

зависит от скорости скольжения и толщины масляной плёнки, устойчивый процесс прокатки наблюдается и при значительном «отрицательном» опережении [5, 6]. Теоретически такие условия выполняются, если трение в очаге деформации подчиняется закону Ньютона [7, 8].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Грудев А.П. Захватывающая способность валков / А.П.Грудев. – М.: СП «Интермет Инженеринг», 1998. – 283с.
2. Максименко О.П. Анализ продольной устойчивости процесса прокатки с учетом внутренних сил и режима натяжения полосы / О.П.Максименко, М.К.Измайлова, Д.И.Лобойко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2015. – №1. – С.59-62.
3. Максименко О.П. Анализ силового взаимодействия в очаге деформации при прокатке / О.П.Максименко, Д.И.Лобойко, Р.Я.Романюк // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – №6. – С.47-49.
4. Чекмарев А.П. Экспериментальное исследование максимальных углов захвата в установившемся процессе прокатки / А.П.Чекмарев, В.И.Прокофьев // *Обработка металлов давлением: науч. тр. ДМетИ*. – М.: *Металлургия*, 1967. – Вып. LII. – С.79-88.
5. Павлов И.М. К вопросу об отрицательном опережении при прокатке / И.М.Павлов, В.К.Белосевич // *Изв. Вузов. Черная металлургия*. – 1961. – №10. – С.46-49.
6. Mizuno T. An experimental research on cold rolling. I. Report: Estimating the mechanism of the lubrication / T.Mizuno // *Japan Society of Technology of Plasticity*. – 1966. – №7. – P.383-389.
7. Максименко О.П. Исследование контактных напряжений при однозонном скольжении металла в валках / О.П.Максименко, В.М.Самохвал, Е.Б.Лейко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2007. – №4. – С.52-55.
8. Максименко О.П. Исследование процесса прокатки в режиме гидродинамического трения / О.П.Максименко, В.М.Самохвал // *Известия вузов. Чёрная металлургия*. – 2007. – №2. – С.40-43.

*Поступила в редколлегию 31.10.2016.*

УДК 621.771.23

РОМАНЮК Р.Я., к.т.н., ст. викладач

Дніпродзержинський державний технічний університет

### **ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ РЕЖИМИ ОБТІСНЕНЬ ДЛЯ ОДНОКЛІТЬОВОГО РЕВЕРСИВНОГО СТАНУ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ 1500 ПАТ „МОДУЛЬ”**

**Вступ.** Успішна діяльність гірничо-металургійного комплексу, у тому числі і прокатного переділу, є важливим джерелом економічного розвитку України. Проте металургійна галузь є прикладом низькоефективного використання матеріальних, енергетичних і трудових ресурсів через вкрай зношене, морально застаріле обладнання, ресурсномісткі і екологічно небезпечні технології. Модернізація діючих виробничих потужностей і впровадження сучасних „ноу-хау” протягом останніх років через недостачу засобів і відсутність чіткої державної політики здійснювалися тільки на окремих металургійних комбінатах України, а рішення екологічних проблем практично не приділялася увага.

Для виробництва вітчизняної металопродукції характерна надмірна енергоємність, витрати на споживання енергоресурсів в структурі собівартості різних підприємств становлять від 30-50% і навіть більше, що на 20-25% перевищує загальносвітові рівні цього показника.

Отже, питання зниження витрат енергії без суттєвої модернізації виробництва та зміни технології є актуальними.

**Постановка задачі.** Метою роботи є аналіз існуючих режимів обтиснень на одноклітьовому стані холодної прокатки 1500 ПАТ „Модуль” та їх удосконалення з метою зниження енерговитрат.

**Результати роботи.** Одноклітьовий реверсивний стан холодної прокатки 1500 ПАТ „Модуль” (м. Кам’янець-Подільський) призначений для прокатки гарячекатаних штаб в рулонах вихідною товщиною 1,5-3 мм та шириною 900-1300 мм на кінцеву товщину 0,4-0,8 мм. Діаметри робочих валків – 480 мм, опорних – 1200 мм, максимальна швидкість прокатки – 8,5 м/с, максимальна сила прокатки – 1500 тс, максимальний сумарний момент прокатки – 10,27 тс·м, в’язкість емульсола при 50°C – 40 мм<sup>2</sup>/с [1].

