

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія (ДДМА)

ТЕОРІЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ПРОКАТНОГО, ВОЛОЧИЛЬНОГО ТА ПРЕСУВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

Методичні вказівки

до практичних та самостійних робіт

**для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти,
студентів спеціальностей 136 "Металургія" та
131 «Прикладна механіка» денної та заочної форм навчання**

Затверджено
на засіданні
методичної ради
Протокол № від

Тернопіль-Краматорськ
ДДМА
2024

Теорія і технологія прокатного, волочильного та пресувального виробництва : методичні вказівки до практичних та самостійних робіт для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, студентів спеціальностей 136 "Металургія" та 131 «Прикладна механіка» денної та заочної форм навчання / укл. О. В. Чучин. – Тернопіль-Краматорськ : ДДМА, 2024. – 56 с.

Містить 11 практичних робіт, присвячених волочінню, прокатці та пресуванню. Кожна практична робота складається з опису вихідних даних, завдання, теоретичної частини, порядку виконання практичної роботи, теоретичних питань до самостійної підготовки.

Укладач

О. В. Чучин, ст. викл.

Відп. за випуск

І. С. Алієв, проф.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
<i>Практична робота 1</i>	
Апроксимація кривих зміцнення металів та сплавів різними функціями.....	5
<i>Практична робота 2</i>	
Розрахунок силових параметрів та накопиченої деформації МВО в процесі прямого пресування прутка. Графічний (чисельний) метод.....	9
<i>Практична робота 3</i>	
Розрахунок силових параметрів та накопиченої деформації МВО в процесі прямого пресування прутка. Аналітичний метод.....	13
<i>Практична робота 4</i>	
Розрахунок силових параметрів та накопиченої деформації МВО в процесі прямого пресування прутка. Уточнення графічного методу.....	16
<i>Практична робота 5</i>	
Розрахунок силових параметрів енергетичним методом в процесі прямого пресування прутка.....	19
<i>Практична робота 6</i>	
Визначення оптимальних кутів конусності в процесі прямого пресування прутка.....	24
<i>Практична робота 7</i>	
Розрахунок силових параметрів енергетичним методом в процесі зворотного пресування прутка.....	27
<i>Практична робота 8</i>	
Розрахунок контейнера на міцність при прямому пресуванні.....	30
<i>Практична робота 9</i>	
Розрахунок бандажованого контейнера на міцність при прямому пресуванні	33
<i>Практична робота 10</i>	
Розрахунок на міцність контейнера із двох втулок при прямому пресуванні.....	35
<i>Практична робота 11</i>	
Розрахунок на міцність контейнера із трьох втулок при прямому пресуванні.....	42
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	52
ДОДАТОК А.....	53
ДОДАТОК Б.....	55

ВСТУП

Курс «Теорія і технологія прокатного, волочильного та пресувального виробництва» складається з трьох розділів: «Волочіння», «Основи прокатного виробництва» та «Пресування».

До даних методичних вказівок входить 11 практичних робіт, з яких практичну роботу 1 можна віднести до всіх трьох розділів, а практичні роботи 2 – 11 – до останнього розділу «Пресування».

Практична робота 1 присвячена апроксимації кривих зміцнення металів та сплавів різними функціями.

В практичних роботах 2 – 11 виконується розрахунок силових параметрів, накопиченої деформації МВО та енергетичним методом, оптимальних кутів конусності, монолітного та бандажованого контейнера на міцність для прямого пресування прутка; виконується розрахунок силових параметрів енергетичним методом для зворотного пресування прутка.

Кожна практична робота складається з опису вихідних даних, завдання, теоретичної частини, порядку виконання практичної роботи, п'яти теоретичних питань до самостійної підготовки. Інформація, яка наводиться в теоретичній частині, необхідна для виконання практичної роботи.

Практична робота 1

Апроксимація кривих зміцнення металів та сплавів різними функціями

Вихідні дані для побудови кривої зміцнення матеріалу (за варіантами в табл. А.1 Додатка А): 10 значень напруження текучості σ_s для 10 значень логарифмічної деформації e (от 0,2 до 2,0) в залежності від заданого матеріалу.

Знайти: невідомі коефіцієнти для чотирьох функцій апроксимації кривої зміцнення.

Теоретичні відомості

При розробці технологічних процесів обробки металів тиском необхідно знати залежність напруження текучості матеріалу σ_s від ступеня деформації e , яка відображається кривою зміцнення (рис. 1.1) [1].

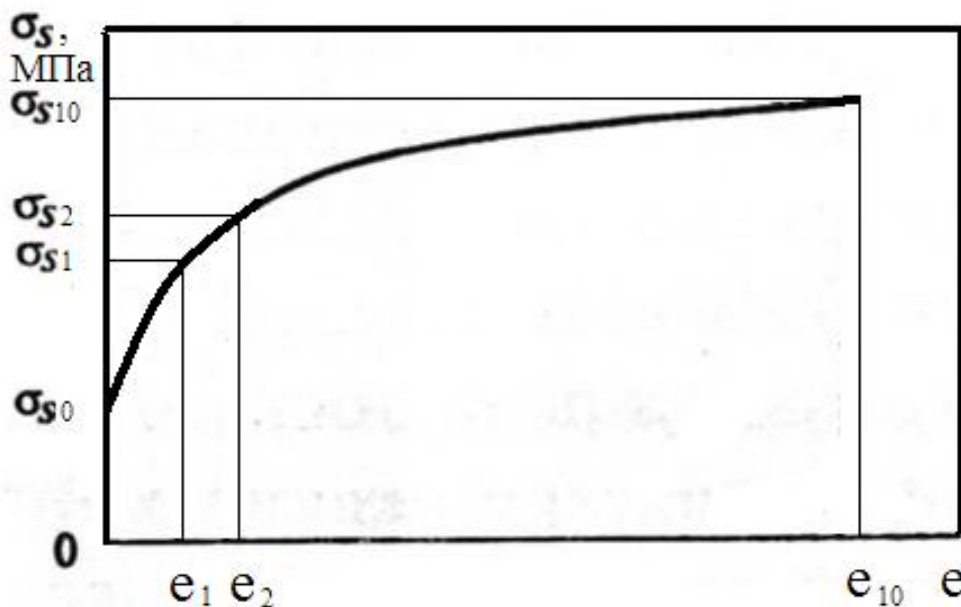


Рисунок 1.1 – Типова експериментальна крива зміцнення

Як правило, пружну ділянку на цій кривій не показують через те, що пружна деформація дуже мала в порівнянні з пластичною.

При досягненні порогу зміцнення подальша деформація не викликає значної зміни величини напруження текучості.

За визначенням О. А. Ільюшина, ступенем деформації називається величина, повна похідна якої за часом дорівнює інтенсивності швидкостей деформацій, тобто

$$\frac{de}{dt} = \varepsilon_i, \text{ звідки } e = \int_0^t \varepsilon_i dt.$$

Замість терміна «ступінь деформації» в технічній літературі також використовується термін «накопичена деформація».

Під час випробувань зразків на розтягнення або стиснення накопиченою деформацією є саме логарифмічна, звана також *істинною деформацією*, а не відносне подовження або зменшення площі поперечного перерізу зразка.

При випробуваннях на стиснення використовують зразки з торцевими виточками, заповненими мастильним матеріалом, тому контактне тертя практично відсутнє, і в ході випробування бокова поверхня зразка зберігає циліндричну форму.

Напруженням текучості σ_s називається напруження, що викликає в умовах лінійного напруженого стану пластичну деформацію при даній величині накопиченої деформації. Напруження текучості змінюється по ходу зміцнення матеріалу, тобто є змінною величиною, яку слід відрізнити від постійної величини, званою *межею текучості* σ_{s0} , що представляє собою початкове напруження текучості, тобто напруження, при якому виникають пластичні деформації (див. рис. 1.1).

Завдання апроксимації – заміна експериментальної кривої на лінію, що має досить просте математичне вираження і в той же час добре збігається з початковою кривою.

Криву зміцнення можна апроксимувати наступними функціями:

1) лінійною

$$\sigma_{si} = \sigma_{s01} + A e_i; \quad (1.1)$$

2) ступеневою (рівняння Надаї)

$$\sigma_{si} = B_2 e_i^{n_2}; \quad (1.2)$$

3) ступеневою (рівняння Людвіка)

$$\sigma_{si} = \sigma_{s03} + B_3 e_i^{n_3}; \quad (1.3)$$

4) показовою (рівняння В. М. Розенберга)

$$\sigma_{si} = \sigma_{s04} + C[1 - e^{-e_i}] + D[1 - e^{-N e_i}], \quad (1.4)$$

де σ_{si} , e_i – відповідно, напруження текучості і накопичена деформація в i – тій точці;

σ_{s01} , σ_{s03} , σ_{s04} , A , B_2 , B_3 , C , D , n_2 , n_3 , N – коефіцієнти;

e – основа натурального логарифма.

Залежність (1.4) більш точно описує напруження текучості при великих значеннях накопиченої деформації, тому що відповідно до цієї залежності напруження текучості прагне до деякої межі.

Порядок виконання практичної роботи

1. Занести 10 експериментальних значень напруження текучості σ_{si} з табл. А.1 в табл. 1.1 згідно заданому матеріалу в варіанті.

