

DOI: 10.31319/2519-2884.38.2021.3

УДК.621.771.01

**О.П. Максименко**, д.т.н., професор, O.maks1940@gmail.com

**О.В. Нікулін**, к.т.н., доцент, av\_nikulín@ukr.net

**Д.І. Лобойко**, к.т.н., доцент, darloboenko@gmail.com

**К.К. Марченко**, k.marchenok@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УМОВ ТЕРТЯ НА ПОКАЗНИКИ ПРОЦЕСУ ПРОКАТКИ В ДРОТОВОМУ БЛОЦІ

*Дослідження показують, що при високошвидкісній прокатці катанки присутній значний діапазон даних по коефіцієнту тертя. Тому необхідні дослідження, що направлені на вплив умов тертя в осередку деформації кожної з клітей дротового блоку на зміну питомих натягів в міжклітьових проміжках, на поздовжню стійкість процесу прокатки, на зміну кута нейтрального перетину, а також на розширення металу. За допомогою математичної моделі процесу високошвидкісного прокатування виконано дослідження процесу прокатки катанки в дротовому блоці. Воно показало, що посилення режиму тертя в контакті металу з валками підвищує поздовжню стійкість розкату в осередку деформації та дозволило визначити мінімальне значення коефіцієнту тертя, при якому процес залишається стабільним без втрати рівноваги. В роботі показано, що умови тертя на контакті валків і розкату впливають на коефіцієнт поперечної деформації і обтиснення металу в клітях дротового блоку, а також на силові параметри.*

**Ключові слова:** високошвидкісне прокатування; енергосилові та кінематичні параметри.

*Studies show that the high-speed wire rod rolling there is a significant range of data on the coefficient of friction. Therefore, the necessary research is aimed at the influence of friction conditions in the deformation of each of the cells of the wire block on the change of specific tensions in the intercellular spaces, on the longitudinal stability of the rolling process, on changing the angle of neutral cross section, and on the expansion of the metal. Using a mathematical model of the process of high-speed rolling, a study of the process of rolling wire rod in a wire block. It showed that the strengthening of the friction regime in contact of the metal with the rolls increases the longitudinal stability of the roll in the deformation center and allowed to determine the minimum value of the coefficient of friction at which the process remains stable without loss of equilibrium. The paper shows that the conditions of friction at the contact of the rolls and rolling affect the coefficient of transverse deformation and compression of the metal in the cells of the wire block, as well as the force parameters.*

**Keywords:** high-speed rolling; energy-power and kinematic parameters.

### Постановка проблеми

Фізичне моделювання закономірностей тертя при обробці тиском, як правило, являє собою складну задачу і вирішується з безліччю обмежень і припущень. Особливі труднощі при моделюванні складаються з врахування низки факторів, що впливають на процес і забезпечення необхідного рівня відповідності моделі фактичним закономірностям, що виявляються при пластичному терті в діючому об'єкті. Такі умови для металу та інструменту складаються в дротовому блоці сортового стану через специфічні кінематичних обмеження, високу швидкість процесу прокатки і значне ковзання металу в валках. Обчислювальні експерименти відкривають альтернативні можливості досліджень впливу умов тертя на показники прокатки.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

При теоретичному аналізі поздовжньої стійкості процесу по всім клітям дротового блоку [1], а також при вивченні зносу карбідо-вольфрамових валків [2] середній коефіцієнт тертя  $f_y$  в сталому режимі приймався в діапазоні 0,26...0,3. У дослідженні [3] його значення перебувають у межах 0,17...0,24. Як видно, значний діапазон даних по коефіцієнту тертя при високошвидкіс-

ний прокатці катанки вимагає більш глибокого аналізу механізму тертя. Наприклад, можливе залучення теорії контактної гідродинаміки [4], оскільки в цьому випадку вода, що охолоджує валки може в певній мірі грати роль мастила для металу. Крім того, подальші дослідження впливу коефіцієнту тертя на основні параметри прокатки в дротовому блоці з урахуванням міжклітьових натягів дозволять уточнити граничні умови деформації в сталому режимі.

#### Формулювання мети дослідження

З урахуванням викладеного, метою роботи є дослідження впливу умов тертя в осередку деформації кожної з клітей дротяного блоку на зміну питомих натягів в міжклітьових проміжках, на поздовжню стійкість процесу прокатки, на зміну кута нейтрального перетину, а також на розширення металу.

