

УДК 621.771.014

Л.А. ВАКУЛА, к.т.н., ст.н.с., завідувач лабораторії
НДІ «УкрНДІМет» УкрДНТЦ «Енергосталь»**О.С. РУДЮК**, к.т.н., заступник генерального директора, директор НДІ «УкрНДІМет»
УкрДНТЦ «Енергосталь», м. Харків

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНІЙ ПРОКАТЦІ ТА ЙОГО ВПЛИВ НА ЯКІСТЬ МЕТАЛУ І ЕКСПЛУАТАЦІЮ УСТАТКУВАННЯ

Показано можливість зменшення енергоємності вітчизняного прокату мінімум на 20–30 % за рахунок зниження втрат тепла на нагрівальних печах у результаті їх модернізації та зниження температури нагрівання заготовок на 200–250 °С. Запобігти надмірному зростанню навантажень на устаткування прокатних станів та обмежити їх рівнем максимум 15–25 % можна при зменшенні циклу прокатки, використанні теплозберігаючих або проміжних підігрівальних пристроїв та збільшенні числа проходів. Одночасно з підвищенням зусиль прокатки та контактних напружень в осередку деформації зменшуються теплові навантаження на валки та їх абразивний знос, що потребує використання нових валкових матеріалів.

енергозбереження, низькотемпературне нагрівання, міцність устаткування, механічні властивості

Згідно з результатами останніх досліджень, проведених на чотирьох вітчизняних металургійних підприємствах, цехова енергоємність різних видів металопрокату дорівнювала таким значенням: катаних заготовок – 56,1–65 кг у.п./т (457–530 кВт·г/т), сортового прокату – 104,4–204,7 кг у.п./т (850–1666 кВт·г/т), листового прокату – 204,9–257,0 кг у.п./т (1668–2092 кВт·г/т). Їх доля у галузевій енергоємності склала відповідно: 5,1–5,6 %, 8,3–13,3 % та 13,9–16,5 % [1]. Середній наскрізний заводський коефіцієнт енергоємності вказаних видів прокату на цих підприємствах склав 975,4 кг у.п./т, 1024,4 кг у.п./т, 1028,9 кг у.п./т та 1099,8 кг у.п./т, що в середньому дорівнює близько 1030 кг у.п./т (8385 кВт·г/т).

Для порівняння, на російських підприємствах чорної металургії аналогічний наскрізний коефіцієнт на початку 2000-х років складав: на НЛМК – 659 кг у.п./т, на ЗСМК – 684 кг у.п./т, на ВАТ «Северсталь» – 687 кг у.п./т, на ММК – 719 кг у.п./т, на КМК – 861 кг у.п./т, на ОХМК – 920 кг у.п./т, на НТМК та ВАТ «МЕЧЕЛ» – 932 кг у.п./т, а в середньому – близько 780 кг у.п./т (6350 кВт·г/т) [2].

Навіть з урахуванням деяких методичних розбіжностей при визначенні питомих енерговитрат вітчизняний прокат має більшу енергоємність, ніж російський, який у свою чергу відстає від кращих світових показників. Тому питання скорочення енергоспоживання як за рахунок організаційних, так і за рахунок технічних заходів у прокат-

ному виробництві України нині і у найближчі роки буде найбільш актуальним.

Великий діапазон енергоємності прокату пояснюється специфікою технології прокатки, марочного та профільного сортаменту, а також ступенем оброблення заготовок та готового прокату на ад'юстажах, в першу чергу необхідністю термообробки в печах та режимами нагрівання. При середній теплоємності сталі 700 Дж/(кг·°С) нагрівання заготовок до температури 1100–1300 °С потребує витрат енергії близько 70 МДж/т на кожні 100 °С. З урахуванням ККД на різних типах полум'яних нагрівальних печей прокатних станів фактично витрачається енергії 200–250 МДж/т (55–70 кВт·г/т) на 100 °С. Це обумовлено втратами тепла з пічними газами, випромінюванням у вікна, теплопередачею в охолоджуючу воду глісажних труб та оболонки печей через їх стіни та іншими факторами.