Таблиця 1.1 – Експериментальні і теоретичні значення напруження текучості σ_{si} в залежності від накопиченої деформації e_i в i – тій точці

Точка на графіку i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Значення логарифмічної деформації e_i	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	e_8	e_9	e_{10}
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Значення напруження текучості σ_{si} :	σ_{s1}	σ_{s2}	σ_{s3}	σ_{s4}	σ_{s5}	σ_{s6}	σ_{s7}	σ_{s8}	σ_{s9}	σ_{s10}
експериментальні, з таблиці А.1										
розраховані за формулою (1.1)										
розраховані за формулою (1.2)										
розраховані за формулою (1.3)										
розраховані за формулою (1.4)										

2. Відзначити на графіку (див. рис. 1.1) 10 експериментальних точок для побудови кривої зміцнення. Графік повинен займати 1 або 2 сторінки (на розвороті зошита). З'єднати експериментальні точки на графіку плавною кривою – кривою зміцнення.

Для подальших розрахунків вибрати дві експериментальні точки (точку 1 і 10 з табл. 1.1) з координатами (0,2; σ_{s1}) і (2,0; σ_{s10}). При бажанні можна вибрати дві інші точки з діапазону 1...10.

3. Визначити невідомі коефіцієнти σ_{s01} і A за формулами:

$$\sigma_{s01} = \frac{\sigma_{s1}e_{10} - \sigma_{s10}e_1}{e_{10} - e_1};$$

$$A = \frac{\sigma_{s10} - \sigma_{s1}}{e_{10} - e_1}.$$

Підставити знайдені значення коефіцієнтів σ_{s01} і A в формулу (1.1).

4. Визначите невідомі коефіцієнти n_2 і B_2 за формулами:

$$n_2 = \frac{\ln \frac{\sigma_{s10}}{\sigma_{s1}}}{\ln \frac{e_{10}}{e_1}};$$

$$B_2 = \sigma_{s10} e_{10}^{-n_2} \text{ або } B_2 = \sigma_{s1} e_1^{-n_2}.$$

Підставити знайдені значення коефіцієнтів B_2 и n_2 в формулу (4.2).

5. Невідомі напруження σ_{s03} можна визначити графічно (продовживши раніше побудовану криву зміцнення в п. 2 від точки 1 вліво до перетину з віссю σ_s при $e_0 = 0$, як на прикладі рис. 1.1), або обрав для вихідного в умові матеріалу в довідковій технічній літературі значення межі текучості σ_{s0} .

Далі розрахувати невідомі коефіцієнти n_3 и B_3 за формулами:

$$n_3 = \frac{\ln \frac{\sigma_{s10} - \sigma_{s03}}{\sigma_{s1} - \sigma_{s03}}}{\ln \frac{e_{10}}{e_1}};$$

$$B_3 = (\sigma_{s10} - \sigma_{s03}) e_{10}^{-n_3} \text{ або } B_3 = (\sigma_{s1} - \sigma_{s03}) e_1^{-n_3}.$$

Підставити знайдені значення коефіцієнтів σ_{s03} , B_3 и n_3 в формулу (1.3).

6. Прийняти $\sigma_{s04} = \sigma_{s03}$ (див. п. 5).

Показник ступеня N обрати з діапазону 3...25. Чим більше кривизна кривої зміцнення на початковій ділянці (тобто при малих значеннях e_i), тим більшу величину N слід приймати.

Далі розраховують невідомі коефіцієнти D и C за формулами:

$$D = \frac{(\sigma_{s1} - \sigma_{s04})(1 - e^{-e_{10}}) - (\sigma_{s10} - \sigma_{s04})(1 - e^{-e_1})}{(1 - e^{-Ne_1})(1 - e^{-e_{10}}) - (1 - e^{-Ne_{10}})(1 - e^{-e_1})};$$

$$C = \frac{\sigma_{s1} - \sigma_{s04} - D(1 - e^{-Ne_1})}{1 - e^{-e_1}};$$

або

$$C = \frac{\sigma_{s10} - \sigma_{s04} - D(1 - e^{-Ne_{10}})}{1 - e^{-e_{10}}}.$$

Підставити знайдені значення коефіцієнтів σ_{s04} , C , D и N в формулу (1.4).

7. Підставивши в формули (1.1) – (1.4) по 10 значень e_i (від 0,2 до 2,0), розрахувати 10 значень σ_{si} .

Отримані дані занести у відповідні рядки табл. 1.1.

8. На раніше побудованому графіку кривої зміцнення (див. п. 2) побудувати ще 4 криві, які відповідають рівнянням (1.1) – (1.4). Дані для побудови апроксимуючих функцій взяти з табл. 1.1.

Кожну з чотирьох кривих бажано представити на графіку своїм кольором.

9. Проаналізувавши всі п'ять кривих, представлених на графіку кривої зміцнення, зробити висновок, яка з чотирьох функцій краще описує експериментальні точки.

Питання до самостійної підготовки

1. В чому різниця між логарифмічною та відносною ступенями деформації?
2. Призначення кривої зміцнення матеріалу.
3. Що називають напруженням текучості σ_s ?
4. В чому полягає апроксимація кривої зміцнення?
5. Яка залежність більш точно описує напруження текучості σ_s при великих значеннях накопиченої деформації?

Практична робота 2

Розрахунок силових параметрів та накопиченої деформації МВО в процесі прямого пресування прутка. Графічний (чисельний) метод

Вихідні дані (за варіантами в табл. Б.1 Додатка Б):

- 1) радіуси заготовки b і прес-виробу a , висоти не продеформованої частини заготовки в контейнері H і калібруючого пояска матриці l_k , мм;
- 2) коефіцієнт тертя μ ;
- 3) коефіцієнти для визначення координат x трьох матеріальних частинок – α_1 , α_2 и α_3 ;
- 4) матеріал заготовки.

Знайти: накопичені деформації матеріальними частинками та енерго-силові параметри (приведений тиск $\bar{p}$, тиск пресування p в МПа та зусилля пресування P в КН).

Теоретичні відомості

В методі верхньої оцінки (МВО) розглядаються плоскі деформації. МВО розробили В. Джонсон та Х. Кудо. Сутність його полягає в тому, що обсяг осередку деформації представляється у вигляді жорстких (недеформованих) блоків (трикутних за В. Джонсоном), що ковзають один відносно іншого та вздовж межі із жорсткою зоною. Тим самим дійсне поле ліній ковзання замінюють полем, що складається із системи прямолінійних відрізків, що утворюють трикутники. Уздовж меж блоків – сторін трикутників –

компоненти швидкостей переміщень зазнають розривів. Всередині кожного блоку поле швидкостей однорідне, тобто вектор швидкості для всіх точок даного блоку той самий. На цій підставі будують поле швидкостей, яке при правильній побудові завжди є кінематично можливим. Число та розміри трикутних блоків спочатку вибирають довільно.

Порядок виконання практичної роботи

1. Зобразити у масштабі схему прямого пресування (рис. 2.1, а) розміром від 0,5 до 1 сторінки. Проставити натуральні значення геометричних параметрів (b , a , H и l_k). Вибрати в межах фізичного поля схеми довільно точку «А» з висотою h_1 і точку «Б» з висотою h_2 . Зробити розбивку об'єму, що деформується, пунктирними лініями на жорсткі блоки 0, 1, 2 і 3.

Побудувати годограф швидкостей пунктирними лініями (рис. 2.1, б) згідно з обраним кінематично можливим полем швидкостей (КМПШ).

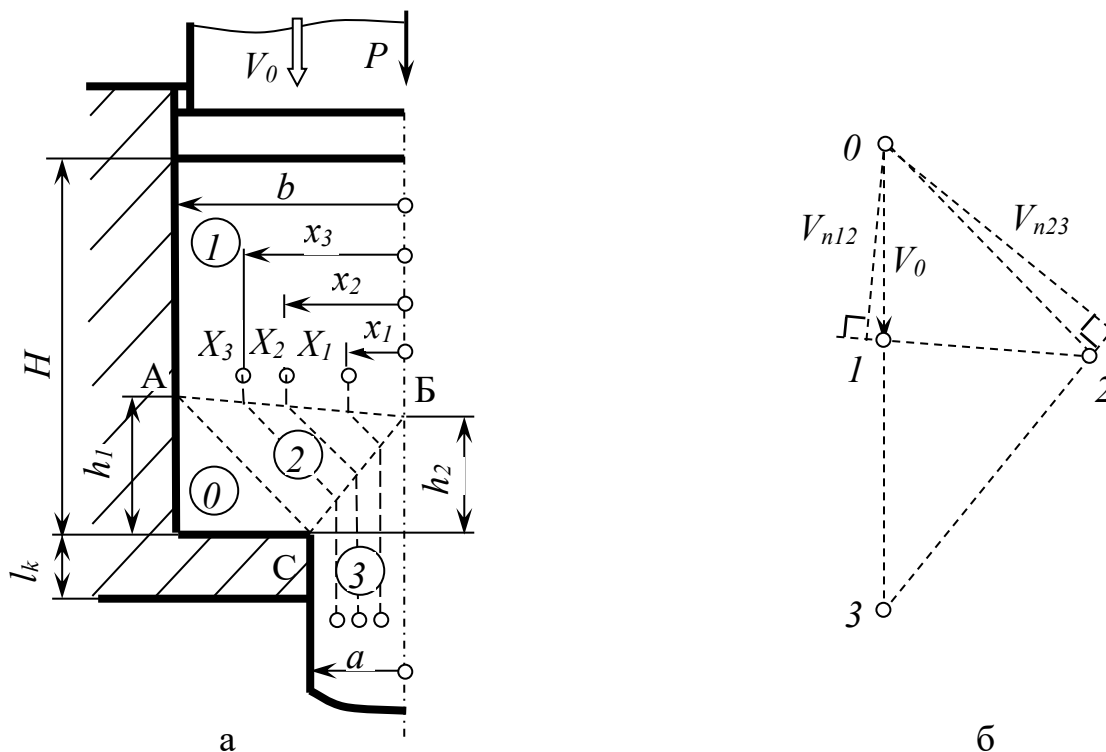


Рисунок 2.1 – Схема прямого пресування (а) та годограф швидкостей (б)

Подальший розрахунок цього тиску може бути зроблений графічним або аналітичним способом. У цій практичній роботі він виконаний графічним способом.

