

**Міністерство освіти і науки, молоді та  
спорту України**  
**Запорізька державна інженерна академія**

---



**Б.П. Серeda  
Ю.О. Белоконь  
А.М. Онiщенко**

## **ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТРУМЕНТ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ**

**Методичні вказівки  
до лабораторного практикуму**

*для студентів ЗДІА  
спеціальності 7.090404 “Обробка металів тиском”  
денної та заочної форм навчання*

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Запорізька державна інженерна академія

# **ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТРУМЕНТ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ**

**Методичні вказівки  
до лабораторного практикуму**

*для студентів ЗДІА  
спеціальності 7.090404 “Обробка металів тиском”  
денної та заочної форм навчання*

*Рекомендовано до видання  
на засіданні кафедри ОМТ,  
протокол № 1 від 31.08.2010р.*

Запоріжжя

ЗДІА

2011

*Б.П. Серета, д.т.н. професор  
Ю.О. Белокоп, к.т.н. доцент  
А.М. Онїщенко, аспірант*

***Відповідальний за випуск:*** *зав. кафедри ОМТ,  
професор Б.П. Серета*

***Рецензенти:*** *Критська Т.В., д.т.н., проф. Запорізької державної  
інженерної академії*

***Серета Б.П.***

***Технологічний інструмент обробки металів тиском: методичні вказівки до  
лабораторного практику для студентів ЗДІА спеціальності 7.090404  
“Обробка металів тиском” / Белокоп Ю.О., Онїщенко А.М. – Запоріжжя,  
ЗДІА, 2011. - 50 с.***

Методичні вказівки призначені для бакалаврів спеціальності «Обробка металів тиском», які включають план та методику проведення лабораторних робіт, згідно з курсу дисципліни «Технологічний інструмент обробки металів тиском». Вказівки містять питання для самоконтролю знань та перелік рекомендованої літератури до самопідготовки.

## ЗМІСТ

Лабораторна робота №1 .....	8
Лабораторна робота №2 .....	16
Лабораторна робота №3 .....	23
Лабораторна робота №4 .....	30
Лабораторна робота №5 .....	35
Лабораторна робота №6 .....	43
Перелік літератури .....	53

## **Правила техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт**

1. Перед початком роботи необхідно переконатися, що усі проходи біля обладнання, на якому виконуються роботи, вільні. Якщо площадка, або проходи біля обладнання зайняті сторонніми предметами (портфелями, сумками та ін.), які ускладнюють переміщення, їх треба прибрати до початку роботи.

2. Не слід надто близько підходити до працюючого обладнання і обпіратися на нього. Забороняється під час роботи відвертатися та займатися іншими справами, які не мають відношення до виконуваної роботи.

3. Забороняється знаходитись біля деталей, що обертаються (муфт, прокатних валків та ін.) в розстебнутому одязі, зі звисаючими кінцями шалей, шарфів, краваток та ін., а також з розпущеним волоссям.

4. Перед включенням кнопки «Пуск» необхідно переконатися, у тому, що всі деталі, які обертаються, закриті захисними засобами і включення агрегату не завдає небезпеки для присутніх, яких треба попередити про наступне включення.

5. Включати і виключати агрегати повинен тільки той студент, якому викладач доручив цю роботу. Під час перерви обладнання повинно бути зупинено. Після закінчення роботи обладнання повинно бути зупинено та знеструмлено.

6. Під час роботи на гідравлічному пресі та розривній машині всі операції, пов'язані з установкою зразків, бойків, інструменту для прошивки, пресування та волочіння, слід проводити, коли обладнання зупинено, тобто коли всі електромотори обладнання виключено.

7. При деформації зразків на гідравлічному пресі (або на розривній машині) слід усунути можливість вискакування в бік стискуваних зразків, а також підкладувального інструменту і деталей (підкладувальних бойків, прошивнів та ін.). Для цього необхідно виконувати такі вимоги:

7.1 Контактні поверхні бойків (плит) пресу повинні бути суворо паралельними.

7.2 Висота стиснутих зразків не повинна перевищувати їх діаметр більш ніж у 2,5 разів.

7.3 Довжина прошивнів не повинна перевищувати діаметр його п'яти більше ніж у 3 рази.

7.4 Зразки для деформації, а також використовуваний інструмент (підкладні бойки, прошивні, контейнери для пресування) слід розміщувати по центру нижньої плити (бойка) пресу.

7.5. Не допускати вдавлювання пришивню в контактну поверхню нижнього бойка.

7.6. Місця можливого виліту зразків (прошивнів) повинні бути обгороджені, а обслуговуючий персонал повинен знаходитись на відстані не ближче ніж на 2 метри від пресу.

7.7. Процеси осадки, прошивки, волочіння та пресування, металу слід вести без ривків і високих прискорень, плавно збільшуючи робоче навантаження.

8. Під час руху бойків пресу або розривної машини заборонено держати (чи придержувати) руками деформуючі зразки або підкладний інструмент (бойки, прошивні та ін.).

9. При роботі на розривній машині слід бути особливо обережним під час опускання рухомої траверси.

10. Щоб уникнути поломок обладнання заборонено виконувати деформацію зразків опусканням траверси верхнього бойка гідравлічного пресу, а також використовувати для цього привод нижнього захвату розривної машини.

11. При роботі зі зразками, які виготовлені зі свинцю, не обхідно пам'ятати, що свинець – отруйний метал, тому його не слід брати руками, якщо на них є незаживлені садні, дряпини. Після роботи необхідно вимити руки. При додержанні цих засобів обережності робота з свинцем безпечна.

12. Після закінчення роботи вимірювальний інструмент слід

здавати керівнику, а використовувані зразки зібрати у місцях, які вказані керівником роботи.

13. В лабораторії виконуються наукові дослідження, часто на тому ж обладнанні, що і лабораторні роботи. Тому без спеціальної вказівки заборонено торкати вимірювальну апаратуру та зразки, які не належать до виконуваної роботи, щоб не нанести шкоди дослідженням.

14. Під час проведення робіт суворо виконувати всі вимоги керівника.

## Лабораторна робота №1

### ЗГИНАННЯ

Мета роботи: Визначити величину пружинення металу і викривлення геометричних розмірів ділянки згинання.

Гнуття є однією з найпоширеніших формозмінних операцій холодного штампування, що широко використовується для одержання різноманітних деталей з листового матеріалу, профільного прокату, труб і дроту.

Питома вага робіт по гнуттю беззупинно збільшується за рахунок нових принципів конструювання й технології виготовлення машин і приладів. Литі й видавлюванні заготівлі витісняються штамповано звареними, виготовленими із гнутих елементів; профільний прокат з легких профілів замінюється заготівлями, отриманими за допомогою гнуття зі смуги або стрічки; вирізка кілець великого діаметру з листового матеріалу замінюється гнуттям смуги на ребро і т. ін.

Залежно від розмірів і форми деталі, профілю вихідної заготівлі й характеру виробництва гнуття здійснюється в штампах, на кривошипних, ексцентрикових, фрикційних і гідравлічних пресах; на спеціальних ручних або механізованих пристроях і на спеціальних гнутих і профілювальних верстатах. Гнуття на малі радіуси деталей дрібних і середніх розмірів здійснюють, як правило, у штампах. Операція гнуття характеризується відносним поворотом частини заготівлі навколо деякої лінії, названою лінією згинання. Гнуттям без нагрівання заготівель виготовляють із листового матеріалу деталі (заготівлі) різних габаритних розмірів товщиною 0,01 - 100 мм, що мають у поздовжньому і у поперечних перерізах різноманітні профілі.

Для забезпечення достатньої точності висота  $H$  прямої частини стінок, що відгинаються, (полиць) деталі (рис. 1, *a*) повинна бути більшою за подвійну товщину полиць, тобто  $H - r \geq 2S$  (за умови, що  $S < 5$  мм).

Якщо ця умова не виконана, тобто деталь має меншу висоту полиць  $H$ ,



необхідно в заготівлі, що надходить на гнуття, попередньо видавлювати канавки (рис. 1, б) шириною  $b \geq S$  і глибиною  $h = (0,1 - 0,3) S$  або виготовляти деталь із подовженими полицями ( $H > 2S$ ) і фрезерувати їх після гнуття, що подовжує технологічний процес і здорожує вартість виготовлення.

Якщо деталь має П - подібну форму й бічні сторони скошені до зони деформації (рис. 1, б), забезпечити якісне гнуття неможливо. На кінцях скошених полиць у місці вигину виходить зминання заготівлі, вигин її неповний. Такі деталі варто конструювати так, як показано на рис. 1 умовно тонкою лінією.

Для точного фіксування заготівель у штампах і запобігання їх зміщення в момент гнуття бажано передбачати в деталях технологічні отвори.

Досить важливим параметром, що визначає зміст і тривалість технологічного процесу виготовлення деталі й конструкцію штамсів для гнуття, є внутрішній радіус гнуття на деталі (див. рис. 1, а).

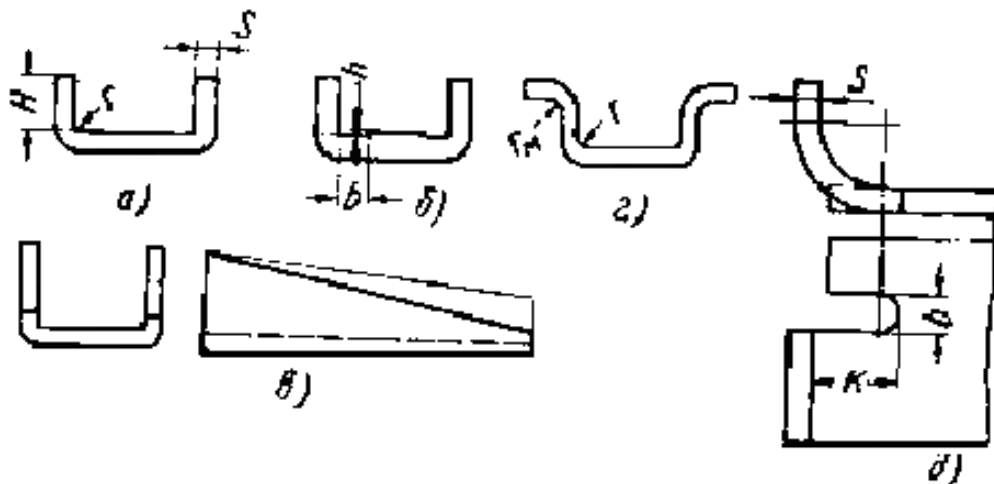


Рис. 1. Деталі, що піддаються гнуттю

### Порядок виконання роботи

Роботу виконують на гідравлічному пресі з максимальним зусиллям ... (Н) (вказати максимальну силу).

Для проведення роботи використовують матрицю 1 (рис. 2 ) з кутом між робочими гранями  $\alpha = \dots$  і пуансон 2 з таким же кутом  $\alpha = \dots$  між робочими

гранями і радіусом закруглення  $R = \dots$  мм (рис. 2 ).

