

## СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОШИВКИ СВЕРЛЕННОЙ И СПЛОШНОЙ ЗАГОТОВКИ

**А.В. Красиков**<sup>1</sup>, KrasikovAV@vtz.ru  
**А.В. Выдрин**<sup>2, 3</sup>, VydrinAV@rosniti.ru  
**Д.Ю. Звонарев**<sup>3</sup>, zvonarevdi@susu.ru  
**А.А. Корсаков**<sup>2</sup>, Korsakov@rosniti.ru  
**А.Г. Ульянов**<sup>1</sup>, UlyanovAG@vtz.ru  
**С.А. Денисюк**<sup>1</sup>, DenisyukSA@vtz.ru

<sup>1</sup> АО «Волжский трубный завод», Волжский, Россия

<sup>2</sup> АО «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности»  
(АО «РусНИТИ»), Челябинск, Россия

<sup>3</sup> Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

**Аннотация.** В процессе производства бесшовных труб одной из основных операций является операция прошивки на ковоалковых станах. При данном процессе не все марки стали удается прошить в гильзу без появления дефектов на внутренней поверхности. К таким маркам стали относятся коррозионно-стойкие и малопластичные марки стали. Для производства труб из таких марок стали применяют полые заготовки. Однако остаются открытыми вопросы о целесообразности применения полых заготовок, каким диаметром должно быть отверстие и пр. В связи с этим в статье представлены результаты компьютерного моделирования прошивки сверленной и сплошной заготовки с целью проведения их сравнительного исследования. Для этого были проанализированы очаги деформации процесса прошивки, напряженно-деформированное состояние, скоростные и температурные параметры. Проведен расчет ресурса пластичности на основе критерия В.Л. Колмогорова для различных точек по радиусу и длине заготовки. Установлено, что наличие отверстия в заготовке практически не оказывает влияния на геометрические параметры гильзы, которые сопоставимы с геометрическими параметрами гильзы, полученной из сплошной заготовки. Выявлено, что наличие отверстия благотворно влияет на качество внутренней поверхности гильзы.

**Ключевые слова:** производство труб из нержавеющей марок стали, прошивка, компьютерное моделирование, МКЭ, пластичность, Qform 3D

**Для цитирования:** Сравнительное исследование процесса прошивки сверленной и сплошной заготовки / А.В. Красиков, А.В. Выдрин, Д.Ю. Звонарев и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2023. Т. 23, № 1. С. 30–37. DOI: 10.14529/met230104

Original article  
DOI: 10.14529/met230104

## COMPARATIVE STUDY OF THE PROCESS OF STITCHING OF DRILLED AND SOLID WORKPIECE

**A.V. Krasikov**<sup>1</sup>, KrasikovAV@vtz.ru  
**A.V. Vydrin**<sup>2, 3</sup>, VydrinAV@rosniti.ru  
**D.Yu. Zvonarev**<sup>3</sup>, zvonarevdi@susu.ru  
**A.A. Korsakov**<sup>2</sup>, Korsakov@rosniti.ru  
**A.G. Ulyanov**<sup>1</sup>, UlyanovAG@vtz.ru  
**S.A. Denisyuk**<sup>1</sup>, DenisyukSA@vtz.ru

<sup>1</sup> JSC "Volzhsky Pipe Plant", Volzhsky, Russia

<sup>2</sup> The Russian Research Institute of the Tube & Pipe Industries, Joint Stock Company  
(RusNITI JSC), Chelyabinsk, Russia

<sup>3</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** In the process of producing seamless pipes, one of the main operations is the flashing operation on the diaper mills. In this process, not all steel grades can be stitched into the sleeve without the appearance

of defects on the inner surface. Such steel grades include corrosion-resistant and low-plastic steel grades. Hollow blanks are used for the production of pipes from such steel grades. However, the question remains open about the advisability of using hollow blanks, what diameter the hole should be, etc. In this regard, the article presents the results of computer modeling of the firmware of a drilled and solid blank, in order to conduct their comparative study. To do this, the foci of deformation of the flashing process, the stress-strain state, speed and temperature parameters were analyzed. The calculation of the plasticity resource based on the criterion of V.L. Kolmogorov for various points in the radius and length of the workpiece was carried out. It is established that the presence of a hole in the workpiece has practically no effect on the geometric parameters of the sleeve and is comparable to the geometric parameters of the sleeve obtained from a solid blank. It was revealed that the presence of a hole has a beneficial effect on the quality of the inner surface of the sleeve.

