

Кондратьєв А. С.
Самсоненко А. А.
Бобух О. С.
Кузьміна О. М.
Ревякін Д. О.
Спектор С. С.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПРОКАТКИ ТРУБ НА СТАНІ PQF НА УМОВИ РОБОТИ ОПРАВКИ

Робота присвячена аналізу процесу виробництва сталевих безшовних труб гарячою прокаткою в умовах стану безперервної прокатки з тривалковими клітьми, а саме стану PQF. Наводиться схема прокатки труб на утримуваних оправках у тривалкових безперервних станах. Досліджується вплив параметрів прокатки труб на стані PQF на умови роботи технологічного інструменту - оправки. Показано, що умови роботи оправки в процесі прокатки на стані PQF істотно залежать від чотирьох основних факторів: зусилля прокатки, що діє на валки, а отже і на оправку; умов тертя на поверхнях контакту металу труби із оправкою; часу контакту металу заготовки з поверхнею оправки в осередку деформації; швидкості ковзання металу труби відносно оправки. Дослідження проводиться за допомогою скінченно-елементного моделювання у програмі QForm UK за методикою повного факторного експерименту 2³.

Створено модель процесу для деформації суцільної сталевіої циліндричної заготовки початковим діаметром 200 мм і довжиною 800 мм у перших двох клітьх п'ятивалкового стану; наведено план експерименту. Визначено вхідні фактори – товщина стінки труби, коефіцієнт тертя, швидкість руху оправки. В якості вихідних факторів (функцій відклику) обрано нормальне напруження в осередку деформації, сила тертя, коефіцієнт витяжки, швидкість труби на виході з кліті, питома робота сил тертя. Результати розрахунків оброблено з отриманням коефіцієнтів регресії.

За результатами дослідження зроблено висновок, що вплив вхідних факторів на цільові функції для першої та другої кліті стану відрізняються: якщо для першої кліті кожний з них приблизно однаково впливає на силу тертя, то у другій кліті найбільший вплив демонструють коефіцієнт тертя та швидкість переміщення оправки.

Ключові слова: безперервна прокатка, безшовна гарячodeформована труба, тривалковий стан PQF, утримувана оправка, скінченноелементне моделювання, повний факторний експеримент, рівняння регресії

Труби є важливими будівельними та транспортними засобами, які знаходять застосування у різних галузях техніки. При цьому сталь є одним із найпоширеніших матеріалів для їх виготовлення. Властивості різних марок сталей роблять їх придатними майже для будь-яких навантажень, забезпечуючи таким чином практично безмежне застосування сталевих труб. Сталь - це матеріал, з якого можна виготовляти труби різних діаметрів, у широкому діапазоні товщин стінок. Ці характеристики є найважливішими передумовами для різноманітного використання безшовних труб [1].

У розвитку виробництва безшовних труб можна виділити три основні етапи.

Перший етап характеризується створенням 1885г. братами Маннесман винаходом способу поперечно-гвинтової прокатки і в 1891 р - способу пілігримової прокатки, які в наступні 50–60 років послужили основою створення технології та обладнання для виробництва гарячекатаних безшовних труб.

Другий етап розвитку технології та устаткування для виробництва гарячекатаних безшовних труб припадає на 1940...1970 роки. Цей етап характеризується створенням високопродуктивних агрегатів, до складу обладнання яких входять безперервні стани прокатки труб. Основними недоліками ТПА з безперервними станами були обмежена довжина чорнових труб та необхідність великих виробничих площ для розміщення обладнання, що в першу чергу пов'язано з довжиною розкату до 20 метрів.

Частково вирішити ці проблеми змогли шляхом створення трубопрокатних агрегатів з безперервним станом, що працює на довгих оправках, переміщуваних із заданою швидкістю, або так званих утримуваних оправках. Це стало початком третього етапу розвитку процесу виробництва гарячекатаних безшовних труб.

На початку 2000-х років технологія безперервної прокатки труб на утримуваній оправці отримала подальший розвиток в результаті створення трубопрокатних агрегатів, до складу яких увійшли безперервні стани з тривалковими клітьми. Це стани PQF (Premium Quality Finishing) виробництва машинобудівного концерну "SMS Meer" та FQM (Fine Quality Mill) виробництва машинобудівної корпорації "DANIELI". Безперервний стан PQF складається з п'яти розташованих одна за одною тривалкових прокатних клітей, призначених для розкатки гільзи в трубну заготовку, кліті встановлені зі зміщенням на 60° один відносно одного [2].

Схема технологічного процесу у таких станах наведена на рис. 1.

