

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

Научная статья
УДК 621.774.35
DOI: 10.14529/met220105

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НАСТРОЕЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОШИВНОГО СТАНА НА ИЗМЕНЕНИЕ ДИАМЕТРА И ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ ГИЛЬЗЫ

А.В. Выдрин¹, vydrinav@susu.ru
В.Л. Нерозников², neroznikovvl@tagmet.ru
Д.Ю. Звонарев³, zvonaREV@rosniti.ru
К.В. Трубников², trubnikovkv@tagmet.ru

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² ТАГМЕТ, Таганрог, Россия

³ Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности (РусНИТИ), Челябинск, Россия

Аннотация. В производстве бесшовных труб массовым способом является применение прошивки заготовки на станах винтовой прокатки с последующей раскаткой на станах продольной прокатки. При этом к качеству и геометрическим параметрам готовых труб предъявляют повышенные требования. К геометрическим параметрам относят такие, как толщина стенки, диаметр, разнотолщинность. При этом на разнотолщинность в основном влияет качество гильзы. Известно, что одни и те же геометрические параметры гильзы (диаметр и толщина стенки) возможно получить при различном соотношении настроечных параметров, таких как расстояние между валками, расстояние между удерживающим инструментом, выдвигание оправки за пережим. Однако в этом случае разнотолщинность гильз будет различной. Кроме настроечных параметров на разнотолщинность влияет и степень износа инструмента, в частности оправка прошивного стана. Установлено, что по мере износа оправки прошивного стана диаметр гильзы монотонно увеличивается, что приводит к перераспределению толщины стенки гильзы, а соответственно и разнотолщинности гильзы. Поиску рациональных настроечных параметров с целью минимизации разнотолщинности и посвящена данная работа. Разработан план эксперимента с применением моделирования в среде QForm. Произведена обработка полученных гильз по геометрическим параметрам. На основе данных проведено вычисление коэффициента среднеквадратичной ошибки (RSME) для различных моделей регрессионных уравнений. Для выбранной модели построены номограммы распределения разнотолщинности, толщины стенки, диаметра гильзы в зависимости от настроечных параметров. Данные номограммы могут быть использованы в производственной практике для оперативного вычисления геометрических параметров гильз при изменении условий прошивки заготовок. В качестве примера были разработаны рекомендации для получения гильз с толщиной стенки 17 мм с минимальной разнотолщинностью.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, прошивка, настроечные параметры, точность, регрессионные уравнения

Для цитирования: 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

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SETTING PARAMETERS WASHING MACHINE ON THE CHANGE OF CASE WALL DIAMETER AND THICKNESS

A.V. Vydrin¹, vydrinav@susu.ru

V.L. Neroznikov², neroznikovvl@tagmet.ru

D.Yu. Zvonarev³, zvonarev@rosniti.ru

K.V. Trubnikov², trubnikovkv@tagmet.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² TAGMET, Taganrog, Russia

³ The Russian Research Institute of the Tube & Pipe Industries (RusNITI), Chelyabinsk, Russia

Abstract. In the production of seamless pipes, a mass method is the use of billet piercing at helical rolling mills with the first rolling at longitudinal rolling mills. At the same time, increased requirements are imposed on the quality and geometric parameters of finished pipes. Geometric parameters include such as wall thickness, diameter, thickness variation. In this case, the difference in thickness mainly affects the quality of the liner. It is known that the same geometric parameters of the sleeve (diameter and wall thickness) can be obtained at different distances between the rolls, the distance between the holding tool, the extension of the mandrel beyond the clamping. However, in this case, the difference in thickness of the liners will be different. In addition to the tuning parameters, the degree of tool wear, in particular, the mandrel of the piercing mill, also affects the thickness difference. It was found that as the mandrel of the piercing mill wears out, the diameter of the liner monotonically increases, which leads to a redistribution of the liner wall, and, accordingly, the difference in liner thickness. This work is devoted to the search for rational tuning parameters in order to minimize the thickness difference. An experimental plan was developed using modeling in the QForm environment. The obtained sleeves were processed according to the geometric parameters. Based on the data, the mean square error coefficient (RSME) was calculated for various models of regression equations. For the selected model, nomograms of the distribution of thickness variation, wall thickness, and sleeve diameter were constructed depending on the tuning parameters. These nomograms can be used in industrial practice for the operational calculation of geometric parameters when the conditions for piercing workpieces change. As a project, recommendations were developed for obtaining liners with a wall thickness of 17 mm with a minimum thickness difference.

Keywords: modeling, firmware, tuning parameters computer, accuracy, regression equations

For citation: 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

Для выпуска конкурентоспособной продукции необходимо использовать наилучшие доступные технологии и внедрять современные разработки в производственный процесс. Одними из главных показателей качества готовых труб являются их геометрические параметры, закладываемые еще на стадии первой деформирующей операции – прошивки. Именно от точности гильзы зависят все последующие показатели по толщине стенки и диаметру готовой трубы [1].

