

ЛЕКЦІЯ 7

3. ПОГОННІ СИЛИ ТА ПРОГІБ ВАЛКІВ КЛІТІ КВАРТО

ПЛАН ЛЕКЦІЇ

1. Погонні сили на міжвалковому контакті.
2. Погонні сили на контакті робочих валків зі штабою.
3. Експериментальні дослідження коефіцієнта нерівномірності n_1 .

3. ПОГОННІ СИЛИ ТА ПРОГІБ ВАЛКІВ КЛІТІ КВАРТО

Формування поперечної різнотовщинності і площинності штабової сталі багато в чому обумовлене параметрами пружних деформацій валкової системи (прогинами валків) і раціональністю початкових профілювань бочок твірних валків. У зв'язку з цим розглянемо вплив основних технологічних чинників на зміну характеру взаємодії опорного, робочого валків і штаби і загальні закономірності пружного прогину валків, спираючись на відомі розробки [12,41,53-63 та ін.].

С достатньою для практики точністю завдання визначення прогинів валкового вузла може бути вирішене з використанням диференціального рівняння зігнутої осі балки, де робочий валок розглядається як балка, що лежить на пружній основі (на опорному валку). При цьому враховується можливість контакту на частини довжини валків, враховується форма їх, що утворюють і міра нерівномірності навантаження робочого валка з боку опорного валка і штаби.

Для можливості теоретичного розрахунку пружних деформацій (прогинів) валків в першу чергу необхідно визначити допоміжні параметри, такі як погонні сили на пружному міжвалковому контакті (між робочим і опорним валками - МВК) і погонні сила на пружно-пластичному контакті (між робочим валком і штабою- ППК) .

3.1 Погонні сили на міжвалковому контакті

Деформація металу супроводжується виникненням міжвалкових погонних сил $q(y)$ і погонних сил у контакті із штабою $p(y)$ (рис.1.4), значення яких

визначають таким чином:

$$q(y) = \frac{P_i}{L_i}; \quad p(y) = \frac{P_i}{B_i}, \quad (3.1)$$

де P_i - сила плющення, діюча на ділянці L_i довжини бочки валка або на ділянці B_i ширині штаби.

У загальному випадку ці погонні сили по довжині валків нерівномірні і від співвідношення $q(y)$ і $p(y)$ багато в чому залежить величина власне прогину робочого валка W_1 (рис.3.1). Під власним прогином робочого валка розуміють міру нерівномірності його пружного сплюснення у контакті з опорним валком. Встановлено, що при контакті вузьких штаб міжвалкові погонні сили під штабою $p(y)$ максимальні в середній частині ширини контакту з робочим валком (рис.1.4, епюра 4), що відповідає епюрі розподілу нормального контактного напруження в осередку деформації в контакті штаби 3 з робочим валком 2 при прокатуванні вузької штаби за даними [11]. Для цього випадку прокатки епюра міжвалкових погонних сил також має опуклий вигляд (епюра 4), що встановлено в роботах [55,57]. Тобто для цих умов деформації металу маємо:

$$q_1/q_0 < 1 \quad \text{и} \quad p_1/p_0 < 1,$$

де q_1 і q_0 - міжвалкові погонні сили відповідно на краю контакту і по осі; p_1 і p_0 - погонні сили прокатки в осередку деформації на краю і в середині ширини штаби.

При прокатуванні широких штаб максимальні погонні (локальні) сили p_1 діють на кромках штаби, а мінімальні p_0 - по осі штаби, тобто $p_1/p_0 > 1$. Появу максимальної погонної сили p_1 на кромці (епюра 5) обумовлено більшою жорсткістю крайових ділянок опорного валка, затисканням кінцевих ділянок робочого валка і, отже, більшою пластичною деформацією крайових ділянок штаби і, відповідно, більшими величинами нормальних контактних напружень.