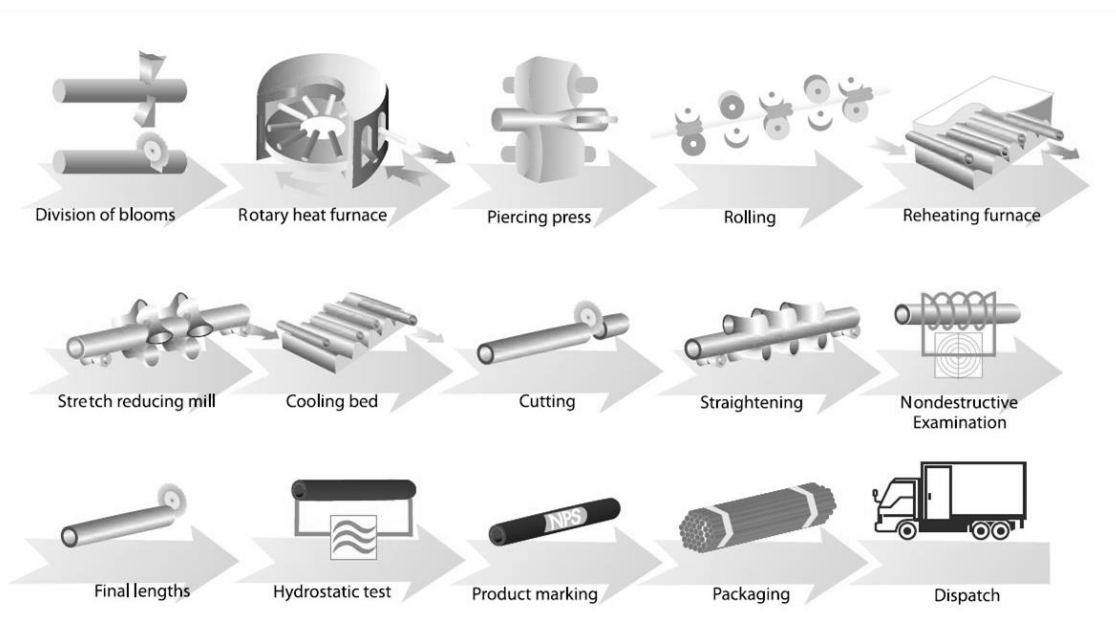


Рис. 1. Схема прокатки труб на утримуваних оправках у тривалкових безперервних станах PQF (джерело <https://tpmcsteel.com/>)

Згадані трубопрокатні агрегати використовують відомі технологічні процеси, але широкого поширення у світі вони набули не тільки через використання нового сучасного обладнання. Трубопрокатні агрегати з станами PQF та FQM оснащені датчиками та системами контролю за технологічними операціями та мають високий рівень автоматизації роботи обладнання [3-6]. Все це вигідно відрізняє зазначені трубопрокатні агрегати від раніше введених в експлуатацію ТПА з безперервними станами.

Однак досвід експлуатації ТПА зі станами PQF і FQM також показав, що кількість труб, що виробляються, і економічна ефективність роботи істотно залежить від стійкості оправок, які є технологічним інструментом у процесі розкатки і переміщуються в процесі деформації заготовки із заданою швидкістю. Крім цього, зношуваність оправок впливає також на якість отримуваних труб.

У роботах [7-9] наголошується, що знос оправок безперервного стану та їх відбракування залежать від величини роботи сил тертя, що припадають на одиницю площі поверхні оправки. У свою чергу робота сил тертя визначає температуру розігріву поверхні оправки на її контакт з металом в осередку деформації. При цьому за досягнення певних температур можливе місцеве «приварювання» поверхні оправки до металу, що призводить до утворення дефектів та передчасного відбракування оправки.

Загалом умови роботи оправки в процесі прокатки на стані PQF переважно залежать від чотирьох основних факторів:

- сили прокатки, що діють на валки, а отже і на оправку;
- умов тертя на поверхнях контакту металу труби із оправкою;
- часу контакту металу з поверхнею оправки в осередку деформації;
- швидкостей ковзання металу труби відносно оправки.

У свою чергу, зусилля прокатки визначаються сортаментом і марками сталей труб, що виробляються, температурою і швидкістю прокатки, а також величинами деформацій металу в кожній з клітей стану.

Умови тертя (коефіцієнт тертя) на поверхнях контакту металу труби з оправкою є похідними від стану поверхні оправки, типу мастила, що застосовується, і товщини мастильного шару. Час контакту металу з поверхнею оправки в осередку деформації визначається як швидкістю руху оправки при прокатці, так і довжиною осередку деформації на ній, яка зрештою обумовлена коефіцієнтом витяжки металу і розмірами валків в кліті.