Використовуваним матеріалом є сталеві штаби 3 (рис. 2 ) шириною ... мм, довжиною ... мм і товщиною ... мм. Опір деформації матеріалу сталевих пластин ...  $\text{Н/мм}^2$ , модуль пружності...  $\text{Н/мм}^2$ .

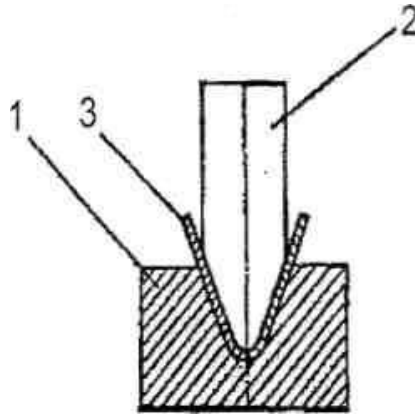


Рис.2 Схема процесу згинання

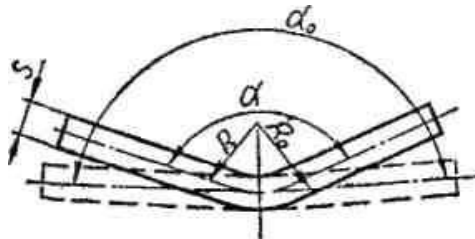


Рис. 3 Схема процесу пружинення штаби

Після проведення згинання штаб заміряємо кут між плоскими елементами виробу ( $\alpha_0$ ) за допомогою кутоміра і радіус внутрішньої поверхні деталі ( $R_0$ ).

Розраховуємо параметри  $\Delta\alpha$  і  $\Delta$  по знайдених експериментальних значеннях (формули 1, 2, 3).

Пружинення оцінюють кутом пружинення ( $\Delta\alpha$ ), який представляє різницю між величиною кута виробу після згинання ( $\alpha_0$ ) і кутом пуансона ( $\alpha$ ).

$$\Delta\alpha = \alpha_0 - \alpha \quad (1)$$

Відповідно,

$$\Delta R = R_0 - R \quad (2)$$

Зручно величину зміни радіусу згинання в результаті пружинення оцінювати відносною величиною:

$$\Delta = \frac{\Delta R}{R} = \frac{R_0 - R}{R} \quad (3)$$

Оскільки теоретично  $R_0$  змінюється від  $\infty$  (у разі повного пружинення) до  $R$  (у разі відсутності пружинення), то параметр  $\Delta$  змінюється від  $\infty$  до 0.

Розраховуємо параметри  $\Delta$  і  $\Delta\alpha$  відповідно по формулах: (4, 5, 6, і 7).

Якщо співвідношення  $R/S > 10$ , то коректування форми інструменту на пружинення повинне бути проведене не тільки по куту, але і по радіусу.

Визначення радіусу деталі після пружинення проводимо по формулах:

$$R_0 = \frac{R}{1 - 3K_0} \quad (4)$$

$$K_0 = \frac{\sigma_T \cdot R}{E \cdot S} \quad (5)$$

де  $\sigma_T$  - опір деформації матеріалу штаби;

$E$  - модуль пружності матеріалу штаби;

$S$  - товщина штаби, що згинається.

Далі набутого теоретичного значення  $R_0$  ставимо у формулу 3 і 6.

Визначення кута пружинення  $\Delta\alpha$  проводимо по формулі:

$$\Delta\alpha = (180 - \alpha) \cdot \left( \frac{R_0}{R} - 1 \right) \quad (6)$$

Одержані експериментальним і розрахунковим шляхом дані заносимо в таблицю 1.

Таблиця 1 - Початкові і розрахункові дані по дослідженню пружинення ділянки згинання

Пуансон		Виріб		Експериментальні дані		Розрахункові дані	
Радіус закруглення R, мм	Кут між плоскими елементами, $\alpha$ , град	Радіус закруглення $R_0$ , мм	Кут між плоскими елементами, $\alpha_0$ , град	$\Delta$ , %	$\Delta\alpha$ , град	$\Delta$	$\Delta\alpha$ , град

Оцінити точність теоретичних формул для розрахунку  $\Delta$  і  $\Delta\alpha$ . Зробити висновок про вплив умов згинання на пружинення металу.

#### Контрольні запитання

1. Особливості та основні види холодного штампування.
2. Обладнання для холодного штампування.
3. Які ви знаєте основні види холодного об'ємного штампування?
4. Основні операції листового штампування.
5. Які основні елементи пробивних (вирубних) штампів?
6. Які ви знаєте основні види штампування витягуванням?
7. Характеристика особливих методів листового штампування (вибухом, електрогідравлічного, електромагнітного тощо).
8. Які технологічні чинники впливають на пружинення металу?
9. Як впливає відношення  $R/S$  на викривлення форми штаби на ділянці згинання?
10. Як впливає радіус інструменту  $r$  на величину пружинення?
11. Причини розбіжності розрахункових і експериментальних даних по пружиненню?
12. Як зменшити пружинення статевої штаби?

## Лабораторна робота №2

### ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНОГО ЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВИТЯЖКИ ДЛЯ СВИНЦЕВИХ ЗРАЗКІВ

Мета роботи: Визначення коефіцієнта листової витяжки для свинцевих зразків. Перевірка точності теоретичних формул для розрахунку.

Витягування являє собою процес перетворення плоскої заготовки в порожнинну деталь будь-якої форми (або подальша зміна її розмірів) і проводиться на витяжних штампах.

На рис. 4 наведена схема витягування циліндричної деталі із плоскої заготовки та послідовність переміщення металу в процесі витягування. Останнє характеризується зменшенням зовнішнього діаметра фланця й переміщенням елементів заготовки (1-5) по мірі збільшення глибини витягування.

При витягуванні кільцева частина заготовки ( $D - d$ ) перетворюється в циліндр діаметром  $d$  і висотою  $h$ . В зв'язку з тим, що обсяг металу при витягуванні не змінюється, то при повному витягуванні циліндра висота деталі  $h$  буде більшою за ширину кільцевої частини  $b$  і становить:

$$h = b \frac{D+d}{2d} = b \frac{K+1}{2} \quad (8.22)$$

де  $K = D/d$  - ступінь витягування. При  $K = 2$ ,  $h = 1,5b$ .

Отже, витягування відбувається за рахунок пластичної деформації яка, супроводжується зсувом значного обсягу металу у висоту. При великому ступені деформації, що відповідає глибокому витягуванню, і при незначній товщині матеріалу зміщений об'єм є причиною утворення гофрів (хвиль) на деформованій заготовці. При малому ступені деформації й при відносно більшій товщині матеріалу гофроутворення не відбувається, тому що в цьому випадку зміщений об'єм металу невеликий, а заготовка стійка.

Для запобігання утворення гофрів і складок при витягуванні застосовується притискування заготовки зі складкоутримувачем.

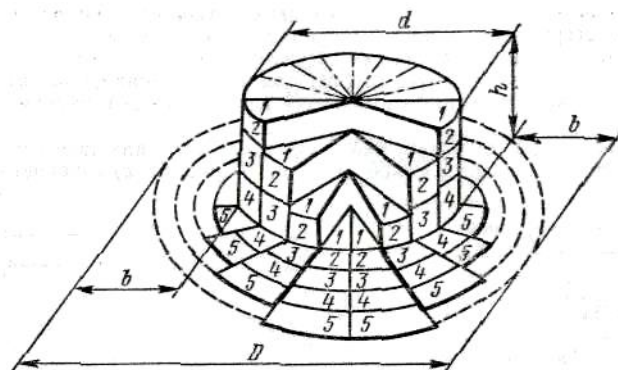


Рис. 4. Послідовність переміщення металу в процесі витягуванні

Витягуванням виготовляється велика кількість порожнинних деталей найрізноманітнішої форми, що відрізняються одна від одної як обрисом у плані, так і формою бічних стінок.

За геометричною формою всі порожнинні деталі можуть бути розділені на три групи:

- 1) вісесиметричної форми (тіла обертання);
- 2) коробчастої форми;
- 3) складної несиметричної форми.

Кожна із груп підрозділяється на кілька різновидів. Наприклад, тіла обертання за формою твірної можуть бути циліндричними, конічними, криволінійними, ступеневими, опукло-вгнутими. Побудова технологічного процесу й технологічні розрахунки для них різні.

Встановлено, що процес глибокого витягування із притискуванням починається не із пластичної деформації фланця заготовки, а з передуючої їй початкової стадії процесу, який полягає в місцевій пластичній деформації кільцевої не затиснутої частини заготовки.

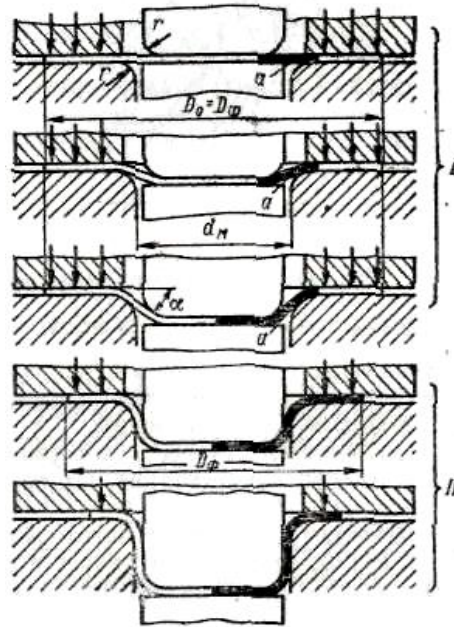


Рис. 5. Послідовність процесу глибокого витягування з притиском заготовлі

На рис. 5 наведена послідовність процесу глибокого витягування із притискуванням заготовлі; на верхніх схемах *I* показана початкова стадія процесу витягування, яка складається з локальної пластичної деформації вільної кільцевої ділянки *a* при затиснутому фланці, що зберігає свої початкові розміри  $D_{\phi} = D_0$ . Ця стадія витягування здійснюється за рахунок розтягання і потоншення кільцевої ділянки, причому найбільше потоншення виникає на границі цієї ділянки з плоским дном.

По мірі занурення пуансона тягнуче зусилля зростає, а розтягання й потоншення вільної ділянки заготовлі збільшується. До кінця цієї стадії відбувається пластична деформація донної частини заготовлі. Після досягнення рівноваги між тягнучим зусиллям і опором фланця деформуванню починається друга стадія процесу витягування, що полягає в пластичній деформації фланця й витягуванні його в матрицю (див. схеми *II* на рис. 5). Таким чином, процес глибокого витягування із притиском складається із двох технологічно різних стадій: початкової й завершальної. При витягуванні більшим притиском з малим ступенем деформації початкова стадія практично відсутня.

Операція витяжки є однією з найпоширеніших операцій листового

штампування. Витяжка застосовується для одержання порожніх виробів із плоскої заготовки.