Реальне скорочення витрат палива на полум'яних печах можливе за рахунок використання:

- сучасних футерувальних матеріалів з високим тепловим опором та низькою теплоємністю, зокрема на базі муліто-кремнеземів;
- крокуючих рейок з теплоізоляційних та теплостійких сплавів замість глісажних труб, що охолоджуються проточною водою;
- пристроїв для допалювання палива;



- повної автоматизації процесу нагрівання металу, використання тиристорних приводів та ін.

Сумарна економія палива за умови впровадження вказаних технічних заходів становитиме 20–25 %, або близько 50–60 МДж/т (15–17 кВт·г/т). З урахуванням того, що питома вага витрат енергії на нагрівання в сумарних витратах енергії на прокатку коливається в широкому інтервалі – від 80 % на сучасних швидкісних безперервних станах до 90 % на застарілих тихохідних станах лінійного типу, це дозволить на 15–20 % скоротити витрати енергії у прокатному виробництві.

Іншим ефективним технічним шляхом енергозбереження є зниження температури нагрівання заготовок під прокатку, що було здійснено в найбільш розвинутих металургійних виробництвах світу і стало однією з основних технологічних концепцій подальшого розвитку прокатного виробництва. Зниження температури нагрівання заготовок на кожні 100 °С в інтервалі 1200–900 °С призводить на різних типах станів до збільшення витрат електроенергії на власне прокатку в середньому на 4–7 кВт·г/т (14–25 МДж/т). При цьому сумарна економія енергії складає близько 200 МДж/т (55 кВт·г/т), або більше 80 %, що підтверджено зокрема роботами [3, 4] та власними експериментальними дослідженнями авторів даної праці. Відповідно до табл. 1 зниження температури нагріву заготовок в інтервалі 1200–750 °С призвело до економії енергоресурсів, причому максимум був досягнутий при найбільшому її зниженні – на 400 °С.

Зниження температури прокатки істотно впливає на комплекс механічних властивостей прокату. При цьому відповідна деформаційно-термічна обробка може забезпечити такі його властивості та структуру, що подальша термообробка в печах може бути або взагалі вилучена з технологічного процесу, або значно скорочена [5]. Це зокрема доведено результатами плинності експериментів на стані 350 ОЕМК (Росія) [6]. На більшості марок сталі межа плинності та тимчасовий опір зі зниженням температури деформації зростали в меншому ступені, ніж в'язкопластичні властивості, а у деяких випадках тимчасовий опір мав тенденцію до зниження. Останнє можна пояснити запобіганням або значним гальмуванням процесу збиральної рекристалізації, що забезпечує деформацію аустеніту з меншими зернами і більшою дефектністю структури. Це призводить до подальшого подрібнення зерен при прокатці, вищій за температуру рекристалізації, або до зберігання їх розмірів та підвищення дефектності структури при температурі прокатки, нижчій за поріг рекристалізації. У результаті твердість прокату зі сталі марок 10, 20 та 35 без термообробки після прокатки – на рівні 115, 132 та 163 НВ, що відповідає вимогам ГОСТ 10702 у стані після термообробки.

Зниження температури прокатки також в цілому позитивно впливає на стійкість прокатних валків. Це пояснюється наступними факторами:

- зниженням температурної втоми металу за рахунок зменшення амплітуди температурного навантаження валків в осередку деформації;
- зниженням абразивного зносу калібрів за рахунок зменшення в складі окалини її найтвердішої фракції – Fe_2O_3 і збільшення найм'якшої – FeO , яка в осередку деформації діє як технологічне мастило.

Але поряд із цим підвищується втома металу від збільшення контактних напружень у валках. Тому на станах, де впроваджена низькотемпературна прокатка, як правило, змінені або вдосконалені валкові матеріали, що більш ефективно діють в умовах експлуатації, вказаних вище. Так, при низькотемпературній прокатці низькоуглецевих сталей, або так званій феритній прокатці, найбільш ефективними валковими матеріалами показали себе швидкорізальні сталі [7].

Основною проблемою низькотемпературного нагрівання є підвищення енергосилових параметрів прокатки, яке спостерігається в основному в перших проходах. Далі завдяки деформаційному розігріванню металу опір деформації зменшується, причому чим більші ступінь обтиску та швидкість прокатки, тим швидше. Дослідження показали, що на більшості вітчизняних сортопрокатних станів технічні характеристики клітей та їх приводів не дозволяють суттєво знизити температуру нагріву під прокатку без впровадження додаткових технічних заходів.