Немаловажным параметром в точности труб и гильз является разнотолщинность.

Основным видом разнотолщинности прошиваемых в двухвалковом прошивном стане гильз является эксцентричная поперечная раз-

нотолщинность. Этот вывод подтверждают исследования, выполненные с помощью регрессионного анализа [2, 3]. При этом отдельно оценивают величину концевой разнотолщинности и разнотолщинность в основной части гильзы. На концевую разнотолщинность влияют такие параметры, как обжатие перед носком оправки, коэффициент овализации, отклонение от перпендикулярности торца заготовки, точность выставления оси прошивки, равномерность нагрева заготовки. Разнотолщинность средней части зависит от коэффициента овализации, калибровки инструмента, угла подачи, степени износа инструмента, точности выставления оси прошивки и равномерности нагрева заготовки.

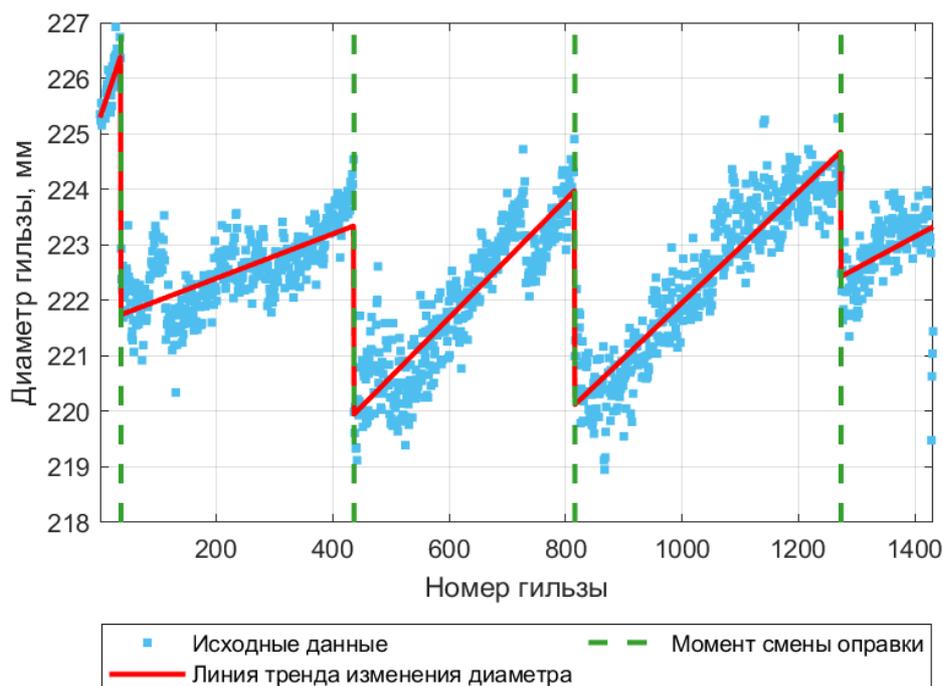


Рис. 1. Изменение диаметра гильзы по мере износа оправки прошивного стана
Fig.1. Changing the diameter of the sleeve as the mandrel of the piercing mill wears out

При реализации процесса прошивки заготовок при различных настроечных параметрах возможно получить одинаковые значения как по толщине стенки, так и по диаметру гильзы [4]. Однако в этом случае разнотолщинность может быть различная. Кроме этого, по мере износа оправки прошивного стана меняется и диаметр гильзы (рис. 1). Для оценки степени влияния износа на диаметр гильзы были проанализированы данные, полученные с использованием QAS системы, установленной на прошивном стане АО «ТАГМЕТ» KSW 1150 VD (см. рис. 1). Представленная выборка соответствует суточному объему производства. За это время в работе находилось 4 оправки. Как видно из рис. 1 по мере износа оправки диаметр гильзы монотонно повышается.

Это в частности приводит к тому, что при неизменных условиях по величине обжатий между валками, величина обжатия заготовки перед носком оправки постоянно увеличивается и тем самым повышается разнотолщинность гильз.

Таким образом, поиск путей уменьшения разнотолщинности гильз за счет подбора настроечных параметров является перспективной задачей.

С целью определения влияния настроечных параметров на величину разнотолщинно-

сти гильз был выбран полно факторный эксперимент (ПФЭ) для процесса прошивки заготовки диаметром 210 мм. Известны работы, в которых для определения геометрических размеров гильзы применяются программные продукты, реализующие метод конечных элементов [5], например QForm.

В качестве управляющих параметров были выбраны следующие факторы:

- выдвигание оправки за пережим с пределами изменения значения от 10 до 100 мм с шагом 30 мм;

- расстояние между валками с пределами изменения значения от 170 до 190 мм с шагом 5 мм;

- расстояние между дисками Дишера с пределами значения от 200 до 210 мм.