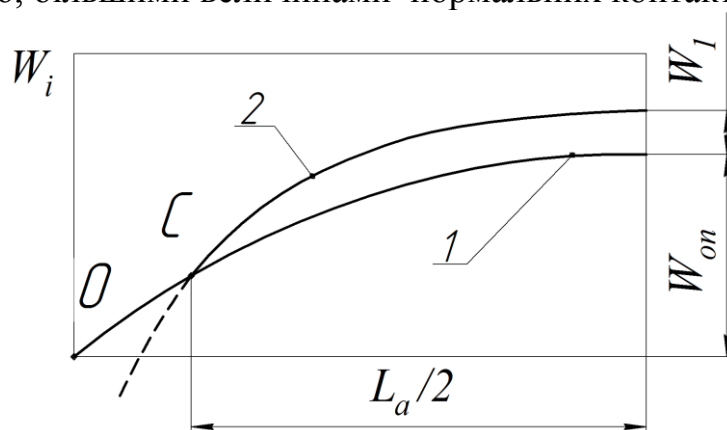


Рисунок 3.1 - Схема прогинів опорного (1) і робочого (2) валків (L_a - довжина фактичного міжвалкового контакту)

У відповідність з розпо-ділом погонних (локальних) сил по ширині штаб і на міжвалковому контакті виникає відповідна форма епюри 5 (з увігнутим профілем) міжвалкових погонних сил, при якій $q_1/q_0 > 1$.

Експериментальні дослідження показують, що міжвалкові погонні сили розподіляються по довжині валків за параболічним законом, який можна виразити у виді

$$q(y) = q_0 + a^1 \cdot y^m. \quad (3.2)$$

де a^1 - коефіцієнт, визначуваний з граничних умов коли при $y = b$ погонна сила рівна $q(y) = q_1 = n \cdot q_0$, тобто

$$n \cdot q_0 = q_0 + a^1 \cdot b^m. \quad (3.3)$$

З рівняння (3.3) отримаємо

$$a^1 = q_0(n-1)/b^m, \quad (3.4)$$

де b - половина довжини міжвалкового контакту; n - коефіцієнт нерівномірності розподілу міжвалкових погонних сил; m - показник степені параболі, що представляє твірну бочки валка.

Тоді

$$q(y) = q_0 \left[\frac{y^m}{b^m} (n-1) + 1 \right]. \quad (3.5)$$

Приймаємо рівність площ епюр міжвалкових сил і загальної сили прокатки у контакті зі штабою. Сила прокатки P на міжвалковому контакті з урахуванням розподіленого навантаження рівна

$$P = \int_{-b}^b q(y) dy = 2q_0 b \left[1 + (n-1) \frac{1}{1+m} \right].$$

Звідки

$$q_0 = \frac{P(n+m)}{2b(n+n)}. \quad (3.6)$$

Підставляючи рівняння (3.6) в рівняння (3.5) отримуємо

$$q(y) = \frac{P(n+m)}{2b(n+n)} \left[1 + (n-1) \frac{y^m}{b^m} \right].$$

У цьому рівнянні $P/2b = q$ - дорівнює середній величині погонних сил, тобто

$$q(y) = \frac{q \cdot (1+m)}{m+n} \left[1 + (n-1) \frac{y^m}{b^m} \right] \quad (3.7)$$

Із рівняння (3.7) слідує, що параметр $q(y)$ є сложна функція y/b , m и n , так як сам коефіцієнт n залежить від параметрів y/b (B/L) и D_1/D_2 и змінюється у пределах:

при прокатуванні вузьких штаб ($B/L=0,5$), $D_1/D_2=0,3$, $m=2$, $n=0,13$ отримаємо:

$y/b=1$ (край бочки) - $q(y)=q_1=0,182q$;

$y/b=0$ (середина бочки) - $q(y)=q_0=1,41q$;

при прокатуванні широких штаб ($B/L=0,85$), $D_1/D_2=0,3$, $m=2$, $n=0,61$ отримуємо:

$$y/b=1 \text{ (край бочки)} \quad - \quad q(y)=q_1=0,7q;$$

$$y/b=0 \text{ (середина бочки)} \quad - \quad q(y)=q_0=1,15q.$$

З розрахунку виходить, що нерівномірність міжвалкових сил і величина коефіцієнту n відбувається, головним чином, внаслідок зміни ширини штаби і власного прогину робочого валка. Збільшення коефіцієнту n (зменшення нерівномірності міжвалкових сил) свідчить також про зменшення нерівномірності зносу опорного валка.