У світовій практиці розроблено та задіяно декілька організаційних та технічних шляхів вирішення цієї проблеми, які використовуються як поодиночі, так і сукупно. За зростанням ступеня складності та обсягу робіт їх можна класифікувати таким чином:

1. Зниження падіння температури розкатів за рахунок зменшення часу знаходження їх в технологічному потоці стану в результаті скорочення пауз в технологічному циклі та підвищення швидкості прокатки.
2. Заміна чавунних валків на більш міцні з легованої сталі.
3. Перероблення калібровок валків з метою перерозподілу витяжок за прохід в бік зменшення їх у первантажених проходах та збільшення в недовантажених, що особливо ефективно за наявності незадіяних клітей.
4. Зниження падіння температури розкатів за рахунок встановлення термостатів або підігрівальних печей на ділянках технологічного потоку з найбільшими міждеформаційними паузами.
5. Підвищення конструктивної міцності окремих клітей та (або) їх приводів, на яких спостерігається пере-

вантаження, за рахунок реконструкції або заміни на більш міцні та жорсткі.

6. Встановлення додаткової кліті – як правило, передчистою, що дозволяє перерозподілити та знизити витяжки в усіх проходах і за необхідності підвищити швидкість прокатки.

Для прогнозу зниження температури нагрівання заготовок необхідно розрахувати зусилля, моменти і потужність прокатки та співставити їх з паспортними характеристиками відповідного устаткування. Це можна зробити за допомогою ряду ефективних комп'ютерних програм для розрахунку цих параметрів, наприклад [8, 9]. Важливим у них є визначення опору деформації з урахуванням ступеня, швидкості та температури деформації. У вибраному інтервалі температури 900–1200 °С його можна розрахувати за допомогою термомеханічних коефіцієнтів або з використанням феноменологічних залежностей величини опору деформації сталі від умов деформації [8, 9].

Для декількох сортових станів трьох вітчизняних підприємств, що умовно називаються надалі А, Б і В, було проведено моделювання температурного стану металу в процесі прокатки при різних температурах нагрівання заготовок та розраховано відповідні енергосилові параметри прокатки. Зокрема проаналізовані енергопараметри при прокатці кутового профілю 90×90×6 мм із квадратної заготовки перерізом 160×160 мм на напівбезперервному стані 350 підприємства А, профілю автобуду КамАЗу 232×35 мм із прямокутної заготовки перерізом 230×100 мм на напівбезперервному стані 550 підприємства Б та круглого профілю діаметром 22 мм із квадрат-

ної заготовки перерізом 106×106 мм на безперервному стані 350 підприємства В.

Існуюча температура нагрівання заготовок на вказаних станах знаходиться в межах 1200–1270 °С, у розрахунках приймали її зниження на 200–220 °С, тобто до 1000–1050 °С. Розрахункові значення енергопараметрів співставляли з допустимими навантаженнями на кліті та їх приводи при різних технологічних варіантах низькотемпературної прокатки, які передбачали використання заходів, перелічених вище.

У статті проаналізовано два варіанти запобігання перевантаженню устаткування – за рахунок використання тільки теплозберігаючих пристроїв (термостатів або проміжних печей) та використання їх з одночасним зменшенням витяжок за прохід у результаті збільшення кількості проходів.

На рис. 1–4 як приклади – температура деформації при прокатці профіля діаметром 22 мм та зусилля прокатки досліджених профілів:

- при існуючих температурах нагрівання заготовок;
- при знижених температурах нагрівання та застосуванні термостатів на двох ділянках з максимальним падінням температури розкатів;
- при знижених температурах нагрівання, застосуванні термостатів, а також при одночасному збільшенні кількості проходів зі зниженням та перерозподілом витяжок.