Процес витяжки, як правило, лімітується умовами стійкості тангенціального деформування фланця (умовами складкоутворення) і умовами міцності стінки стакану.

Застосування фланцевих притисків практично виключає утворення складок на фланці й тоді основною умовою нормального протікання процесу витяжки є умова міцності стінки стакану.

Максимальні напруги, що розтягують,  $\sigma_\rho$  виникають у місці переходу з округлення матриці на циліндричну ділянку (рис. 6).

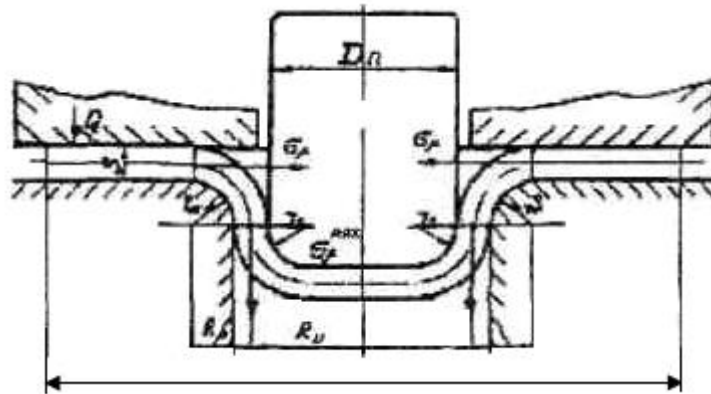


Рис. 6 Схема осередку деформації при листовому штампуванні:

$S$  - товщина заготовки;

$r_m$  - радіус матриці;

$r_n$  - радіус пуансона;

$\sigma_\rho$  - меридіальна напруга.

З курсу "Теорія процесів кування й штампування" відомо, що  $\sigma_\rho^{\max}$  можна визначити по формулі

$$\sigma_\rho^{\max} = \left( \sigma_t l_n \frac{R_H}{R_u} + \frac{\mu Q}{\pi R_H S} + \frac{\sigma_{tS}}{2R_\rho} \right) (1 + 1.6\mu). \quad (7)$$



Оскільки стінка стакану перебуває в одноосьовому напруженому стані, то умовою втрати стійкості в стінці склянки буде умова переходу її в пластичному стані, тобто

$$\sigma_{\rho}^{\max} = \sigma_t \quad (8)$$

Тоді умову стійкого плинного процесу витяжки запишемо у вигляді (див. рис. 15)

$$\sigma_t = \left( \sigma_m l_n \frac{R_H}{R_u} + \frac{\mu Q}{\pi R_H S} + \frac{\sigma_m}{2} \frac{S}{R_{\rho}} \right) \quad (9)$$

З рівняння (9) для відношення, що являє собою коефіцієнт витяжки  $K_{en}$ , можна записати

$$\frac{R_H}{R_u} = K_{en} = \exp \left( \frac{1}{1+1.6\mu} - \frac{\mu Q}{\pi R_H S \sigma_m} - \frac{S}{2R_{\rho}} \right). \quad (10)$$

Якщо вираз в дужках дорівнює одиниці, то коефіцієнт витяжки складе приблизно 2,72. Його максимально можливий коефіцієнт, тому що він досягається лише у випадку  $\mu = 0$  і  $S = 0$ .

Велике значення при веденні процесу витяжки має коефіцієнт тертя між металом і інструментом, а також величина зусилля притиску. З формули (10) бачимо, що зменшення тертя дозволяє досягати більше значних величин  $K_{en}$ . Зусилля притиску зменшує коефіцієнт витяжки, однак у цілому ряді випадків, щоб уникнути утворення поздовжніх гофрів на фланці, які виникають від дії тангенціальних напруг, застосування притисків зовсім необхідно.

Порядок проведення роботи.

Роботу проводимо на універсальній випробувальній машині зусиллям 50тс.

1. Установлюємо штамп (пуансон, матрицю й притиск).
2. Установлюємо заготівлі з листового свинцю (діаметр заготівель - 30, 35, 40, 50,60, 70 мм) і робимо витяжку (для заготівель товщиною 2 мм - пуансон діаметром 25,5 мм, для 4 мм - 21,5 мм). Визначаємо орієнтовне значення  $K_{en}$  по формулі

$$K_{en} = \frac{0.85R_3}{R_u},$$

де 0,85 - коефіцієнт, що враховує зміну радіуса заготівлі в момент, коли розтягуючі напруги досягають максимуму,

$R_3$  - радіус заготівлі;

$$R_u = D + S$$

$D$  - діаметр пуансона;

$S$  - товщина матеріалу.

Отримані експериментальні значення параметрів процесу витяжки заносимо в табл.2

Розраховуємо теоретичне значення коефіцієнта витяжки, приймаючи, що  $\mu = 0,2$ ;  $Q = 4$  кгс;  $r = 8$  мм;  $\tau = 2,5$  кгс/мм<sup>2</sup>.

Оцінюємо точність теоретичної формули для розрахунку коефіцієнта витяжки при листовому штампуванні.

Таблиця 2 - Результати дослідження витяжки

№	Наявність розривів після витяжки	Товщина заготівлі S, мм	Зовнішній радіус заготівлі $R_3$ ,	Експ. значення $K_{ВП}$	Розрахункові значення $K_{ВП}$	Похибка, %
1						
2						
3						
4						

## Контрольні питання

1. Що є процесом витягування?
2. За рахунок яких чинників відбувається процес витягування?
3. На які групи поділяють порожнинні деталі виготовлені за допомогою витягування?
4. На скільки стадій поділяють процес витягування?
5. Опишіть початкову стадію витягування.
6. Опишіть завершальну стадію витягування.
7. Який технологічний фактор впливає на зусилля витягування?

## Лабораторна робота №3

### ВАЛКИ І ВАЛКОВА АРМАТУРА

Мета роботи: Визначення прогину валка.

#### 1. Нерівномірність деформації смуги.

Листова продукція використовується для виготовлення літаків, ракет, суден, автомобілів, сільгоспмашин, електротехнічних виробів, труб різних ємностей, побутової техніки. В прокатному сортаменті листова продукція в розвинених країнах становить 65-67%.

Потреба машин у листовому металі становить 70-90% і це обумовлює необхідність отримання економічною продукції, що забезпечує зниження маси машин, а, отже, і зниження енерговитрат. Економічною продукцією можна вважати листи (смуги) з товщиною, що знаходиться в межах від мінусового допуску до номінального розміру, що мають мінімальні (допустимі) поперечну та поздовжню різнотовщинність, мінімальну не площинність, а краще її відсутність.

Листова продукція включає в себе листи і смуги. Листи мають товщину  $h = 4-60$  мм і довжину 7 до 60 м і прокочують їх у гарячому стані на двох-трьох клітьових станах з реверсивними клітьями. Смуги прокочують в гарячому ( $h = 1,2-8$  мм) і холодному ( $h = 0,4-2$  мм) станах на безперервних і реверсивних (одно клітьових) станах. Довжина смуг складає 200 м і більше і тому після виходу смуги з останньої кліті її змотують на моталках в рулон.

Якість листової (смугової) продукції оцінюють відповідно необхідним: хімічного складу, мікроструктури, показників механічних властивостей (межі міцності і текучості, відносне подовження, твердість), різнотовщинності і неплщинності.

Поперечна різнотовщинність листів (смуг) є геометричним параметром і визначається з виразу (рис. 4)

$$\delta_{II} = h_c - h_k,$$

де  $h_c$ , і  $h_k$  - товщина листа відповідно в середині і на кромці (на відстані ~ 40 мм від краю).

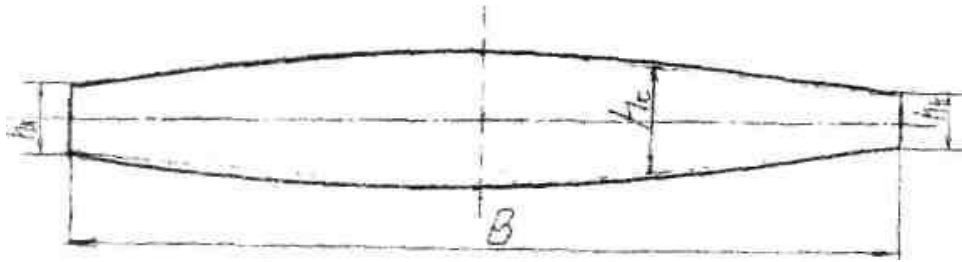


Рис. 4 Поперечний переріз прокатаного листа.

На рис. 4 показано поперечний переріз листа шириною  $B$  з симетричною різнотовщиною)  $\delta_{II}$ . Проте цей випадок відноситься до окремого. У більшості випадків має місце несиметрична поперечна різнотовщинність, коли товщина лівої і правої крайок різна. Іноді товщина однієї з кромек смуги при гарячій прокатці перевищує навіть товщину  $h_c$  в середині ширини, утворюючи, так звану, клиновидність поперечного перерізу. Такий профіль поперечного перерізу смуги є найбільш несприятливим для отримання в подальшому холоднокатаної смуги.

За даними практики оптимальним розміром поперечної різнотовщинності гарячекатаної смуги є  $\delta_{III} = 0,03-0,05$  мм. Для холоднокатаної смуги оптимальною є поперечна різнотовщинність, рівна  $\delta_{III} = \delta_{III} \cdot h_x/h_g$  (де  $h_g$  і  $h_x$  - товщина відповідно гарячекатаної і холоднокатаної смуг). Прокатка листів (смуг) з деякою поперечною різнотовщинністю обумовлена необхідністю самоцентрування смуги щодо осі кліти і запобігання зсуву її на станину з отриманням недокату, («гармошки») і аварійної ситуації на стані.

Об'єктивно кажучи, можна прокатувати листи (смуги) без поперечної різнотовщинності, але цього ніколи ніхто не допускає.

Вихідна поперечна різнотовщинність гарячекатаної смуги обумовлена наявністю декількох постійно діючих факторів:

1. Різної температурою по ширині смуги – кромки мають меншу

температуру. Останнє сприяє меншим нормальним контактним напруженням в середині ширини смуги і більшого обтиснення металу.

2. Різницею температури металу на лівій (завалочній) і правій (приводній) крайках смуги перед чистовою групою клітей, що зумовлює різну товщину крайок - меншу на більш нагрітій кромці.

3. Наявністю прогину робочих і опорних валків, величина якого визначається силовими, геометричними параметрами валків і смуги, системою профілюванням валків. Фактори, що збільшують прогин валків призводять до збільшення поперечної різнотовщинності смуг.

4. При прокатці кінцевих ділянок смуг (переднього і заднього) без натягу збільшується сила прокатки, прогин валків і поперечна різнотовщинність смуг.

5. Нераціональним профілюванням валкового комплекту без урахування ширини смуги - призводить до нерівномірного розподілу міжвалкового тисків і тисків під смугою (рис. 5), Що викликає нерівномірний знос валків і нерівномірні обтиснення, і товщини) смуги по ширині.