При правильній побудові годографа КМПШ має задовольнятися умова стискання у вигляді:

$$bV_{01} = aV_{03}.$$

Довжини відрізків b і a (див. рис. 2.1, а), а також V_{01} і V_{03} (див. рис. 2.1, б) виміряти в мм.

Якщо множення в лівій та правій частинах рівні або відрізняються на кілька одиниць чи десятків, то можна вважати, що годограф швидкостей побудований правильно. Інакше уточнити годограф швидкостей (див. рис. 2.1, б).

2. Заміряти довжини (в мм) відповідних геометричних (див. рис. 2.1, а) і швидкісних (див. рис. 2.1, б) параметрів, значення цих довжин занести до табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Виміряні довжини геометричних та швидкісних параметрів

Геометричні параметри l , мм	$H-h_1 =$	$l_k =$	$l_{02} =$	$l_{12} =$	$l_{23} =$
Швидкісні параметри V , мм	$V_0 = V_{01} =$	$V_{03} =$	$V_{02} =$	$V_{12} =$	$V_{23} =$

3. Розрахувати величину приведенного тиску для чисельного рішення $\bar{p}_q$ за формулою:

$$\bar{p}_q = \frac{1}{2bV_0} [l_{02}V_{02} + l_{12}V_{12} + l_{23}V_{23} + 2\mu(H - h_1)V_0 + 2\mu l_k V_{03}].$$

Розрахувати величину приведенного тиску для аналітичного рішення $\bar{p}_a$ за формулою:

$$\bar{p}_a = \frac{ab[(b-a)^2 + h_1^2] + a(b-a)[b^2 + (h_1 - h_2)^2] + b(b-a)[a^2 + h_2^2]}{2ab[ah_1 + (b-a)h_2]} + \mu \left(\frac{H - h_1}{b} + \frac{l_k}{a} \right).$$

У формули для розрахунку $\bar{p}_q$ і $\bar{p}_a$ підставляти значення розмірів b , a , h_1 , h_2 , H і l_k , встановлені з урахуванням обраного масштабу (див. рис. 2.1, а).

Порівняти розраховані значення приведених тисків $\bar{p}_q$ і $\bar{p}_a$, цим перевіривши правильність побудови годографа швидкостей і вимірів довжин відрізків (див. табл. 2.1).

4. Розрахувати чисельні значення координат x трьох матеріальних точок (X_1 , X_2 та X_3) у зоні 1 (див. рис. 2.1, а) за формулами:

$$x_1 = \alpha_1 b; x_2 = \alpha_2 b; x_3 = \alpha_3 b.$$

У цих формулах значення розміру b підставити з урахуванням обраного масштабу схеми прямого пресування (див. рис. 2.1, а).

Проставити три матеріальні точки X_1 , X_2 та X_3 з урахуванням раніше розрахованих координат x_1 , x_2 та x_3 у зоні 1 (див. рис. 2.1, а).

Зобразити у розрахунковій схемі прямого пресування (див. рис. 2.1, а) пунктирними лініями траєкторії переміщення трьох матеріальних часток уздовж лінії тока в зонах 1, 2 та 3.

5. Визначити величину деформацій зсуву $\Delta\gamma_{12}$ і $\Delta\gamma_{23}$ на межах блоків 1 та 2, 2 та 3 за формулами:

$$\Delta\gamma_{12} = \frac{V_{12}}{V_{n12}}; \Delta\gamma_{23} = \frac{V_{23}}{V_{n23}},$$

де V_{n12} і V_{n23} – нормальні компоненти швидкості до відповідних швидкостей V_{12} і V_{23} (див. рис. 2.1, б). Ці компоненти швидкості чисельно дорівнюють довжинам перпендикулярів, опущених з полюса годографа (т. 0) на лінії, що визначають напрям векторів V_{12} і V_{23} .

Розрахувати накопичену деформацію матеріальними частками для чисельного рішення $e_{\text{ч}}$ за формулою:

$$e_{\text{ч}} = \Delta\gamma_{12} + \Delta\gamma_{23}.$$

Визначити накопичену деформацію матеріальними частками для аналітичного рішення $e_{\text{а}}$ за відомою формулою:

$$e_{\text{а}} = \ln \frac{b^2}{a^2}.$$

У цю формулу підставити справжні значення розмірів b і a (див. вихідні дані на початку практичної роботи 2).

Порівняти розраховані деформації $e_{\text{ч}}$ і $e_{\text{а}}$.

6. Знайти величини напруження текучості для чисельного $\sigma_{\text{сч}}$ та аналітичного $\sigma_{\text{са}}$ рішень після підстановки знайдених у п. 5 значень накопичених деформацій матеріальними частками $e_{\text{ч}}$ і $e_{\text{а}}$ в рівняння апроксимації кривої зміцнення, що найкраще описує експериментальні точки (див. п. 9 практичної роботи 1).

Порівняти знайдені значення напруження текучості $\sigma_{\text{сч}}$ і $\sigma_{\text{са}}$.

7. Розрахувати величини тисків прямого пресування для чисельного $p_{\text{ч}}$ та аналітичного $p_{\text{а}}$ рішень за формулами:

$$p_{\text{ч}} = \bar{p}_{\text{ч}} \sigma_{\text{сч}}; p_{\text{а}} = \bar{p}_{\text{а}} \sigma_{\text{са}},$$

де $\bar{p}_{\text{ч}}$ і $\bar{p}_{\text{а}}$ – приведені тиски, відповідно, для чисельного та аналітичного рішень (див. п. 3);

$\sigma_{\text{сч}}$ і $\sigma_{\text{са}}$ – напруження текучості, відповідно, для чисельного та аналітичного рішень (див. п. 6).

Порівняти знайдені значення тиску прямого пресування $p_{\text{ч}}$ і $p_{\text{а}}$.

8. Розрахувати величини зусиль прямого пресування для чисельного P_q та аналітичного P_a рішень за формулами:

$$P_q = p_q \pi b^2; P_a = p_a \pi b^2,$$

де p_q і p_a – тиски, відповідно, для чисельного та аналітичного рішень (див. п. 7).

У ці формули підставити справжнє значення розміру b (див. вихідні дані на початку практичної роботи 2).

Порівняти знайдені значення зусиль прямого пресування P_q і P_a .

Питання до самостійної підготовки

1. Які припущення у метода верхньої оцінки (МВО)?
2. Яка різниця між методом верхньої оцінки та методом нижньої оцінки?
3. Які розрахунки можна виконувати в методі верхньої оцінки?
4. Які припущення, характерні для МВО (енергетичного методу)?
5. Які основні умови для вирішення МВО (енергетичного методу)?

Практична робота 3

Розрахунок силових параметрів та накопиченої деформації МВО в процесі прямого пресування прутка. Аналітичний метод

Вихідні дані (за варіантами в табл. Б.1 Додатка Б):
див. практичну роботу 2.

Знайти: див. практичну роботу 2.

Теоретичні відомості

В теорії пластичності доведено, що рішення, засновані на кінематично можливих полях переміщень (швидкості переміщень) дають верхню оцінку кінематичних витрат, а рішення, засновані на статичних полях швидкостей дають нижню оцінку, а між ними є реальна оцінка. Отже з усіх верхніх оцінок є найкращою та, що дає мінімальне значення, а з усіх нижніх оцінок та, що дає максимальне значення.

Пошук оптимальних значень технологічно змінних параметрів є найважливішою особливістю енергетичного методу. Визначення найкращого (мінімального) значення енергії або сил деформування (процедура мінімізації), функції по будь-якому параметру або функціоналу за рядом параметрів є також складовою рішення технологічних завдань.

Порядок виконання практичної роботи

1. Для шести значень коефіцієнта λ (пропонується $\lambda = 0; 0,5; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1$) розрахувати шість значень висоти, що оптимізується, h_1 за формулою:

$$h_1 = \sqrt{\frac{2ab^2(b-a)}{ab + a(b-a)(1-\lambda)^2 + b(b-a)\lambda^2 - 2\mu a[a + (b-a)\lambda]}}, \quad (3.1)$$

де λ – коефіцієнт, що розраховується за формулою $\lambda = h_2/h_1$.

Звідки висота h_2 розраховується за формулою:

$$h_2 = \lambda h_1. \quad (3.2)$$

Підставити у формулу (3.1) значення розмірів b і a , встановлені з урахуванням обраного масштабу (див. рис. 2.1, а).

Можна збільшити кількість значень коефіцієнта, що приймаються, λ (більше шести) в діапазоні $0 \dots 1,1$, тим самим збільшивши кількість розрахункових значень висоти h_1 , що оптимізується.

