

Соловійова І.А., Николаєнко Ю.М., Балакін В.Ф.

Удосконалення методик та програмного забезпечення технологічного проектування ділянок холодної роликрової прокатки

Soloviova I.A., Nykolaenko Yu.M., Balakin V.F.

Improvement of methods and software for technological design of cold roller rolling sections

Анотація. Мета роботи – розробка математичних моделей параметрів деформації для прокатки на станах ХПТР з впровадженням їх до програмного забезпечення технологічного проектування ділянок ХПТР. Дані для отримання моделей є практичні та експериментальні маршрути виробництва нержавіючих труб різного сортаменту на станах ХПТР. Дані структуровані та використано кореляційно-регресійний аналіз для моделювання. На основі отриманих моделей параметрів деформації розроблено програмне забезпечення, що вирішує питання проектування маршрутів виробництва холоднодеформованих труб на станах ХПТР. Результати роботи дають можливість скорочувати час проектування маршрутів та технології виробництва, отримувати нові варіанти маршрутів для вибору та оптимізації виробництва з метою скорочення проходів маршруту, витратного коефіцієнту металу та аналізу навантаження на обладнання.

Ключові слова: абсолютне обтиснення, деформація, математична модель, заготовка, труба, статистичний аналіз.

Abstract. The purpose of the work is to develop mathematical models of deformation parameters for rolling on CPTR mills with their implementation in the software for technological design of CPTR sections. The data for obtaining models are practical and experimental routes for the production of stainless-steel pipes of various assortments on HPTR mills. The data was structured and correlation-regression analysis was used for modeling. Based on the obtained deformation parameter models, software was developed that solves the issue of designing routes for the production of cold-formed pipes on CPTR mills. The results of the work make it possible to reduce the time for designing routes and production technologies, obtain new route options for selection and optimization of production in order to reduce route passes, metal consumption coefficient, and analyze the load on equipment.

Keywords: absolute compression, deformation, mathematical model, workpiece, pipe, statistical analysis.

Introduction. Despite the rapid development of highly intelligent technologies, it is impossible to imagine modern human life without metallurgy. Since this is the industry whose products, we use every day. Engineering activities are associated with the use of modern information technologies, computer programs, the ability to perform modeling, forecasting, programming to perform technological calculations at a professional level, implement them in the existing technological process and develop new production technologies.

Problem statement. The production of cold-deformed pipes of the same assortment leads to the use of different technological schemes for their manufacture, from blanks of different sizes for a different number of deformation cycles. When designing variants of routes for the production of cold-deformed pipes, it is necessary: to use in each pass of the route all possible variants of equipment for cold rolling of metal, to limit oneself to unified sizes of diameters and wall thickness of blanks, to limit the sizes of the initial blank to the assortment of blanks and to use deformation modes that ensure maximum use of the plastic properties of the

metal, these problems were raised when designing routes for the production of cold-deformed pipes of a separate assortment and for some groups of steels [1-5].

The purpose of the work is to develop mathematical models of deformation parameters for rolling a wide range of pipes for different groups of steels that have formed with the same deformation parameters on the CPTR mills, with their implementation in the software for technological design of CPTR sections, which is useful for designers, production specialists, researchers and students when performing course and diploma theses.

Research methods. The operating modes of the CPTR mills introduced at Ukrainian pipe plants, known methods of route calculations [1-5] were analyzed, data were generalized and regression models of deformation parameters were derived for new groups of steels and a wide range of products were derived. Algorithms were constructed, according to which software for calculating pipe production routes on CPTR mills was developed. In order to improve the methods



of calculating deformation parameters, regression-correlation analysis of generalized experimental and practical data was performed. Various approximation models were carefully analyzed and the most accurate ones were selected, according to which the corresponding software for calculating routes was developed.

Results of the study Analysis of routes and technological maps of stainless-steel pipe production at Ukrainian pipe plants led to the unification of the assortment of stainless-steel cold-formed pipes into 8

following groups (table 1) [1-6]. The purpose of unifying the assortment is to identify the same deformation parameters in the production of cold-formed pipes on CPTR mills. The maximum permissible compressions in diameter ($\Delta D_{\max}$) for pipes of each group of steels of the considered assortment, changes in wall thickness during rolling of pipes of different assortment on CPTR mills were determined based on practical and experimental data.