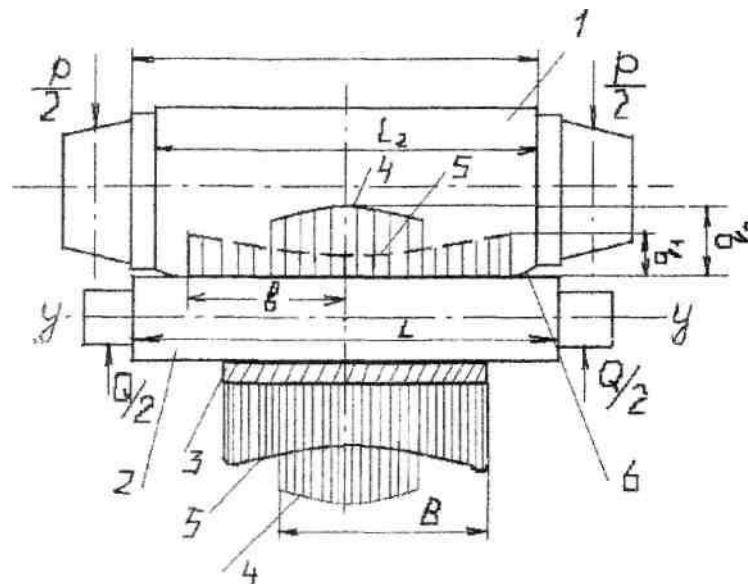


Рис. 5. Нерівномірний розподіл тиску  $q(y)$  між новими циліндричними опорним і робочим валками і смугою  $p(y)$ : 1 - опорний валок; 2 - робочий валок; 3 - смуга; 4 - епюри  $q(y)$  і  $p(y)$  при прокатці вузьких смуг; 5 – теж при прокатці широких смуг; 6 - кінцеві скоси;  $Q$  - зусилля противигину робочих валків.

З рис. 5 випливає, що при прокатці смуг в чотиривалкових клітях (на мал.

5 верхня частина комплекту валків) характер розподілу тиску під смугою  $p(y)$  нерівномірний. При прокатці вузьких смуг ( $B/L = 0.5-0.6$ ) (епюри 4) максимальний тиск  $p_0$  розташований в середині ширини смуги. На крайках контакту смуги з валком тиск  $p_1$  мінімальний, що обумовлено наявністю деякої поперечної течії металу і зниження поздовжніх підпираючих напруг  $\delta_3$ . Аналогічний і характер між валкового тисків  $q(y)$  з максимумом у середині ширини смуги. Такий розподіл тисків  $q(y)$  і  $p(y)$  призводить до збільшення нерівномірності зносу робочих і опорних валків і збільшенню поперечної різнотовщинності смуг.

Для компенсації прогину валків і зменшення поперечної різнотовщинності застосовують збільшену опуклість твірної робочих валків або впливають на шийки робочих валків зусиллям противигину  $Q$ , згинаючи робочий валок в протилежному напрямку щодо вигину від зусилля прокатки  $P = \sum p(y)$ .

При прокатці широких смуг ( $B/L = 0,75-0,85$ ) характер розподілу  $p(y)$  і  $q(y)$  змінюється на протилежний. У цьому випадку максимальні значення тисків  $p(y)$  і  $q(y)$  виникають на крайових ділянках контакту ( $p_1$  і  $q_1$ ). Максимальні значення  $p_1$  зумовлені підвищенням жорсткості валкового комплекту на крайових ділянках і збільшенням обтиснення крайок смуги щодо обтиснення в середній частині ширини. Вирівнювання епюр  $p(y)$  і  $q(y)$  відбувається шляхом застосування кінцевих скосів на опорних валках, що зменшує жорсткість валкового комплекту на крайових ділянках, зменшує величини прогинів робочих валків, нерівномірність зносу валків, поперечну різнотовщинність.

Таким чином, прогин валкового комплекту є одним з факторів, що утворюють поперечну різнотовщинність смуг.

## 2. Експериментальні дослідження

Для вимірювання прогину валка використовують установку, представлену на рис. 6. Ця установка має валок 2, що спирається шийками 3 на підшипники 4, які в свою чергу встановлені на плити 6 рухомі траверси преса типу УПГ - 20 / 2. Валок через смугу 1 навантажують зусиллям  $P=10-50$  кН, а

прогин валка вимірюють індикатором 5 з використанням стрижня-подовжувача 7.

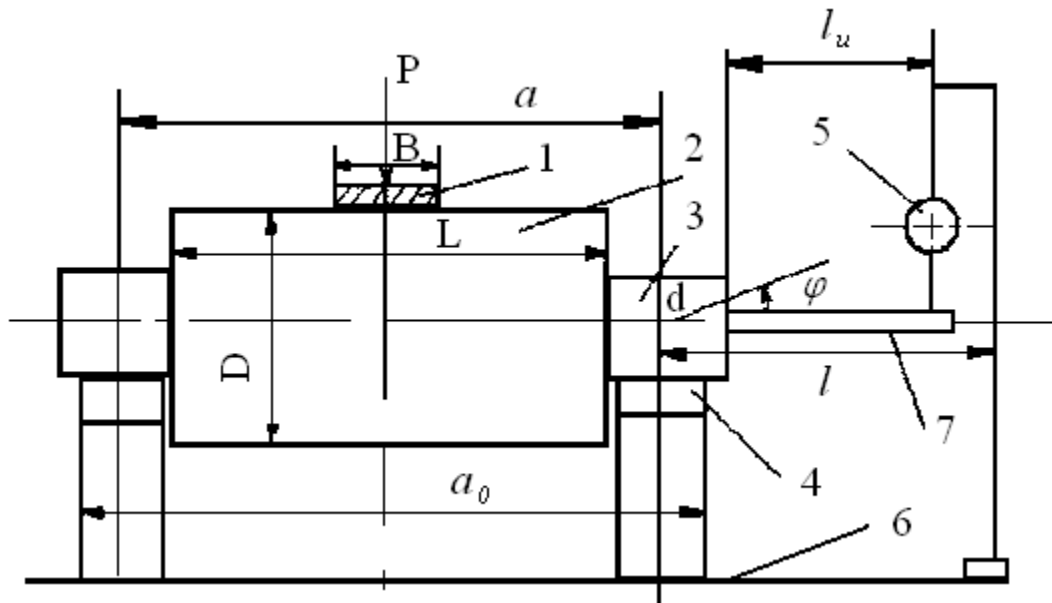


Рис. 6. Установка для визначення прогину валка: 1 - смуга; 2 - опора валок; 3 - шийка валка; 4 - опора; 5 - індикатор; 6 - опорна плита.

Установка має наступні параметри (мм):

Діаметри: валка -  $D=100$ ;

шийки -  $d=30$ ;

валка -  $L = 100$ ;

Довжина: шийки -  $l_m = 27$ ;

стрижня -  $l_u = 200$ ;

Ширина смуги  $B - 61.3$

Відстані:  $a = 127$ ;  $a_0 = 154$ .

Навантаження:  $P = 10-50$  кН.

Прогин краю бочки валка щодо точки «С» визначимо з виразу

$$y_1 = y \cdot l_u / 2l, \quad (11)$$

де  $y$  - відхилення кінця стрижня, що вимірюється індикатором;  $l_u$  - довжина шийки;  $l$  - довжина, що визначається за виразом



$$l = l_u + 0.5l_{uu}, \quad (12)$$

де  $l_u$  - довжина стрижня вимірювача до осі індикатора.

Прогин валка щодо точки «С» при вигині його по параболічній кривій дорівнює:

$$W_c = y_1 (a/l_{ш})^2 \quad (13)$$

Прогин валка щодо краю бочки;

$$W_{\delta} = W_c (L/a)^2 \quad (14)$$

Як приклад визначимо прогин валка  $W_{\delta}$  при  $P = 50$  кН,  $a_0 = 154$  мм,  $a = 127$  мм,  $l_{ш} = 27$  мм,  $L = 100$  мм,  $l_u = 200$  мм,  $y = 0,035$  мм [5] [вирази (1) - (4)]:

$$y_1 = 0,035 \cdot (13,5 / 213,5) = 0,00022 \text{ мм};$$

$$W_c = 0,00022 \cdot (127/27)^2 = 0,0048 \text{ мм};$$

$$W_{\delta} = 0,0048 \cdot (100/127)^2 = 0,003 \text{ мм}.$$

Отримані на установці з рис 6 отримані величини «у» використовують при розрахунку прогину валка для різних  $P = 10-50$  кН, за формулами (11) - (14) і будують залежність  $W_{\delta} = \Phi(P)$ .

Паралельно необхідно розрахувати теоретично величину прогину  $W_{\delta}$  за наступним виразом [6,8]:

$$W_{\delta} = \frac{P \cdot L^3}{29.5 \cdot E \cdot I} \left[ 1 + 1.45 \frac{E \cdot I}{G \cdot R^2 \cdot L^2} - 0.92 \left( \frac{a}{L} - 1 \right) \right], \quad (15)$$

де  $E$  - модуль пружності;  $I$  - момент інерції перерізу валка;  $G$  - модуль зсуву;  $R$  - радіус валка:

$$E = 2,2 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2; G = 8,2 \cdot 10^4 \text{ Н/мм}^2;$$

$$I = \pi \cdot D^4 / 64$$

(D - діаметр валка).

Для нашого випадку з формули (15) маємо:

$$W_{\delta} = \frac{5 \cdot 10^4 \cdot 100^3}{29.5 \cdot 2.2 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 10^6} \left[ 1 + 1.45 \frac{1.45 \cdot 5.4 \cdot 10^6}{2.5 \cdot 10^3 \cdot 10^4} - 0.92 \cdot 0.27 \right] \approx 0.0042 \text{ мм},$$

що досить близько до дослідного значення.

Теоретичну залежність  $W_{\delta} = \Phi(P)$  також слід нанести на малюнок. Дані експериментів та розрахунків внести в таблицю 3.

Таблиця 3 - Досліджені та розрахункові дані прогину валка

P, кН	y, мм	$W_c$ , мм	$W_{\delta}$ , мм

#### Контрольні питання

1. Чим відрізняється смуга від листа?
2. Причини появи поперечної різнотовщинності смуг (листів).
3. Чим викликається нерівномірність деформації смуг (листів)?
4. Види нерівномірності тиску між валками і смугою?
5. Яким чином впливають різні фактори на прогин валка? [Аналіз формули (15)].
6. Чим обумовлено збільшення прогину валка з збільшенням зусилля?

## Лабораторна робота №4

### ВИЗНАЧЕННЯ МІЖВАЛКОВОГО ТИСКУ

Мета роботи: Експериментальне визначення між валкового тиску.