Аналіз температурного стану металу та енергосилових параметрів прокатки профілів при переході до вказаних варіантів низькотемпературного нагрівання показав:

Таблиця 1 – Витрати енергії на нагрівання та прокатку сортового прокату на різних станах при різних температурних режимах деформації

Підприємство, стан	Форма та розміри перерізу, мм		Кількість проходів	Витяжка за прохід	Марка сталі	Температура, °С		Витрати енергії, кВт·г/т			
	заготовки	прокату				нагрівання	кінця прокатки	на нагрівання	на прокатку	на нагрівання та прокатку	питомі за один прохід
«Forsbacka», 300 (Швеція)	Квадрат 70	Круг 10	16	1,295	SAE1042	1150	830	507	49	556	34,8
			16	1,295	SAE1042	750	795	302	72	374	23,4
	Квадрат 100	Круг 34	9	1,305	8MnCrMo	1150	1020	463	24	487	54,1
			9	1,305	8MnCrMo	950	935	366	37	403	44,7
ОЕМК, 350 (Росія)	Квадрат 172	Круг 12	24	1,261	20	1100	1000	602	98	700	29,2
			24	1,261	60C2A	950	990	477	139	616	25,7
«АрселорМіттал Кривий Ріг», 250-3 (Україна)	Квадрат 80	Круг 10	15	1,340	Ст3ТРпс	1200	1000	612	53	665	44,3
			15	1,340	Ст3ТРпс	1060	970	530	64	594	39,6
		Круг 12	15	1,309	Ст3ТРпс	1200	990	612	34	646	43,1
			15	1,309	Ст3ТРпс	1060	960	530	41	571	38,1

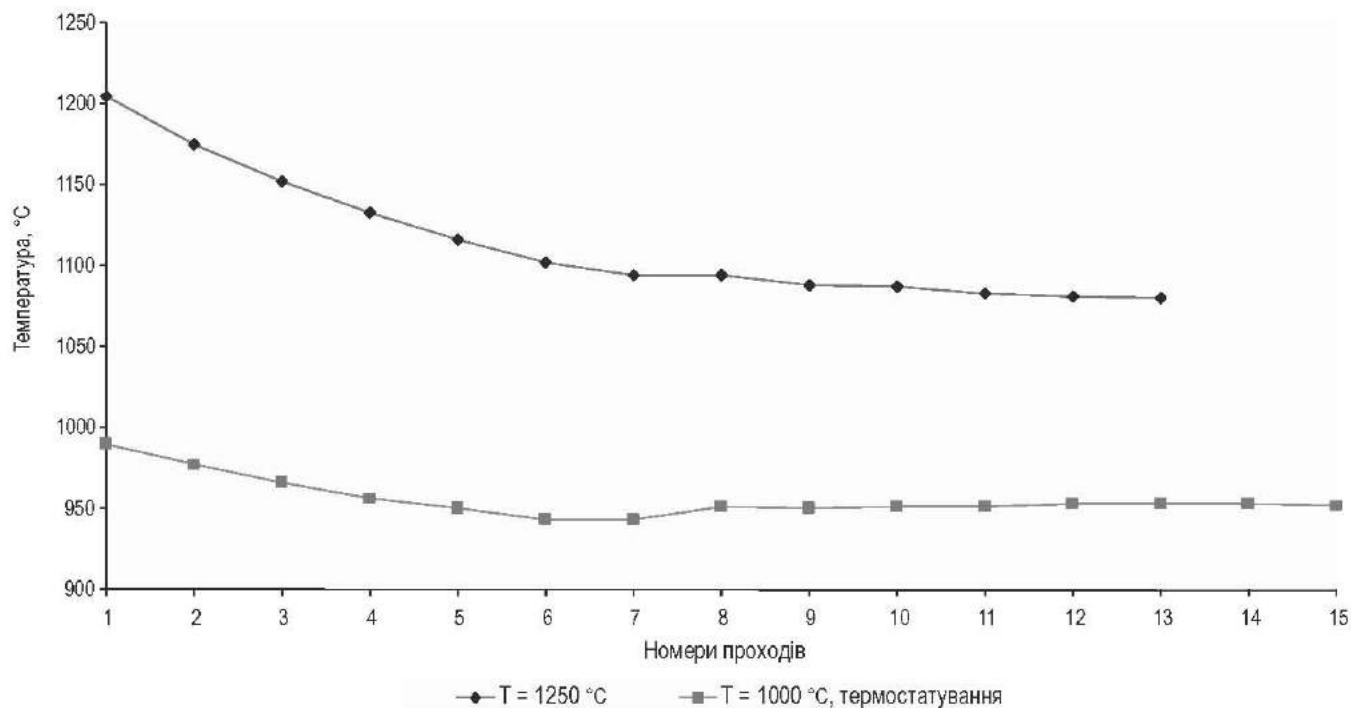


Рисунок 1 – Температура прокатки круга діаметром 22 мм зі сталі 20, стан 350 підприємства В

