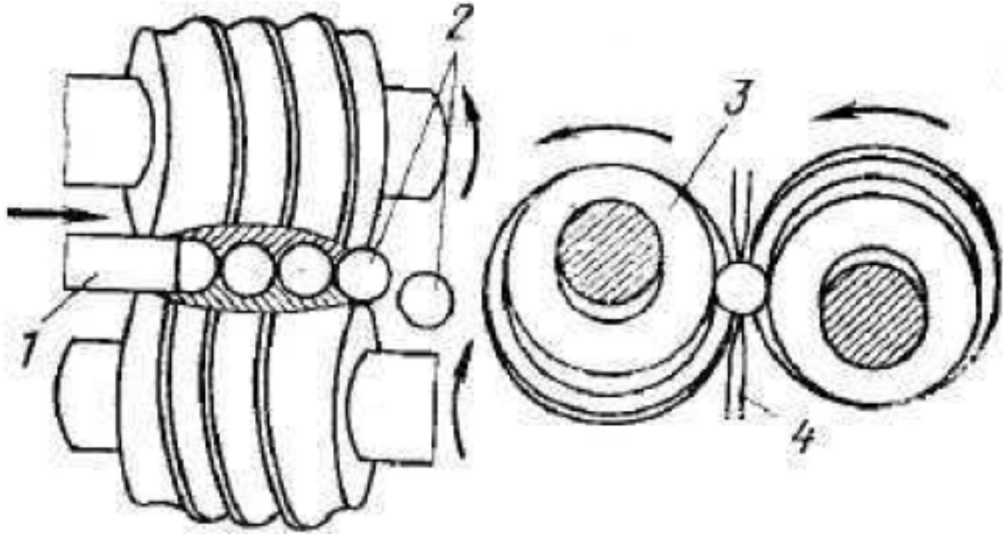


## 10 ВИРОБНИЦТВО КУЛЬ

Процес одержання куль різних діаметрів ковальсько-пресовими методами досить складний і трудомісткий.

ДНДІметмаш розробив цілком новий технологічний процес одержання куль - поперечну прокатку їх у гвинтових калібрах на спеціальних станах. Цей технологічний процес зводиться до наступного (рис 10.1).



1 - заготовка; 2 – готові вироби; 3 - робочі валки з гвинтовими калібрами;  
4 – провідки

Рисунок 10.1 - Схема поперечно-гвинтової прокатки куль

Нагріта заготовка круглого перетину подається між двома обертовими косорозміщеними валками з гвинтовим калібром, утвореним двома рівчаками,

виконаними на поверхні валків. Профіль і розміри калібру відповідають формі й розмірам кулі, що прокатується.

Захоплювана валками (початком калібру) нагріта заготовка обертається й одночасно просувається по осі прокатки. Внаслідок збільшення висоти бурту калібру заготовка зазнає обтиснення, здобуває форму кулі та в остаточному підсумку відділяється від основної маси заготовки, видається як готова куля. За кожний оберт валків прокатується одна куля. Однак можна виконати дво-, три- і чотиривалкові гвинтові калібри, що дозволить за один оберт валків одержувати відповідну кількість куль.

Даний спосіб виробництва куль дозволив зменшити витрату металу на 20% і збільшити продуктивність в 2 - 10 разів у порівнянні з методами, що раніше застосовувалися. При цьому забезпечується досить висока точність виготовлення куль - витримується допуск 0,2 - 0,4 мм. Цим способом у вітчизняній металургії прокатують кулі діаметром 25 - 125 мм.

Процес прокатки куль, призначених для підшипників, відрізняється від наведеного вище способу прокатки млинових куль тільки лише способом відділення від відформованої кулі перемичок, які не обрізуються і не обкатуються. При цьому куля не розвертається в калібрі, а виходить із валків строго по осі, що проходить через смуги перемичок.

Характеристикою стану є діаметр кулі, що прокатується. Продуктивність кулепрокатних станів різноманітна, і вона залежить від частоти обертання валків, їх калібрування й діаметра кулі. У вітчизняній металургії працюють кулепрокатні стани 25-50, 40-80, 80-125, що забезпечують продуктивність 45 - 385 шт/хв.

## 11 ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ПЕРІОДИЧНОЇ ПРОКАТКИ

Головною особливістю періодичної прокатки є закономірна, періодична зміна обтиснення при проходженні штаби між валками. Зміна обтиснення супроводжується зміною випередження, розширення, контактних напруг, тобто всіх кінематичних і динамічних параметрів. Таким чином, процес періодичної прокатки є несталим. Обтиснення можна змінити переміщенням (зближенням або розведенням) валків, однак у більшості випадків це досягається за допомогою застосування валків некруглої форми.

*Геометрія осередку деформації.* У теорії періодичної прокатки в якості основних моделей розглядаються два варіанти прокатки: з наростанням і убуванням обтиснення (рисунок 11.1). І в тому, і в іншому випадку деформація штаби здійснюється валками перемінного радіуса  $\rho$ . але при прокатці з наростанням обтиснення при повороті валків їх радіус зростає (рисунок 11.1, а), а при процесі з убуванням обтиснення - зменшується (рисунок 11.1, б). Відповідно змінюється форма штаби: будучи клиноподібною, вона виходить із валків або товстим, або тонким кінцем уперед.

