

# Обработка металлов давлением. Технологии и машины обработки давлением

УДК 621.7.012.3

DOI: 10.14529/met200403

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВАЛЬЦЕВОЙ ФОРМОВКИ С ЦЕЛЬЮ МИНИМИЗАЦИИ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМАЦИИ ЗАГОТОВКИ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ

**Я.Е. Залавин**

ОАО «Российский научно-исследовательский институт  
трубной промышленности» (ОАО «РосНИТИ»), г. Челябинск, Россия

В настоящее время рынок труб большого диаметра (ТБД) развивается в условиях переизбытка производственных мощностей, что ставит производителей труб данного сегмента в условия жесткой конкуренции. Морские переходы, зоны повышенной сейсмической активности, высокое рабочее давление трубопроводов определяют высокие требования к прочностным, геометрическим и эксплуатационным характеристикам труб. Повышение точности размеров труб большого диаметра является актуальной задачей для большинства производителей данной продукции. Одним из способов повышения точности труб является минимизация неравномерности деформации в поперечном сечении трубы после формообразующих операций. Процесс вальцевой формовки (TRB) обладает преимуществом в сравнении с наиболее распространенным на предприятиях процессом шаговой формовки (JOE) по энергоемкости и постоянству кривизны основной части периметра. При производстве ТБД способом вальцевой формовки неравномерность деформации локализуется в области перехода от плоского участка к основному периметру. Для снижения неравномерности деформации вращение валков в начале прохода выполняется одновременно с перемещением верхнего валка. Для корректной реализации данной технологии требуется методика расчета величины погружения на заданный радиус на стадии перемещения верхнего валка. В статье представлены результаты численного эксперимента по определению кривизны заготовки на стадии перемещения верхнего валка. По результатам эксперимента построена регрессионная модель формирования кривизны и приведен алгоритм расчета перемещения. Полученная регрессионная модель с достаточной точностью позволяет рассчитывать величину погружения, что подтверждается результатами конечно-элементного моделирования. Результаты работы могут быть полезны для практической реализации и использованы как для составления технологических карт формовки, так и для построения конечно-элементных моделей.

*Ключевые слова:* трубы большого диаметра, вальцевая формовка, неравномерность деформации, валки, моделирование, метод конечных элементов, планирование эксперимента, регрессия.

### Введение

Одним из требований предъявляемых к трубам большого диаметра, является обеспечение геометрических характеристик, которые описываются отклонениями от круглости и цилиндричности. Наиболее высокие требования к геометрическим характеристикам предъявляются к трубам для морских участков газопроводов. Допуски формы таких труб достаточно малы (до менее 0,5 % от диаметра), учитывая диаметр и длину труб.

Производственные линии по изготовлению труб большого диаметра принципиально отли-

чаются друг от друга технологиями формовки основного периметра и догибки кромок. Реализованные на отечественных предприятиях технологии формовки труб можно разделить на прессовые (UO и JO) и вальцевую (TRB).

Существующие технологии формовки и сварки труб большого диаметра не позволяют получить форму трубы в пределах малых полей допусков, поэтому для обеспечения заданной точности размеров производят калибровку труб на экспандере.

Процесс экспандирования как операция холодной пластической деформации растяже-

ния в тангенциальном направлении профиля поперечного сечения трубы приводит к утонению стенки трубы, снижению пластических характеристик стали [1–3] и прочности сварного шва. С учетом этого максимальная величина раздачи при экспандировании строго ограничена техническими требованиями и не должна превышать 1,2 %.

Очевидно, что при ограниченной деформации экспандирования труба перед экспандером должна иметь минимально возможные локальные дефекты формы.

Технология производства ТБД с применением вальцевой формовки в России реализована на Волжском и Загорском трубных заводах, а также за рубежом в США, Китае и Саудовской Аравии. Технологии включают в себя фрезерование кромок листа, гибку листа в трехвалковой листогибочной машине, догибку прикромочных участков в двухвалковой клети с профилированными валками, сборку заготовки в сборо-сварочном агрегате, сварку внутреннего и наружного швов и экспандирование.

Неоднородность напряженно-деформированного состояния трубы перед экспандированием формируется на протяжении всего трубного передела, который начинается с формовки листа в трубную заготовку под сварку.

С целью снижения нагрузок на инструмент и приводы гибку листа в вальцах осуществляют в несколько проходов с увеличением погружения верхнего вала перед началом каждого прохода [4].