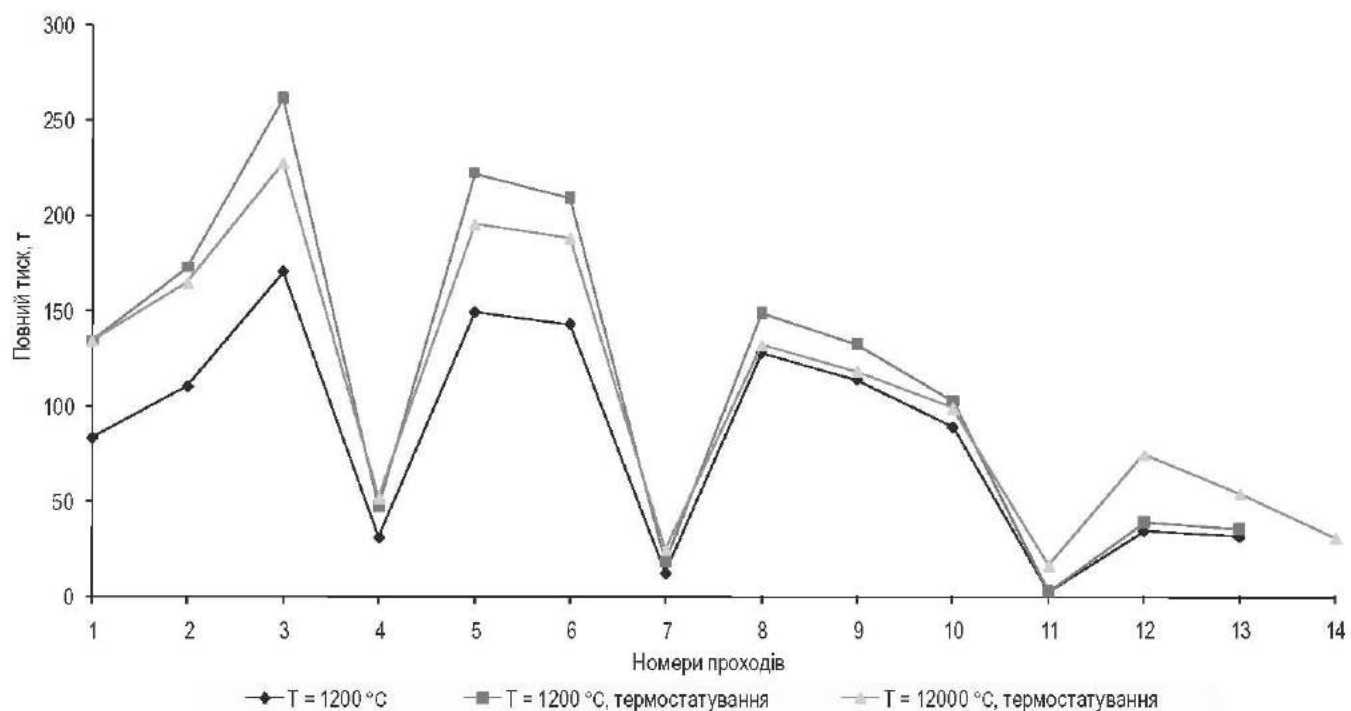


Рисунок 2 – Повний тиск при прокатці кутового профіля 90×90×6 мм, сталь 20, стан 350 підприємства А

1. Перепад температури деформації розкатів в клітях зменшується зі 150–290 °С до 50–140 °С, що максимально стабілізує температурний режим прокатки.

2. Використання тільки теплосберігаючих пристроїв не в усіх випадках запобігає перевантаженню клітей, однак необхідне розвантаження можливе при одночасному збільшенні кількості проходів.

3. Калібровки валків, що використовуюються, передбачають мінімальне число клітей, при цьому залишається можливість задіяти ще одну-дві вільних клітей. Більше того, виробнича площа на ряді станів дозволяє встановити додаткові клітей.