Як видно з наданого переліку, кількість факторів, що впливають на термін експлуатації оправки, і їх взаємний неоднозначний вплив не дають можливості конкретно передбачити зношуваність оправки. Тому доцільно провести аналіз процесу деформації на оправці з визначенням впливу кожного з чинників за допомогою комп'ютерного моделювання. Враховуючи той факт, що ці стани набули великого поширення, і у процесі їх використання почали виникати технологічні питання, що потребують доопрацювання, найпростішим та логічним способом перевірки різних теорій та пропозицій, які повинні сприяти покращенню роботи станів PQF та FQM, є їх перевірка шляхом моделювання процесу прокатки у спеціальних програмах, що використовують метод кінцевих елементів.

Метою даного дослідження є аналіз процесу гарячої прокатки безшовних труб на безперервному стані з тривалковими клітьми PQF, з визначенням найбільш вагомих факторів, які впливають на зношуваність утримуваних оправки, за допомогою скінченно-елементного моделювання.

У даному дослідженні використовували програмне забезпечення для моделювання QForm UK, яке дуже розповсюджене і використовується в сучасних дослідженнях [10].

При моделюванні процесу прокатки чорнових труб у безперервному стані на утримуваних оправках використовували застосовувані на практиці режими деформації, калібрування валків та ін. з метою отримання максимально наближеної до реальної інформації щодо впливу різних параметрів прокатки труб на стані PQF на умови роботи оправки.

Для проведення моделювання процесу гарячої прокатки сталевих труб у програмному комплексі QForm UK необхідно підготувати геометрію заготовки та інструменту. Для цього було виконане креслення інструменту (валків та оправки) та заготовки в AutoCAD LT 2023 в форматі *.dxf та завантажено в проєкт (рисунок 2).

Основними параметрами заготовки, що враховуються у моделі, є розміри заготовки, її матеріал, температура нагріву заготовки в пічі та час транспортування від пічі до стану. Охарактеризуємо основні параметри.

В якості обладнання було обрано стан PQF «184», який може виробляти труби діаметрами від 21,3 мм до 168,3 мм та товщинами стінок 2,3 - 4,0 мм. Моделювання проводилось для перших двох клітей п'ятиклітьового стану. Розмір початкової суцільної циліндричної заготовки $D \times L - 200 \times 800$ мм, матеріал – Сталь 20 (ГОСТ 1050-2013).

Калібровка валків відповідає кресленню на рисунку 3. Діаметр оправки – 172мм. Матеріал інструменту – сталь 4X5MФ1С.

Частота обертання валків: в першій кліті – 60 об/хв, в другій кліті – 97 об/хв.

Розмір кінцевої труби $d \times l - 181 \times 5$ мм; температура прокатки – 1050 °С. Коефіцієнт тертя на контакті заготовки з валком брався рівним 0,3.

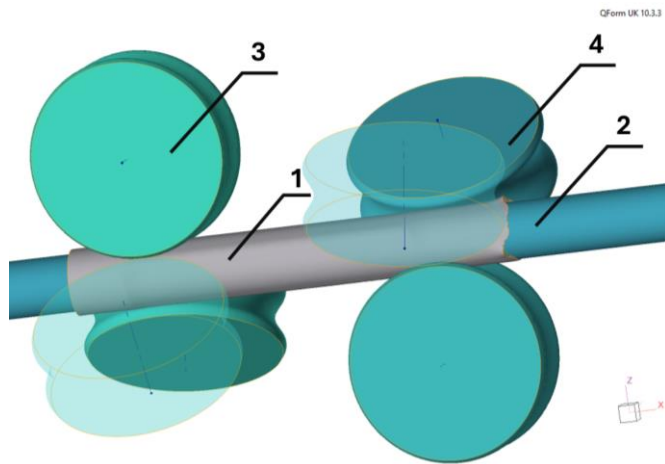


Рис. 2. Креслення інструменту та заготовки при моделюванні в QForm UK:

1 – заготовка; 2 – оправка; 3 – валки першої кліти стану; 4 – валки другої кліти стану

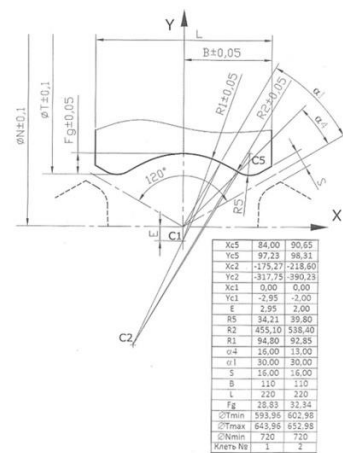


Рис. 3. Калібровка валків стану PQF «184», використана для креслення інструменту при моделюванні

Дослідження процесу гарячої деформації на утримуваній оправці проводились за планом повного факторного експерименту 2^3 (таблиця 1).

