

DOI: 10.31319/2519-8106.1(54)2026.350832

УДК 621.771.2

Maksimenko Oleg, Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Metallurgy
name Professor V.I. Loginov

Максименко О.П., доктор технічних наук, професор кафедри металургії ім. проф. В.І. Логінова
ORCID: 0000-0003-0846-9869

Nikulin Oleksandr, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Department of Metallurgy
name Professor V.I. Loginov

Нікулін О.В., кандидат технічних наук, доцент кафедри металургії ім. проф. В.І. Логінова
ORCID: 0000-0002-3509-7266

Pryimak Anna, Postgraduate Student Department of Metallurgy name Professor V.I. Loginov

Приймак А.Б., здобувач третього (доктора філософії) рівня вищої освіти кафедри металургії
ім. проф. В.І. Логінова
ORCID: 0009-0009-9070-643X

Dniprovsky State Technical University, Kamianske
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

NEW METHOD OF MODELING PARAMETERS OF THE ROLLING IN A WIRE BLOCK

НОВА МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОКАТУВАННЯ В ДРОТОВОМУ БЛОЦІ

Ensuring the stability of the section rolling process, as well as the accuracy of the dimensions of the obtained rolling section largely depends on the adequacy of the process design on the accuracy of the applied method for calculating the roll pass design. The use of computer simulation allows increasing the efficiency of design, provided that deep penetration into the mechanisms of plastic deformation at metal with the establishment or clarification of the patterns in the processes. When improving the methods for calculating high-speed processes of continuous section rolling, a new method for calculating the parameters of rolling in a wire block has been developed, which uses the closure of the kinetic model of the process by jointly taking into account the conditions of metal equilibrium in the deformation zone, kinematic and force conditions of motion, as well as the longitudinal stability of the rolled product during processing in all stands of the wire block.

Keywords: *continuous section rolling, calculation method, roll pass design, kinetic model of the process, rolling of wire rod, wire block.*

Забезпечення стабільності процесу сортової прокатки, а також точності розмірів отриманого профілю багато в чому залежить від адекватності технологічного проектування, зокрема, від точності методу розрахунку калібрування валків, що застосовується. Застосування комп'ютерного моделювання дозволяє підвищити ефективність проектування за умови глибокого проникнення у механізми пластичної деформації металу з встановленням або уточненням закономірностей процесів. При вдосконаленні методів розрахунку високошвидкісних процесів безперервної сортової прокатки розроблено нову методику розрахунку параметрів прокатки в дротовому блоці, яка використовує замикання кінетичної моделі процесу спільним урахуванням умов рівноваги металу в осередку деформації, кінематичних і силових умов руху, а також поздовжньої стійкості до розкату.

Забезпечення стабільності процесу сортової прокатки та точності розмірів одержуваного профілю значною мірою залежить від адекватності технологічного проектування, зокрема, від точності застосовуваного методу розрахунку калібрування валків. Традиційно вирішення цих питань покладалося на інтуїцію, кваліфікацію та досвід калібрувальника, що могло бути дорогим і тривалим процесом.

Застосування комп'ютерного моделювання дозволяє підвищити ефективність проектування за умови глибокого проникнення у механізми пластичної деформації металу та встановлення або уточнення закономірностей процесів. Це дає можливість наблизити розрахункові моделі до реальності та вдосконалити наукове обґрунтування розрахунків параметрів процесу.

При вдосконаленні методів розрахунку високошвидкісних процесів безперервної сортової прокатки розроблено нову методику розрахунку параметрів прокатки в дротовому блоці. Ця методика використовує замикання кінетичної моделі процесу шляхом спільного врахування таких ключових умов: умов рівноваги металу в осередку деформації; кінематичних і силових умов руху; а також поздовжньої стійкості прокату при обробці в усіх клітях дротового блоку.

Методика враховує закон сталості секундних об'ємів, передній та задній натяги прокату. Вона дозволяє узгодити кінематичні параметри руху металевих частинок з умовами рівноваги прокату в осередку деформації.