Зауважимо, що в роботах [5, 6] викладена загальна методика розрахунку середньої результуючої сили  $Q_{cp\ np}^*$  як критерію, за яким можна оцінити подовжню стійкість штаби в осередку деформації. Нагадаємо, що якщо ця величина набуває від'ємних значень, тобто вектор сили направлений протилежно руху штаби, то процес відбувається стійко без часткових буксувань. У разі, якщо  $Q_{cp\ np}^* = 0$  прокатка ведеться в граничних умовах. При  $Q_{cp\ np}^* > 0$ , тобто позитивному значенні введеного показника, прокатка неможлива через те, що в осередку деформації недостатньо сил, що втягують метал в валки. Процедура розрахунку сили  $Q_{cp\ np}^*$  при прокатці в клітях дротового блоку докладно викладена в [1]. З урахуванням того, що при посиленні режиму тертя (з ростом коефіцієнту тертя) стійкість процесу деформації зростає, діапазон зміни коефіцієнта тертя вибирався таким, щоб виявити закономірності прокатки в умовах, близьких до граничних. На підставі попередніх обчислювальних експериментів з діапазону [0,15; 0,32] для  $f_y$  були прийняті значення 0,22; 0,20 і 0,18.

#### Виклад основного матеріалу

Дослідимо вплив коефіцієнту тертя на параметри прокатки катанки діаметром 5,5 мм з кола 17,3 мм в дротовому блоці стану 400/200 ПАТ «ДМК». Результати розрахунків параметрів прокатки з  $f_y = 0,22$  і 0,18 наведені в табл. 1 і 2 відповідно. У верхній частині яких представлені реальні розміри розкату, швидкісні умови, розміри калібрів і зазори між валками. Нижче показані розміри відповідної штаби, силові і кінематичні параметри, а також значення сили  $Q_{cp\ np}^*$ . При всіх прийнятих значеннях  $f_y$  основні результати також показані у вигляді відповідних графіків (рис. 1—5).

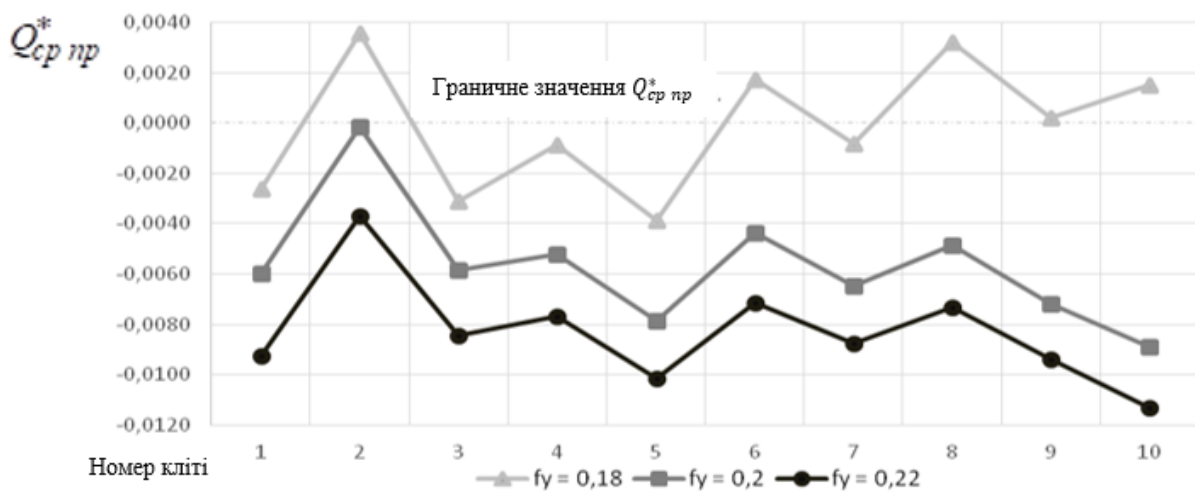


Рис. 1. Вплив коефіцієнту тертя на поздовжню стійкість процесу прокатки  $Q_{cp\ np}^*$  по клітях дротяного блоку

Таблиця 1. Параметри деформації і повздовжня стійкість процесу прокатки при прокатці катанки Ø5,5 мм з коефіцієнтом тертя  $f_y = 0,22$