З отриманих результатів можна зробити узагальнений висновок, що на сортових станах різних типів при зни-

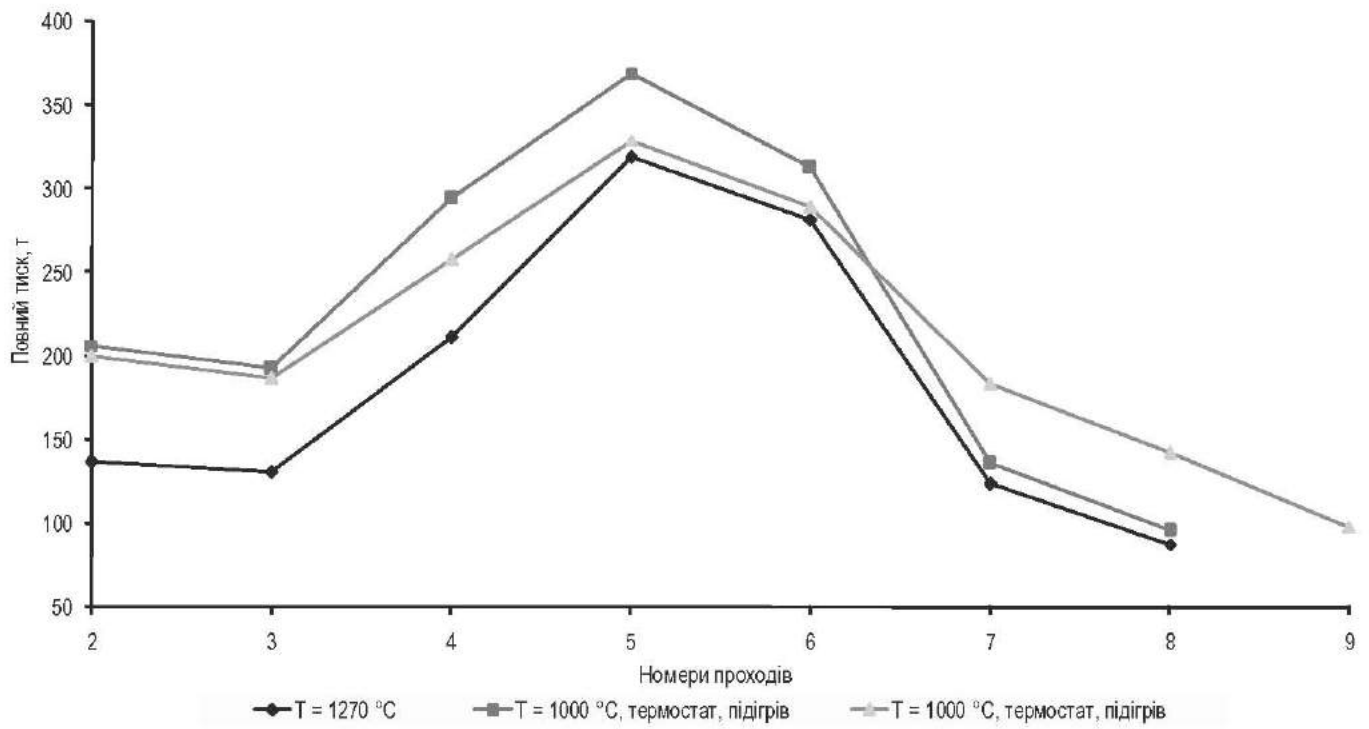


Рисунок 3 – Повний тиск при прокатці профіля автободу КАМАЗ, сталь 15, стан 550 підприємства Б