***Ключові слова:** безперервна сортова прокатка, метод розрахунку, калібрування валків, кінетична модель процесу, прокатка катанки, дротовий блок.*

Problem's Formulation

Ensuring the equilibrium of the rolled product in the deformation zone, the stability of the section rolling process, as well as the accuracy of the dimensions of the obtained profile largely depends on the adequacy of the process design, in particular, on the adopted method for calculating at the roll pass design. Previously, the solution to these issues was determined by the roll pass designer based on his intuition, qualifications and work experience, and could be costly and time-consuming. Active use of computer technology and computer modeling allows to significantly reduce the duration of the design and increase its efficiency, provided that deep penetration into the mechanisms of plastic deformation of metal with the establishment or clarification of process patterns. Regarding the rolling, this allows us to bring computational models closer to reality with the improvement of the scientific substantiation at the calculations of process parameters [1].

Analysis of recent research and publications

During continuous rolling of wire rod in a wire block, a system of "oval-round" calibers is used, located on rolls with alternating mutually perpendicular axes of rotation in a sequence of stands [2—6]. The metal is deformed with a relatively small front and rear tension of the rolled product [7]. As a result, a smooth transition from the shape of one cross-section of the strip to another cross-section is ensured, which makes it possible to obtain a high-quality surface of the wire rod, for which the obtained mechanical properties are also important. In the process of designing technology, significant difficulties are associated with adequately considering the influence of the current process factors, their interactions and ensuring the required level of compliance of the calculated values of the parameters with the actual ones. To solve problems, experimental dependencies are usually used, for example, between the coefficients of longitudinal and transverse deformation [8]. The approach based on the extrapolation of functions does not always guarantee the accuracy of calculations, and along with it the stability of the process and the balance of forces in the deformation zones along the entire line of the wire block, since the areas of factor spaces corresponding to laboratory and production rolling conditions can differ significantly, for example, in rolling speed.

Formulation of the study purpose

The work is presentation a new method for modeling rolling parameters in a wire block based on the calculation of the parameters and modes of deformation during rolling of wire rod, taking into account the law of constancy of second volumes, the conditions of metal equilibrium in the rolls, front and rear tensions, as well as the longitudinal stability of the rolled product [9] in all stands of the wire block.

Presentation of the main material

The generalized model of technological design includes blocks of the traditional scheme of development of roll calibration (Fig. 1).