#### 1. Теоретичні положення

Смуговий і листовий метал прокатується в основному в чотиривалкових клітках (клітках кварто). У ряді випадків використовують шести - і двадцятивалкові клітки. Незалежно від загальної кількості валків смуга обробляється в двох робочих валках, а решта валки є опорними. Робочі валки безпосередньо визначають умови деформації металу та з метою зниження навантаження на клітку їх діаметр прагнуть зробити мінімального допустимого діаметру. Мінімальний діаметр робочих валків обумовлений величинами контактних напруг [6] та інтенсивністю їх зносу. Періодичність перевалки по зносу повинна бути в межах не більше однієї перевалки протягом однієї зміни.

Перевагою застосування робочих валків невеликого діаметру є зниження нормальних контактних напруг і зусилля, що діє на робочу клітку. Зниження нормальних напружень обумовлено зменшенням впливу поздовжніх підпирають напруг  $\sigma_3$  за рахунок зменшення довжини дуги контакту і, отже, контактних дотичних сил тертя. Зменшення зусилля прокатки обумовлено зниженням середніх нормальних контактних напруг і довжини дуги контакту. Крім того, застосування робочих валків невеликого діаметру забезпечує порівняно невеликі величини крутного моменту та потужності власне прокатки. Опорні валки завжди мають діаметр в 2-3 рази більше діаметра робочих валків, вони запобігають прогин робочих валків, і знижують поперечну різнотовщинність смуги.

Під час прокатки смуг на між валкового контакті виникають між валкового тиску  $q(y)$  (рис. 5). Форма епюри між валкових тисків залежить від величини і характеру профілюванням робочих і опорних валків і ширини прокатуваної смуги [10]. При опуклому профілі бочок валків і вузькій смугі максимум  $q(y)$  знаходиться в середній частині довжини бочок (рис. 5, епюри 4).

Характер розподілу тисків  $q(y)$  зумовлює величину прогину робочого валка і інтенсивність зносу валків. Епюри 4 (рис. 5) сприяє збільшенню прогину робочого валка і зносу валків в середній частині довжини бочки. Нерівномірність розподілу  $q(y)$  характеризується коефіцієнтом

$$n_q = q_1 / q_0 \quad (16)$$

де  $q_1$  і  $q_0$  - міжвалкового тиску відповідно на краю бочок валків і в середині.

При прокатці вузьких смуг  $n_q < 1$ , а при прокатці широкої смуги

$n_q \geq 1$ . Теоретичним шляхом розподіл міжвалкового тиску може бути розраховане з виразу [10]

$$q(y) = \frac{P(1+m)}{2b(m+n)} \left[ 1 + (n-1) \frac{y^m}{b^m} \right], \quad (17)$$

де  $m$  - показник ступеня параболічного профілю утворюють бочок валків;  $y$  - поточна координата по довжині опорного валка (відстань від осі валка до кінцевої точки контакту валків);  $b$  - довжина між валкового контакту (рис. 5).

Показник ступеня  $m$  дорівнює:

$$m = (m_p \cdot m_{оп}) / 2 \quad (18)$$

де  $m_p$  і  $m_{оп}$  - показники ступеня утворюють відповідно робочого і опорного валків.

Чим більше показник  $m$ , тим менше значення  $n_q$  і більше прогин робочого валка. Зі сказаного випливає, що в практичних умовах слід вибирати такі профілюванням валків, в тому числі і кінцеві скоси опорних валків, які б забезпечували рівномірний розподіл  $q(y)$  і значення  $n_q \approx 1$ . Підхід до визначення раціонального профілювання валків розглянуто в роботах [7,8,10].

## 2. Експериментальне визначення між валкового тиску

Дослідження впливу параметрів деформації на міжвалкового тиску виконували на моделі чотиривалкової кліти (рис. 7) з діаметрами робочого валка  $D_p = 32$  мм і опорного  $D_{оп} = 80$  мм, довжина бочки  $L_1=100$ мм.

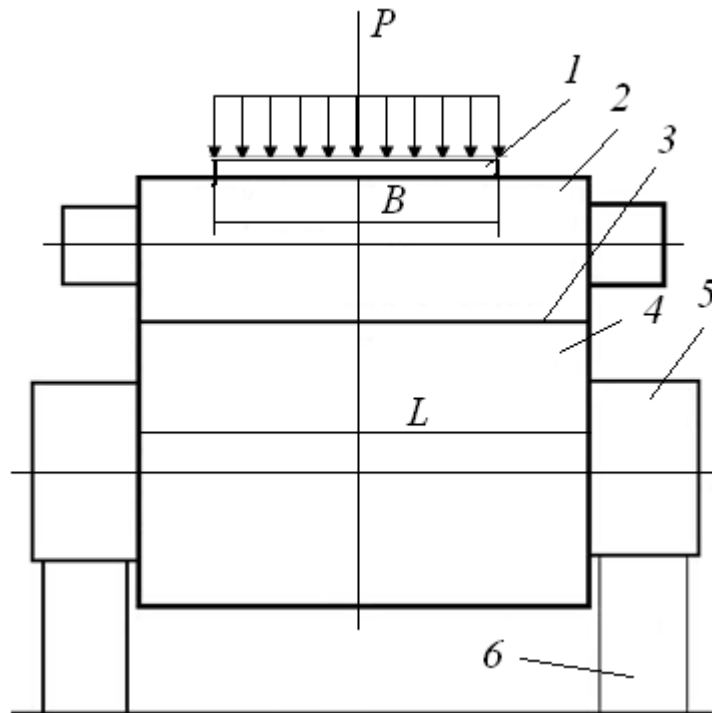


Рис. 7. Схема установки для дослідження між валкового тиску: 1 - смуга; 2 - робочий валок; 3 - копіювальний папір; 4 - опорний валок; 5 - шийка опорного валка; 6 - опора; 7-опорна плита.

Валки виготовлені з сталі марки 9Х з поверхневим загартуванням. Робочий валок має опуклість  $f_p = 0,1$  мм, а опорний валок - циліндричний. Для фіксування між валкового майданчики контакту між валками мають у своєму розпорядженні тонку копіювальний папір, на якій виходять досить чіткі відбитки при навантаженні валків зусиллям  $P$  через алюмінієву пластину, шириною  $B = 60-80$  мм. Після навантаження валків зусиллям  $P = \text{const}$  ( $P=30-50$  кН) витягують копіювальний папір і на інструментальному мікроскопі вимірюють у поперечних перерізах майданчика параметр  $a_i$  через кожні 5-7 мм її довжини. Потім визначають середню ширину «а» майданчика (мм)

$$a = \frac{\sum^i a_i}{i}, \quad (19)$$

де  $i$  - кількість замірів  $a_i$ .

Середнє між валкового тиску розраховуємо з виразу

$$q = P/2bk \text{ Н/см} \quad (20)$$

а максимальний тиск  $q_0$  з виразу

$$q_0 = q \cdot a_0/a \quad (21)$$

Величини  $q(y) = q_i$ , в кожному перетину майданчики розраховують таким чином

$$q_i = q \cdot a_i/a \quad (22)$$

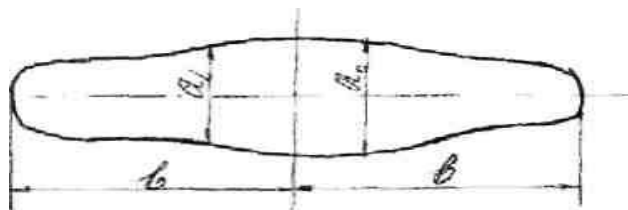


Рис. 8. Схема контактної площадки, виконаної після вимірювання на інструментальному мікроскопі.

Всі виміряні і розрахункові параметри вносять в табл. 4 і по них виробляють побудова епюри тисків  $q_i = \Phi(2b)$  (рис. 8) [10].

Таблиця 4 - Виміряні і розрахункові параметри для ширини смуги ( $B=60$  мм;  $B=90$  мм;  $a=...$  мм;  $q=...$  кН/см<sup>2</sup>;  $n_q=...$ )

№ заміру	B=60 мм		B=70 мм		B=80мм	
	a, мм	q <sub>i</sub> , кН/см	a <sub>i</sub> , мм	q <sub>i</sub> , кН/см	a <sub>i</sub> , мм	q <sub>i</sub> , кН/см
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						

### Контрольні питання

1. Що таке міжклітинний тиск?
2. Які фактори впливають на характер розподілу  $q(y)$ ?
3. Чим характеризується нерівномірність розподілу  $q(y)$ ? Поясніть причини.
4. Виконати аналіз формули (17).
5. Якими умовами визначаються діаметри робочого і опорного валків?
6. Як і чому нерівномірність розподілу  $q(y)$  впливає на поперечну різнотовщинність смуг?

## Лабораторна робота №5

### ЗНАХОДЖЕННЯ СПЛЮЩЕНОЇ ДОВЖИНИ ДУГИ КОНТАКТА ПРИ ХОЛОДНІЙ ПРОКАТЦІ

Мета роботи: Експериментальне знаходження довжини дуги контакту

#### 1 Загальні положення

При прокатці смуг відбувається пружна і пластична деформація металу. Пружна деформація (поворотна) завжди передує пластичної (залишковій) деформації, але при гарячій прокатці пружна деформація смуги практично відсутня. Пластична деформація металу починається за умови, коли внутрішні напруги, що виникають у перерізі смуги досягнуть напруги плинності (межі пружності) металу. Внутрішні напруги (без урахування сил тертя) при осаді зразка рівні:

$$\sigma_1 = P / F , \quad (23)$$

де  $P$  - зусилля деформації;  $F$  - площа контакту (площа перерізу зразка).

Таким чином, пластична деформація виникне при нарузі  $\sigma_1$  яке дещо перевищить межу пружності і досягне напруги плинності металу, тобто

$$\sigma_1 = \sigma_T , \quad (24)$$

де  $\sigma_T$  - напруга плинності металу.

Умова (24) дійсна як і для металу прокатуваної смуги, так і самих валків.

Напруга текучості - нормований параметр для кожної конкретної марки сталі (чи іншого металу) [1] і залежить від температури, ступеня і швидкості деформації металу.

Оскільки смуга та валки знаходяться в контактi, то необхідно забезпечити умови деформації, при яких відбувається пластична деформація тільки смуги,



але не валків, Для виконання цієї умови матеріал валків завжди має великі величини напружень текучості, міцності і твердості. Так, наприклад, при гарячій прокатці (температура  $t = 800-1200^{\circ} \text{C}$ ) метал смуги (сталь) має напругу текучості в межах  $\sigma_T = 60-150 \text{ Н/мм}^2$ , напруга плинності металу валків зі сталі марки 50ХН холодної  $\sigma_T = 450 \text{ Н/мм}^2$ , а межа міцності  $\sigma_B \approx 600 - 700 \text{ Н/мм}^2$ . При холодній прокатці смуг з низько вуглецевої сталі відмінні між напругами плинності смуги і валків мають менше розходження, але істотно розрізняються величини твердості металу (НВ/НСД): смуга - (190-230)/(29-35); робочий валок - (650-680)/(93-97), де НВ і НСД - відповідно твердості по Бринелю і Шору.