Реальні геометричні розміри металу та інші параметри															
№	$h_0, \text{мм}$	$h_1, \text{мм}$	$\Delta h, \text{мм}$	$b_0, \text{мм}$	$b_1, \text{мм}$	$V_0, \text{м/с}$	$V_b, \text{м/с}$	$V_1, \text{м/с}$	$S_n$	$F_0, \text{мм}^2$	$F_1, \text{мм}^2$	$R_k, \text{мм}$	$B_k, \text{мм}$	$h_{впр}, \text{мм}$	Зазор, мм
1	17,30	11,00	6,30	17,30	21,05	10,37	12,93	13,40	0,0365	234,94	181,79	102,63	23,65	4,6	1,80
2	21,05	13,78	7,28	11,00	13,78	13,40	16,01	16,35	0,0215	181,79	148,98	101,66	13,83	6,14	1,50
3	13,78	9,10	4,68	13,78	16,60	16,35	19,86	20,54	0,0343	148,98	118,61	103,32	18,89	3,5	2,10
4	16,60	10,96	5,64	9,10	10,96	20,54	25,08	25,82	0,0294	118,61	94,37	102,52	11,45	4,95	1,06
5	10,96	6,52	4,44	10,96	14,33	25,82	31,63	33,22	0,0501	94,37	73,35	104,01	16,85	2,7	1,12
6	14,33	8,63	5,71	6,52	8,63	33,22	40,02	41,71	0,0423	73,35	58,41	103,33	8,97	3,7	1,23
7	8,63	5,50	3,13	8,63	10,77	41,71	49,87	52,42	0,0510	58,41	46,48	104,38	13,56	2,1	1,30
8	10,77	6,85	3,91	5,50	6,85	52,42	63,21	66,07	0,0452	46,48	36,88	103,88	7,27	2,92	1,01
9	6,85	4,36	2,49	6,85	8,50	66,07	79,60	83,75	0,0521	36,88	29,09	104,74	10,24	1,6	1,16
10	8,50	5,50	3,00	4,36	5,50	83,75	98,00	102,73	0,0483	29,09	23,72	104,36	5,76	2,18	1,14
Геометричні розміри металу приведені до відповідної смуги та інші параметри															
№	$h_0, \text{мм}$	$h_1, \text{мм}$	$\Delta h, \text{мм}$	$b_0, \text{мм}$	$b_1, \text{мм}$	$\alpha_y, \text{рад}$	$Q^*_{пр.ср}$	$p_{ср}/2k$	$\gamma, \text{рад}$	$M_{пр}$	$R\gamma^2/h_1$	$q_0$	$q_1$		
1	15,33	9,75	5,58	15,33	18,65	0,233	-0,0092	1,0904	0,0567	0,0575	0,0338	0,000	0,025		
2	18,65	12,21	6,45	9,75	12,21	0,252	-0,0037	1,0323	0,0514	0,0677	0,0220	0,025	0,027		
3	12,21	8,06	4,14	12,21	14,71	0,200	-0,0084	1,1021	0,0527	0,0452	0,0355	0,027	0,021		
4	14,71	9,71	5,00	8,06	9,71	0,221	-0,0077	1,0774	0,0532	0,0536	0,0299	0,021	0,022		
5	9,71	5,78	3,94	9,71	12,70	0,195	-0,0101	1,1667	0,0528	0,0445	0,0502	0,022	0,027		
6	12,70	7,64	5,06	5,78	7,64	0,221	-0,0071	1,0903	0,0549	0,0525	0,0407	0,027	0,052		
7	7,64	4,87	2,77	7,64	9,54	0,163	-0,0088	1,1727	0,0491	0,0324	0,0517	0,052	0,053		
8	9,54	6,07	3,47	4,87	6,07	0,183	-0,0073	1,1162	0,0515	0,0382	0,0454	0,053	0,063		
9	6,07	3,86	2,21	6,07	7,53	0,145	-0,0094	1,2345	0,0447	0,0293	0,0542	0,063	0,024		
10	7,53	4,87	2,66	3,86	4,87	0,160	-0,0113	1,2224	0,0482	0,0331	0,0497	0,024	0,000		

Таблиця 2. Параметри деформації і повздовжня стійкість процесу прокатки при прокачуванні катанки  $\varnothing 5,5$  мм з коефіцієнтом тертя  $f_y = 0,18$