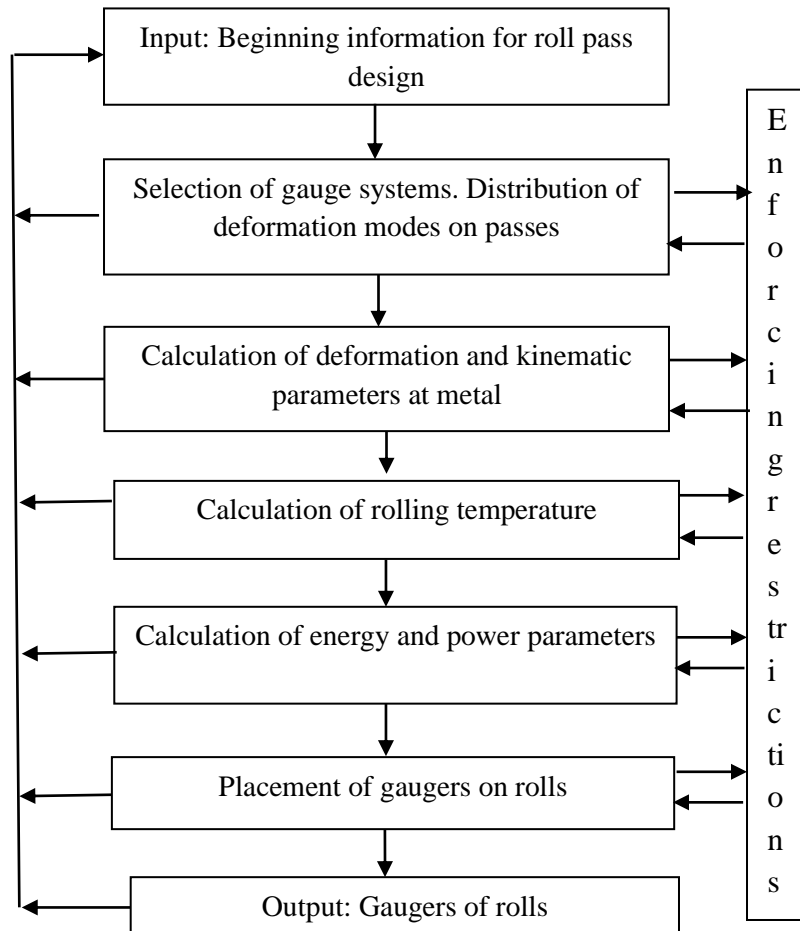


Fig. 1. Generalized model for designing roll passes

The article considers the specification of modeling for rolling of wire rod in a modern wire block. The main original results were obtained for the model's block "Calculation of metal forming". For their presentation, an example of determining the parameters of rolling of 5.0 mm wire rod in the wire block of the PJSC "KAMET-STEEL" rolling mill 400/200 was selected. The structural scheme of calculations is shown on Fig. 2 and Fig. 3.

The calculation is performed against the rolling direction, starting from the last pass. Considering the conversion to the corresponding strip, the final dimensions in the tenth stand will be $h_{110} \times b_{110} = 4.43 \times 4.43$ mm. Let us set the value of the advancing $S_{10} = 0.057$. Taking into account the actual linear speed of the rolls $V_{s10} = 98.0$ m/s, we determine the speed of the wire rod exit from the last stand

$$V_{110} = (1 + 0.057) \cdot V_{s10} = 103.55 \text{ m/s.}$$

As a result, the second volume of metal will be $V_{cek} = h_{110} \cdot b_{110} \cdot V_{110} = 2032, 2 \text{ mm}^2 \cdot \text{m/s}$.