Table 1 - Assortment of cold-formed pipes by steel groups

Group	Type of pipes
1	General purpose (austenitic stainless steel)
2	High quality (austenitic stainless steel)
3	General purpose (stainless ferritic)
4	With particularly high quality and precision requirements (stainless and carbon)
5	General purpose (10, 20, 15X, 20X, 20K, 10G2)
6	Improved quality (20A, 35, 15XM, 15X5M, 30XMA, 50XMA, 38XA, 38XMUA, 40X, 12X1MF, 12XN3A)
7	Hardly deformable (45, 50, 30KhGSA, EI-712)
8	Special thin-walled austenitic stainless steels

An algorithm for determining workpiece dimensions when designing production routes has been developed, which is represented by the following calculation stages:

The maximum diameter of the workpiece before passing through the CPTR mill is defined as:

$$D_0 \leq D_{got} + \Delta D_{\max}, \quad (1)$$

where D_{got} is the diameter of the finished pipe, mm;

D_0 – workpiece diameter, mm;

$\Delta D_{\max}$ – maximum crimping diameter, mm.

The steel groups hereinafter correspond to the groups indicated in Table 1.

Data received $\Delta D_{\max}$ are presented as graphs of dependence on the size of the finished product and

approximated by regression equations. The results of the approximation are presented in Figures 1, 2.

The graphs below show pointwise practical and experimental data that are approximated by regression equations. Figures 1-5 – Definition of regression models $\Delta D_{\max}$ for different steel groups and assortment. Figures 6-7 – definition of regression models for calculating the wall thickness of the workpiece.

Comparison of statistical data and calculations using regression models (Fig. 1, 2) allows us to select models (1, 2) that are accepted for automated route calculation for 1-3 product groups:

$$\Delta D = 1,6481 \ln(D) - 1,5542, \quad (1)$$

for 4-7 product groups:

$$\Delta D = 0,8241 \ln(D) + 0,2229. \quad (2)$$

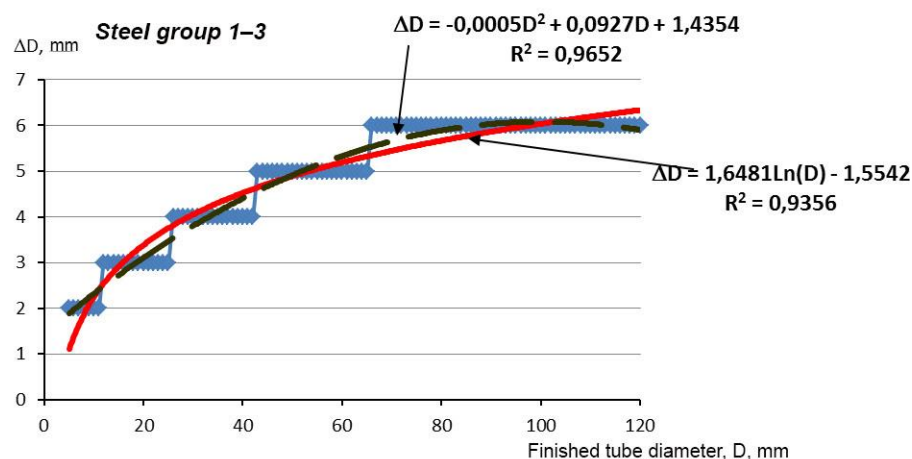
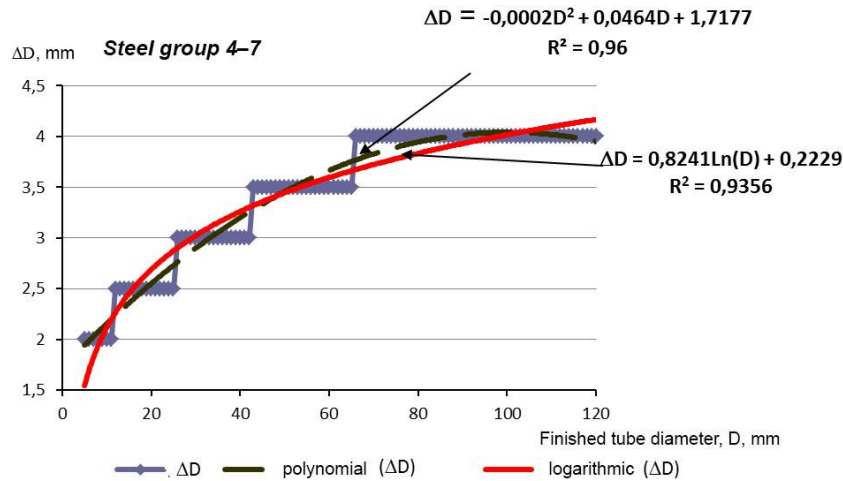