Як слідує з формули (3.7), при значеннях коефіцієнту $n < 1$ еюра між валкових сил має опуклий вигляд, а при $n > 1$ - увігнутий, тобто в цьому випадку величини $q(y)$ максимальні на краях бочок. Це можливо при прокатуванні широких штаб у валках з $D_1/D_2 \geq 0,4$.

Залежність коефіцієнта n для циліндричних валків для рівняння (3.7) визначені з даних В. П. Полухіна [55,57] і представлена в наступному виді

$$n = \left[5 \cdot D_1/D_2 - 0,5 \right] \cdot \left[0,13 + 2,17 \left(\frac{B}{L_a} - 0,5 \right)^{1,5} \right]. \quad (3.8)$$

З урахуванням форми і опуклості твірної опорного валка [64] отримаємо

$$n = n_m n_f \left[5 \cdot D_1/D_2 - 0,5 \right] \cdot \left[0,13 + 2,17 \left(\frac{B}{L_a} - 0,5 \right)^{1,5} \right]; \quad (3.9)$$

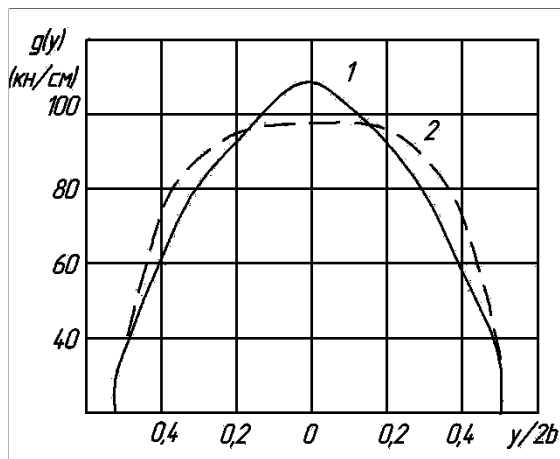
$$n_m = 1,03 - 0,03m; \quad n_f = 0,5 + 0,5 \sqrt{1 - 1000 f_{\Sigma} / L^2}, \quad (3.10)$$

де f_{Σ} - сумарна опуклість опорного і робочого валків на радіус; n_m -кое-

фіцієнт, що враховує вплив форми твірної опорного валка $\therefore n_f$ -коефіцієнт, що враховує вплив величини опуклостей валків..

При розрахунку міжвалкових погонних сил за формулою (3.7) показник степені m відображає форму твірної валків. .

Рисунок 3.3-Розподіл міжвалкових погонних сил при m : 1-2; 2-4.



З рис.3.3 слідує, що у разі застосування профілю бочки у вигляді параболи другої степені ($m=2$, крива 1) величини $q(y)$ змінюються по параболі з «загостреною» вершиною, що сприяє появі максимальних локальних величин $q(y)$ і місцевому зносу бочок валків. У разі застосування профілю бочок з параметром $m \geq 4$ міжвалкові погонні сили більше рівномірно розподілені на довжині бочки, рівною $y/2b = 0,4$, що сприяє зниженню зношення середньої частини валків.

З отриманих даних виходить, що збільшення параметра m при виготовленні твірної опорного валка забезпечує зниження коефіцієнта нерівномірності $q(y)$. Приведені дані свідчать о доцільності застосування опорних валків з твірною у вигляді параболи з $m \geq 4$.

Дослідження впливу типу профілювання опорних валків на характер міжвалкових погонних сил виконували на моделі чотиривалкової кліті (рис. 2.4) з діаметрами робочого валка $D_1 = 32$ мм і опорного $D_2 = 80$ мм, довжина бочки валків 100 мм. Валки було виготовлено із сталі 9Х з поверхневим загартуванням. Досліди за визначенням довжини міжвалкового контакту виконували при навантаженнях $P_M = 10 \dots 42$ кН. Початкову опуклість опорного валка для модельних навантажень приймали рівною $f_{оп} = 0,06; 0,14; 0,28; 0,33$ і $0,46$ мм. Використали валки з різною формою твірної [12].