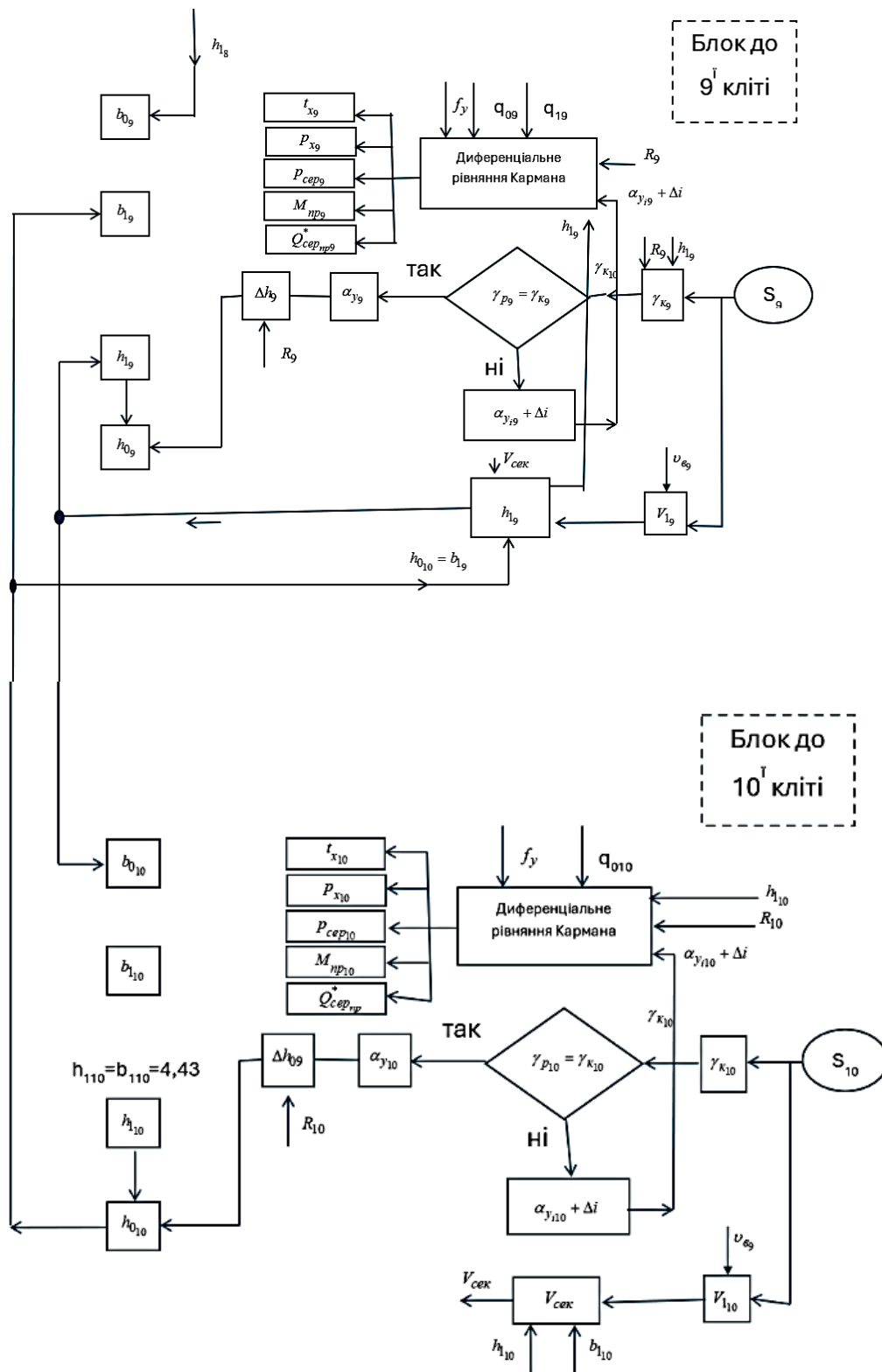


Fig. 2. Structural diagram of calculation of rolling parameters for 9 and 10 cages