**Keywords:** production of pipes from stainless steel grades, firmware, computer modeling, FEA, plasticity, Qform 3D

**For citation:** Krasikov A.V., Vydrin A.V., Zvonarev D.Yu., Korsakov A.A., Ulyanov A.G., Denisjuk S.A. Comparative study of the process of stitching of drilled and solid workpiece. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2023;23(1):30–37. (In Russ.) DOI: 10.14529/met230104

Трубы из нержавеющей марки стали находят все большее применение в различных отраслях промышленности. К ним, в частности, относятся объекты Госкорпорации «Росатом», заводы по производству сжиженного природного газа, пищевая индустрия и достаточно много других областей [1].

Увеличению объемов выпуска таких труб может способствовать освоение технологии их производства на ТПА с непрерывным раскатным станом. При этом первой операцией, связанной с пластической деформацией, является прошивка. В линиях ТПА с непрерывным станом в настоящее время в основном применяют станы винтовой прокатки. В то же время известно, что для этих станом существуют проблемы с качеством внутренней поверхности гильзы. Очевидно, что при прошивке заготовок из нержавеющей марки стали эти проблемы могут обостриться в связи с низкой пластичностью высоколегированных марки стали. Решения этих проблем могут быть получены за счет применения сверленных полых заготовок. Однако сравнительный анализ процесса прошивки сплошных и полых заготовок до сих пор не проводился.

В связи со сложностью экспериментального исследования процесса горячей прошивки, особенно в заводских условиях, подобный анализ может быть выполнен на основе компьютерного моделирования с помощью метода конечных элементов (МКЭ) [2].

Компьютерное моделирование было выполнено в среде Qform 3D, в результате которого определялись геометрические параметры получаемой гильзы, скорость деформации, показатель напряженного состояния в очаге деформации и температура гильзы.

На рис. 1 представлена гистограмма распределения толщины стенки по всей длине гильзы. На рис. 2 представлено изменение диаметра по длине гильзы.

В таблице представлены сводные данные по размерам гильз.

В соответствии с результатами, представленными на рис. 1 и 2, а также в таблице, можно сделать вывод о том, что при одной и той же настройке прошивного стана средние геометрические размеры полученных гильз (диаметры и толщины стенок) одинаковы для сплошной и полых заготовок. При этом распределение значений толщин стенки имеет больший разброс при использовании полых заготовок. Очевидно, это может быть объяснено тем, что при прошивке полых заготовок общая площадь свободного формоизменения больше и характер течения металла имеет больше степени свободы.

Так как по результатам расчета геометрические параметры гильзы аналогичны для двух расчетов, то для детальной оценки необходимо проанализировать изменение степени использования пластичности. С этой целью прежде всего следует определить пластичность металла.

Анализ литературных данных показал, что в настоящее время имеется большое количество информации по пластичности металлов и сплавов в холодном состоянии [3–6], однако системные исследования пластичности в горячем состоянии отсутствуют. Среди немногих работ в направлении исследования пластичности металлов в горячем состоянии можно отметить работу, в которой проведено комплексное исследование зависимости пластичности металлов от температуры, показателя