Характеризуючи геометричні параметри осередку деформації, розрізняють *кут захвату* ( $\alpha_x, \alpha_y$ ) у перетині входу й *кут дотику* ( $\theta_x, \theta_y$ ), як центральний кут між осьовою лінією валків і початковим радіусом  $\rho_A$ . Ці кути

не однакові, тому що нормаль до поверхні валка в перетині входу  $NA$  не проходить через центр валка.

Форма вихідного кінця штаби характеризується *кутом клиновидності*  $\psi$ . Залежно від профілю валків, цей кут може бути або постійним, або змінним.

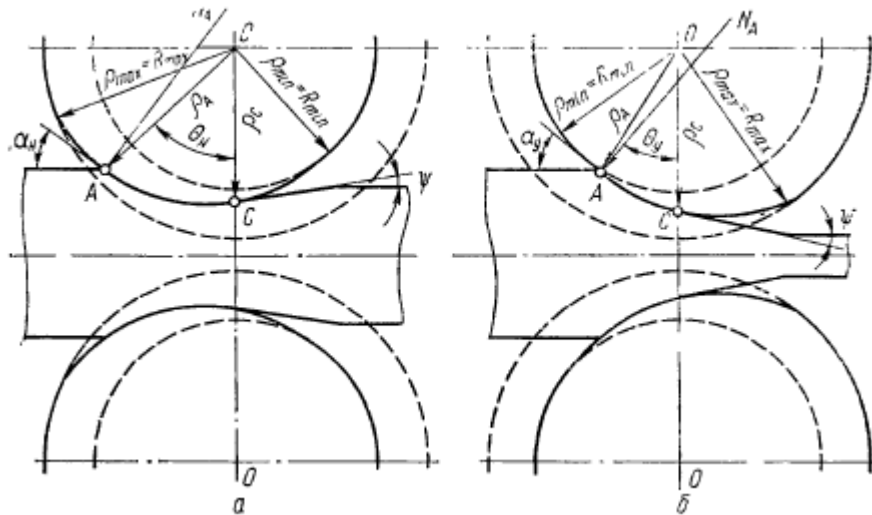


Рисунок 11.1 - Прокатка з наростанням (а) і убуванням (б) обтиснення

Визначимо значення кутів дотику й захвату. Знайдемо величину умовного обтиснення, яке було б у тому випадку, якби вся контактна поверхня була описана радіусом  $\rho_A$  (рисунок 11.2)

$$\Delta h_{\text{усл}} = h_0 - 2(D/2 - \rho_A), \quad (11.1)$$

де  $D$  – відстань між центрами валків (ідеальний діаметр).

Тоді кут дотику  $\theta$  визначається за формулами

$$\theta = \arccos(1 - \Delta h_{\text{усл}}/2\rho_A) \quad (11.2)$$

чи

$$\theta = \sqrt{\Delta h_{\text{усл}}/\rho_A} \quad (11.3)$$

Формули (11.2) і (11.3) дійсні при прокатці як з наростанням, так і з убуванням обтиснення. Введемо поняття середнього радіуса контактної поверхні, величину якого будемо визначати по формулі

$$R_{\text{ср}} = \sqrt{\rho_{\text{min}}\rho_{\text{max}}} \quad (11.4)$$

Центр відповідної окружності  $O_{\text{ср}}$  лежить на нормалі до поверхні валка в крапці  $A$ . З рисунок 11.2, а видно, що кути  $AO_{\text{ср}}C$  і  $AOC$  практично рівні, так як вони опираються на ту саму дугу  $AC$ , а радіуси  $R_{\text{ср}}$ ,  $\rho_A$  й  $\rho_C$  відрізняються незначно. Отже, маємо

$$\alpha_{\text{н}} + \psi_{\text{в}} = \theta_{\text{н}},$$

Звідки

$$\alpha_{\text{н}} = \theta_{\text{н}} - \psi_{\text{в}}. \quad (11.5)$$

Існує доказ того, що при відсутності випередження кут  $\psi_B$  дорівнює куту клиновидності  $\psi$ . Тому, якщо знехтувати випередженням і прийняти  $\psi_B = \psi$  отримаємо

$$\alpha_H = \theta_H - \psi. \quad (11.6)$$

Шляхом аналогічних міркувань, використовуючи схему на рисунку 11.2, б, для випадку прокатки з убуванням обтиснення знаходимо

$$\alpha_Y = \theta_Y + \psi_B \quad (11.7)$$

або (зневажаючи випередженням)

$$\alpha_Y = \theta_Y + \psi. \quad (11.8)$$

Довжину осередку деформації можна визначити за наступними формулами: при наростанні обтиснення (рисунок 11.2, а)

$$\begin{aligned} l_{d.H} &= l'_{d.H} + l''_{d.H} = R_{cp} \sin \alpha_H + R_{cp} \sin \psi_B = \\ &= R_{cp} (\sin \alpha_H + \sin \psi_B), \end{aligned} \quad (11.9)$$