В результате ПФЭ был реализован со схемой $4^1 \cdot 5^1 \cdot 2^1 = 40$ экспериментов. В табл. 1 представлены значения управляющих параметров для каждого варианта моделирования, а также относительные характеристики процесса (обжатие перед носком оправки, обжатие в пережиме, коэффициент овализации).

В качестве выходных параметров фиксировались диаметр гильзы по длине и толщина стенки гильз. Методика оценки толщины стенки и диаметра оценивалась с использованием специализированного программного продукта [5, 6].

Значения настроечных параметров при моделировании процесса прошивки

Таблица 1

Table 1

Values of setting parameters when simulating the firmware process

№ эксперимента	Расстояние между валками, мм	Обжатие в пережиме, %	Выдвижение оправки за пережим, мм	Обжатие перед носком оправки, %	Расстояние между дисками, мм	Коэффициент овализации
1	170	20,2	10	19,6	200	1,18
2					210	1,24
3	175	17,9		17,3	200	1,14
4					210	1,20
5	180	15,6		14,9	200	1,11
6					210	1,17
7	185	13,2		12,6	200	1,08
8					210	1,14
9	190	10,9		10,2	200	1,05
10					210	1,11
11	170	20,2	40	17,6	200	1,18
12					210	1,24
13	175	17,9		15,3	200	1,14
14					210	1,20
15	180	15,6		12,9	200	1,11
16					210	1,17
17	185	13,2		10,6	200	1,08
18					210	1,14
19	190	10,9		8,2	200	1,05
20					210	1,11
21	170	20,2	70	15,6	200	1,18
22					210	1,24
23	175	17,9		13,2	200	1,14
24					210	1,20
25	180	15,6		10,9	200	1,11
26					210	1,17
27	185	13,2		8,5	200	1,08
28					210	1,14
29	190	10,9		6,2	200	1,05
30					210	1,11
31	170	20,2	100	13,5	200	1,18
32					210	1,24
33	175	17,9		11,1	200	1,14
34					210	1,20
35	180	15,6		8,8	200	1,11
36					210	1,17
37	185	13,2		6,5	200	1,08
38					210	1,14
39	190	10,9		4,1	200	1,05
40					210	1,11

Разнотолщинность гильз вычислялась как величина однократного относительного отклонения от математического ожидания средней толщины стенки.

Значения относительного отклонения вычислялись по уравнению

$$\bar{S} = \frac{S_i - S_{cp}}{S_{cp}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где S_i – текущее значение толщины стенки;
 S_{cp} – среднее значение толщины стенки.

Доверительный интервал по разнотолщинности рассчитывался как однократное отклонение от математического ожидания. В качестве примера на рис. 2 представлены гистограммы распределения разнотолщинности для различных настроечных параметров.

В табл. 2 представлены сводные результаты по определению геометрических параметров гильзы (средняя толщина стенки, разнотолщинность) согласно проведенному ПФЭ. Стоит отметить, что полученные результаты

сохожи с результатами замеров гильз автоматической системой QAS.

Используя программный продукт MATLAB, провели определение регрессионной модели. Результаты вычисленной среднеквадратичной

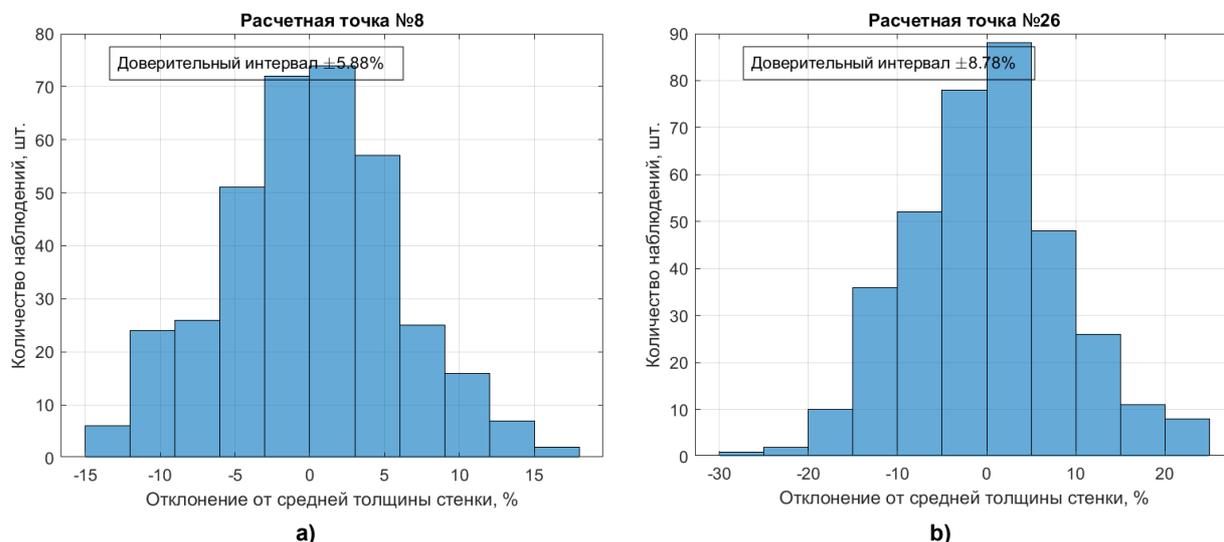


Рис. 2. Распределение разнотолщинности гильз при реализации настроечных параметров
Fig. 2. Distribution of case thickness differences in the implementation of tuning parameters