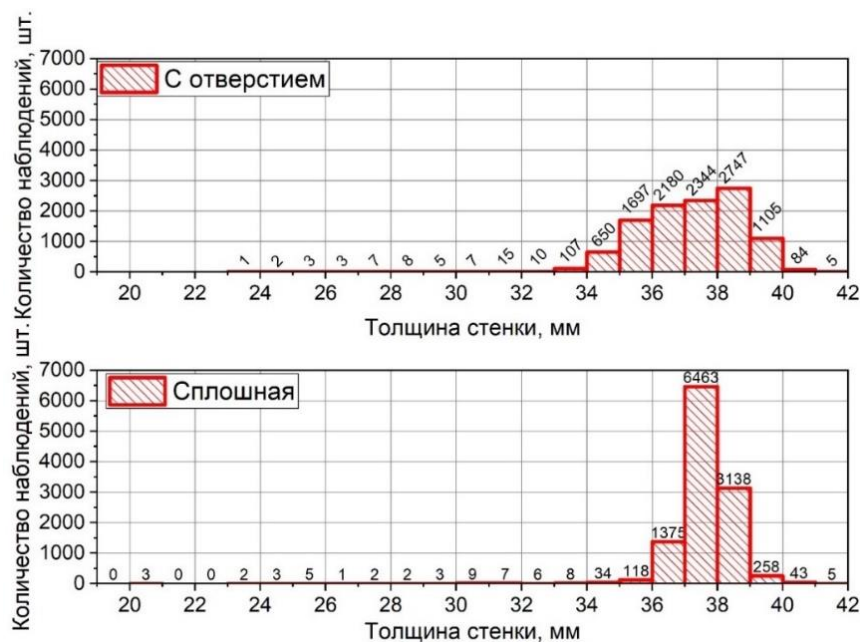


Рис. 1. Распределение толщины стенки гильзы  
Fig. 1. Distribution of the thickness of the sleeve wall

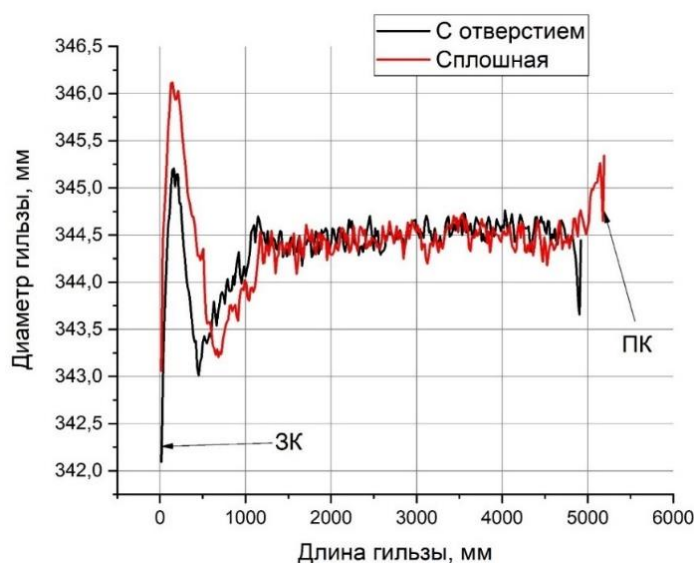


Рис. 2. Изменение диаметра гильзы по ее длине  
Fig. 2. Changing the diameter of the sleeve along its length

Параметры гильзы  
Sleeve parameters

| Модель                                    | 1                    | 2        |
|---|----------------------|----------|
| Тип заготовки                             | Полая (с отверстием) | Сплошная |
| Средняя толщина стенки гильзы, мм         | 37,2                 | 37,65    |
| Максимальная толщина стенки гильзы, мм    | 41,28                | 41,62    |
| Минимальная толщина стенки гильзы, мм     | 23,65                | 20,09    |
| Средний диаметр гильзы, мм                | 344,4                | 344,6    |
| Максимальный диаметр гильзы, мм           | 345,2                | 346,11   |
| Минимальный диаметр гильзы, мм            | 342,1                | 343,1    |
| Минимальный внутренний диаметр гильзы, мм | 265,2                | 268,9    |
| Длина гильзы, мм                          | 4921                 | 5226     |

напряженного состояния и параметра Лоде [7]. Однако в этой работе отсутствуют уравнения, аппроксимирующие полученные экспериментальные данные.