при убуванні обтиснення (рисунок 11.2, б)

$$\begin{aligned} l_{d.Y} &= l'_{d.Y} - l''_{d.Y} = R_{cp} \sin \alpha_Y - R_{cp} \sin \psi_B = \\ &= R_{cp} (\sin \alpha_Y - \sin \psi_B). \end{aligned} \quad (11.10)$$

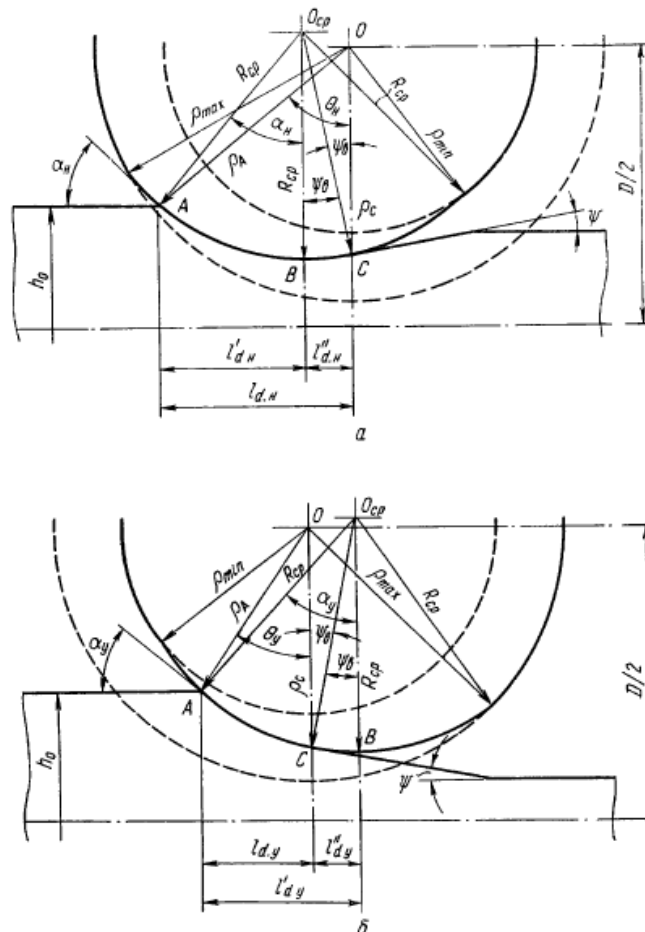


Рисунок 11.2 - Геометричні параметри осередку деформації при прокатці з наростанням (а) і убуванням (б) обтиснення

Слід підкреслити, що основні геометричні характеристики осередку деформації ( $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $l_d$  і ін.) є миттєвими, тобто вони залежать від положення валків у цей момент часу.

*Профіль валків і штаби.* Принципове питання калібрування валків для періодичної прокатки полягає в наступному: яким повинен бути профіль валків, щоб клиноподібна штаба, що виходить з них, мала плоскі грані ( $\psi = \text{const}$ )?

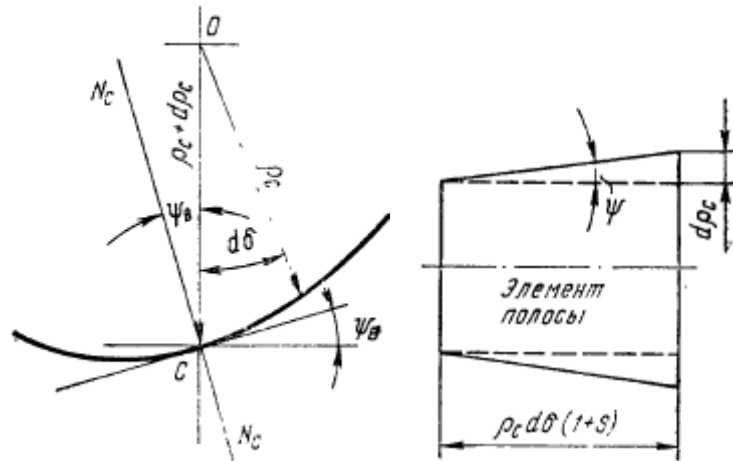


Рисунок 11.3 - До визначення клиновидності штаби при прокатці у валках змінного радіуса

Розглянемо формування профілю елементарної ділянки штаби (рисунок 11.3). При повороті валків на нескінченно малий кут  $d\delta$  їх радіус у вихідному перетині  $\rho_c$  зміниться на величину  $d\rho_c$ . При цьому перетин штаби просувається вперед на відстань  $\rho_c d\delta(1+S)$ , де  $S$  – миттєве випередження. Отже, миттєвий кут клиновидності штаби буде

$$\tan \psi = \frac{d\rho_c}{\rho_c d\delta(1+S)} = \frac{d\rho_c}{\rho_c d\delta k_s}, \quad (11.11)$$

де  $k_s = (1+S)$  – коефіцієнт випередження.