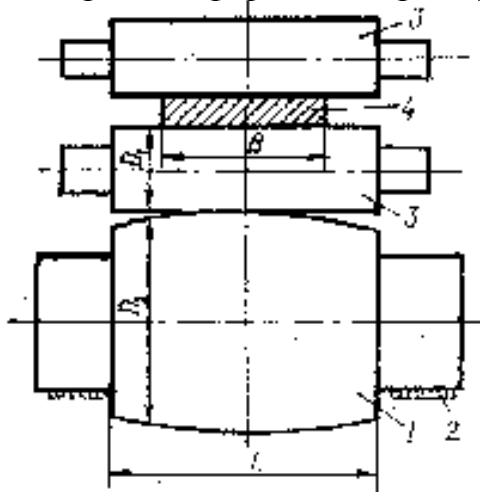


Рисунок 3.4 -Модель кліті кварто: 1 – опорний валок; 2 – опори шийок валка; 3 – робочие валки; 4 – алюминиевая пластина

Для фіксації площі міжвалкового контакту застосовували відомий метод. У основі методу лежить зняття відбитків контакту за допомогою чутливого паперу, що укладається між валками. У нашому випадку застосовували копіювальний папір, на якому отримували досить чіткі відбитки. Розміри відбитків визначали на інструментальному мікроскопі.

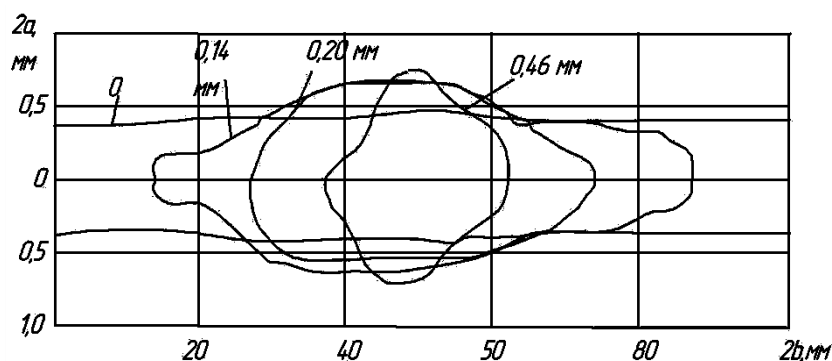


Рисунок 3.5- Форма міжвалкових контактних ділянок при різних опуклостях бочки опорного валка

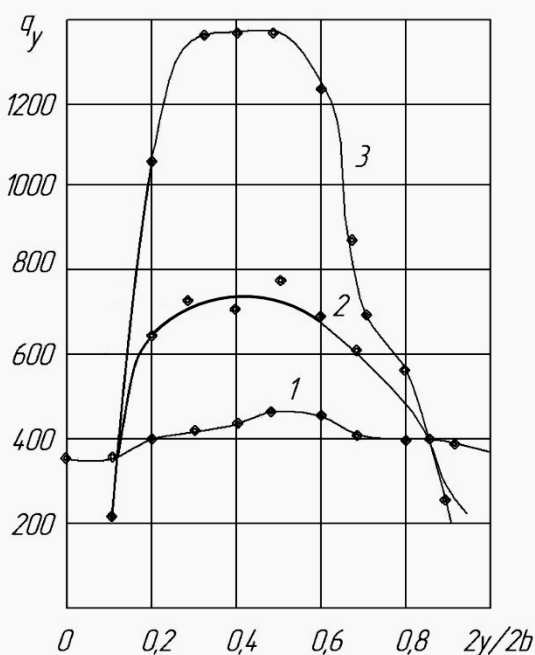
На рис. 3.5 показані форми контактних міжвалкових площ при різних опуклостях опорного валка ($B=70$ мм, $P_M=40$ кН). При контакті циліндричних ($f_{оп}=0$) валків довжина $2b$ міжвалкового контакту при усіх навантаженнях дорівнює довжині бочки. Ширина $2a$ цієї площі має максимальні розміри по осі валка. При контакті опуклого опорного валка з циліндричним робочим валком форма контактної площі набуває форми овалу. Зі збільшенням опуклості валка довжина $2b$ контакту зменшується, обумовлюючи підвищення міжвалкових погонних сил. При цьому спостерігається деяке збільшення ширини $2a$ контакту. .