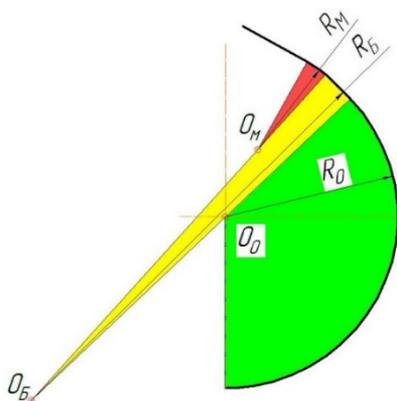


Рис. 1. Неравномерность деформации основного периметра трубной заготовки после формовки

Поперечное сечение (рис. 1) трубной заготовки после формовки имеет участки различной кривизны, которые можно разделить

на участок основного периметра радиусом  $R_0$ , участок «перегиба» радиусом  $R_M$ , участок пониженной кривизны радиусом  $R_B$  и плоский участок.

Форма очага деформации при погружении отличается от формы очага деформации при вращении [5–7], что при одном и том же положении нажимного вала относительно нижних валков приводит к образованию неравномерности деформации на переходе от плоского участка к основному.

Величина неравенства  $R_B > R_0 > R_M$  зависит от отношения диаметра верхнего вала к диаметру трубы  $\frac{D}{D_m}$ , а также от технологии и режимов формовки. Чем меньше параметр  $\frac{D}{D_m}$ , тем выше разница радиусов участков. Также при формовке в один проход неравномерность деформации больше, чем в несколько проходов.

Для придания плоским участкам кривизны основного периметра выполняют догибку кромок в двухвалковой клети с профилированными валками. Уровнять кривизну остальных участков возможно только в процессе экспандирования.

В работе [7] исследованы причины появления участков радиусами  $R_M$  и  $R_B$  и предложена технология, обеспечивающая более монотонный переход от плоского участка к участку основного периметра.

Суть технологии заключается в последовательности работы приводов вращения валков и погружения нажимного вала, при которой: вначале выполняется погружение верхнего вала на некоторую величину  $H_1$ , при котором выполняется условие  $R_M = R_0$ , затем выполняется вращение валков с дальнейшим погружением до величины  $H_2$ , после чего погружение останавливается, а вращение продолжается вплоть до завершения прохода. Данная технология апробирована на конечно-элементной модели и применяется в условиях реального производства ТБД.

Для определения погружения  $H_2$  существуют различные методики расчета, в основе которых лежит метод аппроксимации формы очага деформации типовыми кривыми [8–12].

В настоящей работе определены зависимости для расчета величины погружения  $H_1$  на заданный радиус, поскольку для условий вальцевой формовки таких зависимостей в литературе не обнаружено.

**Методы исследования**

Модель формирования кривизны в процессе погружения валка строилась методом регрессионного анализа. Коэффициенты регрессии определялись из результатов дробного факторного эксперимента, проведенного методом конечных элементов [13–15].

**Постановка задачи исследования**

Исследуемая модель очага деформации представлена на рис. 2б в виде «черного ящика», в котором определяющими параметрами (факторами) являются:  $L$  – межцентровое расстояние нижних валков, мм;  $D$  – диаметр верхнего валка, мм;  $H$  – погружение верхнего вала, мм. Параметром отклика приня

т наружный радиус  $r_i$  заготовки в плоскости  $A-A$  (рис. 2а).

Анализ результатов моделирования изгиба заготовки в отдельно взятых вариантах показал, что в сечении  $A-A$  (см. рис. 2б) зависимость  $r(H)$  имеет нелинейный характер. Функция изменения радиуса от погружения имеет вид  $r(H) = \frac{1}{H}$ .

С учетом нелинейности модели принят трехуровневый план вида  $N = 3^k$ , где  $N = 9$  – число опытов,  $k = 3$  – количество факторов. С целью снижения числа опытов принята 1/8 реплика от полного факторного плана.

Уровни и интервалы варьирования факторов представлены в табл. 1.