Результаты вычислений геометрических показателей гильзы
The results of calculating the geometric parameters of the sleeve

Таблица 2

Table 2

№ эксперимента	Средняя толщина стенки, мм	Разнотолщинность, ±%	Средний диаметр гильзы, мм
1	16,81	6,99	225,90
2	17,03	8,53	231,10
3	19,01	5,87	227,06
4	19,21	6,35	231,25
5	21,28	4,69	228,29
6	21,28	5,53	231,42
7	23,71	4,06	229,09
8	24,14	5,88	236,13
9	25,05	4,89	230,60
10	24,98	5,32	234,35
11	15,83	10,33	224,05
12	15,42	8,84	226,48
13	18,25	9,8	226,26
14	17,63	7,31	227,23
15	20,14	7,09	225,51
16	20,03	6,41	228,15
17	22,37	5,75	225,26
18	22,24	5,17	228,61
19	25,11	6,71	229,72
20	24,04	4,93	229,73
21	13,85	12,99	219,22
22	14,21	13,05	223,51
23	16,49	10,6	222,72
24	16,41	10,62	224,42
25	18,48	8,60	221,14

Окончание табл. 2
Table 2 (end)

№ эксперимента	Средняя толщина стенки, мм	Разнотолщинность, ±%	Средний диаметр гильзы, мм
26	18,75	8,78	225,35
27	20,82	5,19	221,10
28	21,07	6,54	225,46
29	22,86	5,64	224,26
30	23,08	4,78	225,35
31	14,49	12,25	219,90
32	14,71	12,49	222,57
33	16,03	10,93	220,41
34	16,25	11,28	223,09
35	17,87	9,16	220,81
36	18,14	9,66	223,82
37	19,74	7,52	221,53
38	20,09	8,11	224,71
39	21,40	6,68	222,97
40	21,85	7,16	226,15

Сводные данные результатов обучения регрессионных моделей

Таблица 3

Summary of learning outcomes for regression models

Table 3

Название модели	Средняя толщина стенки, мм		Разнотолщинность, ±%		Средний диаметр гильзы, мм	
	RSME	R ²	RSME	R ²	RSME	R ²
Linear [7]	0,19887	1,0	1,0153	0,84	1,3255	0,88
Interaction Linear [8]	0,19284	1,0	0,87169	0,88	1,32	0,88
Robust Linear	0,2	1,0	1,0176	0,84	1,363	0,87
Stepwise Linear	0,19887	1,0	0,87222	0,88	1,3255	0,88
Fine Tree [9]	1,2115	0,85	1,1348	0,8	2,3459	0,61
Medium Tree	3,0852	0	1,7287	0,53	3,7604	0
Coarse Tree	3,0852	0	2,5181	0	3,7604	0
Linear SVM [10]	0,39293	0,98	1,0322	0,83	1,4674	0,85
Quadratic SVM [11]	0,26311	0,99	0,82607	0,89	1,4409	0,85
Cubic SVM [12]	0,25852	0,99	0,60205	0,94	0,91528	0,94
Fine Gaussian SVM	0,75696	0,94	0,63013	0,94	1,9462	0,73
Medium Gaussian SVM	0,55338	0,97	0,51642	0,96	1,5979	0,82
Coarse Gaussian SVM	1,099	0,87	1,1413	0,79	2,6737	0,49
Boosted Trees [13]	1,486	0,77	0,78735	0,9	9,7834	0
Bagged Trees [14]	2,6337	0,27	1,7868	0,5	2,831	0,43
Squared Exponential GPR [15]	0,19332	1,0	0,25041	0,99	1,3042	0,88
Matern 5/2 GPR [16]	0,1933	1,0	0,19029	0,99	1,287	0,88
Exponential GPR	0,000487	1,0	0,00058	1,0	0,00071666	1,0
Rational Quadratic GPR	0,19332	1,0	0,21967	0,99	1,3042	0,88
Narrow Neural Network [17]	0,16747	1,0	0,71008	0,92	1,2241	0,89
Medium Neural Network	0,13575	1,0	0,35264	0,98	0,73677	0,96
Wide Neural Network [18]	0,13553	1,0	0,00098681	1,0	0,72444	0,96
Bilayered Neural Network	0,13553	1,0	0,17054	1,0	1,1166	0,91
Trilayered Neural Network	0,074267	1,0	0,31852	0,98	0,62814	0,97

ошибки (RSME) и коэффициента детерминации (R²) для различных моделей представлены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, для оценки разно-

толщинности наибольшая точность была получена в модели Exponential GPR (рис. 3а) по сравнению с другими моделями (рис. 3б).