Реальні геометричні розміри металу та інші параметри															
№	$h_0, \text{мм}$	$h_1, \text{мм}$	$\Delta h, \text{мм}$	$b_0, \text{мм}$	$b_1, \text{мм}$	$V_0, \text{м/с}$	$V_B, \text{м/с}$	$V_1, \text{м/с}$	$S_n$	$F_0, \text{мм}^2$	$F_1, \text{мм}^2$	$R_k, \text{мм}$	$B_k, \text{мм}$	$h_{\text{вр}}, \text{мм}$	Зазор, мм
1	17,30	11,00	6,30	17,30	21,05	10,24	12,93	13,24	0,0240	234,94	181,79	102,63	23,65	4,6	1,80
2	21,05	13,78	7,28	11,00	13,78	13,24	16,01	16,15	0,0090	181,79	149,00	101,66	13,83	6,14	1,50
3	13,78	9,10	4,68	13,78	16,60	16,15	19,86	20,30	0,0220	149,00	118,59	103,32	18,89	3,5	2,10
4	16,60	10,96	5,64	9,10	10,96	20,30	25,08	25,51	0,0170	118,59	94,37	102,52	11,45	4,95	1,06
5	10,96	6,52	4,44	10,96	14,34	25,51	31,63	32,80	0,0370	94,37	73,38	104,01	16,85	2,7	1,12
6	14,34	8,62	5,71	6,52	8,62	32,80	40,02	41,22	0,0300	73,38	58,39	103,33	8,97	3,7	1,22
7	8,62	5,50	3,12	8,62	10,77	41,22	49,87	51,77	0,0380	58,39	46,50	104,38	13,56	2,1	1,30
8	10,77	6,87	3,90	5,50	6,87	51,77	63,21	65,04	0,0290	46,50	37,01	103,88	7,27	2,92	1,03
9	6,87	4,36	2,51	6,87	8,52	65,04	79,60	82,55	0,0370	37,01	29,16	104,74	10,24	1,6	1,16
10	8,52	5,59	2,93	4,36	5,59	82,55	98,00	98,29	0,0030	29,16	24,49	104,34	5,76	2,18	1,23
Геометричні розміри металу приведені до відповідної штаби та інші параметри															
№	$h_0, \text{мм}$	$h_1, \text{мм}$	$\Delta h, \text{мм}$	$b_0, \text{мм}$	$b_1, \text{мм}$	$\alpha_y, \text{рад}$	$Q^*_{\text{пр.сп}}$	$p_{\text{ср}}/2k$	$\gamma, \text{рад}$	$M_{\text{пр}}$	$R\gamma^2/h_1$	$q_0$	$q_1$		
1	15,33	9,75	5,58	15,33	18,65	0,233	-0,0026	1,0283	0,0437	0,0540	0,0201	0,000	0,025		
2	18,65	12,21	6,45	9,75	12,21	0,252	0,0036	0,9779	0,0346	0,0643	0,0100	0,025	0,025		
3	12,21	8,06	4,14	12,21	14,71	0,200	-0,0031	1,0407	0,0425	0,0424	0,0231	0,025	0,025		
4	14,71	9,71	4,99	8,06	9,71	0,221	-0,0009	1,0126	0,0405	0,0504	0,0173	0,025	0,026		
5	9,71	5,78	3,94	9,71	12,70	0,195	-0,0039	1,0668	0,0447	0,0393	0,0360	0,026	0,050		
6	12,70	7,64	5,06	5,78	7,64	0,221	0,0018	0,9796	0,0437	0,0463	0,0259	0,050	0,098		
7	7,64	4,87	2,77	7,64	9,54	0,163	-0,0008	1,0150	0,0420	0,0280	0,0378	0,098	0,120		
8	9,54	6,08	3,46	4,87	6,08	0,182	0,0032	0,9436	0,0413	0,0331	0,0291	0,120	0,150		
9	6,08	3,86	2,22	6,08	7,55	0,146	0,0002	0,9935	0,0382	0,0240	0,0395	0,150	0,150		
10	7,55	4,95	2,60	3,86	4,95	0,158	0,0015	0,9871	0,0275	0,0355	0,0159	0,150	0,000		

Примітка:  $h_0$  — початкова товщина;  $h_1$  — кінцева товщина;  $\Delta h$  — абсолютне обтиснення;  $b_0$  — початкова ширина;  $b_1$  — кінцева ширина;  $V_0$  — швидкість на вході в кліть;  $V_B$  — швидкість валків;  $V_1$  — швидкість на виході з кліть;  $F_0$  — початкова площа;  $F_1$  — кінцева площа;  $R_k$  — катаючий радіус валків;  $B_k$  — ширина калібру;  $h_{\text{вр}}$  — глибина врізу калібру;  $t$  — зазор;  $\alpha_y$  — кут захоплення при сталому процесі;  $q_0 = \sigma_0/2k$  і  $q_1 = \sigma_0/2k$  — безрозмірний задній і передній на-тяг;  $2k$  — середній опір деформації металу.