2. Розрахувати шість (або більше) значень приведенного тиску $\bar{p}$ (з точністю до 0,01 або 0,001) за формулою:

$$\bar{p} = \frac{\left(\begin{aligned} &ab[(b-a)^2 + h_1^2] + \\ &+ a(b-a)[b^2 + (1-\lambda)^2 h_1^2] + \\ &+ b(b-a)[a^2 + \lambda^2 h_1^2] \end{aligned} \right)}{2ab[a + (b-a)\lambda]h_1} + \mu \left(\frac{H - h_1}{b} + \frac{l_k}{a} \right). \quad (3.3)$$

У формулу (3.3) підставити значення розмірів b , a , H і l_k , встановлені з урахуванням обраного масштабу (див. рис. 2.1, а), а також послідовно вибрані (див. п. 1) значення коефіцієнта λ та розраховані за формулою (3.1) значення висоти h_1 .

3. Прийняті значення коефіцієнта λ , розраховані за формулою (3.1) значення висоти h_1 (див. п. 1) та за формулою (3.3) значення приведенного тиску $\bar{p}$ (див. п. 2) занести до табл. 3.1.

Побудувати (рис. 3.1) графік залежності $\bar{p} = f(\lambda)$.

На графіку знайти оптимальне значення коефіцієнта λ ($\lambda_{\text{опт}}$), при якому значення приведенного тиску $\bar{p}$ буде мінімальним ($\bar{p}_{\text{онм}}$).

4. Розрахувати за формулою (3.1) величину оптимальної висоти $h_{1\text{опт}}$, підставивши до неї замість коефіцієнта λ величину $\lambda_{\text{онм}}$.

Розрахувати за формулою (3.2) величину оптимальної висоти $h_{2\text{опт}}$, підставивши до неї замість коефіцієнта λ величину $\lambda_{\text{онм}}$.

Таблиця 3.1 – Значення коефіцієнта λ , висоти h_1 та приведенного тиску $\bar{p}$

Коефіцієнт λ	0	0,5	0,8	0,9	1,0	1,1
Висота h_1 , мм						
Приведений тиск $\bar{p}$						

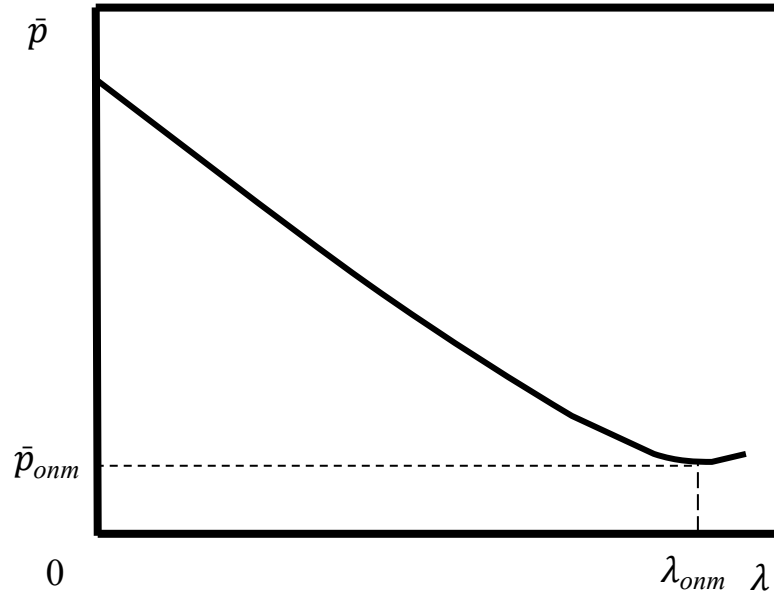


Рисунок 3.1 – Графік залежності $\bar{p} = f(\lambda)$

5. Визначити за формулою (3.3) величину оптимального приведенного тиску $\bar{p}_{\text{опт}}$, підставивши до неї замість коефіцієнта λ та висоти h_1 відповідно величини $\lambda_{\text{опт}}$ і $h_{1\text{опт}}$.

6. Визначити величину деформацій зсуву $\Delta\gamma_{12}$ і $\Delta\gamma_{23}$ на межах блоків 1 та 2, 2 та 3 (див. рис. 2.1, а) за формулами:

$$\Delta\gamma_{12} = \frac{b-a}{b \sin \gamma} \frac{\sqrt{b^2 + (h_{1\text{опт}} - h_{2\text{опт}})^2}}{\sqrt{(b-a)^2 + h_{1\text{опт}}^2}};$$

$$\Delta\gamma_{23} = \frac{a^2 + h_{2\text{опт}}^2}{a \left[\frac{a}{b-a} h_{1\text{опт}} + h_{2\text{опт}} \right]}, \quad (3.4)$$

$$\text{де } \gamma = 90^\circ - \left(\arctg \frac{b-a}{h_{1\text{опт}}} + \arctg \frac{h_{1\text{опт}} - h_{2\text{опт}}}{b} \right).$$

У формули (3.4) підставити значення оптимальних висот $h_{1\text{опт}}$ і $h_{2\text{опт}}$ (див. п. 4), а також розмірів b і a , встановлені з урахуванням вибраного масштабу (див. рис. 2.1, а).

Розрахувати накопичену деформацію матеріальними частками e за формулою:

$$e = \Delta\gamma_{12} + \Delta\gamma_{23}.$$

Порівняти значення накопиченої деформації e з раніше розрахованими значеннями накопичених деформацій $e_{\text{ч}}$ і e_a (див. п. 5 в практичній роботі 2).

7. Знайти величину напруження текучості σ_s після підстановки знайденого у п. 6 значення накопиченої деформації матеріальними частками e в рівняння апроксимації кривої зміцнення, що найкраще описує експериментальні точки (див. п. 9 практичної роботи 1).

8. Розрахувати величину тиску прямого пресування p за формулою:

$$p = \bar{p}_{\text{opt}} \sigma_s,$$

де $\bar{p}_{\text{opt}}$ – оптимальний приведений тиск (див. п. 5);

σ_s – напруження текучості (див. п. 7).

Порівняти величину тиску прямого пресування p з раніше розрахованими значеннями тисків $p_{\text{ч}}$ і p_a (див. п. 7 у практичній роботі 2).

9. Розрахувати величину зусилля прямого пресування P за формулою:

$$P = p \pi b^2,$$

де p – тиск прямого пресування (див. п. 8).

У цю формулу підставити справжнє значення розміру b (див. вихідні дані на початку практичної роботи 2).

Порівняти величину зусилля прямого пресування P з раніше розрахованими значеннями зусиль $P_{\text{ч}}$ і P_a (див. п. 8 в практичній роботі 2).

Питання до самостійної підготовки

1. В чому різниця графічного (чисельного) та аналітичного МВО?
2. Навіщо знаходять величину оптимального приведенного тиску?
3. Яка різниця між приведеним тиском і тиском?
4. Для чого розраховують накопичену деформацію матеріальними частками?
5. Які величини відносять до силових параметрів?

Практична робота 4

Розрахунок силових параметрів та накопиченої деформації МВО в процесі прямого пресування прутка. Уточнення графічного методу

Вихідні дані (за варіантами в табл. Б.1 Додатка Б):

див. практичну роботу 2.

Знайти: див. практичну роботу 2.

Процес обробки металів тиском, при якому виріб виготовляється в результаті течії металу із замкнутого об'єму через отвір в матриці, називають пресуванням [2].

Залежно від наявності або відсутності переміщення заготовки у контейнері преса, розрізняють пряме пресування та зворотне пресування.

При прямому пресуванні (рис. 4.1) напрямом течії металу збігається з напрямком руху прес-штемпеля, причому метал, який деформується, переміщається в нерухомому контейнері. Нагріту при необхідності до потрібної температури заготовку 1 поміщають в контейнер 2, що включає втулку 6, з одного торця якого встановлюють матрицю 3 у спеціальній матриці-тримачі 4, а з іншого торця – поршень 5, який називають прес-штемпелем (нижнім пуансоном). Прес-штемпель передає тиск преса на заготовку 1 за допомогою прес-шайби 7 і змушує метал витікати з отвору в матриці, утворюючи в результаті прес-виріб 8.

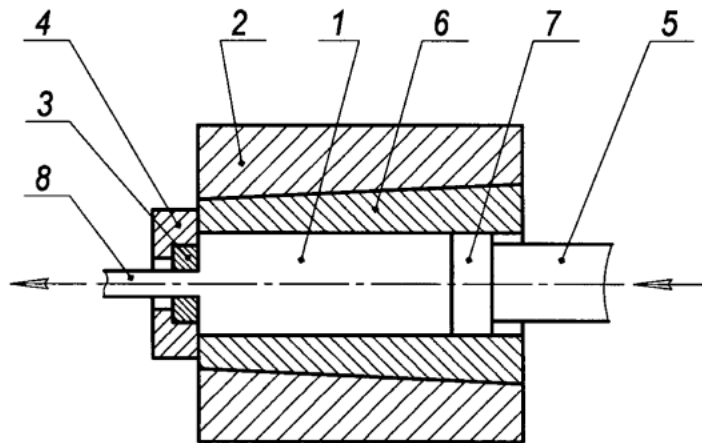


Рисунок 4.1 – Схема процесу прямого пресування

Порядок виконання практичної роботи

1. Використати раніше відображену у практичній роботі 2 схему прямого пресування (див. рис. 2.1, а).