Високу твердість поверхневого шару валків отримують шляхом загартування, що одночасно забезпечує і підвищення міцності поверхневого шару валків. У зв'язку з цим робочі валки витримують контактні тиски, що значно перевищують напруги плинності металу.

Так, за даними А. В. Третьякова та ін [6], при твердості валка 85НСД допустимі контактні напруги складають  $p_{\text{доп}} = 2400 \text{ Н/мм}^2$  (напруги плинності низько вуглецевої сталі після зміцнення з сумарним обтисненням  $E_{\Sigma} = 60-70\%$  складають  $\sigma_T = 600-750 \text{ Н/мм}^2$ ). У зв'язку з вказаному при нормальному процесі прокатки валки зазнають тільки пружну деформацію. У разі аварійних ситуацій (накладення смуг, порив смуги, перевищення допустимих обтиснення) контактні тиску між смугою і валками можуть перевищити допустимі ( $p_{\text{ср}} > p_{\text{доп}}$ ) і відбудеться місцева пластична деформація робочих валків (Надав, навар смуги), що призводить до зупинки стану, та й заміні валків.

Пружна деформація бочок валків має місце у всіх випадках прокатки смуг і вона надає відповідний вплив на геометричні параметри вогнища деформації і, отже, на кінематичні та силові параметри прокатки. Проте помітний вплив на вказані параметри пружне сплюскування валків надає при нормальних контактних тисках  $p_{\text{ср}} \geq 300 \text{ Н/мм}^2$  (прокатка в останніх 3-4х - клітях чистової групи безперервного смугового стану гарячої прокатки і у всіх випадках холодної прокатки смуг).

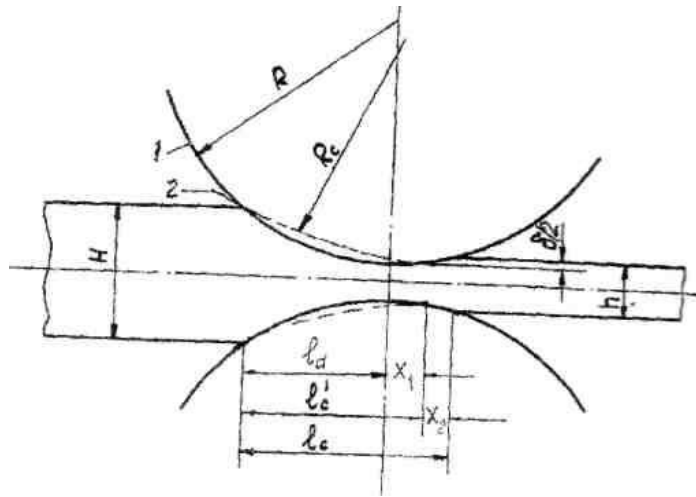


Рис. 9. Схема осередку деформації при холодній прокатці: 1-контур жорсткого валка; 2 - контур пружно деформованого валка

У результаті пружного деформування валка у вогнищі деформації відбуваються такі зміни (рис. 9):

- Збільшується радіус валка з  $R$  до  $R_c$ ;
- Збільшується довжина дуги контакту на величину  $x_1$  (з  $l_d$  до  $l_c'$ );
- Зменшується величина обтиснення.

При холодній прокатці в осередку деформації відбувається пружна деформація самої смуги, а на виході з осередку деформації з довжиною  $l_c'$  висотні розміри смуги відновлюються на величину  $\delta$  за рахунок чого загальна довжина вогнища зростає на величину  $x_2$ .

На рис 9 маємо:  $H$  і  $h$ -товщина вихідна і кінцева;  $\delta$  - величина пружної деформації смуги;  $R$  і  $R_c$  - радіуси відповідно жорсткого і пружно деформованого валка;  $l_d$  - довжина дуги контакту на жорсткому валки;  $x_1$  і  $x_2$  - збільшення довжини дуги відповідно за рахунок пружних деформацій валка і смуги;  $l_c'$  - довжина дуги контакту з урахуванням сплюснення валка;  $l_c$  - повна довжина дуги контакту з урахуванням пружних деформацій валка і смуги.

Для теоретичного розрахунку параметрів  $l_d$ ,  $l_c'$  та  $l_c$  використовують відомі формули [1] (без урахування натягу):

$$l_d = \sqrt{R \cdot \Delta h} \quad (25)$$

$$l_c' = \frac{c + \sqrt{c^2 + 4R \cdot \Delta h (1 - c \cdot f_{II} / 2h_{cp})}}{2(1 - c \cdot f_{II} / 2h_{cp})}; \quad (26)$$

$$c = \sigma_\phi \cdot R / 47500; x_2 = \sigma_{\phi i} R / 95000; \quad (27)$$

$$l_c = l_c' + x_2; h_{cp} = \sqrt{H \cdot h}, \quad (28)$$

де  $\Delta h$  - фактичне абсолютна обтиснення;  $f_{II}$  - показник тертя [1];  $h_{cp}$  - середня товщина смуги;  $\sigma_\phi$  - середнє опір металу у вогнищі деформації:  $\sigma_{\phi 1}$  - опір металу деформації після прокатки:

$$\sigma_\phi = 1,15 \cdot \sigma_T; \sigma_{\phi 1} = 1,15 \cdot \sigma_{T1} \quad (29)$$

де  $\sigma_T$  і  $\sigma_{T1}$  - межа текучості металу середній у вогнищі деформації і після прокатки.

Формули (27) придатні при прокатці сталевий смуги в сталевих валках. Величини межі текучості  $\sigma_T$  і  $\sigma_{T1}$ ). При розрахунку сплющеної дуги при прокатці алюмінієвих смуг (алюміній марки А1) параметри  $\sigma_T$  і  $\sigma_{T1}$  і  $x_2$  визначають за наступними формулами (для алюмінію модуль пружності дорівнює  $E = 67500 \text{ Н/мм}^2$ ): межа текучості алюмінію за А. В. Третьякову (для А1):

$$\sigma_0 = 60 \text{ Н/мм}^2; \sigma_{T1} = 60 + 6,4 \cdot e^{0,62}; \quad (30)$$

$$\sigma_\phi = 1,15 [\sigma_{T0} + 0,67(\sigma_{T1} - \sigma_{T0})],$$

Де  $\sigma_{T0}$  - межа текучості до деформації:  $e$  - сумарне відносне обтиснення за  $n$  кількість проходів:

Параметр  $x_2$  дорівнює:

$$\sigma_\phi = 1,15 \cdot \sigma_T; x_2 = \sigma_{\phi 1} \cdot R / 29000. \quad (31)$$

Для міді марки М1-М4 маємо (модуль пружності  $E = 100000 \text{ Н/мм}^2$ ):

$$\sigma_0 = 81 \text{ Н/мм}^2; \sigma_{T1} = 81 + 6,3 \cdot e^{0,41}; \quad (32)$$

$$\sigma_\phi = 1,15\sigma_{T1}, x_2 = \sigma_{\phi1} \cdot R / 48300. \quad (33)$$

## 2. Експериментальне визначення довжини дуги контакту

Існує кілька методів експериментального дослідження сплющеної довжини дуги контакту [1], Два з них можуть бути використані тільки в лабораторних умовах і вимагають застосування спеціальних датчиків, що вбудовуються у валки, та електронної апаратури [1, 9]. Ці датчики фіксують період проходження смуги довжини осередку деформації. Одночасно фіксується час  $t$  проходження смуги осередку деформації та швидкість валків  $v$  і за формулою розраховують довжину дуги контакту:

$$l_c = v \cdot t,$$

А. В. Третьяков [1] пропонує визначати довжину дуги контакту  $l_c$  по зусиллю прокатки:

$$l_c = \sqrt{R(\Delta h + P / 4.75B)}, \quad (34)$$

У цій формулі:  $P$  - у тоннах;  $B$ ,  $R$ ,  $\Delta h$  - у міліметрах. Проте для визначення довжини  $l_c$  та необхідне застосування месдоз і спеціальної апаратури для вимірювання зусилля прокатки.

Простий метод вимірювання сплющеної дуги контакту запропонований В. А. Ніколаєвим. Це метод не вимагає спеціальних вимірювальних пристроїв та апаратури. Метод заснований на одночасній прокатці в валках смуг з різними механічними властивостями. Причому одна смуга має більш високі величини напруги плинності (випробуваний матеріал) і дві смужки свідки зі значно

меншими величинами напруги текучості. Наприклад, якщо випробуваний матеріал із сталі, то свідками можуть бути смуги з свинцю або відпаленого алюмінію. При прокатці смуг з міді або алюмінію в якості свідків використовують смуги з свинцю (рис. 10).

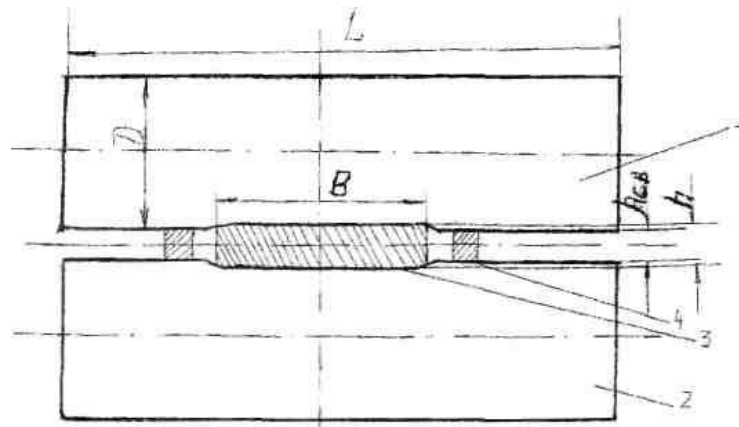


Рис. 10. Схемою до визначення сплющеної дуги контакту при холодній прокатці смуг: 1,2 - валки; 3 - сталева смуга; 4-свинцеві смужки («свідки»)

На рис. 10 представлена схема прокатки смуг з різного матеріалу. Наприклад, середня смуга зі сталі (міді, алюмінію), а дві вкрай смужки зі свинцю. На контакті сталевих смуги відбувається пружні деформації самої смуги і валків в результаті чого абсолютна обтиснення зменшується, а товщина смуги  $h$  збільшується порівняно з умовами прокатки в абсолютно жорстких валках. Для свинцевих смуг ( $\sigma_T = 10-15 \text{ Н/мм}^2$ ) сталеві валки є практично абсолютно жорсткими і пружні деформації валків практично відсутні. Що виходить товщина свинцевої смуги  $h_{CB}$  відповідає фактичному зазору між валками з дотриманням пружною віддачі смуги під дією зусилля прокатки. Зі сказаного, очевидно, що якщо б валки мали абсолютну жорсткість, то при прокатці сталевих смуги отримаємо  $h = h_{CB}$  і тоді  $l'_c = l_d$ .