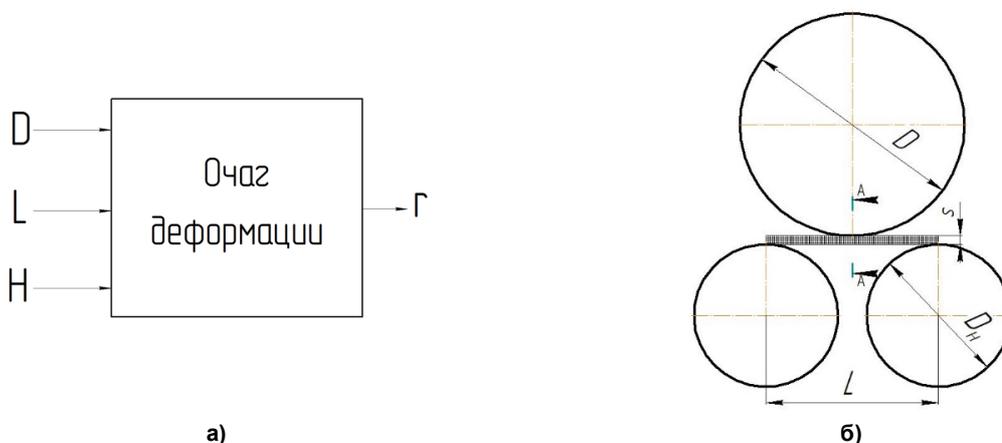


Рис. 2. Модель системы «валки – заготовка»: а – схема «черный ящик»; б – структурная схема

Независимые переменные

Таблица 1

| Наименование и обозначение факторов | Уровни варьирования, мм |          |          | Интервал варьирования, мм |
|-------------------------------------|-------------------------|----------|----------|---------------------------|
|                                     | Минимум                 | Середина | Максимум |                           |
| $L$                                 | 600                     | 700      | 800      | 100                       |
| $D$                                 | 260                     | 580      | 900      | 320                       |
| $H$                                 | 15                      | 45       | 75       | 30                        |

Матрица планирования эксперимента

Таблица 2

| № опыта | Факторы  |          |          | Зависимая переменная $r$ , мм |
|---------|----------|----------|----------|-------------------------------|
|         | $L$ , мм | $D$ , мм | $H$ , мм |                               |
| 1       | 800      | 260      | 45       | 249,93                        |
| 2       | 800      | 580      | 15       | 3327,17                       |
| 3       | 600      | 260      | 15       | 917,71                        |
| 4       | 800      | 900      | 75       | 340,39                        |
| 5       | 700      | 900      | 15       | 2004,45                       |
| 6       | 600      | 900      | 45       | 324,32                        |
| 7       | 700      | 580      | 45       | 222,66                        |
| 8       | 700      | 260      | 75       | 113,74                        |
| 9       | 600      | 580      | 75       | 218,82                        |

Параметры опытов и значение зависимой переменной  $r$  представлены в табл. 2.

В конечно-элементной модели валки задавались как абсолютно жесткие тела. Нижние валки имели постоянный диаметр  $D_n = 500$  мм. Свойства модели листа задавались со следующими параметрами:  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа;  $\sigma_T = 550$  МПа,  $\Pi = 3 \cdot 10^3$  МПа.

Зависимая переменная  $r$  определялась согласно выражению

$$r = \frac{s}{2\varepsilon} \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – максимальные деформации в сечении А–А при конечном погружении.

Уравнение регрессии примет вид

$$r(L, H, D) = b_0 + b_1 \cdot L + b_2 \cdot D + \frac{b_3}{D} + \frac{b_4}{H} \quad (2)$$

где  $b_0 \dots b_4$  – коэффициенты регрессии.

В условиях проведенного эксперимента коэффициенты регрессии приняли следующие значения:

$$\begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -300 \\ 4 \\ -3 \\ -7,5 \cdot 10^5 \\ 4,9 \cdot 10^4 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Коэффициент корреляции составил  $R=0,91$ , что говорит о высоком уровне подбора регрессии.

### Обсуждение результатов

Для проверки адекватности регрессионной модели было проведено сопоставление полученных результатов с результатами конечно-элементного моделирования. Начальные условия соответствовали вариантам расчета № 4 и 8 табл. 2. Результаты сравнения представлены на рис. 3.