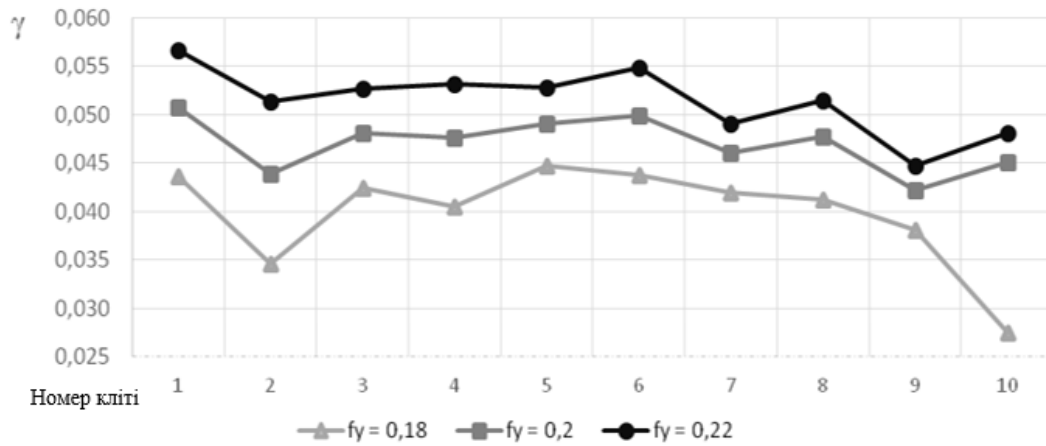


Рис. 2. Зміна кута нейтрального перетину  $\gamma$  по клітках в залежності від коефіцієнту тертя

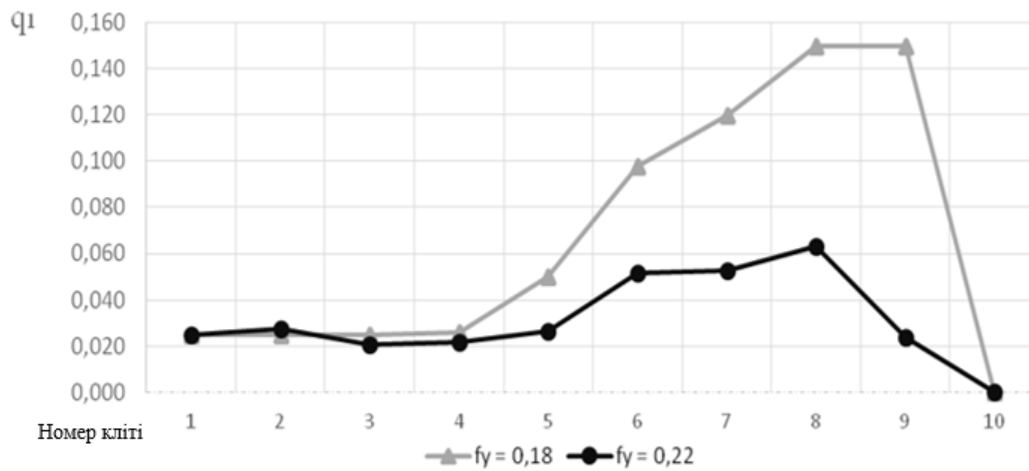


Рис. 3. Зміна переднього питомого натягу по клітках в залежності від коефіцієнту тертя