Варіювались наступні параметри процесу: товщина стінки заготовки S , коефіцієнт тертя на контакті заготовки з оправкою f та швидкість руху оправки $V_{оп}$.

Відповідно до плану експерименту товщина стінки варіювалась у діапазоні 11 мм, 12 мм та 13 мм; коефіцієнт тертя на контакті заготовки з оправкою f — в діапазоні 0,08; 0,11; 0,13; швидкість руху оправки — 0,9 м/с; 1,1 м/с; 1,3 м/с.

В якості вихідних параметрів були обрані отримані в результаті моделювання характеристики: нормальні напруження, довжина осередку деформації, коефіцієнт витяжки, швидкість виходу заготовки з кліти та робота сил тертя на контакті заготовки та оправки.

На рис. 4 наведені екрани програми QForm UK з візуалізацією процесу гарячої прокатки безшовних труб на утримуваній оправці у двох перших клітках тривалкового стану та результатами моделювання.

Обробка та аналіз результатів моделювання. Як було зазначено вище, для дослідження комплексного впливу параметрів процесу в якості цільових функцій обрали такі: σ_n – значення нормального напруження, Н/мм²; $l_{од}$ – довжина осередку деформації, мм; $F_{тр}$ – сила тертя, Н; μ – коефіцієнт витяжки; $V_{вих}$ – швидкість труби на виході з другої кліти, м/с; $a_{тр}$ – робота сил тертя, Дж/мм².

В таблиці 1 наведено матрицю планування експерименту зі значеннями факторів та визначених за результатами моделювання значення цільових функцій.

В результаті моделювання були отримані рівняння регресії, які в загальному вигляді виглядають таким чином:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 + b_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + b_{123} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3, \quad (1)$$

де Y – цільова функція; b_0, b_1, \dots, b_{123} – коефіцієнти регресії.

Основною цільовою функцією була обрана питома величина роботи сил тертя, тобто величина сили тертя металу по поверхні оправки в процесі прокатки, яка віднесена до площі поверхні.

В таблицях 2, 3 наведені розраховані коефіцієнти регресії для кожної з вищевказаних цільових функцій.