Fig. 1. Maximum pipe compression by diameter $\Delta D_{\max}$ on CPTR mills for steel groups 1-3

Fig. 2. Maximum pipe diameter crimping $\Delta D_{\max}$ on CPTR mills for steel groups 4-7

For ultra-thin-walled stainless steel pipes (group 8), the dependence ΔD was studied on D , t , t/D for the states ХПТР 6-15, ХПТР 15-30, ХПТР 30-60 (Fig. 3-5). The points on the graphs correspond to practical

data, the curved lines are approximations of the data by equations.

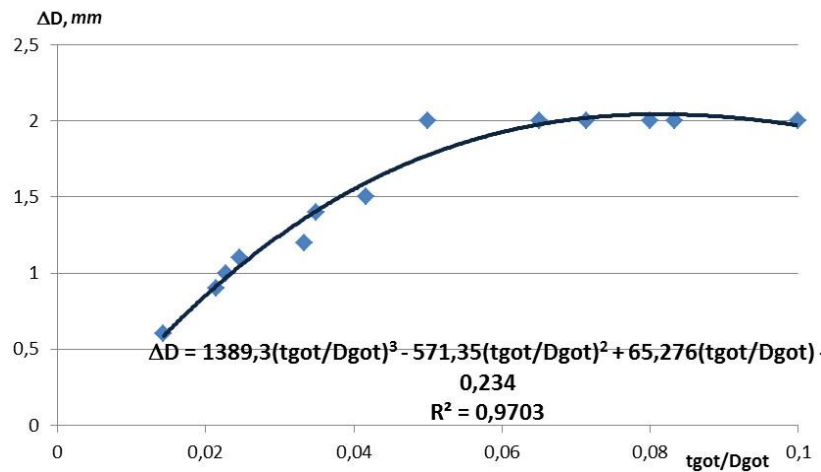


Fig. 3. Maximum pipe diameter crimping on CPTR 6-15 mills for steel groups 8

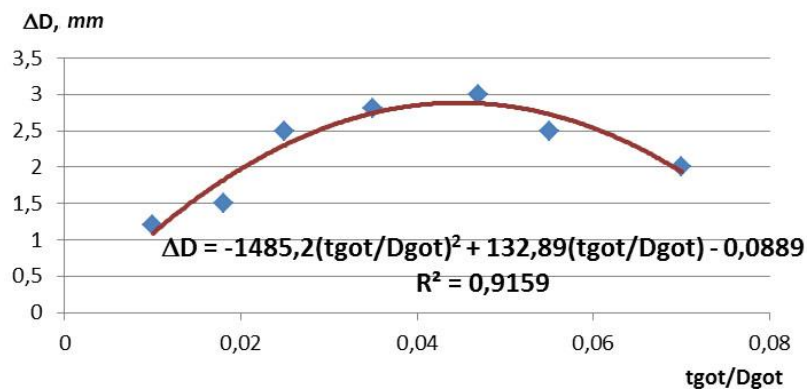


Figure 4 - Maximum pipe diameter crimping on CPTR 15-30 mills for steel groups 8