Представимо вираження (11.11) у вигляді

$$d\rho_c/\rho_c = \tan \psi k_s d\delta. \quad (11.12)$$

Після інтегрування одержимо

$$\begin{aligned} \ln \rho_c &= \tan \psi k_s \delta + \ln C; \\ \rho_c &= C e^{\tan \psi k_s \delta}, \end{aligned} \quad (11.13)$$

де  $\delta$  — кут повороту валків;  $C$  - постійна інтегрування.

Вираження (11.13) може бути також презентовано в наступних позначеннях:

$$\rho_i = C e^{\tan \psi k_s \delta_i}, \quad (11.14)$$

де  $\rho_i$  - поточне значення радіуса валка на перехідній ділянці;  $\delta_i$  - поточне значення кута, відлічуваного від  $\rho_{min}$ .

Постійну  $C$  визначаємо з початкової умови:

при  $\delta_i = 0$  маємо  $\rho_i = \rho_{min}$ . Звідси знаходимо  $C = \rho_{min}$ , і формула (11.15) приймає кінцевий вигляд:

$$\rho_i = \rho_{min} e^{\tan \psi k_s \delta_i} \quad (11.16)$$

Для випадку прокатки з убиванням обтиснення аналогічний висновок приводить до вираження

$$\rho_i = \rho_{max} e^{-\tan \psi k_s \delta_i}, \quad (11.17)$$

де  $\delta_i$  – кут, відлічуваний від  $\rho_{max}$ .

Формула (11.16) при  $\tan \psi = const$  і  $k_s = k_{cp} = const$  представляє собою рівняння логарифмічної спіралі. Те ж відноситься до формули (11.17). Отже, щоб після прокатки одержати клиноподібні ділянки із плоскими гранями, профіль валків повинен бути виконаний по логарифмічній спіралі. При цьому приймається допущення, що випередження залишається постійним (середнім). Якщо ж випередження змінюється, що відповідає дійсності, то грані клиноподібних ділянок будуть мати деяку кривизну, хоча б малу. Часто такою кривизною можна знехтувати.

Виконання профілю валків по логарифмічній спіралі на практиці натрапляє на труднощі, тому найчастіше застосовується профілювання валків по дугах окружностей, зі зсувом центру окружності щодо центру валка, як показано на рисунку 11.2. Радіус перехідної окружності розраховують по вищенаведеній формулі (11,4).

*Нейтральний кут і умови захвату.* Положення нейтрального перетину визначається з рівняння рівноваги поздовжніх сил, прикладених до штаби у осередку деформації.

Нехай радіус  $\rho_y$ , що відповідає нейтральному перетину, виходить у деяку точку  $G$  на дузі дотику (рисунок 11.4); тоді ділянка  $AG$  на контактній поверхні буде зоною відставання, а  $GC$  - зоною випередження. Зону випередження, у свою чергу, можна розділити на дві ділянки:  $GB$ , де сили нормального тиску діють проти ходу прокатки, і  $BC$ , де рівнодіюча нормальних тисків дає складову, спрямовану по ходу прокатки.

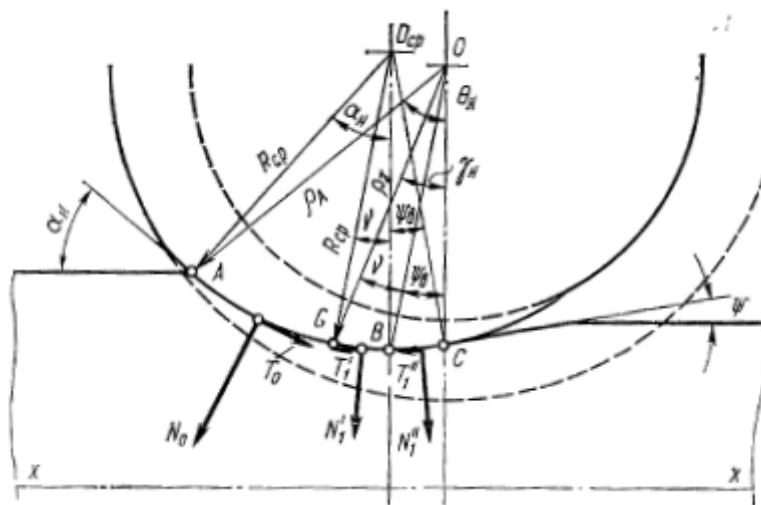


Рисунок 11.4 - Схеми сил до визначення нейтрального кута при прокатці з наростанням обтиснення

Відповідно до такого розподілу контактної поверхні на ділянки можна скласти наступне рівняння рівноваги поздовжніх сил (див. рисунок 11.4):

$$-N_{0x} + T_{0x} - N'_{1x} - T'_{1x} + N''_{1x} - T''_{1x} = 0. \quad (11.18)$$