На основе полученного уравнения были

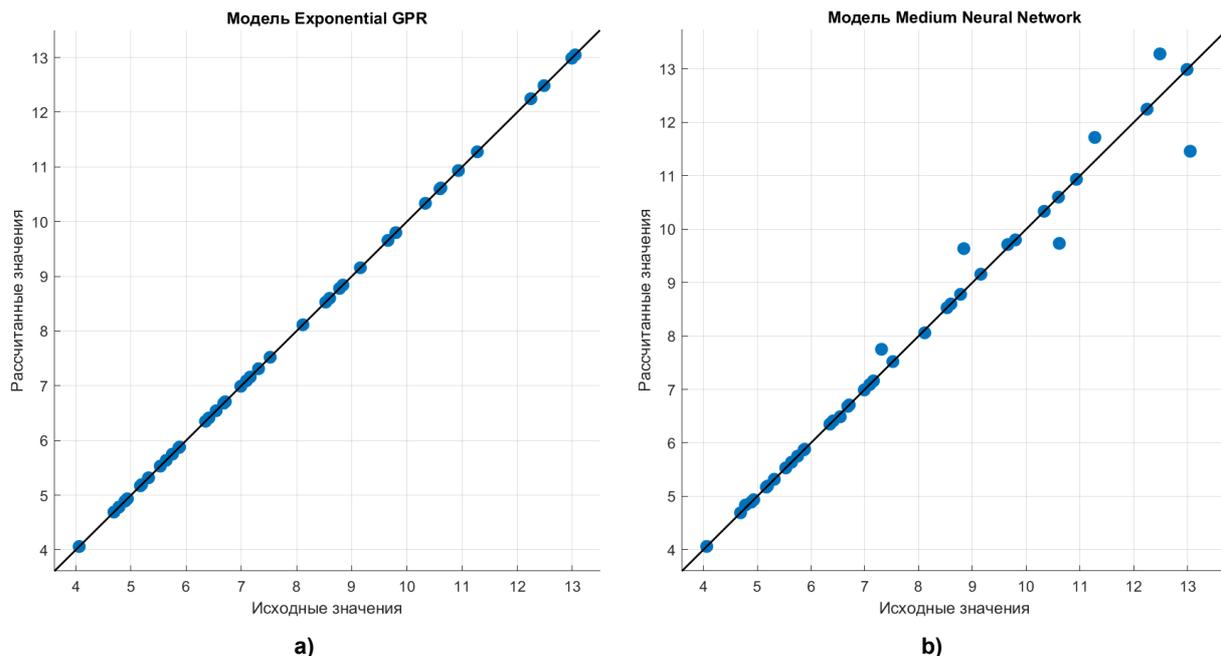


Рис. 3. Распределение отклонений рассчитанных значений разнотолщинности от исходных
Fig. 3. Distribution of deviations of the calculated values of thickness variation from the initial ones

построены номограммы распределения разнотолщинности (рис. 4), толщины стенки (рис. 5) и диаметра гильзы (рис. 6).

Из представленных рис. 4–6 можно сделать вывод о том, что при выдвигании оправки за пережим, равном 30 мм, расстоянии между валками 180 мм разнотолщинность со-

ставит 6,3 % при толщине стенки 20,6 мм, и диаметре 226,6 мм.

Для получения толщины стенки гильзы, равной 17 мм, с наименьшей разнотолщинностью необходимы следующие настроечные параметры: расстояние между валками – 171 мм, выдвигание оправки – 10 мм и расстояние