Для оценки универсальности регрессионной модели был произведен расчет формовки трубы  $\varnothing 720 \times 10$  мм в один проход на заданный радиус методом конечных элементов

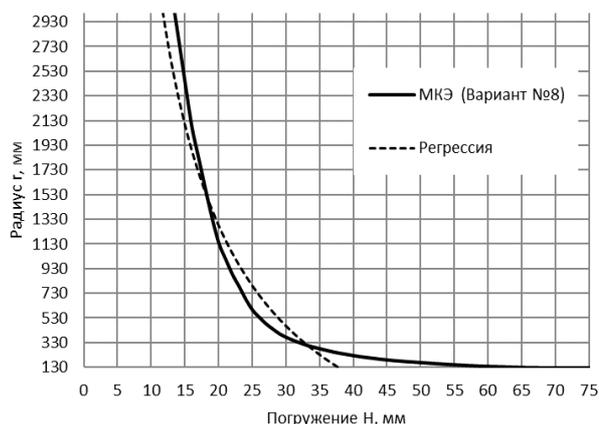
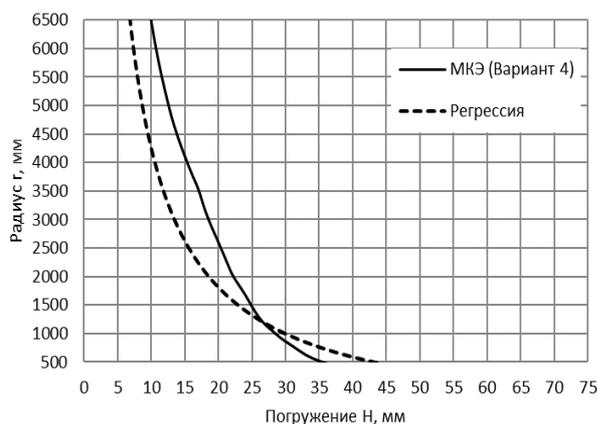


Рис. 3. Изменение радиуса кривизны при погружении верхнего валка

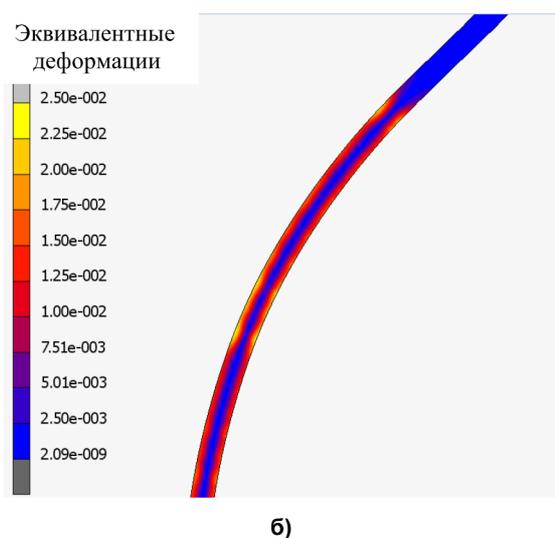
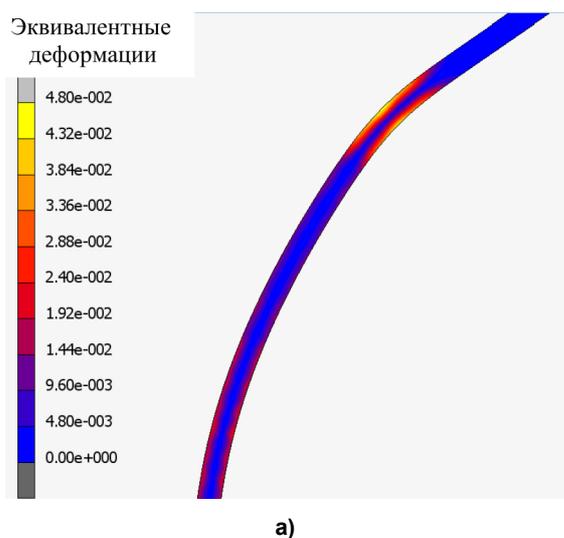


Рис. 4. Распределение остаточных деформаций на переходном участке при формовке: а – с отдельным погружением и вращением валков; б – с одновременным погружением и вращением валков

при условии, что  $D = 300$  мм,  $L = 600$  мм,  $s = 10$  мм,  $r = 332$  мм. По результатам моделирования установлено, что заданный радиус  $r$  заготовки обеспечивается при погружении  $H_2 = 65$  мм. По формуле (2) с учетом (3) первое погружение  $H_1 \approx 30$  мм.

На рис. 4 представлены сравнительные результаты моделирования формовки с раздельным и одновременным погружением и вращением валков.

#### Выводы

1. Исследован процесс формирования кривизны заготовки на контакте с нажимным

валком. Установлено, что при линейном увеличении погружения верхнего валка, изменение кривизны заготовки имеет выраженный нелинейный характер.