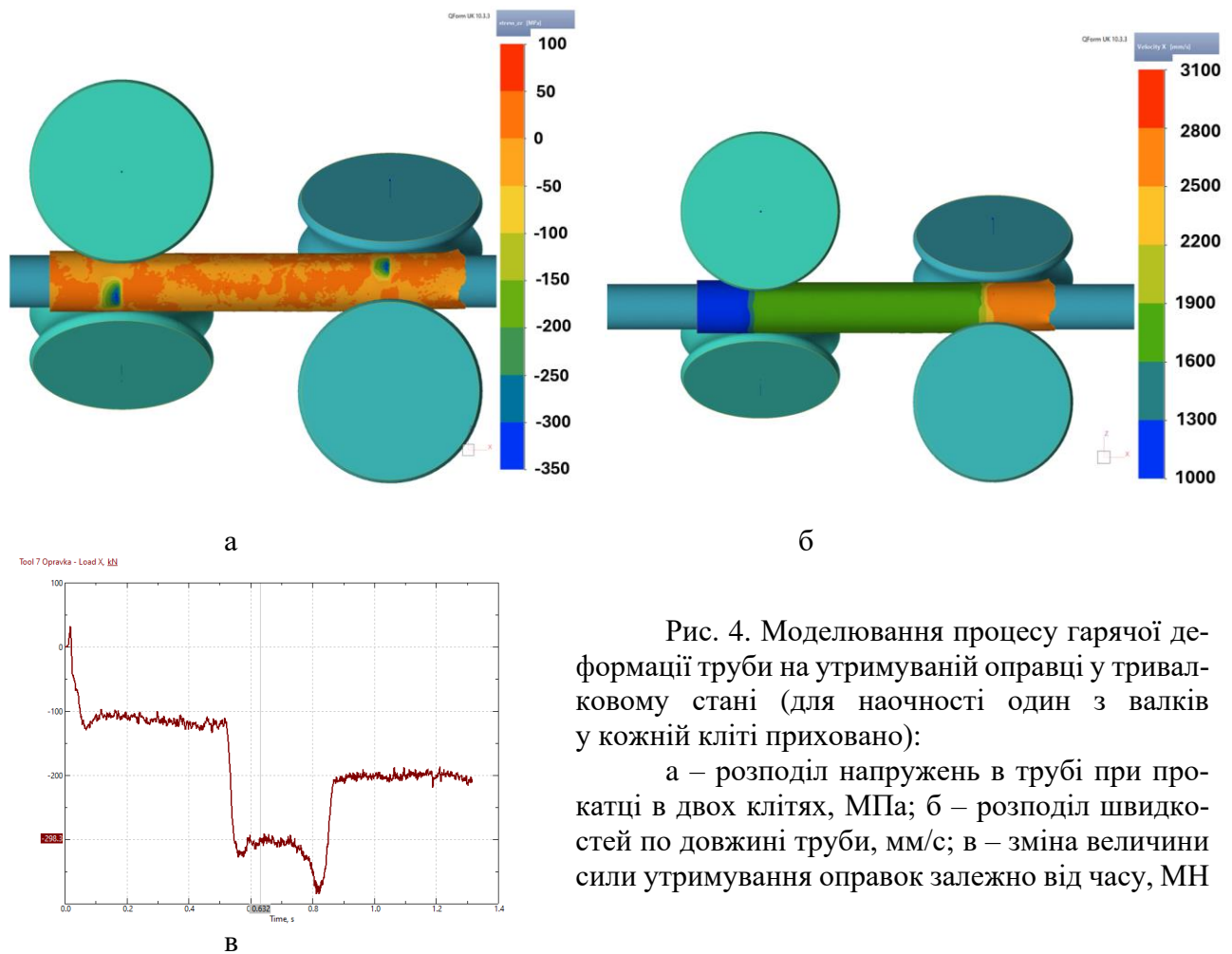


Рис. 4. Моделювання процесу гарячої деформації труби на утримуваній оправці у тривалковому стані (для наочності один з валків у кожній кліті приховано):

а – розподіл напружень в трубi при прокатці в двох клітях, МПа; б – розподіл швидкостей по довжині труби, мм/с; в – зміна величини сили утримування оправок залежно від часу, МН

Таблиця 1

Матриця планування та результати дослідів

№ досл.	Фактори			№ кліті	Цільові функції					
	Товщина стінки S, мм	Коефіцієнт тертя f	Швидкість руху оправки V _{оп} , мм/с		Нормальні напруження σ _н , Н/мм ²	Довжина осередку деформації l _{од} , мм	Сила тертя F _{тр} , Н	Коефіцієнт витяжки μ	Швидкість труби на виході з 2 кліті V _{вих} , м/с	Робота сил тертя a _{тр} , Дж/мм ²
1	13,0	0,14	1,3	1	240,0	68,0	2,250	1,772	2,66	2,35
				2	241,5	54,0	1,830	1,494	3,97	3,76
2	13,0	0,14	0,9	1	199,6	64,0	1,790	1,800	2,70	3,58
				2	214,5	64,0	1,920	1,479	3,99	6,59
3	13,0	0,08	1,3	1	228,7	66,0	1,210	1,79	2,69	1,29
				2	278,9	53,0	1,120	1,492	4,00	2,33
4	13,0	0,08	0,9	1	205,8	68,0	1,120	1,761	2,64	2,17
				2	241,0	59,0	1,140	1,490	3,94	3,85
5	11,0	0,14	1,3	1	217,7	62,0	1,890	1,579	2,37	1,56
				2	228,0	56,0	1,790	1,460	3,46	2,97
6	11,0	0,14	0,9	1	227,9	54,0	1,723	1,583	2,38	2,82
				2	205,6	60,0	1,727	1,446	3,43	4,85
7	11,0	0,08	1,3	1	197,1	58,0	0,914	1,582	2,37	0,75
				2	221,5	62,0	1,097	1,450	3,44	1,81
8	11,0	0,08	0,9	1	200,8	53,0	0,851	1,572	2,36	1,38
				2	206,5	60,0	0,991	1,415	3,34	2,69

Таблиця 2

Результати розрахунку коефіцієнтів регресії для першої кліті

Цільові функції	Коефіцієнти регресії							
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{23}	b_{13}	b_{123}
Нормальне напруження σ_n , Н/мм ²	214,7	3,8	6,6	6,175	-5,33	1,38	9,65	3,0
Сила тертя $F_{тр}$, Н	1,47	0,12	0,44	0,1	-0,02	0,06	0,04	0,03
Коефіцієнт витяжки μ	1,68	0,101	0,004	0,001	0,002	-0,009	-0,007	-0,005
Швидкість труби на виході з кліті $V_{вих}$, м/с	2,52	0,151	0,006	0,001	0,003	-0,013	0	-0,009
Робота сил тертя $a_{тр}$, Дж/мм ²	2,0	0,4	0,6	-0,5	0	-0,1	0	

Таблиця 3

Результати розрахунку коефіцієнтів регресії для другої кліті

Цільові функції	Коефіцієнти регресії							
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{23}	b_{13}	b_{123}
Нормальне напруження σ_n , Н/мм ²	230,0	14,7	-7,29	12,79	-8,69	-0,44	3,44	-2,29
Сила тертя $F_{тр}$, Н	1,45	0,05	0,36	0,01	0,01	-0,01	-0,43	0,0
Коефіцієнт витяжки μ	1,466	0,023	0,004	0,008	-0,006	-0,001	-0,004	0,004
Швидкість труби на виході з 2 кліті $V_{вих}$, м/с	3,70	1,28	0,016	0,081	-0,011	-0,019	-0,011	-0,008
Робота сил тертя $a_{тр}$, Дж/мм ²	3,6	0,5	0,9	-0,9	0,1	-0,3	-0,2	0,0

Після аналізу коефіцієнтів регресії та перевірки отриманої моделі за методикою регресійного аналізу при повному факторному експерименті [11] на підставі проведених розрахунків були складені рівняння регресії.