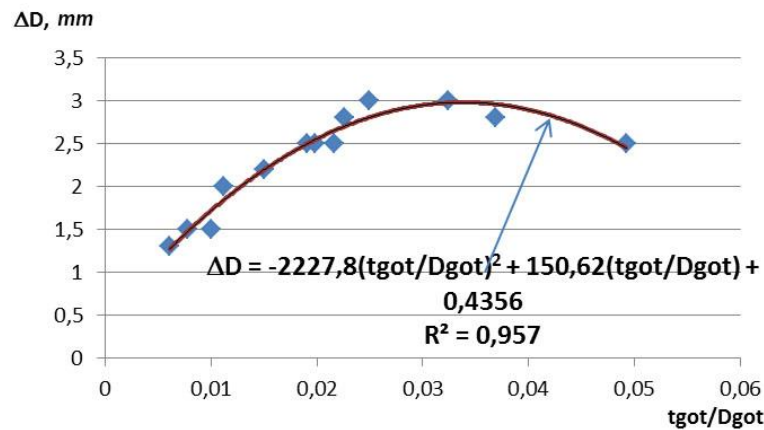


Fig. 5. Maximum pipe diameter crimping on CPTR 30-60 mills for steel group 8

To calculate the thickness of the workpiece wall, we analyzed practical and experimental data for each CPTR state (for groups 1-3, these are CPTR states 8-15, 15-30, 30-60, 60-120, Fig. 6, for group 8, CPTR states 6-15, 15-30, 30-60, Fig. 7) and obtained models for each CPTR state.

In Figures 6-7 the following notations are used:
 t_{got} – wall thickness of the finished (reducing) pipe;
 t_z – the thickness of the workpiece wall.

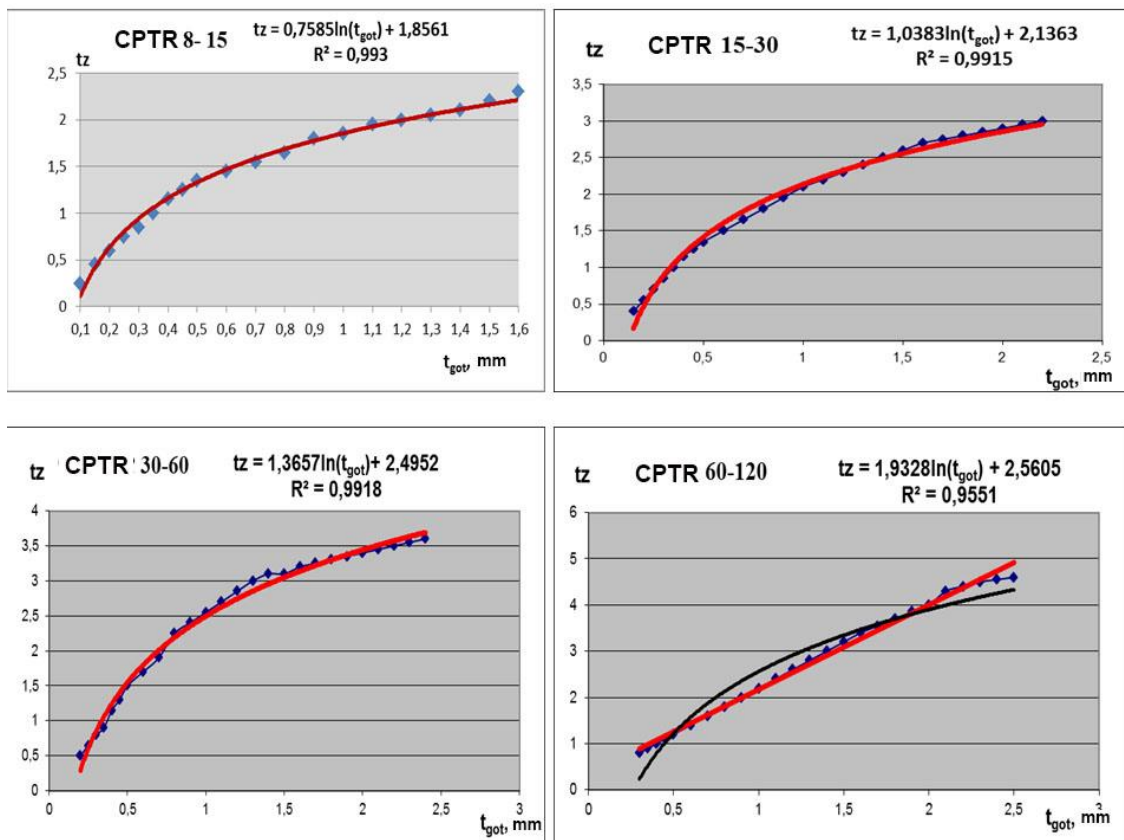


Fig. 6. Approximation by regression models of the values of the billet wall thickness according to data for pipes made of stainless-steel grades (Groups 1-3)