2. Разработана регрессионная модель для определения кривизны заготовки при погружении верхнего валка. Полученная модель позволяет производить расчет настроек машины вальцевой формовки для реализации технологии формовки с одновременной работой приводов погружения и вращения валков.

#### Литература

1. Аверкиев, Ю.А. *Технология холодной штамповки* / Ю.А. Аверкиев, А.Ю. Аверкиев. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
2. Махутов, Н.А. Влияние экспандирования труб на перераспределение остаточных напряжений после формовки / Н.А. Махутов, Д.А. Неганов, Е.П. Студёнов // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2020. – Т. 10, № 2. – С. 122–126.
3. Деформационное старение низкоуглеродистой трубной стали / М.А. Смирнов, И.Ю. Пышминцев, О.В. Варнак, А.О. Струин // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. – 2013. – Т. 13, № 1. – С. 129–133.
4. Лясковский, А.А. *Технология производства труб в условиях АО «ЗТЗ»* / А.А. Лясковский // *Трубы-2018: тр. XXII науч.-практ. конф.* – 2018. – Ч. 1. – С. 97–101.
5. Попов, Е.П. *Теория и расчет гибких упругих стержней* / Е.П. Попов. – М.: Наука, 1986. – 296 с.
6. Моделирование очага деформации при формовке листовой заготовки на трехвалковой гибочной установке / Г.П. Жигулев, М.Н. Скрипаленко, В.А. Фадеев, М.М. Скрипаленко // *Металлург*. – 2020. – № 4. – С. 66–70.
7. Ильичев, В.Г. *Технологические особенности и резервы улучшения геометрических характеристик при вальцевой формовке заготовки для труб большого диаметра* / В.Г. Ильичев, Я.Е. Залавин // *Сталь*. – 2016. – № 1. – С. 32–35.
8. Мошин, Е.Н. *Гибка и правка на ротационных машинах* / Е.Н. Мошин. – М.: Машиностроение, 1967. – 269 с.
9. Лысов, М.И. *Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки* / М.И. Лысов. – Л.: Машиностроение, 1966. – 236 с.
10. Нестеров, Г.И. *Определение параметров настройки гибочной валковой машины* / Г.И. Нестеров, С.В. Самусев, Д.В. Нестеров // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 2002. – № 11. – С. 33–36.
11. Шинкин, В.Н. *Упругопластическая деформация металлического листа на трехвалковых вальцах* / В.Н. Шинкин // *Молодой ученый*. – 2015. – № 13. – С. 225–229.
12. Залавин, Я.Е. *Методика расчета параметров формоизменения листовой заготовки в трехвалковой листогибочной машине* / Я.Е. Залавин, В.Г. Ильичев // *Трубы-2016: тр. XXII науч.-практ. конф.* – 2016. – Ч. 2. – С. 190–192.
13. Fisher, R.A. *The Design of Experiments* / R.A. Fisher. – 9th Edition. – Hafner Press, 1971. – 256 p.
14. Адлер, Ю.П. *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий* / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 269 с.
15. Antony, J. *Design of Experiments for Engineers and Scientists* / J. Antony. – Elsevier, 2014. – 155 p.

**Залавин Яков Евгеньевич**, начальник сектора технологии формовки труб, ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (ОАО «РосНИТИ»), г. Челябинск; zalavin@rosniti.ru.

*Поступила в редакцию 21 августа 2020 г.*

---

DOI: 10.14529/met200403

## CALCULATION OF THE PARAMETERS OF THE ROLL FORMING WITH THE PURPOSE OF MINIMIZING THE UNIFORMITY OF DEFORMATION IN THE CROSS SECTION