У табл.1-3 наведено існуючі режими обтиснень, передні та задні натяги, швидкості прокатки, коефіцієнти тертя по проходах при виробництві штаб розмірами 0,4x1250 мм, 0,5x1250 мм та 0,8x1250 мм. Енергосилові параметри були розраховані за методикою, наведеною в роботах Я.Д.Василева [2], яка відрізняється врахуванням пружних характеристик валка і штаби та кінематики осередку деформації. В останньому рядку розраховано сумарні значення моменту та потужності прокатки.

Таблиця 1 – Результати теоретичного розрахунку енергосилових параметрів прокатки штаби 0,4x1250 мм ( $\sigma_{T0} = 220$  МПа) за існуючими режимами деформації

№ прох.	$h_0$ , мм	$h_1$ , мм	$V$ , м/с	$q_0$ , МПа	$q_1$ , МПа	$\beta\sigma_{Tcp}$ , МПа	$f_{cp}$	$P$ , МН	$M_{np}$ , кН·м	$W$ , кВт	$K_{cm}$
1	2	1,5	7,4	36	47,08	541,3	0,039	7,67	59,8	1409	0,00001
2	1,58	1,2	7,8	47,08	61,56	622,1	0,038	8,27	61,7	1394	0,000022
3	1,25	0,9	7,7	61,56	80,5	673,9	0,042	9	63,6	1333	0,000067
4	0,96	0,7	8,4	80,5	105,27	726	0,043	9,42	59,1	1232	0,000082
5	0,72	0,5	8,4	105,27	137,65	766,4	0,043	10,3	63	1227	0,000092
6	0,51	0,4	8,4	137,65	22	792,8	0,038	9,27	76,8	1202	0,000071
$\Sigma$									384	7797	

Примітка:  $q_0$  та  $q_1$  – задній та передній питомі натяги штаби відповідно,  $W$  – потужність прокатки з урахуванням натягів

Таблиця 2 – Результати теоретичного розрахунку енергосилових параметрів прокатки штаби 0,5x1250 мм ( $\sigma_{T0} = 220$  МПа) за існуючими режимами деформації

№ прох.	$h_0$ , мм	$h_1$ , мм	$V$ , м/с	$q_0$ , МПа	$q_1$ , МПа	$\beta\sigma_{Tcp}$ , МПа	$f_{cp}$	$P$ , МН	$M_{np}$ , кН·м	$W$ , кВт	$K_{cm}$
1	2,5	1,9	6,5	19,2	38,94	541,8	0,042	8,76	68,3	1433	0,000061
2	1,97	1,5	7	24,59	49,67	622	0,041	9,32	67,8	1408	0,000089
3	1,56	1,2	7,5	31,37	63,19	670,4	0,044	9,76	62,8	1302	0,000127

Продовження таблиці 2

4	1,23	0,9	7,5	39,91	82,77	712,1	0,046	10,46	62,1	1227	0,00015
5	0,93	0,6	7,5	52,28	114,33	752,9	0,046	11,59	64,5	1167	0,00016
6	0,66	0,5	7,5	72,21	22	780,3	0,042	11,02	75,6	1145	0,00014
Σ									401,1	7682	

Таблиця 3 – Результати теоретичного розрахунку енергосилових параметрів прокатки штаби 0,8x1250 мм ( $\sigma_{T0} = 220$  МПа) за існуючими режимами деформації

№ прох.	$h_0$ , мм	$h_1$ , мм	$V$ , м/с	$q_0$ , МПа	$q_1$ , МПа	$\beta\sigma_{Tcp}$ , МПа	$f_{cp}$	$P$ , МН	$M_{np}$ , кН·м	$W$ , кВт	$K_{cm}$
1	3	2,29	5	18,67	32,68	542	0,047	9,98	97,9	1627	0,000074
2	2,299	1,83	6,1	25,16	39,91	624,9	0,043	9,87	86,1	1598	0,000084
3	1,836	1,49	7,4	27,93	48,64	672,1	0,045	9,84	68,6	1424	0,000135
4	1,490	1,20	7,5	34,05	60,70	705	0,046	9,84	68,6	1155	0,000143
5	1,208	0,97	7,4	42,49	79,15	736	0,045	9,85	49,8	908	0,00013
6	0,971	0,8	7,2	55,40	22	759,6	0,043	9,55	69,3	1089	0,000125
Σ									440,3	7801	