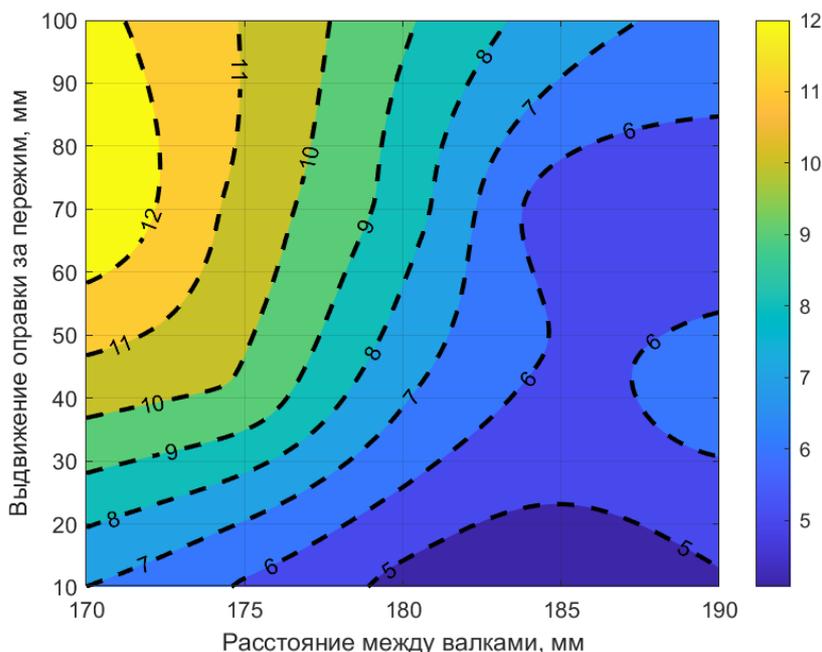


Рис. 4. Распределение разнотолщинности гильзы в зависимости от настроечных параметров
Fig. 4. The distribution of the variation in the thickness of the sleeve depending on the setting parameters

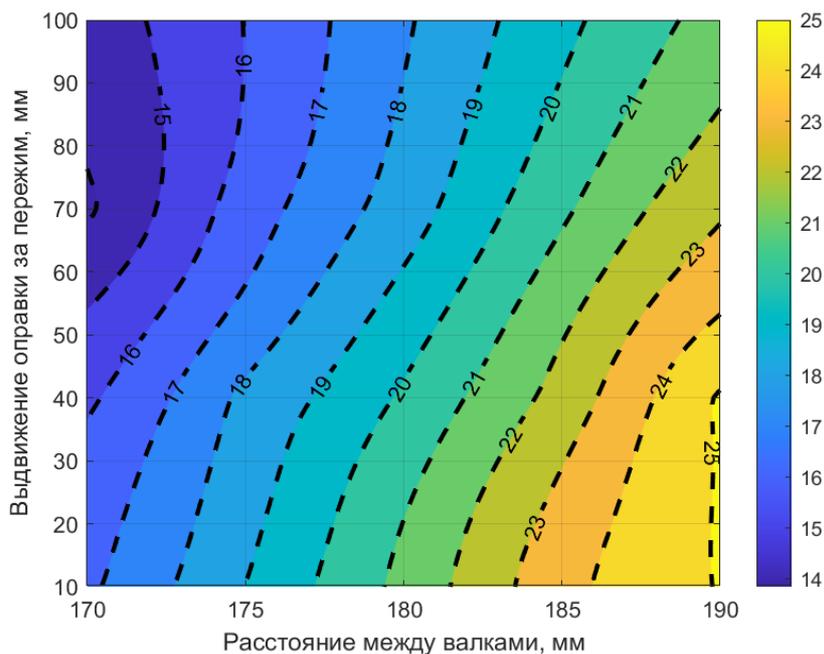


Рис. 5. Распределение толщины стенки гильзы в зависимости от настроечных параметров

Fig. 5. The distribution of the wall thickness of the sleeve depending on the setting parameters

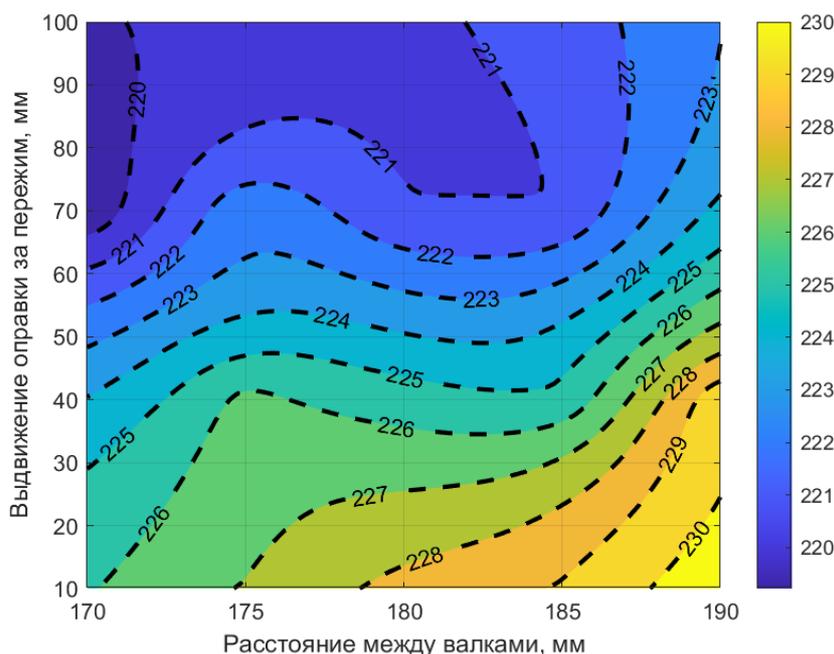


Рис. 6. Распределение диаметра гильзы в зависимости от настроечных параметров

Fig. 6. Sleeve diameter distribution depending on the setting parameters

между дисками Дишера – 200 мм. В этом случае разнотолщинность гильз составит 6,9 %.