У реальних умовах прокатки сплющену довжину дуги контакту слід розраховувати за формулою

$$l'_c = \sqrt{R \cdot (H - h_{CB})}; \quad (35)$$

$$l'_c = \sqrt{R_c \cdot (H - h)}. \quad (36)$$

У формулі (35) довжина дуги  $l'_c$  отримана в жорстких валку, а у вираженні (36) довжина дуги  $l'_c$  отримана для фактичного обтиснення сталевий смуги в упругодеформованих валках з радіусом  $R_c$ .

Вирішуючи спільно виразу (35) і 36) отримаємо

$$\frac{R_c}{R} = \frac{H - h_{CB}}{H - h} = \frac{\Delta h_{CB}}{\Delta h}. \quad (37)$$

Повну довжину дуги контакту розраховують за формулою (28)

З формули (34) отримаємо формулу для розрахунку зусилля прокатки

$$P = \frac{4.75B(l_c^2 - R\Delta h)}{R}, \quad (38)$$

де  $l_c$  - досвідчена величина сплющеної довжини дуги контакту.

Для проведення досліджень застосовують смуги товщиною  $H = 1-2$  мм, шириною  $B = 20-40$  мм, а звідки - шириною  $5-10$  мм (довжина смуг  $150-200$  мм). Смуги і свідки прокатують в валках діаметром  $D = 250$  (200) мм.

Усі виміри, дані заносять до таблиці.

#### Контрольні запитання

1. При яких контактних напруженнях проходить сплющення валків?
2. Составні сплющеної дуги контакта.
3. Опишіть механізм пружної та пластичної деформації.
4. Від яких параметрів залежить напруга текучесті металу?
5. При яких видах прокатки має місце пружна деформація прокатних валків?
6. Які процеси виникають у вогнищі деформації через пружну

деформацію валка?

7. Які марки сталі використовують для виготовлення прокатних валків?

## Лабораторна робота №6

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОФІЛЮ КАНАЛУ ВОЛОКИ КОНСТРУКЦІЇ ВОЛОЧІЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТА

Мета роботи: Експериментальне визначення контуру профілю волоки.

Основний інструмент при волочінні — це волоки різноманітної конструкції. При виробництві порожніх виробів зі стоншеною стінкою крім волок до волочильного інструмента відносяться оправлення (довгі і короткі).

Волока звичайно складається з двох деталей: обойми / і власне волоки 2 (рис.11). Така конструкція волоки обумовлений особливими умовами її роботи і властивостями матеріалу, з якого вона виготовлена.

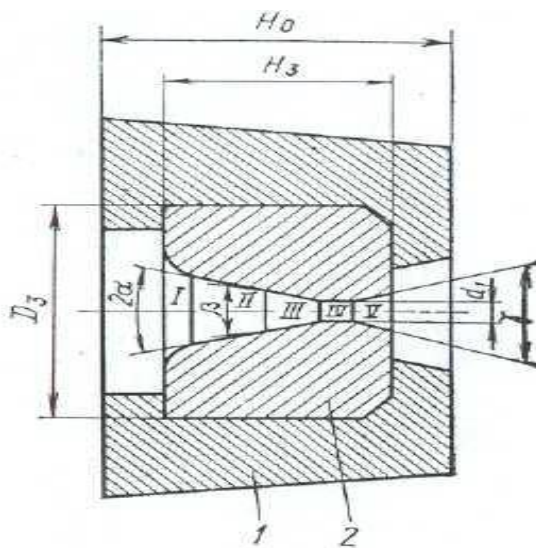


Рис. 11. Розріз волоки

Для збільшення стійкості волок проти стирання їх роблять із твердих сплавів металокерамічним способом (з карбідів вольфраму і титана, іноді ванадію, молібдену, танталу, бора й ін.). Застосовують також волоки з керамічних твердих сплавів — мікроліта, термкорунда, що відрізняються



високою зносостійкістю й у той же час їхня вартість у багато разів нижче звичайних волок з вольфрамових сплавів. При волочінні щонайтоншого сталевого дроту (менш 0,2 мм) для виготовлення волок застосовують технічні алмази. Усі ці матеріали поряд з високою твердістю і стійкістю проти стирання відрізняються низькою в'язкістю. Щоб уникнути руйнування такої волюки в процесі роботи, неї укладають з попереднім затягуванням (запресовуванням і ін.) в обойму з досить в'язанням і міцної сталі. При цьому помітно зменшуються напруги, що розтягують, у кільцевому напрямку волюки в момент волочіння або виключаються напругами стиску з боку обойми.

Поряд з такою конструкцією одинарною волюки в останні роки широке застосування одержують збірні волюки, що забезпечують волочіння в умовах гідродинамічного тертя. На рис. 12 показана збірна волюка з убудованою мильницею. Як змащення використовується мильний порошок іноді з добавкою порошкоподібної сірки (до 1/3 маси). Збірна волюка, поліпшуючи умови змащення, забезпечує підвищення продуктивності волочильних станів до 30%; знижує до 20% витрата енергії на волочіння і збільшує стійкість у 3...4 рази і більш.

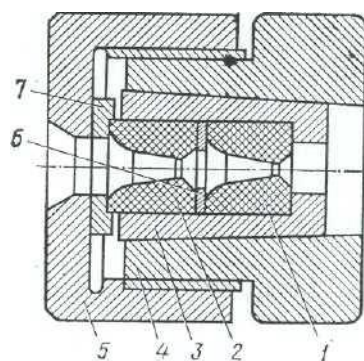


Рис. 12. Збірна волюка для волочіння дроту в режимі гідродинамічного тертя: 1 – робочий твердосплавний вкладиш; 2 – напірний вкладиш; 3 – затискна втулка; 4 – корпус; 5 – гайка; 6 – ущільнення; 7 – завзята шайба

При волочінні прутків і труб великих перетинів волюки виготовляють без обойми з інструментальної сталі (графітізована сталь, сталь У8, У12,

ШХ15, Х12М и ін.). Різні оправлення і стрижні, застосовувані при волочінні порожніх виробів, виготовляють з інструментальних сталей і твердих сплавів. Для збільшення стійкості сталевих оправлень їх звичайно хромують, а іноді цианують або цементують і завжди термічно обробляють для підвищення твердості.

Незалежно від конструкції волоки її окремі ділянки мають свою форму і найменування. Поздовжній розріз профілю найбільше часто застосовуваної конічної волоки (див. рис. 11) складається з наступних ділянок. Деформуюча або робоча зона III має конічну форму з кутом при вершині  $2\alpha$ . Перед робочою зоною знаходиться мастильна зона II, що заповнена технологічним змащенням. За деформуючою зоною розташований пасок, що калібрує, IV, що має циліндричну форму. Вихідна зона або распушка V виконується у формі конуса з кутом  $\beta$  або частіше сферичної форми.

Вважається, що найбільш оптимальним профілем деформуючої зони волочильного каналу є конус. Кут робочого конуса  $2\alpha$  приймається рівним  $8...24^\circ$ , причому він повинний бути тим менше, чим вище твердість і менше перетин металу, що протягається, а також чим менше значення витяжки і коефіцієнта контактного тертя.

Довжина робочого конуса приймається  $0,5...0,7$  від діаметра одержуваного виробу. Довжина паска, що калібрує,  $fr = (0,3...1) d$ . При волочінні сталевого дроту найбільшу експлуатаційну стійкість показали волоки з  $\beta=0,5$ .

Мастильна зона для полегшення надходження змащення в процесі волочіння виконується конічної форми з кутом  $\rho=40...60^\circ$ . При подовженій мастильній зоні, а отже, і зменшеному куті нахилу утворюючої завдяки зниженню інтенсивності відгону змащення гідродинамічний ефект змащення підвищується. Вихідна распушка збільшує твердість волоки і приймається сферичної або конічної форми. В останньому випадку кут  $\gamma=60...90^\circ$ , а її довжина береться не менш  $0,15$  від загальної висоти волоки

*H<sub>3</sub>*.

### 1. Конструкція волочильного інструменту

Процес волочіння металу застосовують для зменшення розмірів і отримання профілю потрібної форми з високою точністю (круглі, прямокутні, фасонні). Волочіння виконують на станах різної конструкції (стани одноразового і багаторазового волочіння) у холодком стані. У ряді випадків (при волочіння важко деформованих мало пластичних сталях) застосовують тепле волочіння при температурі 500 - 650°C. Перед волочінням гарячекатаний метал (наприклад, катанку з  $d_0 = 6.5$  мм) піддають операції видалення окалини шляхом травлення або механічного злому окалини, очищення поверхні дроту від шламу (залишків окалини), нанесення під мастильного шару (мед'ення, борирування, ізвестирування) і загострення переднього кінця заготовки для заправки, її в волокни.

Залежно від призначення протягуємо металу застосовують величини коефіцієнтів витяжок в межах  $\mu = 1.06 - 1.6$ . Невеликі витяжки застосовують при калібруванні металу ( $\mu = 1.06 - 1.2$ ). Волочіння завжди виконують при подачі у вогнище деформації технологічного змащення (рідкого, або сухий у вигляді порошку), наявність якої забезпечує допустимі величини напружений волочіння і зносостійкість волок.

Безпосередня пластична деформація металу здійснюється в Волока, які для волочіння невеликих діаметрів, виготовлені із сплавів типу ВК 6, ВК 8, штучних і природних алмазів. Волоки типу ВК 6 і ВК 8 виготовлені шляхом пресування суміші порошку карбиду вольфраму і кобальту (6 та 8% відповідно). Карбід вольфраму забезпечує твердість і зносостійкість інструменту, а кобальт пластифікуюча (зв'язує) добавка.