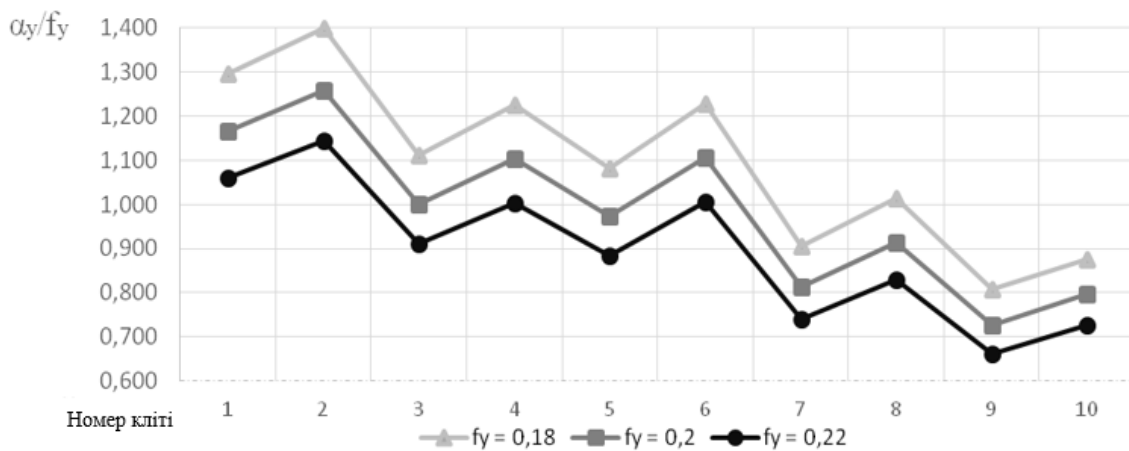


Рис. 4. Залежність  $\alpha_y/f_y$  від коефіцієнту тертя по клітках дротового блоку

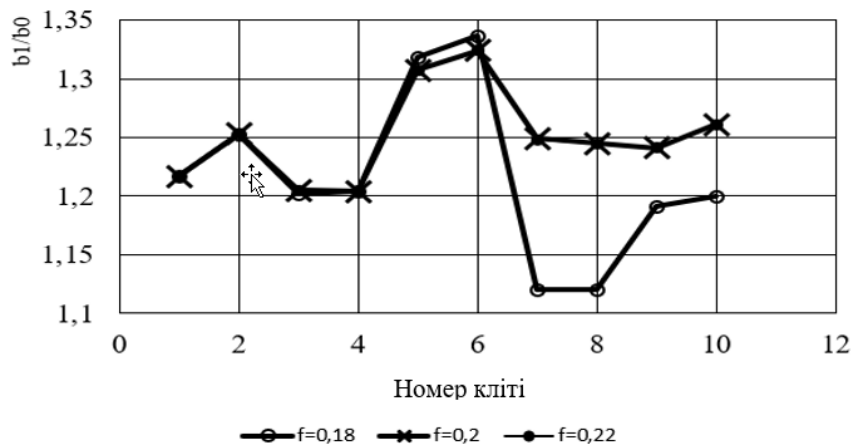


Рис. 5. Залежність коефіцієнту поперечної деформації від умов тертя

Звернемо увагу на те, що дослідження проводили в припущенні, що коефіцієнт тертя змінюється від 0,22 до 0,18 протягом прокатки одного розкату. На графіках рис. 1 показано вплив коефіцієнту тертя на граничну стійкість металу в кожній з клітей дротового блоку. Як видно, при прокатці з  $f_y = 0,22$  процес відбувається стійко у всіх клітях дротового блоку, тому що значення середньої результуючої сили  $Q_{ср пр}^*$  в осередках деформації є від'ємними, а сили — спрямованими протилежно руху штаби.

Причому розрахунки показують, що найбільш стійко штаба поводить при прокатці в п'ятій і 10 клітях. При зменшенні коефіцієнту тертя поздовжня стійкість металу по всім клітям блоку знижується. При  $f_y = 0,22$  прокатування в другій клітці ведеться в умовах близьких до граничних, а при коефіцієнті тертя рівному 0,18 стабільність процесу явно порушується в другій, шостій, 8-й—10-й клітях, оскільки сила  $Q_{ср пр}^*$  в осередках деформації цих клітей, приймаючи позитивне значення, як би сприяє процесу прокатки. Враховуючи, що вона є внутрішньою силою опору, роль активної сили  $Q_{ср пр}^*$  виконувати не може. Викладене дозволяє зробити висновок, що при  $f_y = 0,18$  стабільність процесу в дротовому блоці порушується і слід очікувати пробуксовки штаби в валках. Очевидно, мінімальне значення  $f_y$  має бути не менше 0,2. Звернемо увагу на те, що кут нейтрального перетину  $\gamma$  в наведених розрахунках у всіх випадках прокатки більше нульового значення, що впливає з графіків на рис. 2. Очевидно, що гранична умова  $Q_{ср пр}^* = 0$  є більш жорсткою у порівнянні з традиційною  $\gamma = 0$ , на що вказано в літературі [6, 7].