For carbon and alloy steels (group 4-7):
status of the CPTR 8-15:

$$t_z = 0,4858 \cdot \ln(t_{got}) + 1,6734;$$

status of the CPTR 15-30:

$$t_z = 0,7047 \cdot \ln(t_{got}) + 1,9517.$$

The type of dependence of the wall thickness of the billet on the wall thickness of the finished pipe is logarithmic $t_z = a \cdot \ln(t_{got}) + b$, where the coefficients a , b are determined by the type of mill. For the use of models in the program for calculating routes, equations

(6) were unified $t_z(t_{got}, stan())$ for steel groups 1-3, where $stan$ - types of CPTR: 8, 15, 30, 60:

$$a = 0,0217 \cdot s \tan + 0,661 \quad (4)$$

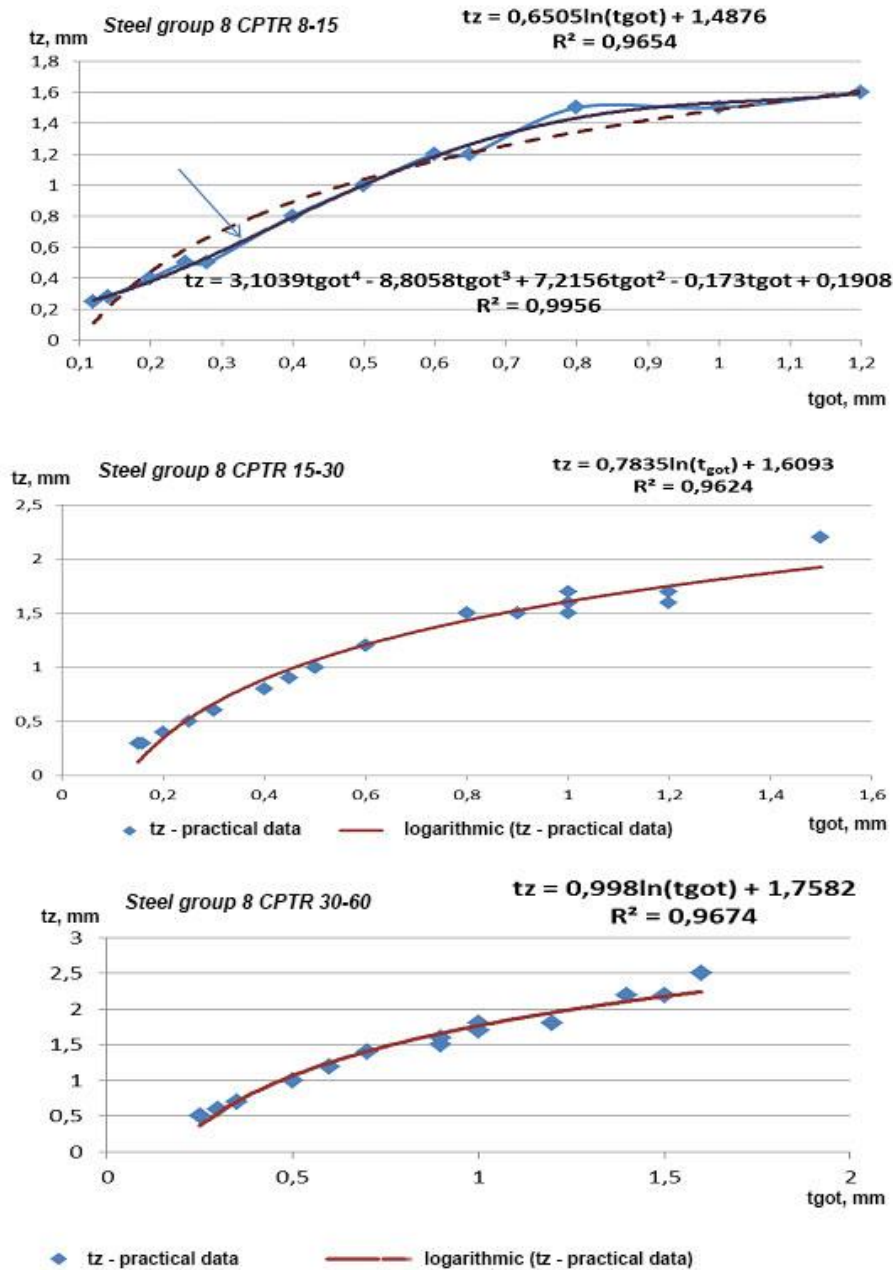


Fig. 7. Approximation by regression models of the values of the billet wall thickness according to data for ultra-thin-walled pipes made of stainless-steel group (Group 8) for grades CPTR 6-15, CPTR 15-30, CPTR 30-60

$$b = 0,3657 \cdot \ln(stan()) \quad (5)$$

Unified equation for steel groups 1-3 and corresponding CPTR states:

$$t_z = (0,0217 \cdot s \tan + 0,661) \cdot \ln(t_{got}) + (0,3657 \cdot \ln(stan()) \quad (6)$$

A similar dependence of the workpiece wall thickness was obtained for ultra-thin-walled stainless steel pipes (steel group 8) – Figure 7.

Unified equation for determining the wall thickness

of the workpiece for group 8 (7):

$$t_z = (0,0145 \cdot s \tan + 0,5647) \cdot \ln(t_{got}) + (0,0111 \cdot \ln(stan()) \quad (7)$$

where the parameter $stan$ takes the value according to the type of state of the steel CPTR - 6, 15, 30.

Taking into account the research, a program for calculating routes on the CPTR mills has been developed. Examples of calculations are given in Figures 8-10.

Table 2. Summary table of models for calculating the wall thickness of the workpiece

State of the CPTR (steel groups 1-3)	Regression model t_z - wall thickness of the workpiece, t_{got} - wall thickness of the finished pipe	State of the CPTR (groups of steels 1-13)	Regression model t_z - wall thickness of the workpiece, t_{got} - wall thickness of the finished pipe