Як показують дослідження, наприклад, наведені в роботах [2, 3], для зниження енерговитрат на ведення процесу прокатки необхідно збільшити передній та задній натяги, причому останній більш суттєво впливає на зниження енерговитрат.

Слід зазначити, що збільшення заднього натягу негативно впливає на подовжню сталість процесу та може призвести до пробуксовок металу в валках. Теоретично оцінити можливість існування сталого процесу прокатки з натягами за допомогою відомої умови для простого процесу, яка наведена в [4], неможливо. Тому з цією метою використовується методика, розроблена в [1, 5].

Суть цієї методики зводиться до визначення результуючої величини (в безрозмірній формі) втягуючих та виштовхуючих сил в кожному перетині осередку деформації за формулою

$$Q_x^* = - \int_{\varphi}^{\alpha_y} \frac{p_x}{\beta\sigma_{Tcp}} \sin \varphi d\varphi + \int_{\varphi}^{\alpha_y} \frac{t_x}{\beta\sigma_{Tcp}} \cos \varphi d\varphi, \quad (1)$$

де  $h_x$  та  $t_x$  – нормальні контактні напруження та напруження тертя в кожному перетині осередку деформації відповідно, МПа;

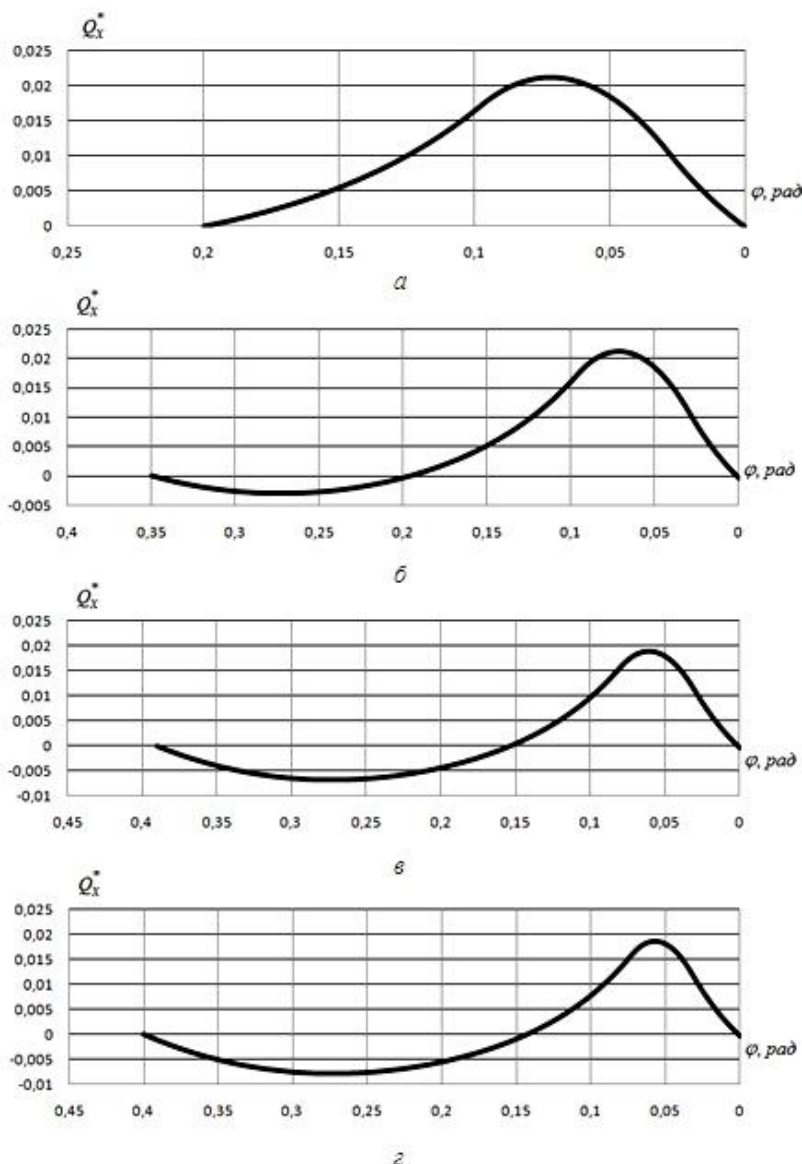
$\beta\sigma_{Tcp}$  – середнє вимушене напруження плинності, МПа;