Дані рис.3.5 дозволяють визначити міжвалкові погонні сили за формулою[12]

$$q(y)=q \cdot 2a(y)/2a,$$

де $2a$ -ширина ділянки по осі контакту; $2a(y)$ - ширина ділянки у будь-якому перерізі контакту.

Як впливає з рис.3.6 збільшення опуклості валка з $f_{оп}=0$, до $f_{оп} = 0,28$ мм викликає відповідне збільшення міжвалкових погонних сил. При



цьому, чим більше опуклість валка, тим більше нерівномірність міжвалкових погонних сил. При збільшенні опуклості від $f_{оп}=0$, до $f_{оп} = 0,28$ мм ($m=2$) коефіцієнт n зменшується від 0,84 до 0,15.

Рисунок 3.6 - Розподіл міжвалкових погонних сил при різних профілюваннях опорних валків, мм: 1 - 0; 2 - 0,14; 3 - 0,28 ($P_M = 40$ кН, $B = 70$ мм, $L = 100$ мм)

Дані на рис.3.6 отримані при взаємодії опуклого опорного валка і циліндричного робочого валка. Подіб-

ний характер залежностей матиме місце і у разі застосування циліндричного опорного валка і опуклого робочого валка. І в першому і в другому варіантах наявність опуклості викликає підвищене зношення поверхонь центральної частини довжини валків.

3.2 Погонні сили на контактні робочих валків зі штабою

Характер розподілу погонних сил по ширині штаби визначається багатьма чинниками, у тому числі поперечним профілем штаби і закономірностями обтиснення по ширині, нерівномірністю розподілу на ширині штаби коефіцієнта зовнішнього тертя і натягнення, розширення металу і т. п. [65-67]. Досліджуючи закономірності зміни $p(y)$ О.І.Целіков [68] відмічає, що нерівномірність розподілу нормальних контактних напружень по ширині штаби обумовлена нерівномірністю деформацій за рахунок розширення і дією зовнішніх частин. При цьому залежно від ширини штаби характер епюр $p(y)$ може бути різний. Для вузьких штаб $p(y)$ має максимум в середині ширини, а для широких - максимум $p(y)$ розташовується між серединою і кромкою. .

У одному з перших досліджень І. Г. Астахов [70] встановив залежність нерівномірності розподілу погонних сил $p(y)$ від ширини і форми поперечного перерізу штаби. При цьому для вузьких штаб і штаб з опуклим профілем поперечного перерізу епюра $p(y)$ має максимум в середині ширини штаби, а для широких штаб ($B/L > 5$) і штаб з увігнутим поперечним профілем епюра $p(y)$ має два максимуми поблизу країв

У дослідженнях О. П. Чекмарьова і О. А. Тарасенко [11], П. І. Полухіна, В. П. Полухіна, В.О.Ніколаєва [69] методом точкових месдоз встановлений вплив ширини і обтиснення, на нерівномірність розподілу погонних сил. Причому при прокатуванні штаб з $B/L = 0,76$ в 90 % випадків спостерігається зниження $p(y)$ від краю до середини ширини. Прокатка початкових штаб з опуклим профілем поперечного перерізу обумовлює появу опуклої епюри нормальних напружень з максимумом по середині ширини штаби. Рівномірне обтиснення по ширині штаби забезпечує і рівномірний розподіл нормальних контактних напружень.

Узагальнюючи теоретичні і експериментальні дослідження В.П. Полухін [57,68] пропонує математичну модель ітераційного рішення, яка достовірно описує розподіл погонних сил на ППК

$$p(y) = p \left[\frac{10}{3} \alpha - 1 \left(\frac{y-b}{B} \right)^4 + 5 \left(-\alpha \left(\frac{y-b}{B} \right)^2 + \alpha \right) \right],$$

де p - середня погонна сила по ширині штаби; α - параметр, який характеризує форму епюри $p(y)$.