CPTR 8-15	$t_z = 0,7585 \cdot \ln(t_{got}) + 1,8561$ $R^2=0.993$	CPTR 30-60	$t_z = 1,3657 \cdot \ln(t_{got}) + 2,4952$ $R^2= 0.9918$
CPTR 15-30	$t_z = 1,0383 \cdot \ln(t_{got}) + 2,1363$ $R^2= 0.9915$	CPTR 60-120	$t_z = 1,9328 \cdot \ln(t_{got}) + 2,5607$ $R^2= 0.9551$
State of the CPTR (groups of steels 4-7)	Regression model t_z - wall thickness of the workpiece, t_{got} - wall thickness of the finished pipe	State of the CPTR (steel groups 4-7)	Regression model t_z - wall thickness of the workpiece, t_{got} - wall thickness of the finished pipe
CPTR 8-15	$t_z = 0,4858 \cdot \ln(t_{got}) + 1,6734$	CPTR 15-30:	$t_z = 0,7047 \cdot \ln(t_{got}) + 1,9517$
CPTR 6-15 (gr. st. 8)	$R^2= 0.9654$	$t_z = 0,6505 \cdot \ln(t_{got}) + 1,4876$	
CPTR 15-30 (gr. st. 8)	$R^2= 0.9624$	$t_z = 0,7835 \cdot \ln(t_{got}) + 1,6093$	
CPTR 30-60 (gr. art. 8)	$R^2= 0.9674$	$t_z = 0,998 \cdot \ln(t_{got}) + 1,7582$	

Діаметр готової труби	D	12	Перевірка вихідних даних - стінки
Товщина стінки готової труби	T	1	Перевірка вихідних даних - діаметру
Пропонується тип стану		8-15	
Розрахункові дані		Розрахунок	
Розрахунок максимально допустимого deltaD	Tz	2,5	2,5
Розрахунок товщини стінки заготовки	Tz	1,8996	$=1,6481 \cdot \ln(D3)-1,5542$
Діаметр заготовки	Dz=D+deltaD	14,5	
Товщина стінки заготовки	Tz	1,90	$=([0,0217 \cdot C5+0,661] \cdot \ln(D4)+0,3657 \cdot \ln(C5)+1,1391$
Коефіцієнт витяжки по проході	μ	2,18	$= (D10-D11) \cdot D11 / ((D3-D4) \cdot D4)$
Ступінь деформації за проход	ϵ	0,54	$= 1 - 1/D13$
Допустиме значення середньої частини витяжки на станах ХПТР	$\mu_{\text{ж}}$	1,06	
ctrok		1	
ctov		1	
Довжина ділянки обтиску	$l_{\text{обж}}$	170	
Лінійне зміщення	m μ	18,33	
Подача	m	8,4	
Максимально допустима подача	m _{max}	8	
Приймаємо значення подачі	m	8,0	
Лінійне зміщення приймаємо		17,4	