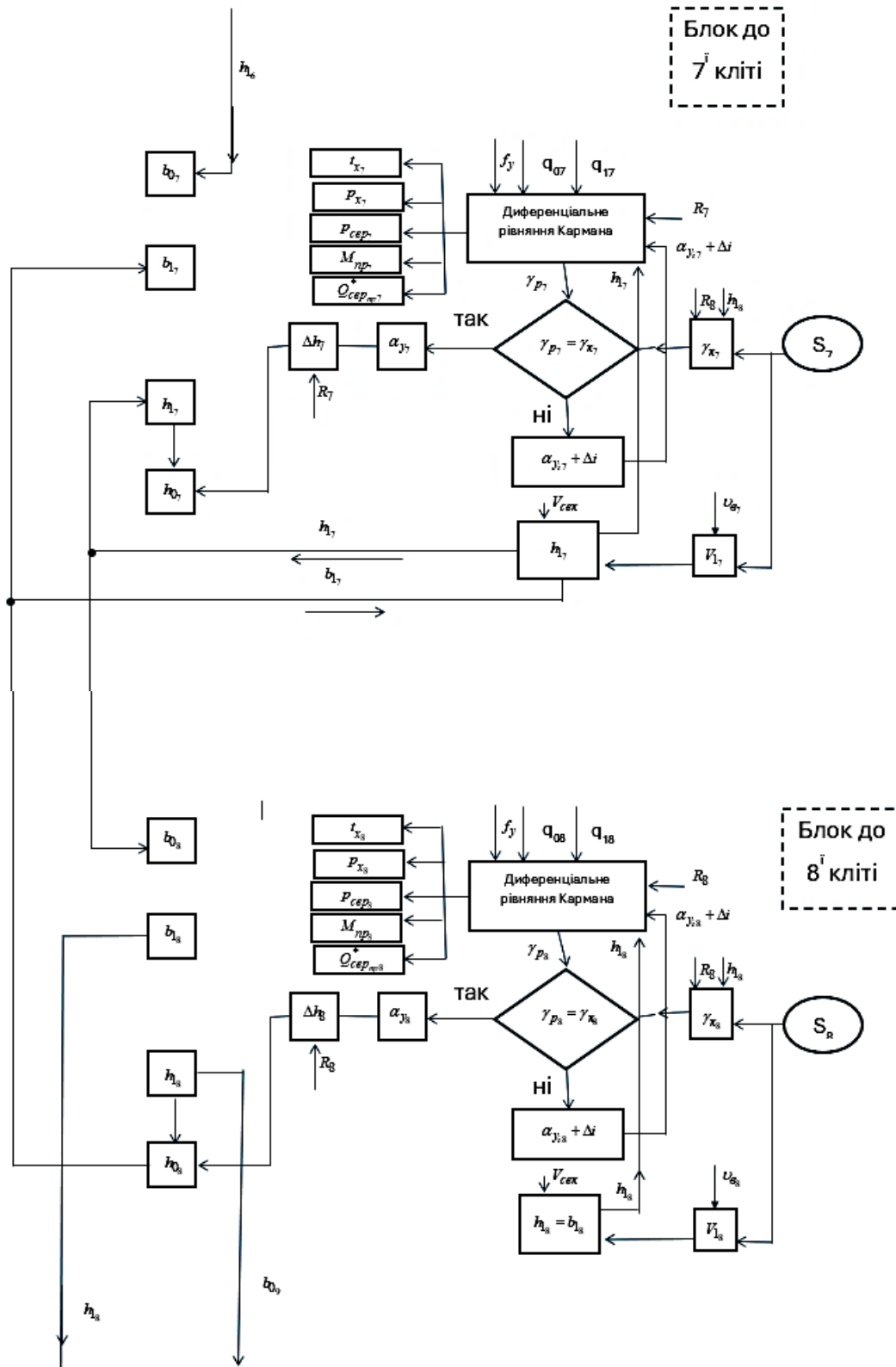


Fig. 3. Structural scheme for calculating rolling parameters for 7 and 8 cages

All parameters related to the geometry of the deformation zones, kinematic conditions, and force characteristics that are determined by calculation or known from the process instructions are given in Tabl. 1.

Table 1. Calculation results of rolling parameters for the corresponding strip

№ st.	h_0 , mm	h_1 , mm	Δh , mm	b_0 , mm	b_1 , mm	q_0	q_1	α , rad	v_0 , m/s	S	$Q^*_{cp. np}$	$p_{cp}/2k_{cp}$	γ , rad	R_k , mm
1	15,33	8,99	6,34	15,33	18,65	0	0,025	0,249	13,68	0,048	-0,0155	1,16	0,065	102,6
2	18,9	11,87	7,03	8,99	12,21	0,025	0,027	0,263	16,82	0,035	-0,0126	1,1	0,064	101,7
3	11,87	6,90	4,97	11,87	14,71	0,027	0,021	0,220	20,37	0,056	-0,0153	1,2	0,061	103,3
4	16,65	9,58	7,07	6,90	9,71	0,021	0,022	0,262	25,88	0,042	-0,012	1,12	0,062	103,3
5	9,58	5,60	3,98	9,58	12,70	0,022	0,027	0,196	31,63	0,064	-0,016	1,27	0,059	104,0
6	12,99	8,77	4,22	5,60	7,64	0,027	0,052	0,202	40,02	0,057	-0,015	1,16	0,062	103,3
7	8,77	4,59	4,18	8,77	9,54	0,052	0,053	0,200	49,87	0,084	-0,0147	1,16	0,061	104,4
8	9,64	5,48	4,16	4,59	6,07	0,053	0,063	0,200	63,21	0,071	-0,017	1,27	0,061	103,9
9	5,48	3,83	1,65	5,48	7,53	0,063	0,024	0,126	79,3	0,06	-0,018	1,56	0,047	104,7
10	6,23	4,43	1,80	3,83	4,87	0,024	0	0,131	98	0,054	-0,019	1,36	0,048	104,4