При опуклій епюрі параметр $\alpha > 1$, а при увігнутій - $\alpha < 1$. Якщо $\alpha = 1$, то епюра є рівномірною і $p(y) = p$. Дослідження пружних деформацій валків із залученням вказаної формули показало, що параметр α істотно впливає на прогин робочого валка. Проте визначення $p(y)$ за приведеною формулою

ускладнене внаслідок відсутності рекомендацій для визначення параметра «а».

У роботі [61] дана наступна залежність для визначення $p(y)$

$$p(y) = \frac{3P}{B(n_1 + 1)} - \frac{12P}{B^3(n_1 + 1)} \left(y - \frac{B}{2} \right)^2.$$

Коефіцієнт n_1 нерівномірності розподілу $p(y)$ рекомендується приймати рівним $n_1 = 0,5 \dots 2$. Фіксоване значення коефіцієнта n_1 , як показано в роботах [65-67], не дозволяє набувати об'єктивних розрахункових значень $p(y)$ і прогинів валків

У експериментальних і теоретичних дослідженнях показано, що за відсутності механізму активної дії на профіль валків розподіл погонних сил підкоряється в основному параболічному закону. З урахуванням цього в загальному випадку нерівномірність розподілу погонних сил може бути описана таким чином [12]

$$p(y) = p_0 + a^1 y^{m_1}, \quad (3.11)$$

де p_0 - погонна сила по осі штаби; a^1 - коефіцієнт, визначуваний з граничних умов; m_1 - показник степені контуру поперечного перерізу штаби.

Приймаємо, що при $y = 0,5B$ погонна сила рівна $p(y) = p_1 = n_1 \cdot p_0$. Тобто

$$n_1 \cdot p_0 = p_0 + a^1 \cdot y^{m_1}. \quad (3.12)$$

де p_1 - погонна сила у кромки штаби; n_1 - коефіцієнт нерівномірності розподілу погонної сили ($n_1 = p_1/p_0$).

З формули (3.12) отримаємо ($y=0,5B$)

$$a^1 = p_0(n - 1)/(0,5B)^{m_1}, \quad (3.13)$$

де B – ширина штаби.

Тоді з формул (3.11) - (3.13) отримаємо

$$p(y) = p_0 \left[\frac{2^m y^m}{B^m} (n_1 - 1) + 1 \right]. \quad (3.14)$$

Приймаємо рівність площ епюр погонних сил і загальної сили прокатки на контакті із штабою. Сила прокатки P на контакті з урахуванням розподіленого навантаження рівна

$$P = \int_{-0,5B}^{0,5B} p(y) dy = p_0 B \left[1 + (n_1 - 1) \frac{1}{1 + m_1} \right].$$

Откуда

$$p_0 = \frac{P}{B} \frac{1 + m_1}{m_1 + n_1}. \quad (3.15)$$

Підставляючи формулу (3.15) в рівняння (3.14) отримуємо

$$p(y) = \frac{P}{B} \frac{1+m_1}{m_1+n_1} \left[1 + n_1 - 1 \frac{(2y)^{m_1}}{B^{m_1}} \right].$$

У цьому рівнянні P/B рівно середній величині погонних сил на контакті із штабою $q = P/B$ і тоді

$$p(y) = \frac{p \cdot 1+m_1}{m_1+n_1} \left[1 + n_1 - 1 \frac{(2y)^{m_1}}{B^{m_1}} \right]$$

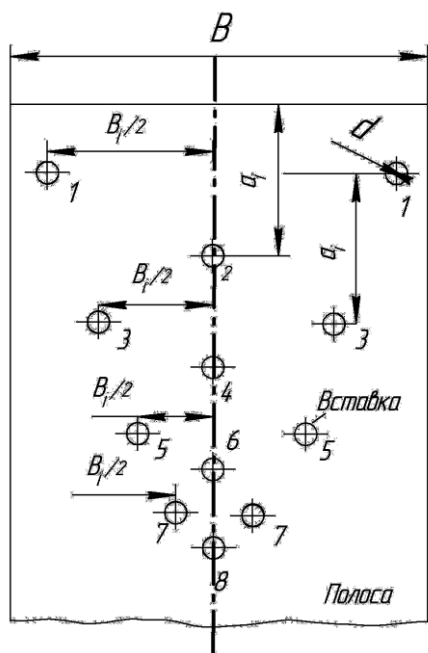
Для практичних розрахунків з деяким наближенням можна приймати $m_1=2$ і тоді

$$p(y) = \frac{3p}{2+n_1} \left[1 + n_1 - 1 \frac{(2y)^2}{B^2} \right]. \quad (3.16)$$