Однак тепер у межах фізичного поля схеми точки «А» та «Б» проставляються не довільно (висотні розміри h_1 і h_2), а з урахуванням раніше встановлених оптимальних висотних розмірів $h_{1\text{опт}}$ і $h_{2\text{опт}}$ (див. п. 4 у практичній роботі 3). Зробити розбивку об'єму, що деформується, суцільними лініями на жорсткі блоки 0, 1, 2 і 3.

Побудувати годограф швидкостей суцільними лініями (рис. 2.1, б) згідно з обраним КМПШ.

Для перевірки правильності побудованого годографа швидкостей необхідно чисельно розрахувати множення у лівій та правій частинах рівності:

$$bV_{01} = aV_{03}.$$

Довжини відрізків b і a (див. рис. 2.1, а), а також V_{01} і V_{03} (див. рис. 2.1, б) виміряти в мм.

Якщо множення в лівій та правій частинах рівні або відрізняються на кілька одиниць чи десятків, то можна вважати, що годограф швидкостей побудований правильно. Інакше уточнити годограф швидкостей (див. рис. 2.1, б).

2. Виконати обсяг робіт, аналогічний до цього пункту в практичній роботі 2.

3. Розрахувати величини приведенного тиску для чисельного $\bar{p}_q$ та аналітичного $\bar{p}_a$ рішень щодо формул, наведених у цьому пункті практичної роботи 2.

У формули для розрахунку $\bar{p}_q$ і $\bar{p}_a$ підставляти значення розмірів b , a , $h_{1\text{опт}}$, $h_{2\text{опт}}$, H і l_k , встановлені з урахуванням обраного масштабу (див. рис. 2.1, а).

Порівняти розраховані значення приведених тисків $\bar{p}_q$ і $\bar{p}_a$ з величиною приведенного тиску $\bar{p}_{\text{онм}}$ (див. п. 5 практичної роботи 3).

4. Використати раніше проставлені три точки X_1 , X_2 та X_3 (див. рис. 2.1, а).

Зобразити у розрахунковій схемі прямого пресування (див. рис. 2.1, а) суцільними лініями траєкторії переміщення трьох матеріальних часток уздовж лінії току в зонах 1, 2 та 3.

5. Виконати обсяг робіт, аналогічний до цього пункту в практичній роботі 2.

Порівняти розраховані деформації e_q і e_a з величиною накопиченої деформації e (див. п. 6 практичної роботи 3).

6. Виконати обсяг робіт, аналогічний до цього пункту в практичній роботі 2.

Порівняти знайдені значення напруження текучості σ_{sq} і σ_{sa} з величиною напруження текучості σ_s (див. п. 7 практичної роботи 3).

7. Виконати обсяг робіт, аналогічний до цього пункту в практичній роботі 2.

Порівняти знайдені значення тиску прямого пресування p_q і p_a з величиною тиску пресування p (див. п. 8 практичної роботи 3).

8. Виконати обсяг робіт, аналогічний до цього пункту в практичній роботі 2.

Порівняти знайдені значення зусиль прямого пресування P_q і P_a з величиною зусилля пресування P (див. п. 9 практичної роботи 3).

Питання до самостійної підготовки

1. Що називають «мертвою» зоною і від чого залежать її розміри?

2. Як змінюються значення деформації в заготовці, яка деформується, вздовж осі та в поперечному напрямку при прямому пресуванні?
3. Для чого видаляють передню та кінцеву частини прес-виробу?
4. Що таке прес-залишок і чому його залишають в контейнері?
5. Як змінюється зусилля по ходу прес-штемпеля при прямому пресуванні?

Практична робота 5

Розрахунок силових параметрів енергетичним методом в процесі прямого пресування прутка

Вихідні дані (за варіантами в табл. Б.1 Додатка Б):

- 1) радіус заготовки b , висоті непродеформованої частини заготовки в контейнері H і калібруючого пояска матриці l_k , мм;
- 2) матеріал заготовки;
- 3) три радіуси прес-виробу $a_n = 0,5a$; a ; $0,5(a + b)$;
- 4) три значення коефіцієнта тертя $\mu = 0$; $0,2$; $0,5$.

Знайти: тиск p та зусилля P прямого пресування, тиск на стінку контейнера q та побудувати графіки залежності $p = f(a_n)$ і $q = f(a_n)$.

Теоретичні відомості

Пресування суцільних стрижнів може здійснюватися як прямим (рис. 5.1, а), так і зворотним способом (рис. 5.1, б) [3].

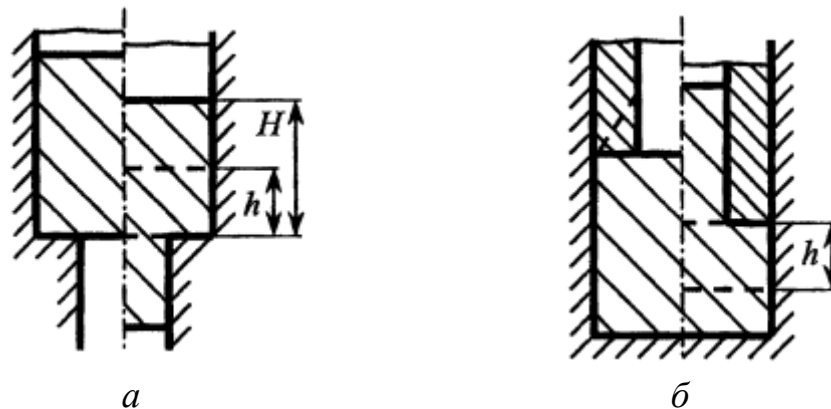


Рисунок 5.1 – Схеми прямого (а) та зворотного (б) пресування стрижня

При прямому пресуванні заготовка поміщається в порожнину контейнера (рис. 5.1, а, зліва від осі) і при робочому ході суцільного прес-штемпеля видавлюється через отвір матриці, розташованої внизу контейнера (рис. 5.1, а, праворуч від осі). У цьому випадку крім сили, необхідної для здійснення процесу пластичної деформації, потрібно додатково долати силу

тертя між контейнером і жорсткою частиною заготовки, що переміщується вниз, в зоні $H-h$.

При зворотному пресуванні (рис. 5.1, б) формотворний отвір виконується безпосередньо в прес-штемплі, і для здійснення процесу переміщення розташованої нижче пластичної області h жорстку частину заготовки і, відповідно, долати силу тертя між нею і контейнером не потрібно. Таким чином, сила, необхідна для здійснення зворотного пресування, за наявності жорсткої зони буде меншою, ніж для прямого. Досліди, однак, показують, що при гарному мастилі тертя між контейнером і жорсткою частиною заготовки впливає на силові параметри прямого пресування незначно. Зменшення довжини $H-h$ вдвічі призводить до зміни сили лише на 3-5 %. Крім цього, пряме пресування дозволяє отримувати значно більшу різноманітність геометричної форми виробів, ніж протилежне. Це пов'язано з тим, що перехідній частині отвору матриці при прямому пресуванні можна надати будь-яку необхідну форму. Якщо ж при зворотному пресуванні виконати перехідну частину отвору в прес-штемплі з кутом малої конусності (показано пунктиром на рис. 5.1, б, зліва від осі), то загострена кромка прес-штемплеля внаслідок своєї малої жорсткості буде віджиматися витікаючою частиною заготовки, дряпаючи при цьому стінку контейнера і викликаючи тим самим значне взаємне зношування, або просто ламаючись внаслідок малої міцності.

Для аналізу напруженого та деформованого станів заготовки прийнято розрахункову схему, представлену на рис. 5.2.

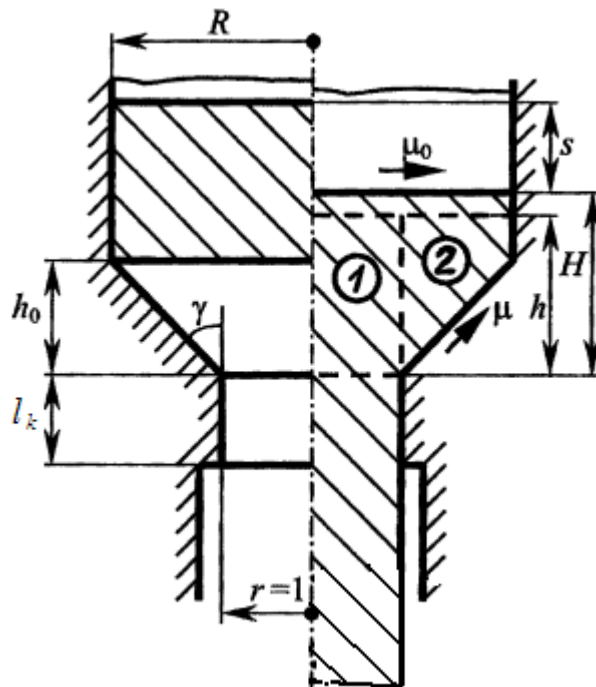


Рисунок 5.2 – Розрахункова схема пресування прутка

У цій схемі використовується циліндрична система координат, а осередок пластичної деформації представлений у вигляді двох областей: центральної області 1 та периферійної області 2.

Порядок виконання практичної роботи

Прийняти $a_n = 0,5a$.

Прийняти кут $\gamma = 90^\circ$, тобто периферійна трапецеїдальна область 2 (див. рис. 5.2) вироджується у прямокутну (див. рис. 2.1 у практичній роботі 2).