кліть: значення нормального напруження:

$$\sigma_n = 214,7 + 9,65 \cdot \frac{s-12}{1} \cdot \frac{V_{опр}-1,1}{0,2}, \text{ Н/мм}^2 \quad (2)$$

- сила тертя в осередку деформації:

$$F_{тр} = 1,47 + 0,12 \cdot \frac{s-12}{1} \cdot 0,44 \frac{f-0,11}{0,03} + 0,1 \cdot \frac{V_{опр}-1,1}{0,2}, \text{ Н} \quad (3)$$

– коефіцієнт витяжки:

$$\mu = 1,68 + 0,101 \cdot \frac{s-12}{1}. \quad (4)$$

– швидкість труби на виході з кліті:

$$V_{\text{вих}} = 2,52 + 0,151 \cdot \frac{s-12}{1}, \text{ мм/с} \quad (5)$$

кліть: значення нормального напруження:

$$\sigma_{\text{н}} = 230,0 + 14,7 \cdot \frac{s-12}{1} + 12,79 \cdot \frac{V_{\text{опр}}^{-1,1}}{0,2}, \text{ Н/мм}^2 \quad (6)$$

– сила тертя в осередку деформації:

$$F_{\text{тр}} = 1,45 + 0,36 \cdot \frac{f-0,11}{0,03}, \text{ Н} \quad (7)$$

– швидкість труби на виході з кліті:

$$V_{\text{вих}} = 3,7 + 0,28 \cdot \frac{s-12}{1}, \text{ мм/с} \quad (8)$$

Було проаналізовано вплив вибраних параметрів процесу прокатки на роботу сил тертя металу по поверхні оправок $a_{\text{тр}}$.

Рівняння регресії для роботи сил тертя металу по поверхні оправок на першій кліті має вигляд:

$$a_{\text{тр}} = 2,0 + 0,4 \cdot \frac{s-12}{1} + 0,6 \cdot \frac{f-0,11}{0,03} - 0,5 \cdot \frac{V_{\text{опр}}^{-1,1}}{0,2} - 0,1 \cdot \frac{f-0,11}{0,03} \cdot \frac{V_{\text{опр}}^{-1,1}}{0,2}, \text{ Дж/мм}^2 \quad (9)$$

Наведене рівняння вказує на відносно рівний вплив кожного з факторів на силу тертя.

Для другої кліті рівняння регресії для роботи сил тертя металу по поверхні оправок має вигляд:

$$a_{\text{тр}} = 3,6 + 0,5 \cdot \frac{s-12}{1} + 0,9 \cdot \frac{f-0,11}{0,03} - 0,9 \cdot \frac{V_{\text{опр}}^{-1,1}}{0,2} - 0,3 \cdot \frac{f-0,11}{0,03} \cdot \frac{V_{\text{опр}}^{-1,1}}{0,2} - 0,2 \cdot \frac{s-12}{1} \cdot \frac{f-0,11}{0,03} \cdot \frac{V_{\text{опр}}^{-1,1}}{0,2}, \text{ Дж/мм}^2 \quad (10)$$

Судячи з рівняння (10), у другій кліті найбільший вплив на роботу сил тертя мають коефіцієнт тертя та швидкість переміщення оправки при прокатці.

ВИСНОВКИ

Показано, що умови роботи оправки в процесі прокатки на стані PQF переважно залежать від силових умов, умов тертя на контактні металу заготовки з оправкою, часу цього контакту і швидкості ковзання металу труби відносно оправки.

Для визначення найбільш вагомих факторів, які впливають на зношуваність оправок стану PQF, створено модель для розрахунку в скінченно-елементній програмі QForm UK. Моделювання проводилось для перших двох клітей п'ятиклітьового стану.

Проведено дослідження за методикою повного факторного експерименту 23. Визначено вхідні фактори – товщина стінки труби, коефіцієнт тертя, швидкість руху оправки. В якості вихідних факторів (функцій відклику) обрано нормальне напруження на контактні заготовки та оправки, сила тертя, коефіцієнт витяжки, швидкість труби на виході з кліті, питома робота сил тертя.