В итоге полученные уравнения возможно использовать для определения рациональных настроечных параметров с целью получения гильз и труб с минимальной разнотолщин-

ностью. Кроме этого, показана возможность получения одинаковых геометрических параметров гильзы с использованием номограмм, что в свою очередь позволяет более оперативно проводить корректировки на пульте прошивного стана.

Список литературы

1. 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.
2. Причины разностенности гильз и труб на непрерывном трубопрокатном агрегате ТПА 30-102 и меры их устранения / В.Я. Остренко, И.А. Чекмарев, В.Л. Хмель и др. // Metallургическая и горнорудная промышленность. 1978. № 3. С. 22–24.
3. Эффективность гармонического анализа для определения точности труб / В.Я. Остренко, И.М. Суконник, А.П. Марголиус и др. // Metallургическая и горнорудная промышленность. 1977. № 1. С. 71–73.
4. Звонарев Д.Ю., Нерозников В.Л., Выдрин А.В. Определение настроек прошивного стана с помощью цифровых технологий // Черные металлы. 2019. № 9. С. 24–30.
5. Коликов А.П., Романцев Б.А., Алещенко А.С. Обработка металлов давлением: теория процессов трубного производства. М.: Издат. Дом НИТУ «МИСиС», 2019. 502 с.
6. 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
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020662611 Российская Федерация. Программа для расчета геометрических параметров труб при моделировании в среде QForm. № 2020661915; заявл. 08.10.2020; опубл. 16.10.2020 / Д.Ю. Звонарев, М.А. Павлова, Д.А. Ахмеров, М.А. Зинченко; заявитель Открытое акционерное общество «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (ОАО «РосНИТИ»).
8. DuMouchel W.H., O'Brien F.L. Integrating a robust option into a multiple regression computing environment // Computer science and statistics: Proceedings of the 21st symposium on the interface. American Statistical Association, Alexandria, VA, 1989. P. 297–302.
9. Holland P.W., Welsch R.E. Robust regression using iteratively reweighted least-squares // Communications in Statistics-theory and Methods. 1977. Vol. 6, no. 9. P. 813–827. <https://doi.org/10.1080/03610927708827533>
10. Loh W.-Y. Regression trees with unbiased variable selection and interaction detection // Statistica sinica. 2002. Vol. 12, no. 2. P. 361–386.
11. Waugh S.G. Extending and benchmarking Cascade-Correlation: extensions to the Cascade-Correlation architecture and benchmarking of feed-forward supervised artificial neural networks. PhD thesis. University of Tasmania, 1995.
12. The population biology of abalone (*Haliotis* species) in Tasmania. I. Blacklip abalone (*H. rubra*) from the north coast and islands of bass strait / W.J. Nash, T.L. Sellers, S.R. Talbot et al. Sea Fisheries Division, Technical Report 48, 1994. <https://doi.org/10.14264/uql.2016.814>
13. Kecman V., Huang T.-M., Vogt. M. Iterative Single Data Algorithm for Training Kernel Machines from Huge Data Sets: Theory and Performance // Support Vector Machines: Theory and Applications / Edited by Lipo Wang. Berlin: Springer-Verlag, 2005. P. 255–274. https://doi.org/10.1007/10984697_12
14. Friedman J.H. The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction. Springer open, 2017.
15. Friedman J.H. Greedy function approximation: A gradient boosting machine // Annals of statistics. 2001. Vol. 29, iss. 5. P. 1189–1232. DOI: 10.2307/2699986
16. Nocedal J., Wright S. Numerical optimization. Springer Science & Business Media, 2006.
17. Convergence properties of the Nelder–Mead simplex method in low dimensions / J.C. Lagarias, J.A. Reeds, M.H. Wright, P.E. Wright // SIAM Journal on optimization. 1998. Vol. 9, no. 1. P. 112–147. <https://doi.org/10.1137/s1052623496303470>
18. Glorot X., Bengio Y. Understanding the difficulty of training deep feedforward neural networks // Proceedings of the thirteenth international conference on artificial intelligence and statistics. JMLR Workshop and Conference Proceedings, 2010. P. 249–256.