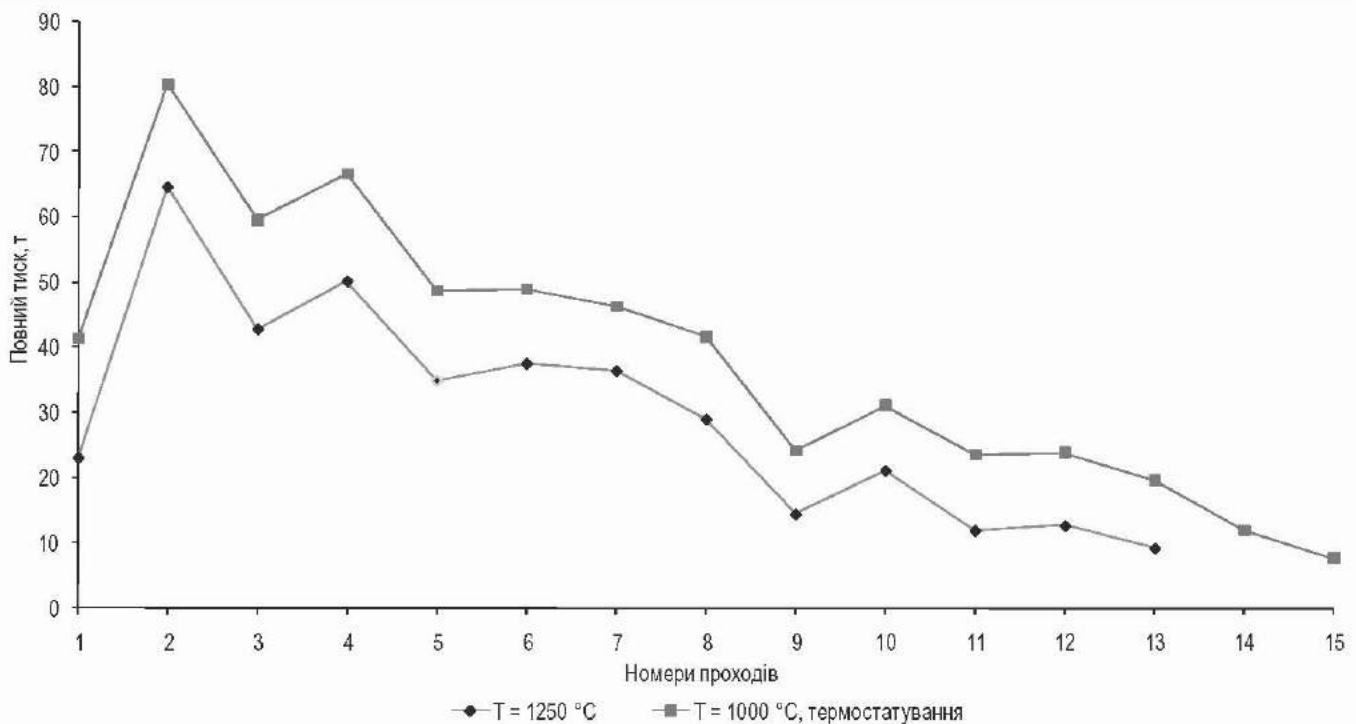


Рисунок 4 – Повний тиск при прокатці круга діаметром 22 мм зі сталі 20, стан 350 підприємства В

женні температури нагрівання заготовок з 1200–1270 °C до 1000–1050 °C, збільшенні числа проходів на 12–15 % та застосуванні на ділянках з найбільшим падінням температури розкатів термостатів енергосилові параметри прокатки зростуть максимум на 20–25 % в окремих проходах. Ці параметри можна зменшити за рахунок встановлення активних термостатів (замість пасивних), тобто прохідних проміжних підігрівальних печей. Практика їх використання на

сучасних безперервних сортових станах показала, що при встановленні між чорною та першою проміжною групами клітей та підігріванні розкатів на 50 °C забезпечується подальший температурний режим прокатки, еквівалентний підвищенню температури нагрівання заготовок в основних печах мінімум на 150 °C [10]. У цьому випадку підвищення міцності клітей та потужності приводів стосується тільки чорної (обтискувальної) групи клітей.



Розрахунки енергозбереження при низькотемпературному нагріванні заготовок на безперервних та напів-безперервних сортових станах показали, що при зниженні температури нагрівання з 1200–1270 °С до 1000–1050 °С з одночасним використанням теплозберігаючих пристроїв та збільшенням кількості проходів на 1–2 сумарна потужність прокатки зростає на 15–18 кВт·г/т. Це дозволяє забезпечити економію палива в межах 110–130 кВт·г/т (400–470 МДж/т), а сумарну економію енергоресурсів на нагрівання та прокатку сортових профілів – на 100–110 кВт·г/т (360–400 МДж/т), або на 12–15 %.

