy Yu. Zvonarev**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Department of Processes and Machines for Metal Forming, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; Head of the Laboratory for Modeling Technological Processes, The Russian Research Institute of the Tube & Pipe Industries, Joint Stock Company (RusNITI JSC), Chelyabinsk, Russia; zvonarev@rosniti.ru.

**Mariya N. Noskova**, Master's Student of the Department of Processes and Machines for Metal Forming, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; Engineer of the Laboratory for Modeling Technological Processes, The Russian Research Institute of the Tube & Pipe Industries, Joint Stock Company (RusNITI JSC), Chelyabinsk, Russia; Noskova@rosniti.ru.

***Статья поступила в редакцию 12.09.2022***

***The article was submitted 12.09.2022***