Крім того, прямі експерименти [8, 9] підтверджують той факт, що втрата рівноваги штаби в валках з подальшим пробуксовуванням можлива при наявності зони випередження, коли  $\gamma > 0$ . З графіків на рис. 3 випливає, що причиною втрати поздовжньої стійкості розкату при прокатуванні з відносно невеликим коефіцієнтом тертя є різке збільшення питомого натягу в міжклітьових проміжках блоку, починаючи з п'ятої кліти. Це пов'язано з необхідністю виконання умови сталості секундних об'ємів металу. При прокатці в другій клітці, де при близьких значеннях натягу і різних умовах тертя на контакт, у разі, коли  $f_y = 0,18$  процес стійко відбуватися не може. Це пояснюється тим, що при  $\frac{\alpha_y}{f_y} = 1,4$  (див. рис. 4) сила  $Q_{ср пр}^* > 0$ , тобто стає

активною. Це неможливо по вище сформульованим мотивам.

Умови тертя в осередках деформації дротового блоку, впливаючи на натяг металу в міжклітьових проміжках, впливають і на поперечний плин металу, а також на обтиснення. Це впливає з аналізу графіків рис. 5. Як видно зменшення коефіцієнту тертя до  $f_y = 0,18$  призводить до збільшення натягу в 6—9 клітях, що, в свою чергу, позначається на показнику попере-

чної деформації  $\frac{b_1}{b_0}$  в цих же клітках, на обтисненні металу в наступних проходах, а також на істотному зниженні безрозмірних величин середнього тиску  $p_{cp}/2k$  і моменту прокатки  $M_{пр}^*$  (див. табл. 1 і 2).

### Висновки

Проведене дослідження процесу прокатки катанки в дротовому блоці показало, що посилення режиму тертя в контактні металу з валками підвищує поздовжню стійкість розкату в осередку деформації. Мінімальне значення коефіцієнту тертя, при якому процес залишається стабільним без втрати рівноваги, є близьким до  $f_y = 0,2$ . При зменшенні  $f_y$  різко зростає натяг металу в міжкліткових проміжках, що може призвести до часткового або повного буксування штаби. Гранична умова  $Q_{cp пр}^* = 0$  є більш жорсткою у порівнянні з відомою  $\gamma = 0$ . Так, при вказаному значенні середньої результуючої сили максимальне відношення  $\frac{\alpha_y}{f_y} = 1,4 < 2$ .

Умови тертя на контактні валків і розкату впливають на коефіцієнт поперечної деформації і обтиснення металу в клітках дротового блоку, а також на силові параметри.

### Список використаної літератури

1. Максименко О. П., Кузьмин Е. В. Саморегулирование процесса с учетом внутренних продольных сил при прокатке в проволочном блоке. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2017. № 6. С. 16–21.
2. Maksymenko O. P., Samokhval V. M., Orobtsov A. Y., Marchenko K. K. Modeling the influence of rolling wear of the rolling parameters in a wire block. *Математичне моделювання*. 2019. № 2(41). С. 83–91.
3. Теоретические и технологические основы высокоскоростной прокатки катанки / А. А. Горбанев и др. Минск: Выш. шк., 2003. 287 с.
4. Коднир Д. С. Контактно-гидродинамическая теория смазки. Куйбышев: Куйбышевское книжное изд-во, 1963. 183 с.
5. Максименко О. П., Измайлова М. К., Лобойко Д. И. Анализ продольной устойчивости процесса прокатки с учетом внутренних сил и режима натяжения полосы. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 1. С. 59–62.
6. Максименко О. П., Измайлова М. К., Лобойко Д. И. Продольная устойчивость полосы в валаках с анализом контактных условий: монография. Днепропетровск : ДДТУ, 2016. 213 с.
7. Максименко О. П., Лобойко Д. И. Баланс продольных сил в очаге деформации и предельные условия прокатки. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2016. № 4. С. 34–37.
8. Грудев А. П. Захватывающая способность прокатных валков. М. : «СП Интермет Инжиниринг», 1998. 283 с.
9. Экспериментальное исследование максимальных углов захвата при установившемся процессе прокатки / А. П. Чекмарев и др. *Обработка металлов давлением: Науч. труды, ДМетИИ*. М. : Металлургия, 1967. Вып. ЛII. С. 79–88.

### STUDY OF THE INFLUENCE OF FRICTION CONDITIONS ON THE INDICATORS OF THE ROLLING PROCESS IN A WIRE BLOCK

Maksimenko O., Nikulin A., Loboiko D., Marchenko K.