ВИСНОВКИ

Модернізація нагрівальних печей прокатних станів одночасно зі зниженням температури нагрівання заготовок до 1000–1050 °С може забезпечити скорочення сумарних витрат енергії на нагрівання та прокатку мінімум на 20–30 %. Енергосилові параметри прокатки та навантаження на устаткування підвищуються максимум на 15–25 % при зменшенні циклу прокатки, використанні теплозберігаючих пристроїв та збільшенні кількості проходів. Одночасно з підвищенням зусиль прокатки та контактних напружень зменшуються теплові навантаження на валки та їх абразивний знос.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. **Aullisa, L.** Lineament del plano di riduzione del consumi di combustibile al treno nasi da 90° di Taranto. / L. **Aullisa** // La Metallurgia Italiana. – 1984. – N 9. – P. 392–397.
2. **Pera, J.-O.** Application of computer simulation to low-temperature bar and rod rolling / J.-O. Pera, S.-E. Lundberg / Iron and Steel Ingeneer. – 1985. – N 10. – P. 48–52.

Показана возможность уменьшения энергоемкости отечественного проката минимум на 20–30 % за счет уменьшения потерь тепла на нагревательных печах в результате их модернизации и снижения температуры нагрева заготовок на 200–250 °С. Предупредить чрезмерный рост нагрузок на оборудование прокатных станов и ограничить их уровнем максимум 15–25 % можно при уменьшении цикла прокатки, использовании теплосберегающих или промежуточных подогревательных устройств и увеличении числа проходв. Одновременно с повышением усилий прокатки и контактных напряжений в очаге деформации уменьшаются тепловые нагрузки на валки и их абразивный износ, требующий использования новых валковых материалов.

3. **Жучков, С.М.** Пути снижения энергозатрат при непрерывной сортовой прокатке [Текст] / С.М. Жучков, Л.В. Кулаков, А.В. Сокуренько // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2004. – № 6. – С. 64–66.
4. **Вакула, Л.А.** Освоение оборудования и технологии деформационно-термической обработки проката в потоке стана 350 [Текст] / Л.А. Вакула, В.П. Масык, В.М. Краснопольский и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2003. – № 6. – С. 32–36.
5. **Жучков, С.М.** Автоматизированный расчет технологических параметров прокатки на непрерывном стане [Текст] / С.М. Жучков, Л.В. Кулаков, К.Ю. Ключников и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2003. – № 6. – С. 40–44.
6. **Гуляев, Ю.Г.** Построение математических моделей процессов обработки металлов давлением с применением искусственных нейронных сетей [Текст] / Ю.Г. Гуляев, В.Н. Данченко, Е.И. Шифрин и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2004. – № 1. – С. 53–59.
7. **Бровман М.Я.** Энергосиловые параметры и усовершенствование технологии прокатки [Текст] / М.Я. Бровман. – М.: *Металлургия*, 1995. – 256 с.
8. **Ноговицын, А.В.** Прогнозирование процессов структурообразования при охлаждении проката с применением математической модели [Текст] / А.В. Ноговицын, А.В. Богачева, Н.Ф. Евсюков и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1999. – № 5. – С. 75–78.
9. **Hernandes, C.A.** Acta metall. / S.F. Medina and J. Ruiz. // *Mater.*, 44, 155 (1996).
10. **Тэрэути, К.** Устройство подогрева раската на стане горячей прокатки № 2 в Фукуяме / К. Тэрэути, У. Танигути и др. // *Тэцу то Хаганэ*, 1985. – Т. 71 – № 5. – С. 58.

Поступила в редакцию 08.10.07 г.

The opportunity of decreasing energy consumption of domestic rolled products by min 20–30% due to reduction of heat loss on heating furnaces after their modernization and decreasing heating temperature of billets by 200–250°C is shown. To prevent over-growth of loadings on rolling mill facility and to limit its maximum increase by 15–25 %, it is possibly by shorting rolling cycle, using heat-saving or intermediate heating devices and increasing number of passes. Simultaneously with increase of efforts during rolling process and surface stress in the center of deformation, thermal loading on rolls decreases along with their abrasive wear requiring use of new roll materials.