Як слід з формули (3.16), параметр $p(y)$ є складною функцією $2y/B$ і n_1 , оскільки сам коефіцієнт n_1 залежить від різних технологічних параметрів. З формули (3.16) також виходить, що при $n_1 = 1$ має місце рівномірний розподіл погонних сил на контакті зі штабою, а при $n_1 = 0 (<1)$ параметр $p(y)$ змінюється по параболічній залежності з $p(y) = 0$ при $y = B/2$. Якщо $n_1 > 1$, то максимальні значення $p(y)$ знаходяться на кромках штаби, а мінімальні - в середині ширини штаби.

Таким чином, якщо будуть відомі параметр n_1 у формулі (3.16), завжди можна визначити $p(y)$ і потім спільно з $q(y)$ - прогин робочого валка.

3.3 Експериментальні дослідження коефіцієнта нерівномірності n_1



Результати лабораторних і теоретичних досліджень, що наводяться нижче [32,65-67] дозволили встановити характер впливу різних технологічних, і конструктивних особливостей станів на нерівномірність деформації валків і погонних сил по ширині штаб, яка оцінювалася коефіцієнтом n_1 .

У роботі [32] коефіцієнт n_1 визначали шляхом прокатки дюралюмінієвих і алюмінієвих штаб різної ширини з м'якими вставками на двохвалковому і тривалковому станах (рис.3.7). – h_0 ,

Рисунок 3.7 – Складена полоса для визначення пружних деформацій валків і пластичних деформацій штаби (1-8-вставки; d -діаметр вставки)

Оскільки прогин валків по ширині на ділянках м'яких вставок 1-8 різний, то різні їх товщина і величини їх обтиснень. Після прокатки в різних подовжніх перерізах по ширині штаб вимірювали товщину вставок і по виразах:

$$\Delta h_1 = H - h_i; \quad \Delta h_0 = H - h_0$$

визначали обтиснення і розраховували довжини дуг контакту з урахуванням пружних деформацій валків в різних поперечних перерізах ширини штаби [28]. Базовими були параметри по осі штаби (H - початкова товщина основної штаби; h_i і h_0 - товщина м'яких вставок на кромці і в середині ширини штаби).

Коефіцієнт n_l визначали за формулою

$$n_l = \frac{l_{d1}}{l_{d0}} \approx \frac{p_1}{p_0}, \quad (3.17)$$

де l_{d1} і l_{d0} - довжина дуги контакту відповідно на кромці і по штаби.

В результаті досліджень отримана наступна лінійна залежність коефіцієнта n_l від відношення $\Delta h_1 / \Delta h_0$ (в діапазоні зміни 0,6...1,6)

$$n_l = 0,75 + 0,25 \Delta h_1 / \Delta h_0, \quad (3.18)$$

де Δh_1 і Δh_0 - абсолютні обтиснення відповідно на кромці і по осі штаби..

З формули (3.18) виходить, що при рівності обтиснень $\Delta h_1 = \Delta h_0$ по ширині штаби коефіцієнт $n_l = 1,0$, а погонні сили рівномірні, тобто $p(y) = \text{const}$. При можливому збільшенні параметра $\Delta h_1 / \Delta h_0$ в межах від 0,6 до 1,6 коефіцієнт n_l зростає з $n_l = 0,9$ до 1,13.

Параметр $\Delta h_1 / \Delta h_0$ є універсальною характеристикою міри нерівномірності погонних сил по ширині штаби, визначуваної нерівномірністю розподілу по ширині зовнішніх чинників (поперечній різновтовщинності штаби до і після прокатки, натягнення кінців штаби, прогинів робочого валка, температури штаби і тому подібне).