The process of finding the values of unknowns begins on the parallel branch of the computational block for stand 10 (Fig. 2) with determining the kinematic angle of the neutral section using the formula

$$\gamma_k = \sqrt{\frac{S \Delta h_1}{R_k}}$$

Next, when numerically solving the boundary value problem with the differential equation of T. Karman with the given parameters R_k , h_1 , q_0 , q_1 , $f_y = 0.26$ and changing α_y in stand 10, we achieve the fulfillment of the condition

$$\gamma_{k10} = \gamma_{p10} \quad (1)$$

Equation (1) fixes the same value of the neutral section angle according to the equilibrium conditions of the rolled product in the deformation zone of the tenth stand and according to the kinematics of the metal particles in it. When condition (1) is satisfied, we find the value of the capture angle α_{y10} that allows us to determine Δh_{10} and h_{010} . Modeling the deformation process based on equality (1) closes the kinetic model when, for given geometric characteristics, the kinematic parameters of the movement by metal particles are consistent with the equilibrium conditions of the rolled product in the deformation zone.

Next, the determination of the deformation and energy-force parameters for the stand 10 is completed. For this, the value of the width for corresponding rolled product b_{010} is required. According to the proposed method, it is determined as follows.

As is known, when rolling in a wire block, the condition $h_{010} = b_{19}$ is satisfied, which makes it possible to calculate h_{19} . After selecting the S_9 approximation, the law of constancy the second volume of metal is used, the calculation algorithm is presented by the block to the ninth stand in Fig. 2. The found value h_{19} is equal to the initial width of the rolled product in the tenth stand.

The results of solving the boundary value problem with the T. Karman equation are graphically shown in Fig. 4. As follows from the stress diagrams, the neutral angle $\gamma_{p10} = 0.048 \text{ rad}$. The result corresponds to the previously determined kinematic value of the angle (Tabl. 1). The practical equality of the neutral angles according to (1) indicates the closure of the process model in terms of kinematic and force indicators: the correspondence of the metal equilibrium conditions in the rolls and the speed parameters at the exit of the rolled product from the deformation zone.

The internal longitudinal forces arising during plastic deformation of the metal are determined by the formulas