Поскольку для расчета степени использования ресурса пластичности металлов и сплавов необходимо иметь выражение, описывающее диаграмму пластичности, содержащее эмпирические коэффициенты, которые методически легко определить, была предложена зависимость вида [8]

$$\Lambda_p = a_0 \left( \frac{\Theta}{1000} \right)^{a_1 + a_{12} \frac{\sigma}{T}} \exp \left( a_2 \frac{\sigma}{T} \right), \quad (1)$$

где  $\Lambda_p$  – степень деформации сдвига, накопленная металлом к моменту разрушения;  $a_0, a_1, a_{12}, a_2$  – эмпирические коэффициенты;  $\Theta$  – температура металла;  $\frac{\sigma}{T}$  – показатель напряженного состояния металла.

Так, для стали марки 08X18H10T (непрерывнолитая заготовка) ранее было получено уравнение диаграммы пластичности [7]:

$$\Lambda_p = 2,55 \left( \frac{\Theta}{1000} \right)^{5,73 - 2,02 \frac{\sigma}{T}} \exp \left( 0,04 \frac{\sigma}{T} \right).$$

Для оценки степени истощения ресурса пластичности используют уравнение вида

$$\psi = \int_0^z \frac{H}{\Lambda_p} dz \leq 1,$$

где  $H$  – интенсивность скоростей деформаций сдвига;  $z$  – длина очага деформации.

В то же время следует отметить, что процесс прошивки сопровождается знакопеременной деформацией. При знакопеременной деформации наблюдается меньшая, чем при монотонной деформации, интенсивность накопления поврежденности металла [9–11].

В ходе моделирования на заготовку наносились точки, относительно которых фиксировались значения показателя напряженного состояния, интенсивности скорости деформации и температуры, а также положение в каждый момент времени процесса прошивки. Точки наносились на внутреннюю поверхность (для полый заготовки), на оси заготовки (для сплошной заготовки), а также на некотором расстоянии от оси заготовки (для сплошной заготовки).

На рис. 3а представлено распределение показателя напряженного состояния, скорости