Враховуючи кути нахилу всіх рівнодіючих, знайдемо значення доданків, що входять у рівняння (11.18). Маємо

$$N_{0x} = N_0 \sin \left( v + \frac{\alpha_H - v}{2} \right) = p_{cp} b R_{cp} (\alpha_H - v) \times \sin \frac{\alpha_H - v}{2} \approx p_{cp} b R_{cp} (\alpha_H - \gamma_H + \psi_B) \frac{\alpha_H + \gamma_H - \psi_B}{2}; \quad (11.19)$$

$$T_{0x} = T_0 \cos \left( v + \frac{\alpha_H - v}{2} \right) \approx p_{cp} b R_{cp} \beta (\alpha_H - \gamma_H + \psi_B); \quad (11.20)$$

$$N'_{1x} = N'_1 \sin \frac{v}{2} = p_{cp} b R_{cp} v \sin \frac{v}{2} \approx p_{cp} b R_{cp} \frac{(\gamma_H - \psi_B)^2}{2}; \quad (11.21)$$

$$T'_{1x} = T'_1 \cos \frac{v}{2} \approx p_{cp} b R_{cp} \beta (\gamma_H - \psi_B); \quad (11.22)$$

$$N''_{1x} = N''_1 \sin \frac{\psi_B}{2} = p_{cp} b R_{cp} \psi_B \sin \frac{\psi_B}{2} \approx p_{cp} b R_{cp} \frac{\psi_B^2}{2}; \quad (11.23)$$

$$T''_{1x} = T''_1 \cos \frac{\psi_B}{2} \approx p_{cp} b R_{cp} \beta \psi_B. \quad (11.24)$$

Після підстановки знайдених значень поздовжніх сил у рівняння (11.18), скорочення всіх членів на  $p_{cp} b R_{cp}$  і алгебраїчних перетворень одержимо

$$-2\gamma_H \beta + \beta (\alpha_H + \gamma_H) - \frac{\alpha_H^2 + \psi_B^2}{2} = 0.$$

Звідси знаходимо (ухвалюючи  $\psi_B = \psi$ ):

$$\gamma_H = \frac{\alpha_H - \psi}{2} \left( 1 - \frac{\alpha_H - \psi}{2\beta} \right) \quad (11.25)$$

або

$$\gamma_H = \frac{\alpha_H}{2} \left( 1 - \frac{\alpha_H}{2\beta} \right) + \frac{\psi}{2} \left( 1 - \frac{\psi}{2\beta} \right). \quad (11.26)$$

Якщо врахувати залежність між кутами  $\alpha_H$  і  $\theta_H$ , то з формули (11.25) одержимо

$$\gamma_H = \frac{\theta_H}{2} \left( 1 - \frac{\theta_H - 2\psi}{2\beta} \right). \quad (11.26)$$

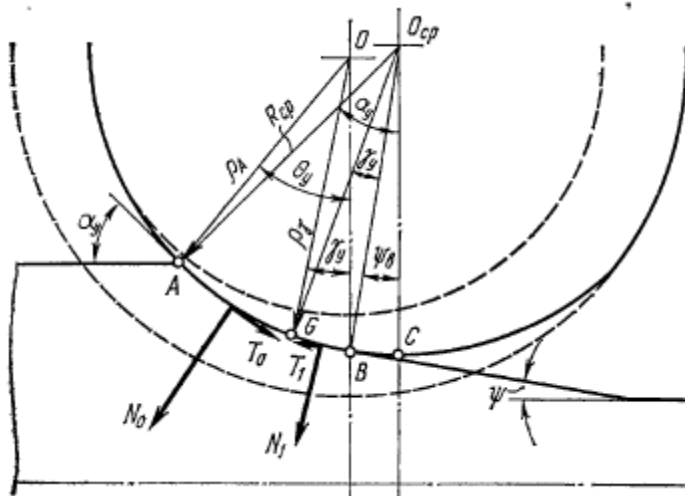


Рисунок 11.5 - Схема сил до визначення нейтрального кута при прокатці з убуванням обтиснення

Перейдемо до визначення нейтрального кута при прокатці з убуванням обтиснення (рисунок 11.5). У цьому випадку на дузі дотику будуть тільки дві ділянки: зона відставання  $AG$  і зона випередження  $GB$ . Рівняння рівноваги поздовжніх сил має такий вигляд:

$$-N_{0x} + T_{0x} - N_{1x} - T_{1x} = 0. \quad (11.27)$$

Виразимо складові цього рівняння в конкретній формі:

$$N_{0x} = N_0 \sin \left( \gamma_y + \psi_B + \frac{\alpha_y - \gamma_y - \psi_B}{2} \right) \approx p_{cp} b R_{cp} (\alpha_y - \gamma_y - \psi_B) \times \left( \frac{\alpha_y + \gamma_y + \psi_B}{2} \right); \quad (11.28)$$

$$T_{0x} = T_0 \cos \left( \gamma_y + \psi_B + \frac{\alpha_y - \gamma_y - \psi_B}{2} \right) \approx p_{cp} b R_{cp} \beta (\alpha_y - \gamma_y - \psi_B); \quad (11.29)$$

$$N_{1x} = N_1 \sin \left( \psi_B + \frac{\gamma_y}{2} \right) \approx p_{cp} b R_{cp} \gamma_y \left( \psi_B + \frac{\gamma_y}{2} \right); \quad (11.30)$$

$$T_{1x} = T_1 \cos \left( \psi_B + \frac{\gamma_y}{2} \right) \approx p_{cp} b R_{cp} \beta \gamma_y. \quad (11.31)$$