1. Відносні безрозмірні радіуси заготовки $\bar{R}$ та прес-виробу $\bar{r}$, висота непродетформованої частини заготовки в контейнері $\bar{H}$ та калібруючого пояска матриці $\bar{l}_k$ (див. рис. 5.2, на якому показані натуральні значення цих радіусів та висот) розрахувати за формулами:

$$\bar{R} = \frac{b}{a_n}; \bar{r} = \frac{a_n}{a_n} = 1; \bar{H} = \frac{H}{a_n}; \bar{l}_k = \frac{l_k}{a_n}.$$

2. Розрахувати три значення (див. рис. 5.2) висоти осередку пластичної деформації $\bar{h}$ ($\bar{h} = h/a_n$) для трьох значень коефіцієнта тертя μ (див. вихідні дані до практики) за формулою:

$$\bar{h} = \sqrt{\frac{\left(0,5 + \mu \frac{\sin \gamma - \cos \gamma}{\sin \gamma + \cos \gamma}\right) [\bar{R}^4 (\ln \bar{R} - 0,75) + \bar{R}^2 - 0,25]}{(\bar{R}^2 - 1) \left[0,5(\bar{R}^2 + 1) \left(1 - 0,5 \left[1 - \frac{1}{\bar{R}}\right] \cos \gamma\right) - 0,5 + \mu \frac{\sin \gamma - \cos \gamma}{\sin \gamma + \cos \gamma}\right]}}.$$

При використанні цієї формули слід враховувати, що фізична висота $\bar{h}$ (див. рис. 5.2) не може бути менше висоти $\bar{h}_0$ ($\bar{h}_0 = h_0/a_n$), яка визначається виразом:

$$\bar{h}_0 = (\bar{R} - 1) \operatorname{ctg} \gamma.$$

Якщо в результаті розрахунку виявиться, що $\bar{h} < \bar{h}_0$, то слід приймати $\bar{h} = \bar{h}_0$.

Однак, у цій практичній роботі при куті $\gamma = 90^\circ$ висота $\bar{h}_0 = 0$.

3. Для трьох значень висоти осередку пластичної деформації $\bar{h}$ (див. п. 2) та відповідних їм трьох значень коефіцієнта тертя μ визначити три значення приведенного тиску $\bar{p}$ прямого пресування за формулою:

$$\bar{p} = \frac{1,1}{\bar{R}^2} \left(\begin{aligned} &1,5(\bar{R}^2 - 1) + \bar{R}^2 \ln \bar{R} + \\ &+ \left[0,5(\bar{R}^2 + 1) \left(1 - 0,5 \left[1 - \frac{1}{\bar{R}} \right] \cos \gamma \right) - \right] \bar{h} + \\ &- 0,5 + \mu \frac{\sin \gamma - \cos \gamma}{\sin \gamma + \cos \gamma} \end{aligned} \right) + \\ + \frac{\left(0,5 + \mu \frac{\sin \gamma - \cos \gamma}{\sin \gamma + \cos \gamma} \right) [\bar{R}^4 (\ln \bar{R} - 0,75) + \bar{R}^2 - 0,25]}{(\bar{R}^2 - 1) \bar{h}} + \\ + 2\mu \left(\bar{l}_k + \frac{\sigma_{s0}}{\sigma_s} \frac{\bar{H} - \bar{h}}{\bar{R}} \right),$$

де $\sigma_{s0}/\sigma_s = 0,5$.

4. Для трьох значень висоти осередку пластичної деформації $\bar{h}$ (див. п. 2) та відповідних ним трьох значень коефіцієнта тертя μ визначити три значення максимального приведенного тиску $\bar{q}$ на стінку контейнера за формулою:

$$\bar{q} = 1,1 \left\{ \begin{aligned} &1 + \ln \bar{R} + \left[0,5 - 0,25 \left(1 - \frac{1}{\bar{R}} \right) \cos \gamma \right] \bar{h} + \\ &0,5 + \mu \frac{\sin \gamma - \cos \gamma}{\sin \gamma + \cos \gamma} \end{aligned} \right. \left. + \frac{\left(\bar{R}^2 \ln \bar{R} - 0,5 \right)}{\bar{h}} \right\} + 2\mu \bar{l}_k.$$

5. Визначити накопичену деформацію матеріальними частками за формулою (див. п. 5 практичної роботи 2):

$$e = \ln \frac{b^2}{a_n^2}.$$

6. Знайти величину напруження текучості σ_s після підстановки знайденого у п. 5 значення накопиченої деформації матеріальними частками e в рівняння апроксимації кривої зміцнення, що найкраще описує експериментальні точки (див. п. 9 практичної роботи 1).

7. Для трьох значень приведенного тиску прямого пресування $\bar{p}$ та трьох значень приведенного тиску на стінку контейнера $\bar{q}$ (розрахованих раніше, відповідно, у п. 3 та п. 4) визначити три значення тиску прямого пресування p і три значення тиску на стінку контейнера q за відповідними формулами:

$$p = \bar{p} \sigma_s; \quad q = \bar{q} \sigma_s,$$

де σ_s – напруження текучості, МПа (див. п. 6).

Розрахувати коефіцієнт k за формулою:

$$k = \frac{q}{p}.$$

8. Розрахувати величину зусилля прямого пресування за формулою:

$$P = p\pi b^2,$$

де p – тиск прямого пресування, МПа (див. п. 7).

9. Вихідні та розраховані значення параметрів занести до таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Вихідні та розраховані значення параметрів при $a_n = 0,5a$

μ	$h = \bar{h}a_n$, мм	$\bar{p}$	p , МПа	P , кН	$\bar{q}$	q , МПа	k
0							
0,2							
0,5							

10. Прийняти $a_n = a$.

11. Виконати розрахунки аналогічні п. 1 – п. 8, але для $a_n = a$.

12. Вихідні та розраховані значення параметрів занести до таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Вихідні та розраховані значення параметрів при $a_n = a$

μ	$h = \bar{h}a_n$, мм	$\bar{p}$	p , МПа	P , кН	$\bar{q}$	q , МПа	k
0							
0,2							
0,5							

13. Прийняти $a_n = 0,5(a + b)$.

14. Виконати розрахунки аналогічні п. 1 – п. 8, але для $a_n = 0,5(a + b)$.

15. Вихідні та розраховані значення параметрів занести до таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Вихідні та розраховані значення параметрів при $a_n = 0,5(a + b)$

μ	$h = \bar{h}a_n$, мм	$\bar{p}$	p , МПа	P , кН	$\bar{q}$	q , МПа	k
0							
0,2							
0,5							

16. Побудувати графіки залежності $p = f(a_n)$ і $q = f(a_n)$. Кожен графік містить по 3 криві (кожній кривій відповідає одне з трьох значень коефіцієнта тертя) і за величиною має бути не менше ніж на 0,5 сторінки. Криві на графіках бажано показати різними кольорами. Дані для побудови графіків брати з табл. 5.1 – 5.3.

Питання до самостійної підготовки

1. Як змінюється зусилля по ходу прес-штемпеля при прямому та зворотному пресуванні прутка?
2. Які процеси можна дослідити МВО та енергетичним методом?
3. Як впливає коефіцієнт тертя на процес прямого пресування прутка?
4. Більш складні за формою в перетині прес-вироби можна отримати прямим чи зворотним пресуванням?
5. Чи існують обмеження довжини прес-виробу при прямому пресуванні?

Практична робота 6

Визначення оптимальних кутів конусності в процесі прямого пресування прутка

Вихідні дані (за варіантами в табл. Б.1 Додатка Б):

- 1) радіуси заготовки b та прес-виробу a , висота калібруючого пояса матриці l_k , мм;
- 2) матеріал заготовки;
- 3) три значення кута конусності $\gamma = 25^\circ; 45^\circ; 65^\circ$ (див. рис. 5.2 у практичній роботі 5);
- 4) три значення коефіцієнта тертя $\mu = 0; 0,2; 0,5$.

Знайти: тиск p та зусилля P прямого пресування, тиск на стінку контейнера q , побудувати графіки залежності $p = f(\gamma)$ і $q = f(\gamma)$ та встановити графічно значення оптимальних кутів конусності $\gamma_{\text{опт}}$, при яких тиски p і q мінімальні.

Теоретичні відомості

При пресуванні прутків існують оптимальні кути конусності $\gamma_{\text{опт}}$, у яких тиск пресування є найменшим. Встановлено, що величина оптимального кута суттєво залежить від відносного радіусу $\bar{R}$ (див. рис. 5.2 у практичній роботі 5), зі збільшенням якого величина $\gamma_{\text{опт}}$ також збільшується [3].

Наявність оптимальних кутів обумовлює утворення застійної зони в куті між контейнером і матрицею (рис. 6.1) у тому випадку, якщо кут

конусності матриці перевищує оптимальний кут при граничному терті, званий також кутом природної течії або кутом застійної зони γ_3 .

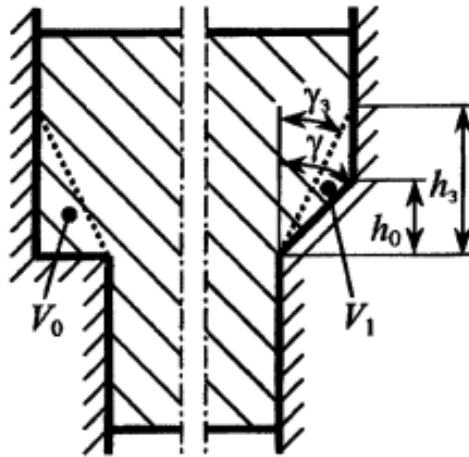


Рисунок 6.1 – Застійна зона при пресуванні прутків

Якщо відомий кут γ_3 , то розрахувати відносну висоту застійної зони можна за формулою:

$$\bar{h}_3 = (\bar{R} - 1) \operatorname{ctg} \gamma_3.$$

Зі збільшенням відносного радіусу $\bar{R}$ кут природної течії γ_3 суттєво збільшується.