$\varphi$  – поточний перетин осередку деформації, рад;

$\alpha_y$  – кут захвату в сталому режимі, рад.

У результаті отримуємо епюру, яка може мати один з представлених на рис.1 виглядів.

Як видно, область значень цієї результуючої сили в осередку деформації може бути лише позитивною (рис.1, а), негативною та позитивною, причому переважати можуть обидві області (рис.1, б, г) або бути рівними (рис.1, в), а також лише негативною. В даному випадку наведено теоретичні епюри, які отримані без врахування переднього та заднього натягів.



$a, б - K_{cm} > 0$ ;  $v - K_{cm} = 0$ ;  $z - K_{cm} < 0$ ;

Рисунок 1 – Епюри розподілу результуючої величини втягуючих та виштовхуючих сил в осередку деформації

З метою визначення поздовжньої сталості процесу прокатки введено показник сталості, який визначається за формулою

$$K_{cm} = \frac{1}{\alpha_y} \int_0^{\alpha_y} Q_x^* d\varphi. \quad (2)$$

Отже, в першому та другому випадках (рис.1,  $a, б$ )  $K_{cm}$  буде позитивним та характеризує домінування в осередку деформації втягуючих сил над виштовхуючими (процес прокатки буде протікати в сталому режимі), в третьому (рис.1,  $v$ ) – нульовим, характеризує рівність вищезгаданих сил (настання граничної умови сталого процесу прокатки), в інших – негативним, переважають або існують лише виштовхуючі сили (сталій процес деформації неможливий) [1, 5].

У останніх стовбцях табл.1-3 наведено значення показника сталості процесу прокатки для кожного проходу. Як видно, у всіх проходах  $K_{cm} > 0$ .

Слід зазначити, що значення показника  $K_{cm}$  є малим, оскільки величина  $Q_x^*$  розраховується в безрозмірній формі, однак з аналізу епюр її розподілу по осередку деформації випливає, що області позитивних значень даної сили перевищують негативні, тобто є достатній запас сил тертя на ведення сталого процесу прокатки.

Для прикладу, на рис.2 наведено теоретичну епюру розподілу сили  $Q_x^*$  для 3 проходу при прокатці штаби 0,4x1250 мм.

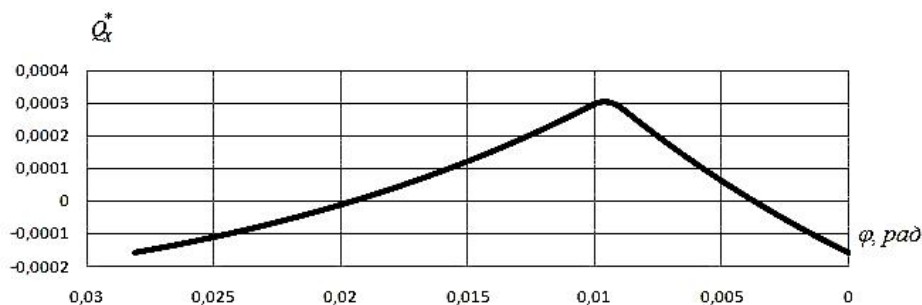


Рисунок 2 – Епюра розподілу сили  $Q_x^*$  для 3 проходу при прокатці штаби 0,4x1250 мм

Як видно, на межах осередку деформації результуюча сила не дорівнює нулю, оскільки прокатка протікає з переднім та заднім натягами. Особливості визначення показника сталості за формулою (2) при прокатці з натягами наведено в [1, рис.4.3].