Figure 8 – Calculation of the route 14.5x1.9—12x1mm CPTR8-15, group 1

Розрахунок маршруту прокатки	Тип проходу	Група сталей	1
Вихідні дані		Позначення	
Діаметр готової труби	D	17	Перевірка вихідних даних - стінки
Товщина стінки готової труби	T	0,5	Перевірка вихідних даних - діаметру
Пропонується тип стану	15	15-30	
Розрахункові дані		Розрахунок	
Розрахунок максимально допустимого deltaD	ΔD	3	
Розрахунок товщини стінки заготовки	T_z	1,4456	
Діаметр заготовки	$D_z = D + \Delta D$	20	
Товщина стінки заготовки	T_z	1,45	
Коефіцієнт витяжки по проході	μ	3,25	$\mu = (D_1 - D_2) / (D_1 - D_2) / (D_2 - D_1) / (D_2 - D_1)$
Ступінь деформації за проход	ϵ	0,69	$\epsilon = 1 - D_1 / D_2$
Допустиме значення середньої частини витяжки на стані ХПТР	$\mu_{\text{ср}}$	1,05	
ctrok		1	
ctov		2	
Довжина ділянки обтіску	$l_{\text{обт}}$	170	
Лінійне зміщення	m_{μ}	11,98	
Подача	m	3,7	
Максимально допустима подача	m_{max}	9,2	
Приймаємо значення подачі	m	3,7	
Лінійне зміщення приймаємо		12,0	

Fig. 9. Calculation of the route passage 20x1.45—17x0.5 CPTR 15-30, group 1

Розрахунок маршруту прокатки	Тип проходу	Група сталей	1
Вихідні дані		Позначення	
Діаметр готової труби	D	20	Перевірка вихідних даних - стінки
Товщина стінки готової труби	T	1,45	Перевірка вихідних даних - діаметру
Пропонується тип стану	15	15-30	
Розрахункові дані		Розрахунок	
Розрахунок максимально допустимого deltaD	ΔD	3,5	
Розрахунок товщини стінки заготовки	T_z	2,4960	
Діаметр заготовки	$D_z = D + \Delta D$	23,5	
Товщина стінки заготовки	T_z	2,50	
Коефіцієнт витяжки по проході	μ	1,95	$\mu = (D_1 - D_2) / (D_1 - D_2) / (D_2 - D_1) / (D_2 - D_1)$
Ступінь деформації за проход	ϵ	0,45	$\epsilon = 1 - D_1 / D_2$
Допустиме значення середньої частини витяжки на стані ХПТР	$\mu_{\text{ср}}$	1,05	
ctrok		1	
ctov		2	
Довжина ділянки обтіску	$l_{\text{обт}}$	170	
Лінійне зміщення	m_{μ}	17,03	
Подача	m	8,7	
Максимально допустима подача	m_{max}	9,2	
Приймаємо значення подачі	m	8,7	
Лінійне зміщення приймаємо		17,0	

Fig. 10. Calculation of the route passage 23.5x2.5 -20x1.45 CPTR 15-30 group 1

Comparing the calculated routes with the existing assortment, with other equipment options and with a reduction in the number of passes (Table 3).