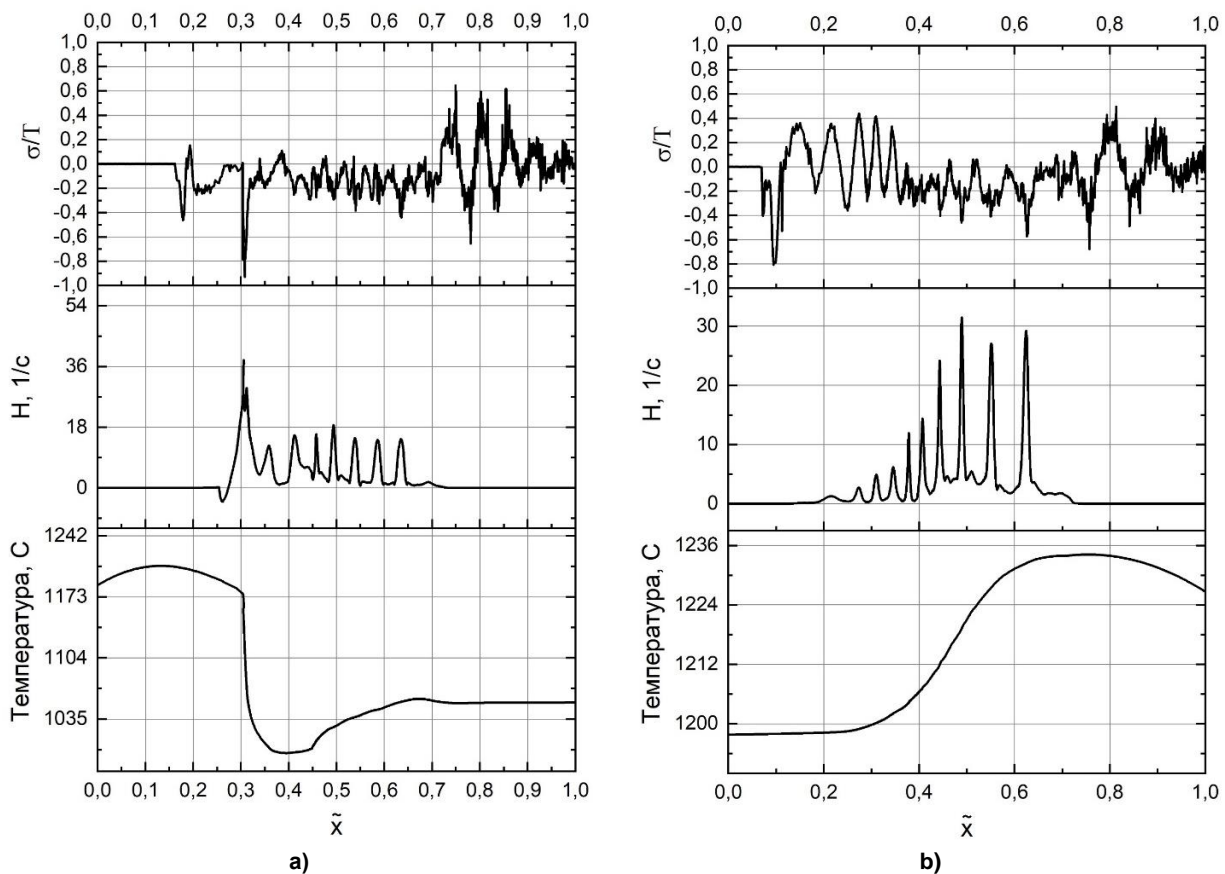


Рис. 3. Распределение показателя напряженного состояния, скорости деформирования и температуры металла: а) центральная часть сплошной заготовки; б) внутренняя поверхность полый заготовки  
Fig. 3. Distribution of the stress state, deformation rate and metal temperature: а) the central part of the continuous workpiece; б) the inner surface of the hollow workpiece

деформирования, температуры для внутренней поверхности полой заготовки, а на рис. 3b представлены аналогичные графики для осевой зоны сплошной заготовки.

На рис. 4 представлено распределение ресурса пластичности для центра сплошной заготовки и внутренней поверхности полой заготовки.

Как видно из рис. 4, степень истощения ресурса пластичности возрастает ступенчато, что характерно для процесса прошивки, так как в этом процессе сжимающие напряжения

(со стороны валков) сменяются растягивающими напряжениями (со стороны линеек).

Что характерно, для сплошной заготовки степень истощения ресурса пластичности в 2,7 раза превышает степень истощения ресурса пластичности для полой заготовки. Следовательно, сплошная заготовка более склонна к появлению внутренних дефектов в виде плен.

На рис. 5 представлено распределение максимального значения истощения ресурса пластичности по длине заготовки.