Підставивши значення сил  $N_{0x}$ ,  $N_{1x}$  і  $T_{1x}$  у рівняння (11.28), за аналогією з виводом формул (11.25) і (11.27) одержимо

$$\gamma_y = \frac{\alpha_y - \psi}{2} \left( 1 - \frac{\alpha_y - \psi}{2\beta} \right); \quad (11.32)$$

$$\gamma_y = \frac{\alpha_y}{2} \left( 1 - \frac{\alpha_y}{2\beta} \right) + \frac{\psi}{2} \left( 1 - \frac{\psi}{2\beta} \right); \quad (11.33)$$

$$\gamma_y = \frac{\theta_y}{2} \left( 1 - \frac{\theta_y - 2\psi}{2\beta} \right). \quad (11.34)$$

Формули (11.26) і (11.34) уперше виведені В. К. Смирновим.

Порівнюючи формули (11.25) і (11.27) з формулою нейтрального кута при простому процесі прокатки, бачимо, що вони мають однакову структуру. Відмінність полягає в тому, що в правій частині формул (11.26) і (11.33) утримується додатковий член, який при прокатці з наростанням обтиснення має знак плюс, а при прокатці з убуванням обтиснення - знак мінус. Останнє свідчить про те, що втягуюча здатність валків при прокатці з наростанням обтиснення вище, ніж при прокатці з убуванням обтиснення.

Граничні значення кутів захвата в обох випадках можуть бути знайдені відповідно з формул (11.25) і (11.32), якщо покласти  $\gamma = 0$ . З формули (11.25) одержуємо

$$1 - \frac{\alpha_n - \psi}{2\beta} = 0; \\ \alpha_{nmax} = 2\beta + \psi. \quad (11.35)$$

Аналогічно з формули (11.32) знаходимо

$$\alpha_{ymax} = 2\beta - \psi. \quad (11.36)$$

Таким чином, максимальний кут захвата при прокатці з убуванням радіуса валків менше, ніж при прокатці з наростанням радіуса:  $\alpha_{ymax} < \alpha_{nmax}$ . Цей висновок повністю узгодиться з даними практики. При прокатці з



більшими деформаціями пробуксовка валків виникає в першу чергу саме на тих ділянках штаби, на яких обтиснення падає.

*Випередження.* Завдання полягає в тому, щоб при відомому значенні нейтрального кута визначити величину випередження. Отже, потрібно вивести формулу випередження типу формули Фінка при змінних параметрах періодичної прокатки.

Слід підкреслити, що при періодичній прокатці від величини випередження залежить не тільки швидкість виходу металу з валків, але й довжина періодів на штабі, тобто її форма.

При теоретичнім визначенні випередження будемо виходити з умови нестисливості металу, а також прийнемо відсутність розширення в зоні випередження.

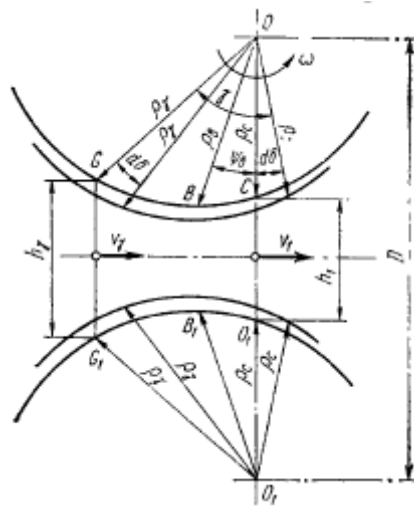


Рисунок 11.6 - До виведення формули випередження при прокатці у валках змінного радіуса

Розглянемо фігуру  $GOO_1G_1$  на рисунку 11.6, яка охоплює зону випередження осередку деформації й сектори валків  $GOC$  і  $G_1O_1C_1$ . Будемо вважати, що обсяг металу, що вступає в поле фігури  $GOO_1G_1$  за час  $d\tau$ , дорівнює обсягу металу, що виходить із поля цієї фігури за те ж час. При цьому в поняття «обсяг металу» включається як тіло штаби, так і тіло валків.

Виходячи зі сказаного, складемо рівність

$$\Delta V_{\text{пг}} + \Delta V_{\text{вг}} = \Delta V_{\text{п1}} + \Delta V_{\text{в1}}, \quad (11.37)$$

де  $\Delta V_{\text{пг}}$  — обсяг штаби, що пройшов через нейтральний перетин за час  $d\tau$ ;  $\Delta V_{\text{вг}}$  - обсяг валків, що вступив у поле фігури  $GOO_1G_1$  за час  $d\tau$ ;  $\Delta V_{\text{п1}}$  і  $\Delta V_{\text{в1}}$  - величини, аналогічні  $\Delta V_{\text{пг}}$  і  $\Delta V_{\text{вг}}$ , але відносяться до перетину виходу з осередку деформації. Маємо (див. рисунок 11.6):

$$\Delta V_{\text{пг}} = bh_{\gamma}v_{\gamma}d\tau; \quad (11.38)$$

$$\Delta V_{\text{вг}} = 2b \left( \frac{\rho_{\gamma}^2 d\delta}{2} \right) = b\rho_{\gamma}^2 \omega d\tau, \quad (11.39)$$