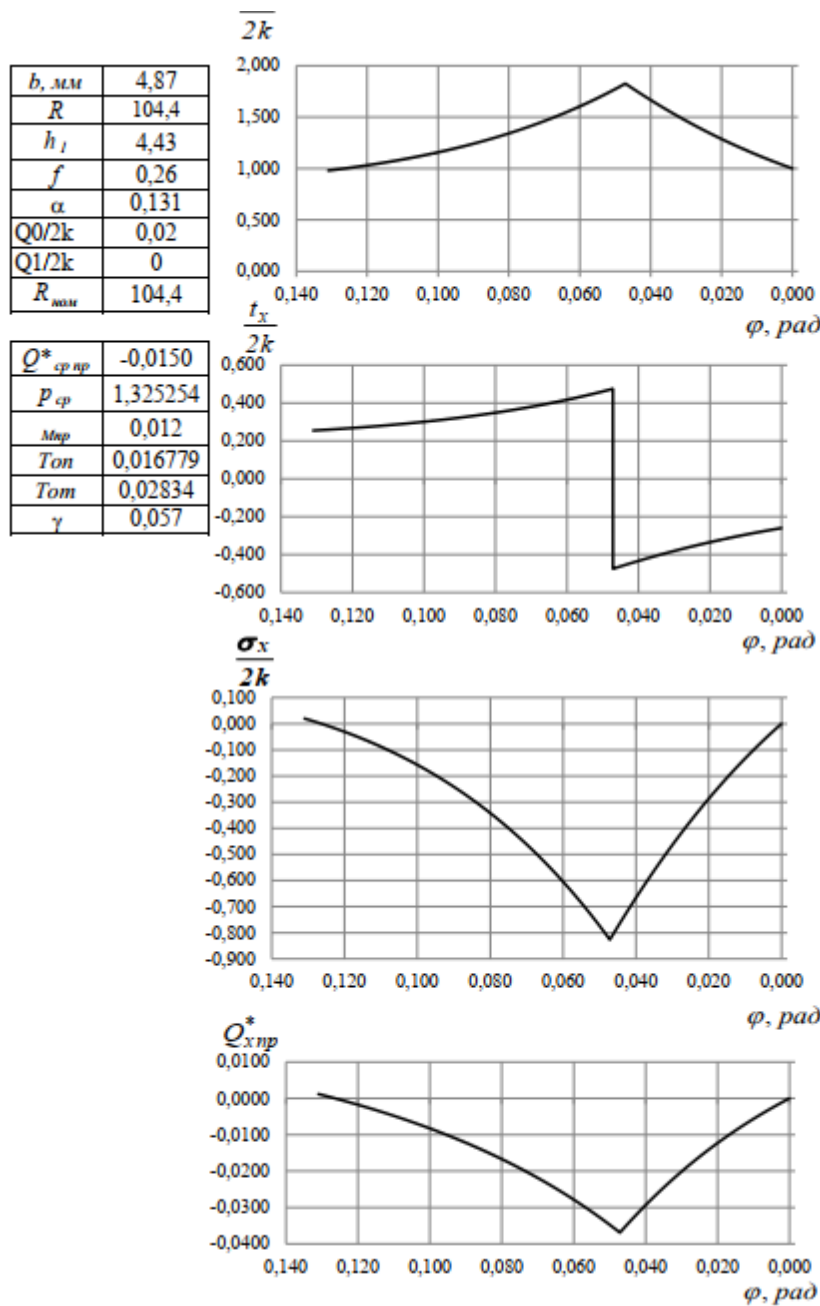


Fig. 4. Graphical representation of solutions to the boundary value problem

$$Q^*_{xnl} = \frac{Q_{xnl}}{2k_{cp} \cdot R_k \cdot b_{cp}};$$

$$Q_{xnl} = \sigma_x h_x b_x;$$

$$\sigma_x = p_x - 2k_{cp}.$$

Depending on the rolling conditions, these current forces can act both in the direction of strip movement and in the opposite direction. Their average value in the deformation zone is determined by

$$Q^*_{\text{ср нр}} = \frac{1}{\alpha_y} \int_0^{\alpha_y} Q^*_{xnl} d\varphi.$$

For the tenth stand $Q_{цепnp}^* = -0,019$.

According to work [9], with the found force value $Q_{цепnp}^*$ (negative value), the rolling process in the specified stand proceeds stably without slipping. In its physical meaning, it is a resistance force and cannot be directed towards the movement of the rolled product in the rolls. The limiting value of the force is zero.

Continuing the computational procedure for the ninth stand, we consider that equality is observed at a capture angle of $\alpha_{y9} = 0.126$ rad.

Next, it is easy to calculate h_{09} and Δh_9 . As in the previously considered case, the width of the rolled product b_{09} remains unknown. Considering that $h_{18} = b_{09}$ and using the law of constancy of second volumes for the eighth stand, and also setting the lead S_8 , we have

$$h_{18} = b_{18} = \sqrt{\frac{V_{cek}}{v_{18}}} = 5,48 \text{ мм}.$$

As a result, all geometric h_{09} , h_{19} , b_{09} , b_{19} and the power parameters during rolling in the ninth stand are determined. Next, as in the tenth stand, we find α_{y8} , Δh_8 and h_{08} , and then calculate h_{17} and the equal value b_{08} .

Similarly, according to Fig. 2 and 3, the indicators in the remaining stands of the wire block are determined, which are given in Tabl. 1.

Next, using the corresponding strip method, the obtained information is converted into the actual sizes of circles and ovals required for the roll pass design. The results are given in Tabl. 2.

Table 2. Actual dimensions of rolled sections for roll pass design

Number of stands	Actual dimensions of rolled sections, mm				
	h_0	h_1	Δh	b_0	b_1
1	17,32	10,15	7,17	17,32	21,32
2	21,32	13,40	7,92	10,15	13,40
3	13,40	8,81	4,59	13,40	16,77
4	16,77	11,81	4,96	8,81	11,81
5	11,81	7,32	4,49	11,81	14,66
6	14,66	9,90	4,76	7,92	9,90
7	9,90	5,14	3,76	9,90	10,94
8	10,94	6,19	4,75	5,14	6,19
9	6,19	4,32	1,87	6,19	7,44
10	7,44	5,0	2,44	4,32	5,0

Conclusions

Based on the need to improve the calculation methods for high-speed continuous section rolling processes, a new method for calculating rolling parameters in a wire block has been developed, which uses the closing of the kinetic model of the process by jointly taking into account the conditions of metal equilibrium in the deformation zone, the kinematic conditions of movement, and the longitudinal stability of the rolled product during processing.