Как видно из рис. 5а, при прошивке

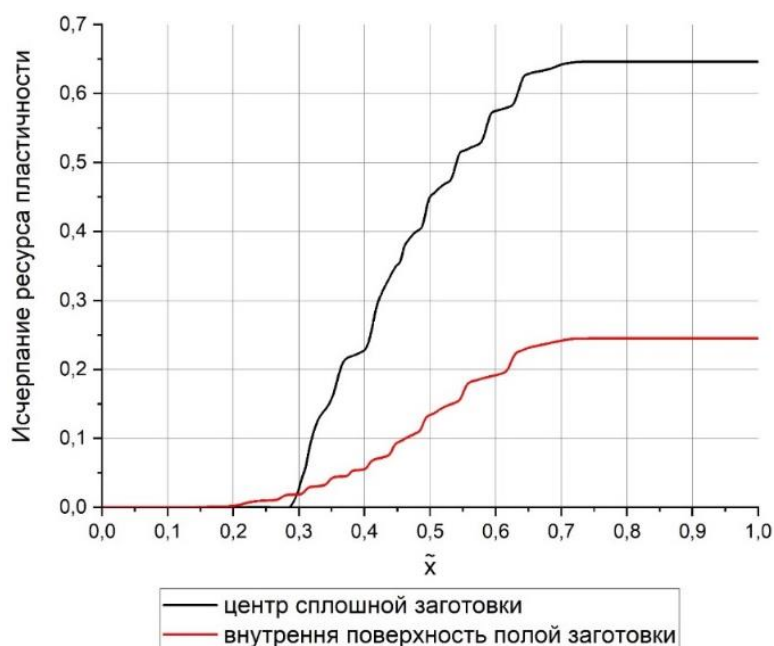


Рис. 4. Распределение истощения ресурса пластичности по длине очага деформации  
Fig. 4. Distribution of exhaustion of the plasticity resource along the length of the deformation focus

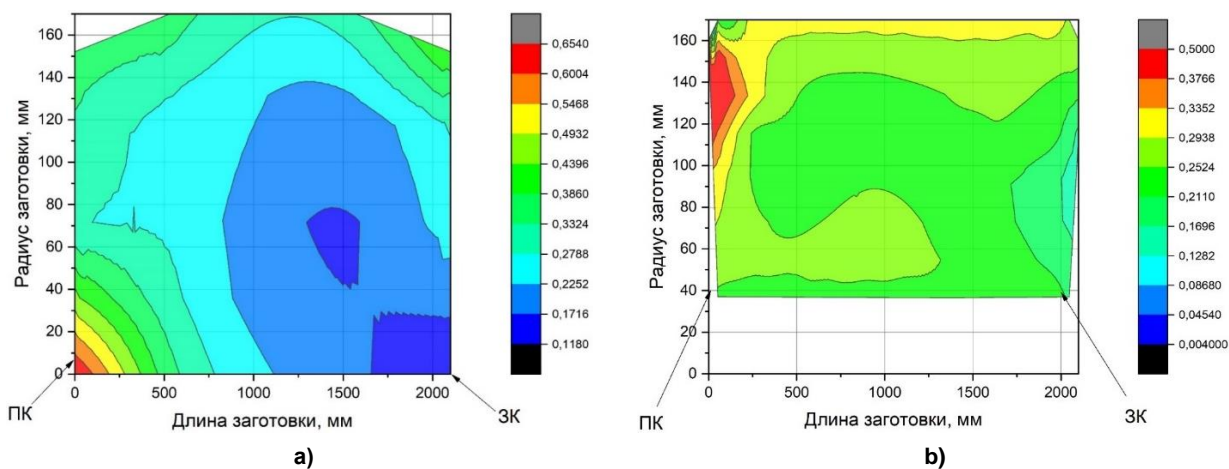


Рис. 5. Изменение ресурса пластичности заготовки относительно ее длины:  
а) сплошная заготовка; б) полая заготовка  
Fig. 5. Change in the resource of plasticity of the workpiece relative to its length:  
a) continuous blank; b) hollow blank

сплошной заготовки степень истощения ресурса пластичности распределена по объему очень неравномерно. Ближе к заднему концу почти по всей толщине поврежденность металла будет практически отсутствовать. Это хорошо коррелирует с изменением показателя напряженного состояния (см. рис. 3а), который на переднем конце может достигать значений 0,58, а на заднем конце он ниже нуля. Соответственно, на переднем конце степень истощения ресурса пластичности гораздо более значительная и в осевой зоне достигает максимального значения. Поэтому при неправильной настройке прошивного стана, наличии дефектов металлургического происхождения здесь возможно появление трещин с их последующей трансформацией во внутреннюю плену.

При прошивке поллой заготовки (рис. 5б) поврежденность металла по объему распределена более равномерно. Но при этом степень истощения ресурса пластичности в среднем несколько выше, чем при прошивке сплошной заготовки. Это также хорошо коррелирует с характером изменения показателя напряженного состояния (см. рис. 3б), который на протяжении практически всего процесса прошивки периодически принимает положительные значения. Полученная информация должна приниматься во внимание при проектировании дальнейшей технологии, включая

раскатку и редуцирование. То есть в целом гильза, полученная из поллой заготовки, имеет поврежденность выше, чем гильза, полученная из сплошной заготовки. Также следует отметить, что максимальное истощение ресурса пластичности имеет место на переднем конце заготовки, но, в отличие от сплошной заготовки, максимальное значение степени истощения ресурса пластичности имеет место, близкое к наружной поверхности. Поэтому при некачественной непрерывно-литой заготовке здесь может происходить расслоение металла.