#### Abstract

Physical modeling of the laws of friction during pressure treatment is a complex problem and is solved with many restrictions and assumptions. Computational experiments open up alternative

possibilities for investigating the influence of friction conditions on the rolling process. A deeper analysis of the friction mechanism in the wire block is required, since there is a significant scatter in the data on the coefficient of friction during high-speed rolling of wire rod. The aim of this work is to study the influence of friction conditions in the deformation zone of each of the stands of the wire block on the change in specific tensions, on the longitudinal stability of the rolling process, on the change in the angle of the neutral section and on the broadening of the metal. The study of the influence of these factors is based on the joint solution of the differential equilibrium equation of the elementary volume, isolated in the deformation zone, the plasticity equation. In this work, the range of variation of the coefficient of friction was chosen such as to reveal the patterns of rolling in conditions close to the limiting. The work investigated the influence of the coefficient of friction on the parameters of rolling wire rod with a diameter of 5.5 mm in a wire block. The study was carried out with a change in the coefficient of friction from 0.22 to 0.18 during the rolling of one roll. The friction conditions in the deformation zones of the wire block, affect the tension of the roll, affect both the transverse flow of the metal, and the reduction. The study of the process of rolling wire rod in a wire block showed that a toughening of the friction mode in contact between the metal and the rolls increases the longitudinal stability of the rolled wire in the deformation zone. The minimum value of the friction coefficient at which the process remains stable without loss of equilibrium is close to 0.2. With a decrease in the coefficient of friction, the tension of the metal in the inter-stand spaces sharply increases, which can lead to partial or complete slipping of the strip. The friction conditions in the contact between the rolls and the rolled stock affect the coefficient of transverse deformation and reduction of the metal in the stands of the wire block, as well as the power parameters.

### References

- [1] Maksimenko, O.P., & Kuz'min, E. V. (2017). Samoregulirovanie processa s uchetom vnutrennih prodol'nyh sil pri prokatke v pro-vochnom bloke [Self-regulation of the process taking into account internal longitudinal forces during rolling in a wire block]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. *Metallurgical and Mining Industry*, № 6. P. 16–21 [in Ukraine].
- [2] Maksymenko O. P., Samokhval V. M., Orobtsov A. Y., Marchenko K. K. (2019). Modeling the influence of rolling wear of the rolling parameters in a wire block. *Matematychni modeliuvannia – Mathematical modeling*. № 2(41). P. 83–91 [in Ukraine].
- [3] Gorbanev, A.A., ZHuchkov, S.M., & Filippov, V.V. et al. (2003). Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy vysokoskorostnoj prokatki katanki [*Theoretical and technological foundations of high-speed rolling of wire rod*]. Mn. : Vyshcha shkola [in Belarus].
- [4] Kodnir D. S. (1963). Kontaktno-gidrodinamicheskaya teoriya smazki [*Contact-hydrodynamic theory of lubrication*]. Kujby'shev: Kujby'shevskoe knizhnoe izd-vo [in USSR].
- [5] Maksimenko O. P., Izmajlova M. K., Loboiko D. I. (2015) Analiz prodol'noj ustojchivosti processa prokatki s uchetom vnutrennikh sil i rezhima natyazheniya polosy' [Analysis of the longitudinal stability of the rolling process taking into account the internal forces and the strip tension mode]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. *Metallurgical and Mining Industry*, № 1. P. 59–62 [in Ukraine].
- [6] Maksimenko, O. P., Loboiko, D.I., & Izmajlova, M. K. (2016). Prodol'naya ustojchivost' polosy v valkah s analizom kontaktnykh uslovij [*Longitudinal stability of strip in rolls with analysis of contact conditions*]. Dneprodzerzhinsk : DDTU [in Ukraine].
- [7] Maksimenko O.P., Loboiko D.I. (2016) Balans prodol'ny'kh sil v ochage deformatsii i predel'ny'e usloviya prokatki [Balance of longitudinal forces in the deformation zone and limiting conditions of rolling]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promy'shlennost'* – *Metallurgical and Mining Industry*, № 4. 34–37 [in Ukraine].
- [8] Grudev A. P. (1998) Zakhvaty'vayushhaya sposobnost' prokatny'kh valkov [*Gripping power of the milling rolls*]. M. : «SP Internet Inzhiniring» [in Russia].
- [9] Chekmarev A. P. et al. (1967). E'ksperimental'noe issledovanie maksimal'ny'kh uglov zakhvata pri ustanovivshemsya processe prokatki [Experimental study of the maximum grip angles in a steady-state rolling process]. *Obrabotka metallov davleniem: Nauch. trudy' - Processing of metals by pressure: Scientific labors*, DMetI. M. : Metallurgiya, № 52. 79–88 [in USSR].