References

- [1] Maksimenko O.P., Shtoda M.M., Níkulín O.V. (2023) Osnovi kalíbrovki prokatnikh valkív [Basics of roll pass design]. [in Ukrainian]
- [2] Maksimenko, O.P., Nikulin, O.V., Samohval, V.M., Loboyko, D.I. (2021) Sistemnyy pidhid, metody doslidzhen' protsesiv prokatuvannya z analizom pozdovzhn'oyi stalosti: navch. posib.

- [Systematic approach, methods of research of rolling processes with the analysis of longitudinal stability: textbook]. Kam'yans'ke: DDTU [in Ukrainian]*
- [3] Chubenko, V.A., Khinetska, A.A., Cherniavskiy, D.O. (2017) *Tekhnolohiia prokatnoho vyrobnytstva [Rolling production technology]. Kryvyi Rih [in Ukrainian]*
- [4] Maksimenko, O.P., Nikulin, O.V., Samohval, V.M., Prijmak A.B. (2022) *Kinetichne modelyuvannya prokatuvannya katanki u drotovomu bloci [Kinetic modeling of wire rod rolling in a wire block]. Kam'yans'ke: DDTU. Matematichne modelyuvannya, № 46. P. 63 – 70. [in Ukrainian]*
- [5] Huda Z. (2024) *Metal Forming Processes : Fundamentals, Analysis, Calculations. Cham: Springer, 307 p. [in English]*
- [6] Guo X. (ed.) (2022) *Flexible Metal Forming Technologies: Principles, Process and Equipment. Singapore: Springer, XVI, 417 p. [in English].*
- [7] Maksymenko O.P., Nikulin O.V., Loboiko D.I. (2020). *Nova hranychna umova pry stalomu protsesi prokatky [New limit condition for a steady rolling process]. Obrobka metaliv tyskom. № 1(50). p. 266 – 271. [in Ukrainian]*
- [8] Merklein M., Tekkaya A. E., Behrens B.-A. (eds.) (2020) *Sheet-Bulk Metal Forming: Research Results of the TCRC73. Cham: Springer, XIII, 588 p. [in English].*

Список використаної літератури

1. Максименко О.П., Штода М.М., Нікулін О.В. Основи калібровки прокатних валків: навч. посіб. Кам'янське: ДДТУ, 2023. 156 с.
2. Максименко О.П., Нікулін О.В., Самохвал В.М., Лобойко Д.І. Системний підхід, методи досліджень процесів прокатування з аналізом поздовжньої сталості. Кам'янське: ДДТУ, 2021, 347 с.
3. Чубенко В.А., Хіноцька А.А. Технологія прокатного виробництва: навчальний посібник. Кривий Ріг: Видавець ФОП Чернявський Д.О., 2017. 170 с.
4. Максименко О.П., Нікулін О.В., Самохвал В.М., Приймак А.Б. Кінетичне моделювання прокатування катанки в дротовому блоці. *Математичне моделювання. 2022. № 46. P. 63–70.*
5. Huda Z. *Metal Forming Processes : Fundamentals, Analysis, Calculations. Cham: Springer, 2024, 307 p.*
6. Guo X. (ed.) *Flexible Metal Forming Technologies: Principles, Process and Equipment. Singapore: Springer, 2022, XVI, 417 p.*
7. Максименко О.П., Нікулін О.В., Лобойко Д.І. Нова гранична умова при сталому процесі прокатки. *Обробка металів тиском. 2020. № 1(50). С. 266–271.*
8. Merklein M., Tekkaya A. E., Behrens B.-A. (eds.) *Sheet-Bulk Metal Forming: Research Results of the TCRC73. Cham: Springer, 2020. XIII, 588 p.*

*Надійшла до редколегії 09.12.2025
Прийнята після рецензування 19.12.2025
Опублікована 22.01.2026*