Для поллой заготовки показатель истощения ресурса пластичности по всему объему заготовки практически одинаков.

Таким образом, при прошивке сплошной заготовки величина износа оправки выше, чем при прошивке поллой заготовки, в 1,5 раза.

Для сплошной заготовки наблюдаются области с критическим значением напряженного состояния, что может привести к разрыву металла на внутренней поверхности гильзы.

Показатель истощения ресурса пластичности для сплошной заготовки незначительно выше, чем для поллой заготовки (средние значения). Однако на переднем торце заготовки в осевой зоне показатель истощения ресурса пластичности больше в 2,7 раза, чем для переднего торца поллой заготовки.

### Список литературы

1. Волкова А.В. Рынок стальных труб – 2021 / Национальный исследовательский университет Высшей школы экономики. 2021. 69 с.
2. 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
3. Пластичность и прочность твердых тел при высоких давлениях / Б.И. Береснев, Е.Д. Мартынов, К.П. Родионов и др. М.: Наука, 1970. 162 с.
4. Исследование влияния температуры нагрева на технологическую пластичность стали 15Х13Н2 применительно к процессу винтовой прошивки / А.А. Корсаков, Д.В. Михалкин, Е.В. Алютина и др. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76, № 2. С. 169–177. DOI: 10.32339/0135-5910-2020-2-169-177
5. Викторов Н.А. Горячая пластичность стали 08Х18Н10Т // Металловедение и термическая обработка металлов. 2011. № 6. С. 8–9.
6. Выдрин А.В., Жуков А.С. Ресурс пластичности высокохромистой стали 08Х13Н4М1Ф при прессовании // Черные металлы. 2021. № 12. С. 59–62. DOI: 10.17580/chm.2021.12.10
7. Исследование пластичности хромистых сталей при прессовании труб / А.В. Выдрин, А.С. Жуков, Е.В. Храмов, В.Д. Николенко // Металловедение и термическая обработка металлов. 2020. № 1. С. 102–104.
8. Богатов А.А. Механические свойства и модели разрушения металлов. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2002. 329 с.
9. Пластичность и разрушение / В.Л. Колмогоров, А.А. Богатов, Б.А. Мигачев и др. М.: Металлургия, 1977. 336 с.

10. Трубное производство: учеб. / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М. Вавилкин, С.В. Самушев. 2-е изд., испр. и доп. М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. 970 с.

11. Влияние профиля матрицы на характер напряженно-деформированного состояния при прессовании труб / А.В. Выдрин, А.С. Жуков, А.С. Тумашев и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 49–55. DOI: 10.14529/met210306

#### References

1. Volkova A.V. *Rynok stal'nykh trub – 2021* [Steel Pipe Market – 2021]. National Research University of the Higher School of Economics; 2021. 69 p. (In Russ.)

2. 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

3. Beresnev B.I., Martynov E.D., Rodionov K.P. et al. *Plastichnost' i prochnost' tverdykh tel pri vysokikh davleniyakh* [Plasticity and strength of solids at high pressures]. Moscow: Nauka; 1970. 162 p. (In Russ.)

4. Korsakov A.A., Mikhalkin D.V., Alyutina E.V. et al. Study of the heating temperature influence on technological plasticity of the 15X13H2 grade steel (AISI 414) in respect to the screw piercing process. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tehnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*. 2020;76(2):169–177. (In Russ.) DOI: 10.32339/0135-5910-2020-2-169-177

5. Viktorov N.A. Hot ductility of steel 08KH18N10T. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal science and heat treatment*. 2011;6:8–9. (In Russ.)