Table 3. Calculated routes (st.12X18N10T, gr. I)

No.	Manufacturing route	Types of deformation
1	23x2.5 20x1.45 17x0.5 goth	CPTR 15-30 CPTR 15-30
2	43x3.65 39x2.6 35x1.2 Got	CPTR 30-60 CPTR 30-60
3	15x2.3 12x1.6 10x0.75 8x0.25 Got	CPTR 8-15 CPTR 8-15 CPTR 8-15
4	23x2.5 20x1.5 Got	CPTR 15-30
5	10.5x1.3 8x0.5 Got	CPTR 8-15

Conclusions

The developed mathematical models and calculation program solve the issue of designing rolling routes on CPTR mills for different groups of steels, which

reduces the time for designing routes, allows for the optimal selection of routes with fewer passes compared to the current ones, which, in turn, leads to savings in production time and metal consumption .

Бібліографічний опис

1. Соловьева И.А. Разработка многовариантной технологии, исследование и внедрение рациональных режимов производства холоднодеформированных труб: дис. ...канд. техн. наук. Днепропетровск, 1987.
2. Друян В.М., Гуляев Ю.Г., Чукмасов С.А. Теория та технологія трубного виробництва: підручник. Дніпропетровськ: РІА "Дніпро-ВАЛ", 2001. 544 с.
3. Разработка алгоритмов и программного обеспечения расчета параметров производства холоднодеформированных труб прокаткой на станах ХПТР / В.Ф. Балакин, О.Н. Земляная, И.А. Соловьева, Ю.Н. Николаенко. X международная научно-техническая конф., «Пластичная деформация металлов», 19-23 мая 2014 г. Днепропетровск. 2014. Т. 2. С. 215-218.
4. Проектування комбінованих маршрутів виробництва холоднодеформованих труб / В.Ф. Балакін, І.А. Соловйова, Ю.М. Николаєнко, К.С. Білан. *Системні технології*. 2017. Вип. 4. С. 56-62.
5. Соловйова І.А., Николаєнко Ю.М. Проектування маршрутів виробництва холоднодеформованих труб на станах ХПТР. *Системні технології*. 2018. №1 (114), С. 160-165.
6. Використання інформаційних технологій для моделювання технологічних параметрів виробництва труб холодною роликовою прокаткою / Соловйова І.А., Николаєнко Ю.М., Балакін В.Ф., Петров К.В., Серпокрил В.М. VII Міжнародна конференція «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід» 23-25 грудня 2024 р., Дніпровський металургійний інститут УДУНТ. С. 194-199.

References

1. Soloveva, I. A. (1987). Razrabotka mnogovariantnoi tekhnologii, issledovanie i vnedrenie ratsionalnikh rezhimov proizvodstva kholodnodeformirovannikh trub: [diss.].
2. Druyan, V. M., Gulyaev, Yu. G., & Chukmasov, S. A. (2001). *Teoriya ta tekhnologiya trubnogo virobnitstva: pidruchnik*. RIA "Dnipro-VAL".
3. Balakin, V. F., Zemlyanaya, O. N., Soloveva, I. A., & Nykolaienko, Yu. N. Razrabotka algoritmov i programmnoho obespecheniya rascheta parametrov proizvodstva kholodnodeformirovannikh trub prokatkoi na stanakh KhPTR. X mezhnunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konf. "Plastichnaya deformatsiya metallov", 19-23 maya, 2014. T. 2. P. 215-218.
4. Balakin, V. F. Soloviova, I. A., Nykolaienko, Yu. M., & Bilan, K. S. (2017). Proektuvannya kombinovanikh marshrutiv virobnitstva kholodnodeformovanikh trub. *Sistemni tekhnologii*, 4, 56-62.
5. Soloviova, I. A., Nykolaienko, Yu. M. (2018). Proektuvannya marshrutiv virobnitstva kholodnodeformovanikh trub na stanakh KhPTR. *Sistemni tekhnologii*. 1(114), 160-165.
6. Soloviova, I. A., Nykolaienko, Yu. M., Balakin, V. F., Petrov, K. V., & Serpokril, V. M. Vikoristannya informatsiinih tekhnologii dlya modelyuvannya tekhnologichnikh parametrov virobnitstva trub kholodnoyu rolikovoyu prokatkoyu. VII Mizhnarodna konf. "Innovatsiini tekhnologii v nautsi ta osviti. Evropeiskii dosvid" 23-25 grudnya 2024. Dniprovskii metalurgiiinii institut UDUNT. P. 194-199.

Надіслано до редакції / Received: 11.05.2025
 Прийнято до друку / Accepted: 30.08.2025