Об'єм металу, розташований у застійній зоні, буде найбільшим за $\gamma = 90^\circ$ (див. рис. 6.1, зліва обсяг V_0). При зменшенні кута конусності матриці γ цей обсяг також зменшуватиметься і дорівнюватиме V_1 . З геометричних міркувань можна записати:

$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{\bar{h}_3 - \bar{h}_0}{\bar{h}_3} = \frac{\operatorname{ctg} \gamma_3 - \operatorname{ctg} \gamma}{\operatorname{ctg} \gamma_3} = 1 - \frac{\operatorname{ctg} \gamma}{\operatorname{ctg} \gamma_3}.$$

Порядок виконання практичної роботи

Прийняти $a_n = a$.

Відносні безрозмірні радіуси заготовки $\bar{R}$ та прес-виробу $\bar{r}$, висоту калібруючого пояса матриці $\bar{l}_k$ (див. рис. 5.2, на якому показані натуральні значення цих радіусів та висоти) розрахувати за формулами:

$$\bar{R} = \frac{b}{a_n}; \quad \bar{r} = \frac{a_n}{a_n} = 1; \quad \bar{l}_k = \frac{l_k}{a_n}$$

Відносну висоту частини заготовки, що залишилася, в контейнері $\bar{H}$ не випресовану через матрицю, розрахувати за формулою:

$$\bar{H} = 1,3 \sqrt{\frac{\frac{\sin 25^\circ}{\sin 25^\circ + \cos 25^\circ} [\bar{R}^4 (\ln \bar{R} - 0,75) + \bar{R}^2 - 0,25]}{(\bar{R}^2 - 1) \left[0,5(\bar{R}^2 + 1) \left(1 - 0,5 \left[1 - \frac{1}{\bar{R}} \right] \cos 25^\circ \right) - \frac{\cos 25^\circ}{\sin 25^\circ + \cos 25^\circ} \right]}}.$$

1. Прийняти кут конусності $\gamma = 25^\circ$.
Виконати розрахунки аналогічні п. 2 – п. 8 (у практичній роботі 5).
2. Вихідні та розраховані значення параметрів занести до таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Вихідні та розраховані значення параметрів при $\gamma = 25^\circ$

μ	$h = \bar{h}a_n$, мм	$\bar{p}$	p , МПа	P , кН	$\bar{q}$	q , МПа	k
0							
0,2							
0,5							

3. Прийняти $\gamma = 45^\circ$.
4. Виконати розрахунки аналогічні п. 2 - п. 8 (у практичній роботі 5), але для $\gamma = 45^\circ$.
5. Вихідні та розраховані значення параметрів занести до таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Вихідні та розраховані значення параметрів при $\gamma = 45^\circ$

μ	$h = \bar{h}a_n$, мм	$\bar{p}$	p , МПа	P , кН	$\bar{q}$	q , МПа	k
0							
0,2							
0,5							

6. Прийняти $\gamma = 65^\circ$.
7. Виконати розрахунки аналогічні п. 2 - п. 8 (у практичній роботі 5), але для $\gamma = 65^\circ$.
8. Вихідні та розраховані значення параметрів занести до таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Вихідні та розраховані значення параметрів при $\gamma = 65^\circ$

μ	$h = \bar{h}a_n$, мм	$\bar{p}$	p , МПа	P , кН	$\bar{q}$	q , МПа	k
0							
0,2							
0,5							

9. Побудувати графіки залежності $p = f(\gamma)$ і $q = f(\gamma)$. Кожен графік містить по 3 криві (кожній кривій відповідає одне з трьох значень коефіцієнта тертя) і за величиною має бути не менше ніж на 0,5 сторінки. Криві на графіках бажано показати різними кольорами. Дані для побудови графіків брати з табл. 6.1 – 6.3. На кожному графіку для кожної кривої визначити графічно значення оптимальних кутів конусності $\gamma_{\text{опт}}$ (якщо це можливо), при яких тиску p і q мінімальні.

Питання до самостійної підготовки

1. Які переваги та недоліки має використання конічних матриць при прямому пресуванні?
2. Яку функцію виконує «мертва» зона при прямому пресуванні?
3. Які існують види осередку деформації при пресуванні за С.І. Губкіним?
4. З якою ціллю виконують пресування з «сорочкою»?
5. Чим відрізняється гідропресування та гідромеханічне пресування?

Практична робота 7

Розрахунок силових параметрів енергетичним методом в процесі зворотного пресування прутка

Вихідні дані (за варіантами в табл. Б.1 Додатка Б):

- 1) радіус заготовки b , висота калібруючого пояса пуансона l_k , мм;
- 2) матеріал заготовки;
- 3) три радіуси прес-виробу $a_n = 0,5a$; a ; $0,5(a + b)$;
- 4) три значення коефіцієнта тертя $\mu = 0$; $0,2$; $0,5$.

Знайти: тиск $p_{\text{об}}$ та зусилля $P_{\text{об}}$ зворотного пресування та побудувати графіки залежності $p_{\text{об}} = f(\mu)$ і $P_{\text{об}} = f(a_n)$.

Теоретичні відомості

Дивись теоретичні відомості в практичній роботі 5.

Порядок виконання практичної роботи

Прийняти $a_n = 0,5a$.

Прийняти кут $\gamma = 90^\circ$ (див. рис. 5.1, б у практичній роботі 5).

Розраховану величину накопиченої деформації матеріальними частками ϵ та знайдену величину напруження текучості σ_s для $a_n = 0,5a$ дивись, відповідно, в п. 5 та п. 6 у практичній роботі 5.

1. Відносні безрозмірні радіуси заготовки $\bar{R}$ та прес-виробу $\bar{r}$, висоту калібруючого пояску пуансона $\bar{l}_k$ розрахувати за формулами:

$$\bar{R} = \frac{b}{a_n}; \bar{r} = \frac{a_n}{a_n} = 1; \bar{l}_k = \frac{l_k}{a_n}.$$

2. Розрахувати три значення (див. рис. 5.1, б у практичній роботі 5) висоти осередку пластичної деформації $\bar{h}$ ($\bar{h} = h/a_n$) для трьох значень коефіцієнта тертя μ (див. вихідні дані до практики) за формулою:

$$\bar{h} = \sqrt{\frac{\left(0,5 + \mu \frac{\sin \gamma - \cos \gamma}{\sin \gamma + \cos \gamma}\right) [\bar{R}^4 (\ln \bar{R} - 0,75) + \bar{R}^2 - 0,25]}{(\bar{R}^2 - 1) \left[0,5(\bar{R}^2 + 1) \left(1 - 0,5 \left[1 - \frac{1}{\bar{R}}\right] \cos \gamma\right) - 0,5 + \mu \frac{\sin \gamma - \cos \gamma}{\sin \gamma + \cos \gamma}\right]}}.$$

3. Для трьох значень висоти осередку пластичної деформації $\bar{h}$ (див. п. 2) та відповідних їм трьох значень коефіцієнта тертя μ визначити три значення приведенного тиску зворотного пресування $\bar{p}_{o\bar{o}}$ за формулою:

$$\bar{p}_{o\bar{o}} = \frac{1,1}{\bar{R}^2 - 1} \left\{ \begin{aligned} &1,5(\bar{R}^2 - 1) + \bar{R}^2 \ln \bar{R} + \\ &+ \left[0,5(\bar{R}^2 + 1) \left(1 - 0,5 \left[1 - \frac{1}{\bar{R}}\right] \cos \gamma\right) - \right] \bar{h} + \\ &- 0,5 + \mu \frac{\sin \gamma - \cos \gamma}{\sin \gamma + \cos \gamma} \end{aligned} \right\} + \frac{\left(0,5 + \mu \frac{\sin \gamma - \cos \gamma}{\sin \gamma + \cos \gamma}\right) [\bar{R}^4 (\ln \bar{R} - 0,75) + \bar{R}^2 - 0,25]}{(\bar{R}^2 - 1)\bar{h}} + 2\mu l_k.$$

4. Визначити накопичену деформацію матеріальними частками за формулою (див. п. 5 в практичній роботі 2):

$$e = \ln \frac{b^2}{a_n^2}.$$

5. Знайти величину напруження текучості σ_s після підстановки знайденого у п. 4 значення накопиченої деформації матеріальними частками e в рівняння апроксимації кривої зміцнення, що найкраще описує експериментальні точки (див. п. 9 в практичній роботі 1).

6. Для трьох значень приведенного тиску зворотного пресування $\bar{p}_{o\bar{o}}$ (див. п. 3) визначити три значення тиску зворотного пресування $p_{o\bar{o}}$ за формулою:

$$p_{o\bar{o}} = \bar{p}_{o\bar{o}} \sigma_s.$$

де σ_s – напруження текучості, МПа (див. п. 5).

7. Розрахувати величину зусилля зворотного пресування $P_{o\bar{o}}$ за формулою:

$$P_{об} = p_{об}\pi(b^2 - a_n^2),$$

де $p_{об}$ – тиск зворотного пресування, МПа (див. п. 6).