Показано, що вплив вхідних факторів на цільові функції для першої та другої кліті стану відрізняються: якщо для першої кліті вплив кожного з них приблизно однаково впливають на силу тертя, то у другій кліті найбільший вплив демонструють коефіцієнт тертя та швидкість переміщення оправки.

Проведене дослідження показує, що є необхідність більш ретельно визначити коефіцієнти тертя, позначені в літературі значення виглядають заниженими для умов прокатки в стані PQF, тому планується приділити цьому питанню додаткову увагу з проведенням подальших досліджень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стасовский Ю. Н., Сокирко О. И., Гладкий Ю. А. Развитие и использование круглого калибра в непрерывных трубопрокатных станах. *Металл и литье*. 2010. 9–10. С. 65–70.
2. SMS group. URL: <https://www.sms-group.com/plants/seamless-tube-plants>.
3. Кондратьев С.В., Панюшкин Н.Е., Панюшкин Е.Н., Романцев Б.А., Гончарук А.В. Особенности настройки рабочих клетей стана PQF. *Сталь*. 2013. 10. С. 81–84.
4. Романцев Б.А., Гончарук А.В., Михайлов В.К., Бабина Е.С. Анализ и пути совершенствования процессов горячей раскатки труб. *Сталь*. 2002. 12. С. 44–47.
5. Theelen N., Rinaldi P., Sheng Y.Z. PQF technology for the production of seamless steel tubes *Stahl und Eisen*. 2004. 124(11), pp. 99–106.
6. Theelen Norbert, Rinaldi Patricio, Zesheng Yan. Top technology for seamless steel tube production at Tianjin. *Tube International*. 2005. 28, pp. 20–27.
7. Кондратьев С.В., Панюшкин Е.Н., Романцев Б.А., Панюшкин Н.Е., Гончарук А.В. Условия работы перемещаемых с заданной скоростью раскатных оправок непрерывных трубопрокатных станов. *Производство проката*. 2014. 3. С.19–22.
8. Данченко В.Н., Чекмарев И.А., Гринев А.Ф. и др. Износ валков и оправок непрерывного трубопрокатного стана. *Металлургия и коксохимия. Обработка металлов давлением*. 1974. 41. С. 41–45.
9. Гуляев Г.И., Кармазина, Евсюкова Г.А., Хмель В.П. Анализ работы длинных оправок ТПА 159-426. *Сталь*. 1994. 9. С.44–46.
10. Матвеев Ю.М., Выдрин В.М., Фанкельштейн Я.С. и др. Условия работы и стойкость оправок непрерывного стана трубопрокатного агрегата 30-102. *Сталь*. 1965. 10. С. 930–934.
11. Li X., Tu Y., Guo Y. FE analysis of temperature field of PQF mandrel. *9th International Pipeline Conference*. Calgary, Alberta, Canada, 24–28 September 2012. 2012. <https://doi.org/10.1115/ipc2012-90209>.
12. Fengshan D., Qingtian Z., Jian W. Computer Simulation of 3-roll Continual Tube Rolling PQF. *Iron and Steel*. 1998. 33, pp. 35–37.
13. QForm UK. Version 10.3.3. Oxford, UK : Micas Simulations Limited. URL: <https://qform3d.com>.
14. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. Москва: Машиностроение, 1980. 304 с.

REFERENCES

1. Stasovsky Y., Sokirko O., Gladkiy Y. Development and use of round caliber in continuous mill. *Metal and Casting of Ukraine*. 2010. 9–10, pp. 65–70. (*in Russian*).
2. SMS group. URL: <https://www.sms-group.com/plants/seamless-tube-plants>.
3. Kondratev S.V., Paniushkyn N.E., Paniushkyn E.N., Romantsev B.A., Honcharuk A.V. The Peculiarities of Set-Up of the Working Stands of the PQF Rolling Mill. *Stal*. 2013. 10, pp. 81–84. (*in Russian*).
4. Romantsev B.A., Honcharuk A.V., Mykhailov V.K., Babyna E.S. Analysis and ways to improve hot tube rolling processes. *Stal*. 2002. 12, pp. 44–47. (*in Russian*).
5. Theelen N., Rinaldi P., Sheng Y.Z. PQF technology for the production of seamless steel tubes. *Stahl und Eisen*. 2004. 124(11), pp. 99–106.
6. Theelen Norbert, Rinaldi Patricio, Zesheng Yan. Top technology for seamless steel tube production at Tianjin. *Tube International*. 2005. 28, pp. 20–27.
7. Kondratev S.V., Paniushkyn E.N., Romantsev B.A., Paniushkyn N.E., Honcharuk A.V. Operating conditions of a continuous tube rolling mill used rolling mandrels moving at a given speed. *Rolled steel production*. 2014. 3, pp.19–22. (*in Russian*)
8. Danchenko V.N., Chekmarev Y.A., Hrynev A.F. et al. Wear of rolls and mandrels in a continuous pipe mill. *Metallurhiya ta koksokhimiya. Obrabotka metallov davlenyem*. 1974. 41, pp. 71-75. (*in Russian*).
9. Huliev H.Y., Karmazyna, Evsiukova H.A., Khmel V.P. Analysis of the operation of long mandrel TPA 159-426. *Stal*. 1994. 9, pp. 44–46. (*in Russian*).
10. Matvyeyev Yu.M., Vydrin V.M., Fankelshteyn Ya.S. et al. Operating conditions and stability of the continuous mill mandrels of the pipe rolling mill 30-102. *Stal*. 1965. 10, pp. 930–934. (*in Russian*).
11. Li X., Tu Y., Guo Y. FE analysis of temperature field of PQF mandrel. *9th International Pipeline Conference*, Calgary, Alberta, Canada, 24–28 September 2012. 2012. <https://doi.org/10.1115/ipc2012-90209>.
12. Fengshan D., Qingtian Z., Jian W. Computer Simulation of 3-roll Continual Tube Rolling PQF. *Iron and Steel*. 1998. Vol. 33. P. 35–37
13. QForm UK. Version 10.3.3. Oxford, UK : Micas Simulations Limited. URL: <https://qform3d.com>.