Виходячи з останнього твердження про запас сил тертя в осередку деформації, запропоновано удосконалити режими обтисень, наведені в табл.1-3, шляхом збільшення натягів з метою ведення процесу з меншими енерговитратами.

Оскільки, як згадано вище, збільшення заднього натягу може призвести до пробуксовок металу в валках, то для кожного проходу розраховується поздовжня сталість процесу деформації за вищезгаданою методикою.

В табл.4 наведено теоретичні розрахунки енергосилових параметрів при прокатці штаби 0,4x1250 мм для запропонованих режимів натягів.

Таблиця 4 – Результати теоретичного розрахунку енергосилових параметрів прокатки штаби 0,4x1250 мм ( $\sigma_{T0} = 220$  МПа) за запропонованими режимами натягів

№ прох.	$h_0$ , мм	$h_1$ , мм	$V$ , м/с	$q_0$ , МПа	$q_1$ , МПа	$\beta\sigma_{Tcr}$ , МПа	$f_{cp}$	$P$ , МН	$M_{np}$ , кН·м	$W$ , кВт	$K_{cm}$
1	2	1,58	7,4	36	47,08	541,3	0,039	7,67	59,83	1409	0,00001
2	1,58	1,25	7,8	47,08	61,56	622,1	0,038	8,27	61,7	1394	0,000022
3	1,25	0,96	7,7	83,07	108,1	673,9	0,042	8,54	60,9	1297	0,000021
4	0,96	0,72	8,4	116,4	153,85	726	0,043	8,57	54,2	1171	0,000027
5	0,72	0,51	8,4	153,85	217,05	766,4	0,043	8,88	53,2	1098	0,000033
6	0,51	0,4	8,4	137,65	22	792,8	0,038	9,27	76,8	1202	0,000071
$\Sigma$									366,6	7571	

Порівнюючи енергосилові параметри за існуючими (табл.1) та запропонованими (табл.4) режимами, впливає, що за рахунок збільшення переднього та заднього натягів в 3-5 проходах досягається зменшення сили та моменту прокатки в них, а також сумарної потужності деформації на 2,9%, при цьому сталість процесу не порушується ( $K_{cm} > 0$ ). Оскільки показник сталості в перших двох проходах, в порівнянні з іншими, значно менший, то натяги в цих проходах залишаємо без змін. В останньому проході величини  $q_0$  та  $q_1$  також не змінюємо.

Аналогічно удосконалено режими деформації з метою зниження енерговитрат при прокатці штаб 0,5x1250 мм та 0,8x1250 мм. Результати теоретичного розрахунку енергосилових параметрів прокатки за запропонованими режимами натягів наведено в табл.5 та 6.

Таблиця 5 – Результати теоретичного розрахунку енергосилових параметрів прокатки штаби 0,5x1250 мм ( $\sigma_{T0} = 220$  МПа) за запропонованими режимами натягів

№ прох.	$h_0$ , мм	$h_1$ , мм	$V$ , м/с	$q_0$ , МПа	$q_1$ , МПа	$\beta\sigma_{Tcp}$ , МПа	$f_{cp}$	$P$ , МН	$M_{np}$ , кН·м	$W$ , кВт	$K_{cm}$
1	2,5	1,97	6,5	25,6	48,68	541,8	0,042	8,57	65,6	1392	0,000023
2	1,97	1,56	7	40,57	71,43	622	0,041	8,96	64,1	1347	0,00003
3	1,56	1,23	7,5	51,02	90,76	670,4	0,044	9,23	57,8	1234	0,000072
4	1,23	0,93	7,5	64,83	119,91	712,1	0,046	9,88	57,3	1148	0,000098
5	0,93	0,66	7,5	85,65	168,67	752,9	0,046	10,57	57,1	1069	0,000104
6	0,66	0,5	7,5	72,21	22	780,3	0,042	11,02	75,6	1145	0,00014
$\Sigma$									377,5	7335	

Таблиця 6 – Результати теоретичного розрахунку енергосилових параметрів прокатки штаби 0,8x1250 мм ( $\sigma_{T0} = 220$  МПа) за запропонованими режимами натягів