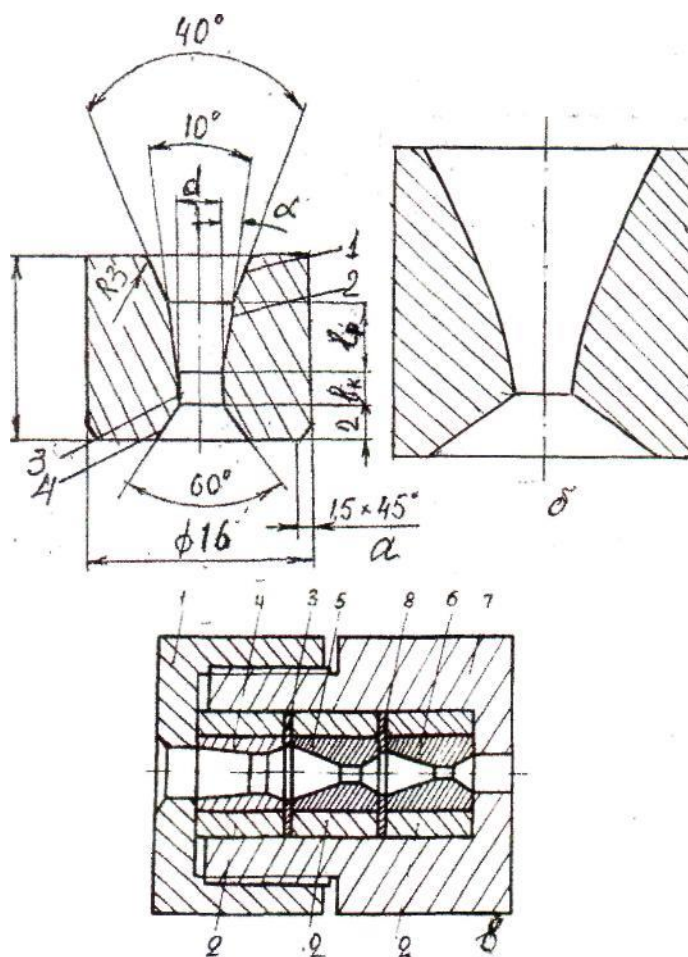


Рис. 13. Проектний профіль форми 9 волоки (а) (1 - мастильний конус; 2 - робочий конус; 3 - калібрувальний пояс; 4 - вихідна распушка); фактичний профіль волоки (б): збірна волока (1-кришка-гайка; 2 - обойма; 3,8 - шайби; 4 - напірна волока; 5, 6-робочі волоки; 7 - корпус).

Геометричні параметри волоки залежать від розмірів протягуємо дроту, а форма її показана на рис. 13 а, б. Вхідний конус 1 необхідний для нагнітання мастила в робочий конус 2. Довжина вхідного (мастильного) конуса становить  $l_{вх} = (1-1,5) d$ , а робочого  $l_r = (1,1-1,3)d$ . Калібрується зона  $l_k$  служить для додання заданих розмірів дроту і становить  $l_k = (0,2-0,8)d$ , шорсткість її поверхні дорівнює  $0,04 - 0,08 Ra$  ( $Ra$  - середня шорсткість поверхні). Важливою характеристикою волоки є кут робочого конуса, оптимальна величина якого залежно від діаметра готового дроту дорівнює  $2\alpha = 8 - 16$  град.

Відзначимо, що в практичних умовах робочий контур профілю волоки помітно відрізняється від теоретичного (рис. 13, б), має форму параболи за

відсутності явного калібруючого паска з незмінним діаметром на довжині  $l_k$ , Показник ступеня «n» параболи залежить від точності виготовлення волоки і ступеня зносу робочого конуса.

Для забезпечення міцності і цілісності самі твердосплавні або алмазні волоки встановлюють в сталеві спеціальні корпуси (рис. 13, в). При цьому волоки (4 - 6) запресовують в сталеві обойми 2 (на «гаряче»), що забезпечують створення в перерізі волоки стискаючих радіальних напружень. Збірний інструмент містить у своєму складі напірну волоку 4 і дві робочі волоки 5,6, укладені в корпус 1,7, Напірна волока має діаметр на 0,03-0,1 мм більше діаметру  $d_0$  заготовки і забезпечує гідродинамічний напір технологічного змащення у вогнище деформації. Представлена конструкція інструменту (рис. 11, в) має високу працездатність. Є й інші спорудження волочильного інструменту.

Кут волочіння ( $2\alpha$ ) робить істотний вплив на величину напруги (зусилля) волочіння  $\sigma_{вл}$  і точність його визначення має першорядне значення. За спрощеною методикою пів кута  $\alpha$  волоки можна визначити з виразу (для прямолінійного конуса):

$$\operatorname{tg} \alpha = (d_0 - d) / 2l = \Delta d / 2, \quad (39)$$

де  $d_0, d$  - діаметри відповідно заготовки і готового дроту;

$\Delta d$  - повне абсолютне відтиск;

$l$  - повна довжина робочого каналу (рис. 11, а):

$$l = l_p + l_k, \quad (40)$$

При наявності параболічного конуса, вираз (39) стає непридатним для чисельної оцінки величини пів кута  $\alpha$ . На підставі аналізу великої кількості, що використовуються в практиці волок, встановлена узагальнююча характеристика контуру робочого каналу волок.

## 2. Експериментальне визначення контуру профілю волокни

Дослідження виконуються на розривній пресі типу УПГ-20/2, шляхом зтягування заготовки з діаметром  $d_0$  в волоку з вихідним діаметром  $d$ . Процес волочіння зупиняють на середній ділянці заготівлі і звільняють випробуваний образна від кліщів та волокни. Деформується ділянку заготовки має вигляд, показаний на рис. 13. Вимірюють розміри  $d_0$  і  $d$  мікрометром з точністю 0,01 мм. Розміри  $d_x$ ,  $l$ ,  $x$  - вимірюють на мікроскопі. При цьому довжину  $l$  розбивають на 4 - 5 перетинів і у відповідних перерізах  $x_i$  вимірюють  $d_{xi}$ , з використанням інструментального мікроскопа. Дані заносяться в табл. 5.

Таблиця 5 - Визначені та розрахункові дані за визначенням середнього кута волокни ( $d_0 = 2,8$  мм,  $l = 3,8$  мм).

Параметри	Перетин $x_i$					
	1	2	3	4	5	6
$x$ , мм	3,4	2,72,	2,04	1,36	0,68	0
$d_x$ , мм	2,8	2,605	2,468	2,394	2,342	2,3
$\Delta d_x$ , мм	0,5	0,305	0,168	0,094	0,042	0
$x/l$	1,0	0,80	0,60	0,40	0,20	0
$\Delta d_x/\Delta d$	1,0	0,61	0,338	0,188	0,084	0
$n_i$	-	2,21	2,12	1,83	1,55	-

При цьому перерізу 1 і 6 відповідають площині - входу і виходу. У табл. 5 параметр  $\Delta d_x$ - фактично відповідає зміні контуру профілю волокни (рис. 13.). За вимірюванням величини  $d_x$  і  $l$  розраховують параметри  $\Delta d_x$ ,  $x/l$ ,  $\Delta d_x/\Delta d$ ,  $n_i$ ;

$$\Delta d = d_0 - d; \Delta d_x = d_x - d$$

Для параболічного профілю волокни між параметрами  $\Delta d_x/\Delta d$  і  $x/l$  існує наступна залежність:

$$\frac{\Delta d_x}{\Delta d} = \left( \frac{x}{l} \right)^{n_i}, \quad (41)$$

де  $n_i$  - показник ступеня параболи.

Вимірювання показують, що показник ступеня має змінне значення по довжини волоки (рис. 14).

За даними табл. 5 необхідно побудувати графік (рис. 15), де по осі абсцис відкладені значення  $x/l$ , а на осі ординат  $\Delta d/\Delta d$ . Пряма 1 відповідає контуру робочого каналу при пропорційній зміні  $\Delta d_x$  але довжині волоки [формула (39)], А крива 2 при параболічній зміні контуру волоки [формула (40)]. Для визначення показника ступеня  $n_i$  можна використовувати два методи. У першому застосовують логарифмування

$$n_i = \ln(\Delta d_x / \Delta d) / \ln(x / l)$$

а в другому показник  $n$ , визначають методом наближення, тобто у виразі (41) змінюють величину  $n_i$  в межах 1,5 - 3,3 до тих пір, поки права частина виявиться рівною лівій частині (постійної).

Середня величина показника ступеня для всього осередку деформації дорівнює

$$n = \sqrt[n_2 \cdot n_3 \cdot n_4 \cdot n_5], \quad (42)$$

де  $n_2 - n_5$  - показник ступеня в окремих точках кривої 2 (рис. 13).

Середні значення  $\Delta d_x/\Delta d$  і  $x_{cp}$  з урахуванням виразу (41) рівні

$$\frac{\Delta d_{cp}}{\Delta d} = \int_0^1 \left( \frac{x}{l} \right)^n \cdot d(x/l) = \frac{1}{n+1}; \quad (43)$$

$$x_{cp} = l \cdot \sqrt[1/(1+n)]. \quad (44)$$

Середній пів кут робочого конуса волюки дорівнює

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{0.5 \cdot \Delta d_{cp}}{x_{cp}}, \quad (45)$$

а з урахуванням виразів (43) і (44) отримаємо

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{0.5 \cdot \Delta d}{l(1+n) \cdot \sqrt{1/(1+n)}} \quad (46)$$

Для табл. 5 середнє значення показника дорівнює  $n \approx 1,94$ . тобто контур практично відповідає параболі другого порядку.

З огляду на невеликі величини пів кута волюки, маємо  $\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha$  (рад).

Порівняти величини пів кута. розрахованих за виразами (39) і (46). Обґрунтувати відмінність.

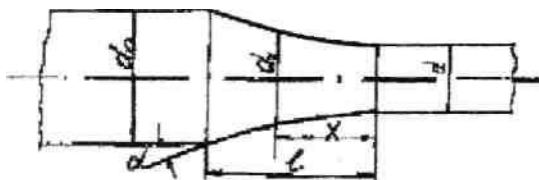


Рис. 14. Вогнище деформації; отриманий шляхом зтягування дроту в волюку.

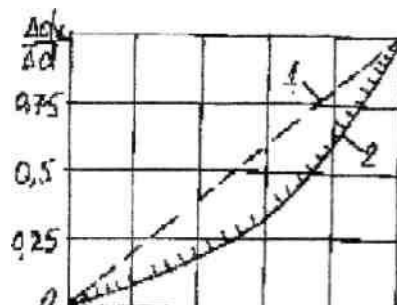


Рис. 15. Контур робочого профілю каналу волюки: 1 - кінічний прямолінійний; 2 – параболічний,



### Контрольні питання

1. Перерахувати основні операції при виробництві дроту волочінням і дати обґрунтування необхідності їх застосування.
2. Чим пояснити відмінність проектного та фактичного профілю робочого каналу волоки?
3. З якою метою передбачають виготовлення калібруючої паска волоки?
4. З якою метою застосовують для волочіння збірний інструмент з напірної і двома робочими волоками?

## Перелік літератури

1. Серода Б.П. Прокатне виробництво. Навчальний посібник. – Запоріжжя: Видавництво Запорізької державної інженерної академії, 2008. – 312 с.
2. Суворов И.К. Обработка металлов давлением: Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1980. - 364 с., ил.
3. Теория прокатки. Справочник. Целиков А.И., Томленов А.Д., Зюзин В.И. и др.. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.
4. Берин И.Ш. Волоочильный инструмент / Берин И.Ш., Днестровский Н.З. – М.: Издательство «Металургия», 1971 – 174 с.
5. Суворов И.К. Обработка металлов давлением: Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1980. 364 с.
6. Серода Б.П., Теорія прокатного та трубного виробництва. / Серода Б.П., Прищип М.Г. Методичні вказівки до лабораторного практимуму для студентів ЗДІА. – Запоріжжя, 2004 – 42 с.