References

1. 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.)
2. Ostrenko V.Ya., Chekmarev I.A., Khmel' V.L. et al. [Causes of difference in wall thickness of sleeves and pipes on a continuous pipe-rolling machine TPA 30-102 and measures to eliminate them]. *Metallurgical and mining industry*. 1978;(3):22–24. (In Russ.)
3. Ostrenko V.Ya., Sukonnik I.M., Margolius A.P. et al. [Efficiency of harmonic analysis to determine the accuracy of pipes]. *Metallurgical and mining industry*. 1977;(1):71–73. (In Russ.)
4. Zvonarev D.Yu., Neroznikov V.L., Vydrin A.V. [Determination of piercing mill settings using digital technologies]. *Ferrous metals*. 2019;(9):24–30. (In Russ.)
5. Kolikov A.P., Romantsev B.A., Aleshchenko A.S. *Obrabotka metallov davleniem: teoriya protsessov trubnogo proizvodstva* [Processing of metals by pressure: theory of pipe production processes]. Moscow: MISIS Publ; 2019. 502 p.
6. 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
7. Zvonarev D.Yu., Pavlova M.A., Akhmerov D.A., Zinchenko M.A. *Programma dlya rascheta geometricheskikh parametrov trub pri modelirovanii v srede QForm* [Program for calculating the geometric parameters of pipes when modeling in the QForm environment]. Certificate of state registration of the computer program RF, no. 2020662611, 2020.
8. DuMouchel W.H., O'Brien F.L. Integrating a robust option into a multiple regression computing environment. In: *Computer science and statistics: Proceedings of the 21st symposium on the interface*. American Statistical Association, Alexandria, VA; 1989. P. 297–302.
9. Holland P.W., Welsch R.E. Robust regression using iteratively reweighted least-squares. *Communications in Statistics-theory and Methods*. 1977;6(9):813–827. <https://doi.org/10.1080/03610927708827533>
10. Loh W.-Y. Regression tress with unbiased variable selection and interaction detection. *Statistica sinica*. 2002;12(2):361–386.
11. Waugh S.G. Extending and benchmarking Cascade-Correlation: extensions to the Cascade-Correlation architecture and benchmarking of feed-forward supervised artificial neural networks. PhD thesis. University of Tasmania, 1995.
12. Nash W.J., Sellers T.L., Talbot S.R., Cawthorn A.J., Ford W.B. The population biology of abalone (*Haliotis* species) in Tasmania. I. Blacklip abalone (*H. rubra*) from the north coast and islands of bass strait. Sea Fisheries Division, Technical Report 48, 1994. <https://doi.org/10.14264/uql.2016.814>
13. Kecman V., Huang T.-M., Vogt M. Iterative Single Data Algorithm for Training Kernel Machines from Huge Data Sets: Theory and Performance. In: *Support Vector Machines: Theory and Applications*. Edited by Lipo Wang. Berlin: Springer-Verlag; 2005. P. 255–274. https://doi.org/10.1007/10984697_12
14. Friedman J.H. *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction*. Springer open, 2017.
15. Friedman J.H. Greedy function approximation: A gradient boosting machine. *Annals of statistics*. 2001;29(5):1189–1232. DOI: 10.2307/2699986
16. Nocedal J., Wright S. *Numerical optimization*. Springer Science & Business Media, 2006.
17. Lagarias J.C., Reeds J.A., Wright M.H., Wright P.E. Convergence properties of the Nelder–Mead simplex method in low dimensions. *SIAM Journal on optimization*. 1998;9(1):112–147. <https://doi.org/10.1137/s1052623496303470>
18. Glorot X., Bengio Y. Understanding the difficulty of training deep feedforward neural networks. In: *Proceedings of the thirteenth international conference on artificial intelligence and statistics. JMLR Workshop and Conference Proceedings*; 2010. P. 249–256.

Информация об авторах

Выдрин Александр Владимирович, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; vydrinav@susu.ru.

Нерозников Владимир Леонидович, начальник трубной лаборатории инженерно-технического центра, ТАГМЕТ, Таганрог, Россия; neroznikovvl@tagmet.ru.

Звонарев Дмитрий Юрьевич, канд. техн. наук, заведующий лабораторией моделирования технологических процессов, Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности (РусНИТИ), Челябинск, Россия; zvonarev@rosniti.ru.

Трубников Кирилл Вячеславович, ведущий инженер инженерно-технического центра, ТАГМЕТ, Таганрог, Россия; trubnikovkv@tagmet.ru.

Information about the authors

Aleksandr V. Vydrin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Processes and Machines for Forming Metals, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; vydrinav@susu.ru.

Vladimir L. Neroznikov, Head of the pipe laboratory of the engineering and technical center, TAGMET, Taganrog, Russia; neroznikovvl@tagmet.ru.

Dmitriy Yu. Zvonarev, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory for Modeling Technological Processes, The Russian Research Institute of the Tube & Pipe Industries (RusNITI), Chelyabinsk, Russia; zvonarev@rosniti.ru.

Kirill V. Trubnikov, Leading Engineer of the Engineering and Technical Center, TAGMET, Taganrog, Russia; trubnikovkv@tagmet.ru.

Статья поступила в редакцию 01.04.2021

The article was submitted 01.04.2021