№ прох.	$h_0$ , мм	$h_1$ , мм	$V$ , м/с	$q_0$ , МПа	$q_1$ , МПа	$\beta\sigma_{Tcp}$ , МПа	$f_{cp}$	$P$ , МН	$M_{np}$ , кН·м	$W$ , кВт	$K_{cm}$
1	3	2,299	5	24	41,76	542	0,047	9,81	94,2	1577	0,000031
2	2,299	1,836	6,1	34,8	61	624,9	0,043	9,62	76,9	1432	0,000043
3	1,836	1,49	7,4	43,57	75,17	672,1	0,045	9,45	61,6	1293	0,000081
4	1,490	1,208	7,5	53,69	92,72	705	0,046	9,36	51,8	1037	0,000092
5	1,208	0,971	7,4	66,23	115,35	736	0,045	9,29	44,1	820	0,000086
6	0,971	0,8	7,2	55,40	22	759,6	0,043	9,55	69,3	1089	0,000125
$\Sigma$									397,9	7248	

У першому випадку (штаба 0,5x1250 мм) за рахунок збільшення переднього та заднього натягів в 1-5 проходах досягається зменшення сили та моменту прокатки, а також сумарної потужності деформації на 4,5%, процес при цьому буде протікати в сталому режимі.

У другому випадку (штаба 0,8x1250 мм) зменшення сумарної потужності деформації становить 7,1%.

Таким чином, на стані 1500 ПАТ „Модуль” удосконалено режими прокатки при виробництві штаб товщинами 0,4 мм 0,5 мм та 0,8 мм. В результаті буде протікати стабільний процес прокатки при менших енерговитратах.

Як показують практичні дані роботи прокатних станів, подібну величину натягу ( $q_0$  та  $q_1$  становлять 0,15-0,3 від  $\beta\sigma_{Tcr}$ ) можна застосовувати при прокатці тонких та особливо тонких штаб і листів лише за умови високої культури виробництва, тобто якісного обрізання та фрезерування кромки, своєчасної заміни ножів тощо.

Крім цього, необхідно використовувати сучасні автоматичні системи регулювання товщини штаби, натягу між клітями, площинності, швидкості прокатки [6].

**Висновки.** Проаналізовано існуючі режими деформації штаб 0,4x1250 мм, 0,5x1250 мм та 0,8x1250 мм. В ході оцінки сталості прокатки за даними режимами встановлено, що є достатній запас сил тертя на ведення процесу, тому запропоновано збільшити передній та задній натяги по проходах. В результаті відбувається зниження сили прокатки в кожному проході, а також сумарного моменту та потужності деформації.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Романюк Р.Я. Підвищення поздовжньої сталості процесу тонколистової прокатки на основі розвитку теоретичних положень щодо контактної взаємодії полоси з валками: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05 / Романюк Роман Ярославович. – Дніпропетровськ, 2012. – 132с.
2. Василев Я.Д. Теорія поздовжньої прокатки / Я.Д.Василев, О.А.Мінаєв. – Донецьк: УНІТЕХ, 2009. – 488с.
3. Максименко О.П. Разработка рациональных режимов натяжений на жестекатальных станах комбината „Запорожсталь” / О.П.Максименко, Р.Я.Романюк // Обработка материалов давлением: сб. науч. трудов. – Краматорск: ДГМА. – 2012. – №1 (30). – С.178-181.
4. Грудев А.П. Теория прокатки: [учебник для вузов] / А.П.Грудев. – М.: Металлургия, 1988. – 240с.
5. Максименко О.П. Методика оценки продольной устойчивости процесса прокатки / О.П.Максименко, Р.Я.Романюк // Вестник Национального технического университета „Харьковский политехнический институт”. – Харьков: НТУ „ХПИ”. – 2009. – №33. – С.84-90.
6. Приходько И.Ю. Совмещённое регулирование толщины, натяжения и плоскостности полос при холодной прокатке современными средствами регулирования с учётом скоростных характеристик исполнительных механизмов / И.Ю.Приходько, А.М.Сафьян, В.С.Куцин // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – №2. – С.32-35.

Надійшла до редакції 14.11.2016.