де  $\omega$  — кутова швидкість валків;

$$\Delta V_{\text{п1}} = bh_1v_1d\tau; \quad (11.40)$$

$$\Delta V_{\text{в1}} = 2b \left( \frac{\rho_c^2 d \delta}{2} \right) = b\rho_c^2 \omega d\tau, \quad (11.41)$$

Зробимо відповідні підстановки і рівність (11.37)

$$bh_\gamma v_\gamma d\tau + b\rho_\gamma^2 \omega d\tau = bh_1v_1d\tau + b\rho_c^2 \omega d\tau.$$

Скоротимо всі члени цього вираження на  $bdt$

$$h_\gamma v_\gamma + \rho_\gamma^2 \omega = h_1v_1 + \rho_c^2 \omega. \quad (11.42)$$

З урахуванням того, що  $v_\gamma = \rho_\gamma \omega \cos \gamma$  і  $v_1 = \rho_c \omega (1 + S)$ , одержуємо

$$h_\gamma \rho_\gamma \omega \cos \gamma + \rho_\gamma^2 \omega = h_1 \rho_c \omega (1 + S) + \rho_c^2 \omega. \quad (11.43)$$

Після скорочення всіх членів на  $\omega$  і простих перетворень одержимо шукану формулу для визначення випередження

$$s = \frac{\rho_\gamma h_\gamma \cos \gamma + \rho_\gamma^2 - \rho_c^2}{\rho_c h_1} - 1. \quad (11.44)$$

Ряд величин, що входять у формулу (11.44), вимагає додаткового визначення:

$$h_1 = D - 2\rho_c; \quad (11.45)$$

$$h_\gamma = D - 2\rho_\gamma \cos \gamma; \quad (11.46)$$

$$\rho_\gamma = \rho_c e^{\pm \tan \psi \gamma}. \quad (11.47)$$

В останньому виразі знак плюс ставиться у випадку прокатки з наростанням обтиснення, знак мінус — з убаванням обтиснення. При невеликих значеннях кутів  $\psi$  і  $\gamma$  ( $\psi \gamma < 0,15$ ) з погрішністю менш 1 % можна прийняти:

$$\rho_\gamma = \rho_c (1 \pm \psi \gamma). \quad (11.48)$$

Випередження, знайдене по формулі (11.44), є миттєвим: воно безупинно змінюється в міру повороту валків. Для визначення загального (середнього) випередження на кінцевій ділянці штаби необхідно розрахувати його величину в окремих перетинах, а потім знайти середньоінтегральне значення.

Аналіз формули (11.44) показує, що при прокатці з наростанням обтиснення випередження більше, ніж при прокатці з убаванням обтиснення; у першому випадку  $\rho_\gamma > \rho_c$ , а в другому  $\rho_\gamma < \rho_c$ . Ця закономірність чітко проявляється в дослідних даних.

На рисунку 11.7 наведені результати дослідження випередження при прокатці свинцевої штаби товщиною  $h_\gamma = 10$  мм у валках зі змінним радіусом від  $R_{\text{max}} = 83,3$  мм до  $R_{\text{min}} = 80,0$  мм. Товщина штаби на клиноподібних ділянках змінювалася від  $h_{1\text{max}} = 7,4$  мм до  $h_{1\text{min}} = 0,9$  мм. Кут клиновидності становив  $\psi = 45^\circ$ . З рисунок 11.7 видно, що гілка випередження  $S_{\text{н}}$  на ділянці прокатки з наростанням обтиснення розташовується вище, чим гілки  $S_{\text{у}}$  на ділянці прокатки з убаванням обтиснення. Загальне випередження на ділянці  $l_{\text{н}}$  склало  $S_{\text{н,общ}} = 17,7\%$ , а на ділянці  $l_{\text{у}} — S_{\text{у,общ}} = 12,9\%$ .

*Зусилля й обертові моменти.* При прокатці у валках змінного радіуса контактні тиски, як і інші параметри, безупинно змінюються. У зв'язку із цим, а також зміною площі контактної поверхні, безупинно змінюється зусилля

прокатки. Звичайно теоретично розраховують те зусилля, яке відповідає максимальному обтисненню. Для розрахунків можуть бути використані формули Целікова, Чекмарьова та інші.

Якщо мати на увазі симетричний процес періодичної прокатки й зневажити інерційними силами, що виникають внаслідок зміни швидкості руху кінців штаби, то слід зробити висновок, що рівнодіючі всіх сил, прикладені до валків, спрямовані вертикально, як і в простому процесі прокатки.

При визначенні величини обертових моментів необхідно враховувати, що в цьому випадку елементарні сили нормального тиску не проходять через центр обертання валка й поряд із силами тертя створюють частину обертового моменту (рисунок 11.8).