**Ya.E. Zalavin**, zalavin@rosniti.ru

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

Currently, the market for large diameter pipes (LDP) is developing in an environment of over-capacity, which puts pipe manufacturers in this segment in a highly competitive environment. Sea crossings, zones of increased seismic activity, high operating pressure of pipelines determine stringent requirements for the strength, geometric and operational characteristics of pipes. Improving the dimensional accuracy of large-diameter pipes is an urgent task for most manufacturers of these products. One of the ways to improve the accuracy of pipes is to minimize the non-uniformity of deformation in the cross-section of the pipe after shaping operations. The roll forming process (TRB) has an advantage over the most common step forming process (JOE) in factories in terms of energy intensity and consistency of curvature of the main part of the perimeter. In the production of LDP by the roll forming method, the uneven deformation is localized in the area of transition from the flat area to the main perimeter. To reduce the unevenness of deformation, the rotation of the rolls at the beginning of the pass is carried out simultaneously with the movement of the upper roll. When implementing this technology, a method is required for calculating the amount of immersion at a given radius at the stage of moving the upper roll. The article presents the results of a numerical experiment to determine the curvature of the workpiece at the stage of moving the upper roll. Based on the results of the experiment, a regression model for the formation of curvature is built and an algorithm for calculating the displacement is presented. The resulting regression model, with sufficient accuracy, allows you to calculate the amount of immersion, which is confirmed by the results of finite element modeling. The results of the work can be useful for practical implementation and are used both for drawing up technological maps of molding, and for building finite element models.

*Keywords: large diameter pipes, roll forming, non-uniformity of deformation, rolls, modeling, finite element method, experiment planning, regression.*

### References

1. Averkiev Yu.A., Averkiev A.Yu. *Tekhnologiya kholodnoy shtampovki* [Cold stamping technology]. Moscow, Machine building Publ., 1989. 304 p.
2. Makhutov N.A., Neganov D.A., Studenov E.P. [Effect of pipe expansion on the redistribution of residual stresses after molding]. *Science and technology of pipeline transport of oil and oil products*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 122–126. (in Russ.)
3. Smirnov M.A., Pyshmintsev I.Yu., Varnak O.V., Struin A.O. Strain aging of low-carbon pipeline steel. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 129–133. (in Russ.)
4. Lyaskovsky A.A. [Pipe production technology in the conditions of JSC “ZTZ”]. *Pipes-2018: Proceedings of the XXII Scientific and Practical Conference. Part 1*, 2018, pp. 97–101. (in Russ.)

5. Popov E.P. *Teoriya i raschet gibkikh uprugikh sterzhney* [Theory and calculation of flexible elastic rods]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 296 p.
6. Zhigulev G.P., Skripalenko M.N., Fadeev V.A., Skripalenko M.M. [Modeling of the deformation zone when forming a sheet blank on a three-roll bending machine]. *Metallurgist*, 2020, no. 4, pp. 66–70. (in Russ.)
7. Ilyichev V.G., Zalavin Ya.E. [Technological features and reserves for improving the geometric characteristics during roll forming of billets for large diameter pipes]. *Steel*, 2016, no. 1, pp. 32–35. (in Russ.)
8. Moshnin, E.N. *Gibka i pravka na rotatsionnykh mashinakh* [Bending and straightening on rotary machines]. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 1967. 269 p.
9. Lysov M.I. *Teoriya i raschet protsessov izgotovleniya detaley metodami gibki* [Theory and calculation of processes for manufacturing parts by bending methods]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1966. 236 p.
10. Nesterov G.I., Samusev S.V., Nesterov D.V. [Determination of the settings for the bending roll machine]. *Izv. vuzov. World Cup*, 2002, no. 11, pp. 33–36. (in Russ.)
11. Shinkin V.N. [Elastoplastic deformation of a metal sheet on three-roll rollers]. *Young Scientist*, 2015, no. 13, pp. 225–229. (in Russ.)
12. Zalavin Ya.E., Ilyichev V.G. [Methods for calculating the parameters of forming sheet blanks in a three-roll bending machine]. *Pipes-2016: Proceedings of the XXII Scientific and Practical Conference. Part 2*, 2016, pp. 190–192. (in Russ.)
13. Fisher R.A. *The Design of Experiments*. 9th ed. Hafner Press, 1971. 256 p.
14. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovsky Yu.V. Planning an experiment in the search for optimal conditions. Moscow, Nauka Publ., 1976. 269 p.
15. Antony J. *Design of Experiments for Engineers and Scientists*. Elsevier, 2014. 155 p.

*Received 21 August 2020*

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Залавин, Я.Е. Расчет параметров вальцевой формовки с целью минимизации неравномерности деформации заготовки в поперечном сечении / Я.Е. Залавин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 23–29. DOI: 10.14529/met200403

#### FOR CITATION

Zalavin Ya.E. Calculation of the Parameters of the Roll Forming with the Purpose of Minimizing the Uniformity of Deformation in the Cross Section. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 23–29. (in Russ.) DOI: 10.14529/met200403

---