14. Novik F.S., Arsov Ya.B. Optimisation of metal technology processes by methods of planning experiments. Moscow: Mashinostroyeniye, 1980. 304 p. (in Russian).

Kondratiev A., Samsonenko A., Bobukh O., Kuzmina O., Reviakin D., Spector S. Study of the influence of tube rolling parameters on the working conditions of the pqf mill mandrel

The work is devoted to the analysis of the process of seamless steel pipes production by hot rolling at continuous rolling mill with three-roll cages, namely the PQF. The scheme of rolling pipes on held mandrels in three-roll continuous mills is given. The influence of pipe rolling parameters at the PQF mill on the working conditions of the technological tool - the mandrel - is investigated.

It is shown that the working conditions of the mandrel in the process of rolling on the PQF mill depend significantly on four main factors: the rolling forces acting on the rolls and on the mandrel; friction conditions on the contact surfaces of the pipe with the mandrel; time of the mandrel and billet contact in the deformation zone; speed of sliding metal of the pipe relative to the mandrel. The study is carried out using finite element simulation in the QForm UK program using the method of a full factorial experiment 2³.

A model of the deformation for a steel cylindrical workpiece with an initial diameter of 200 mm and a length of 800 mm in the first two cages of the five-roll mill was created; the plan of the experiment is given. The input factors are determined - the thickness of the pipe wall, the coefficient of friction, the speed of movement of the mandrel. Normal stress in the center of deformation, friction force, elongation coefficient, speed of the pipe at the exit from the cage, specific friction forces were selected as output factors (response functions). The results of calculations were processed to obtain regression coefficients. According to the results of the study, it was concluded that the influence of input factors on the target functions for the first and second cages of the mill differ: if for the first cage, the influence of each of them has approximately the same effect on the force of friction, then in the second cage the friction coefficient and speed of mandrel show the greatest influence.

Keywords: continuous rolling, seamless hot-rolled tube, three-roll mill PQF, held mandrel, finite element simulation, full-factorial experiment, regression equation.

Кондратьєв Андрій Сергійович – магістр, УДУНТ
Kondratiev Andrii – Master of Technical Science, USUST
Email: a.s.kondratiev@ust.edu.ua

Самсоненко Андрій Анатолійович – канд. техн. наук., доцент, УДУНТ
Samsonenko Andrii – Candidate of Technical Science, Associate Professor, USUST
Email: a.a.samsonenko@ust.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6992-2327>

Бобух Олександр Сергійович – канд. техн. наук, доцент, УДУНТ
Bobukh Oleksandr – Candidate of Technical Science, Associate Professor, USUST
Email: bobukh@metal-forming.org
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7254-3854>

Кузьміна Ольга Михайлівна – канд. техн. наук, доцент, УДУНТ
Kuzmina Olga – Candidate of Technical Science, Associate Professor, USUST
Email: o.m.kuzmina@ust.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0794-0583>

Ревякін Дмитро Олегович – аспірант, УДУНТ
Reviakin Dmytro – Graduate student, USUST
E-mail: 3dmitri@ukr.net

Спектор Станіслав Станіславович – аспірант, УДУНТ
Spektor Stanislav – Graduate student, USUST
E-mail: spektor.stan@gmail.com

УДУНТ – Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро
USUST – Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro city

Стаття надійшла до редакції 12.09.24 р.