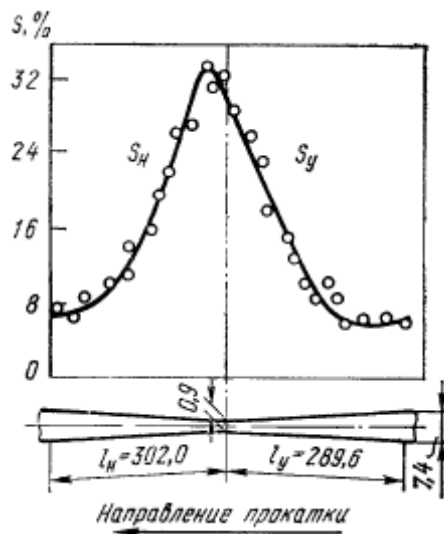


Рисунок 11.7 - Зміна величини випередження при прокатці з наростанням і убуванням обтиснення (по А. П. Чекмарьову й А. Ф. Смольянинову)

Допустимо, що радіус-вектор  $\rho$  змінюється протягом осередку деформації за законом логарифмічної спіралі. Тоді кут між нормаллю й радіусом  $\rho$  у будь-якій точці кривої залишається постійним (така властивість логарифмічної спіралі), у цьому випадку рівним  $\psi$ . Цим визначається напрямок дії елементарних сил  $p$ .

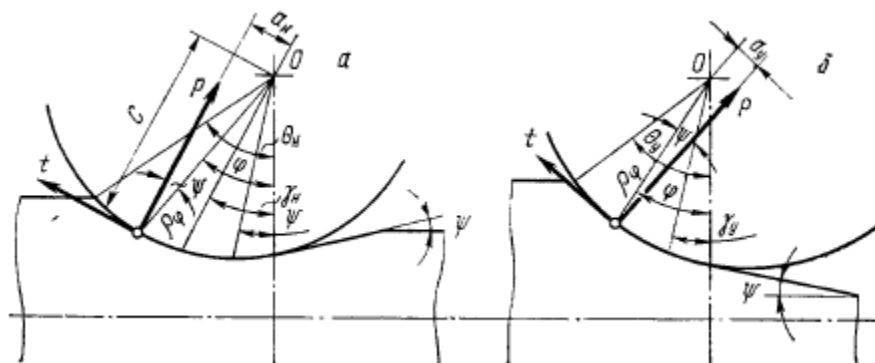


Рисунок 11.8 - До виводу формул крутного моменту при періодичній прокатці з нарощуванням (а) і убуванням (б) обтиснення

Логарифмічну спіраль, як і в попередніх висновках, апроксимуємо дугою окружності середнього радіуса  $R_{cp}$ .

Спочатку розглянемо визначення обертового моменту при прокатці з наростанням обтиснення (рисунок 11.8,а).

Плече елементарної сили тертя  $t$  щодо центру валка можна прийняти

$$c = \rho_\varphi \cos \varphi \approx \rho_\varphi \approx R_{cp}.$$

Плече елементарної сили нормального тиску  $p$  буде

$$\alpha_n = \rho_\varphi \sin \psi \approx \rho_\varphi \psi \approx R_{cp} \psi.$$

Враховуючи розподіл осередку деформації на зони випередження й відставання, складемо рівняння обертового моменту для одного валка

$$M_{прн} = \int_{\gamma_n}^{\theta_n} t b R_{cp}^2 d\varphi - \int_0^{\gamma_n} t b R_{cp}^2 d\varphi + \int_0^{\theta_n} p b R_{cp}^2 \psi d\varphi \quad (11.49)$$

Приймемо, що елементарні сили  $t$  і  $p$  розподіляються по дузі дотику рівномірно й прокатка йде без розширення ( $b = const$ ). При цих допущеннях після інтегрування одержимо

$$M_{прн} = t b R_{cp}^2 (\theta_n - 2\gamma_n) + p b R_{cp}^2 \psi \theta_n. \quad (11.50)$$

За змістом виводу  $t = t_{cp}$  і  $p = p_{cp}$ . Використовуємо закон тертя Амонтона ( $t_{cp} = f p_{cp} \approx \beta p_{cp}$ ), тоді формула (496) приймає кінцевий вигляд:

$$M_{прн} = p_{cp} b R_{cp}^2 f (\theta_n - 2\gamma_n + \theta_n \psi / \beta). \quad (11.51)$$

Аналогічно виводиться формула обертового моменту для випадку прокатки з убуванням обтиснення. Користуючись схемою на рисунку 11.8 б, напишемо:

$$M_{пру} = \int_{\gamma_y}^{\theta_y} t b R_{cp}^2 d\varphi - \int_0^{\gamma_y} t b R_{cp}^2 d\varphi - \int_0^{\theta_y} p b R_{cp}^2 \psi d\varphi. \quad (11.52)$$

Після інтегрування й простих перетворень одержимо:

$$M_{пру} = p_{cp} b R_{cp}^2 f (\theta_y - 2\gamma_y - \theta_y \psi / \beta). \quad (11.53)$$

З порівняння формул (11.51) і (11.53) видно, що за інших рівних умов обертовий момент при прокатці з наростанням обтиснення більше, ніж при прокатці з убуванням обтиснення. Якщо прийняти  $\psi = 0$ , тобто відсутність клиновидності, то формули (11.51) і (11.53) здобувають вид раніше отриманої формули Баюкова для випадку прокатки у валках постійного радіуса.