6. Vydrin A. V., Zhukov A. S. Resource of plasticity of high-chromium steel 08X13N4M1F when pressing. *Stahl und eisen*. 2021;12:59–62. (In Russ.) DOI: 10.17580/chm.2021.12.10

7. Vydrin A.V., Zhukov A.S., Khramkov E.V., Nikolenko V.D. A study of the ductility of chromium steels in pressing of pipes. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal science and heat treatment*. 2020;1:102–104. (In Russ.)

8. Bogatov A.A. *Mekhanicheskiye svoystva i modeli razrusheniya metallov* [Mechanical properties and models of metal destruction]. Ekaterinburg: USTU – UPI; 2002. 329 p. (In Russ.)

9. Kolmogorov V.L., Bogatov A.A., Migachev B.A. et al. *Plastichnost' i razrusheniye* [Plasticity and destruction]; 1977. 336 p. (In Russ.)

10. Romantsev B.A., Goncharuk A.V., Vavilkin N.M., Samusev S.V. *Trubnoye proizvodstvo: uchebnik* [Pipe production. Textbook]. 2nd ed. Moscow: MISiS Publ.; 2011. 970 p. (In Russ.)

11. Vydrin A.V., Zhukov A.S., Tumashev A.S., Zvonarev D.Yu., Pavlova M.A. Influence of Die Profile on the Character of Stress-Deformed State during Extruding of Pipes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2021;21(3):49–55. (In Russ.) DOI: 10.14529/met210306

#### Информация об авторах

**Красиков Андрей Владимирович**, канд. техн. наук, главный прокатчик, АО «Волжский трубный завод», Волжский, Россия; KrasikovAV@vtz.ru.

**Выдрин Александр Владимирович**, д-р техн. наук, проф., ведущий научный сотрудник лаборатории продольной прокатки, АО «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (АО «РусНИТИ»), Челябинск, Россия; заведующий кафедрой процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; VydrinAV@rosniti.ru.

**Звонарев Дмитрий Юрьевич**, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; zvonarevdi@susu.ru.

**Корсаков Андрей Александрович**, канд. техн. наук, начальник отдела бесшовных труб, заведующий лабораторией винтовой прокатки, АО «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (АО «РусНИТИ»), Челябинск, Россия; Korsakov@rosniti.ru.

**Ульянов Андрей Георгиевич**, начальник лаборатории прокатки труб, АО «Волжский трубный завод», Волжский, Россия; UlyanovAG@vtz.ru.

**Денисюк Сергей Александрович**, ведущий инженер-технолог, АО «Волжский трубный завод», Волжский, Россия; DenisjukSA@vtz.ru.

***Information about the authors***

**Andrey V. Krasikov**, Cand. Sci. (Eng.), Chief roller, JSC “Volzhsky Pipe Plant”, Volzhsky, Russia; KrasikovAV@vtz.ru.

**Aleksandr V. Vydrin**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Leading Researcher of the Laboratory of Longitudinal Rolling, Joint Stock Company (RusNITI JSC), Chelyabinsk, Russia; Head of the Department of Processes and Machines for Metal Forming, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; VydrinAV@rosniti.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; zvonarevdi@susu.ru.

**Andrey A. Korsakov**, Cand. Sci. (Eng.), Head of Seamless Pipe Department, Head of the Screw Rolling Laboratory, The Russian Research Institute of the Tube & Pipe Industries, Joint Stock Company (RusNITI JSC), Chelyabinsk, Russia; Korsakov@rosniti.ru.

**Andrey G. Ulyanov**, Head of Pipe Rolling Laboratory, JSC “Volzhsky Pipe Plant”, Volzhsky, Russia; UlyanovAG@vtz.ru.

**Sergey A. Denisyuk**, Leading Process Engineer, JSC “Volzhsky Pipe Plant”, Volzhsky, Russia; DenisyukSA@vtz.ru.

***Статья поступила в редакцию 03.11.2022***

***The article was submitted 03.11.2022***