8. Вихідні та розраховані значення параметрів занести до таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Вихідні та розраховані значення параметрів при $a_n = 0,5a$

μ	$h = \bar{h}a_n$, мм	$\bar{p}_{об}$	$p_{об}$, МПа	$P_{об}$, кН	p , МПа	P , кН
0						
0,2						
0,5						

Значення тиску p та зусилля P прямого пресування (передостання та остання колонки в табл. 7.1) взяти з табл. 5.1 (див. практичну роботу 5).

9. Прийняти $a_n = a$.

10. Виконати розрахунки аналогічні п. 1 – п. 7, але для $a_n = a$.

11. Вихідні та розраховані значення параметрів занести до таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – Вихідні та розраховані значення параметрів при $a_n = a$

μ	$h = \bar{h}a_n$, мм	$\bar{p}_{об}$	$p_{об}$, МПа	$P_{об}$, кН	p , МПа	P , кН
0						
0,2						
0,5						

Значення тиску p та зусилля P прямого пресування (передостання та остання колонки в табл. 7.2) взяти з табл. 5.2 (див. практичну роботу 5).

12. Прийняти $a_n = 0,5(a + b)$.

13. Виконати розрахунки аналогічні п. 1 – п. 7, але для $a_n = 0,5(a + b)$.

14. Вихідні та розраховані значення параметрів занести до таблиці 7.3.

Таблиця 7.3 – Вихідні та розраховані значення параметрів при $a_n = 0,5(a + b)$

μ	$h = \bar{h}a_n$, мм	$\bar{p}_{об}$	$p_{об}$, МПа	$P_{об}$, кН	p , МПа	P , кН
0						
0,2						
0,5						

Значення тиску p та зусилля P прямого пресування (передостання та остання колонки в табл. 7.3) взяти з табл. 5.3 (див. практичну роботу 5).

15. Побудувати графік залежності $p_{об} = f(\mu)$. На графіку має бути 3 криві (кожній кривій відповідає одне з трьох значень радіусу прес-ви-робу a_n). Побудувати графік $P_{(об)} = f(a_n)$ залежності зусиль зворотного та прямого пресування від радіусів прес-виробу a_n . На графіку має бути 6 кри-вих – по три криві зусиль зворотного та прямого пресування (кожній кривій відповідає одне з трьох значень коефіцієнта тертя μ). Графіки мають бути за величиною не менше ніж на 0,5 сторінки. Криві на графіках бажано показати різними кольорами. Дані для побудови графіків брати з табл. 7. 1 – 7.3.

Питання до самостійної підготовки

1. Чим відрізняються реактивні та активні сили тертя при зворот-ному пресуванні?
2. Представити схему зворотного пресування з активними силами тертя.
3. Чи є обмеження в довжині прес-виробу при зворотному пресу-ванні?
4. Чим можна пояснити меншу стійкість прес-штемпелю при зво-ротному пресуванні у порівнянні з прямим пресуванням?
5. Від яких параметрів залежить зусилля при зворотному пресу-ванні?

Практична робота 8

Розрахунок контейнера на міцність при прямому пресуванні

Вихідні дані (за варіантами в табл. Б.1 Додатка Б):

- 1) радіус заготовки b ;
- 2) матеріал контейнера – сталь марки 4Х2В, умовна межа текучості матеріалу $\sigma_{0,2} = 1050$ МПа, модуль пружності матеріалу $E = 210^5$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$;
- 3) зусилля прямого пресування P , кН при $a_n = a$ та $\mu = 0,2$ (див. табл. 5.2 у практичній роботі 5).

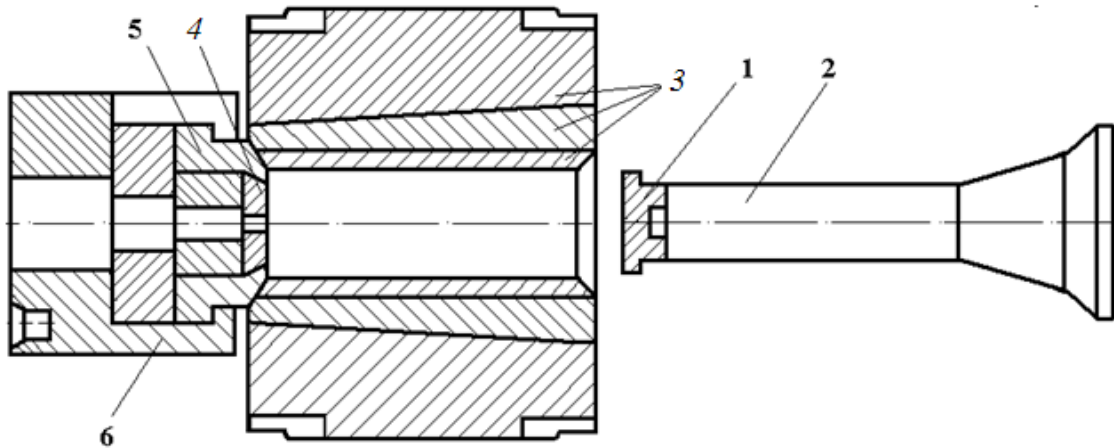
Знайти: розподіл напружень σ_r , σ_θ та переміщень u по поперечному перерізу стінки контейнера та побудувати епюри напружень σ_r , σ_θ та пере-міщень u .

Теоретичні відомості

Продуктивність пресових установок, якість та собівартість готових виробів значною мірою залежать від працездатності інструменту, вартість якого становить до 25 % вартості переділу пресового цеху. Працездатність

інструменту визначається його конструкцією, характеристиками міцності, властивостями інструментальних матеріалів, температурно-силовими умовами експлуатації та якістю його виготовлення [2].

Комплект пресового інструменту включає основний (контейнери, прес-штемплі, прес-шайби, матриці, матрицетримачі) і допоміжний інструмент (перехідні патрони, кільця підкладні, притискні пристрої та ін.). Схему збирання основного пресового інструменту горизонтального гідравлічного преса наведено на рис. 8.1.



*1 – прес-шайба; 2 – прес-штемпель; 3 – контейнер (збірний);
4 – матриця; 5 – матрицетримач;
6 – рухома (мундштучна) головка або інструментальна дошка*

Рисунок 8.1 – Схема зборки основного інструменту горизонтального гідравлічного прутковопрофільного преса

При проектуванні та експлуатації пресів потрібно грамотно розраховувати пресовий інструмент.

Контейнер преса (див. позицію 3 на рис. 8.1) служить для прийому злитків (заготовок), нагрітих до температури пресування. Він сприймає під час пресування тиск, необхідний для деформації зливка (заготовки) та отримання виробу заданого профілю. Контейнер – один із найбільш навантажених вузлів преса. Тому його міцність зумовлює температурно-швидкісні умови процесу, лімітує величини коефіцієнтів витяжки та розміри зливка.

Порядок виконання практичної роботи

Прийняти та розрахувати: $R_b = b$; $R_n = 5R_b$; $R_{cp} = 0,5(R_n + R_b)$.

1. Визначити тиск металу під час пресування на внутрішню поверхню контейнера p_k за формулою:

$$p_k = (0,6 \div 0,9) \frac{P}{\pi R_6^2},$$

де P – зусилля прямого пресування, кН (див. вихідні дані).

У цій формулі менші значення числового коефіцієнта (0,6) відносяться до погано пресованих матеріалів.

2. Розрахувати три значення радіального напруження σ_r при трьох значеннях радіусу $r = R_6; R_{cp}; R_H$ за формулою:

$$\sigma_r = \frac{p_k R_6^2}{R_H^2 - R_6^2} \left(1 - \frac{R_H^2}{r^2} \right).$$

3. Розрахувати три значення окружного напруження σ_θ при трьох значеннях радіусу $r = R_6; R_{cp}; R_H$ за формулою:

$$\sigma_\theta = \frac{p_k R_6^2}{R_H^2 - R_6^2} \left(1 + \frac{R_H^2}{r^2} \right).$$

4. Розрахувати три значення радіальних переміщень u при трьох значеннях радіусу $r = R_6; R_{cp}; R_H$ за формулою:

$$u = \frac{1 - \nu}{E} \frac{p_k R_6^2 r}{R_H^2 - R_6^2} + \frac{1 + \nu}{E} \frac{p_k R_6^2 R_H^2}{R_H^2 - R_6^2} \frac{1}{r},$$

де E – модуль пружності матеріалу (див. вихідні дані);

ν – коефіцієнт Пуассона (див. вихідні дані);

p_k – тиск металу під час пресування на внутрішню поверхню контейнера (див. п. 1).

5. Визначити еквівалентне напруження $\sigma_{еквIII}$ за третьою теорією міцності (теорія найбільших дотичних напружень) за формулою:

$$\sigma_{еквIII} = p_k \frac{2R_H^2}{R_H^2 - R_6^2}.$$

6. Розрахувати коефіцієнт запасу міцності n за формулою:

$$n = \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_{еквIII}},$$

де $\sigma_{0,2}$ – умовна межа текучості матеріалу (див. вихідні дані);

$\sigma_{еквIII}$ – еквівалентне напруження (див. п. 5).

7. Побудувати епюри напружень σ_r , σ_θ та переміщень u з урахуванням розрахованих значень цих напружень та переміщень у п. 2 – 4 (зразок оформлення див. на рис. 8.2 праворуч). При цьому контейнер на вигляді зверху (або поперечному перерізі) повинен бути представлений в масштабі і не менше, ніж на 0,5 сторінки зошита.

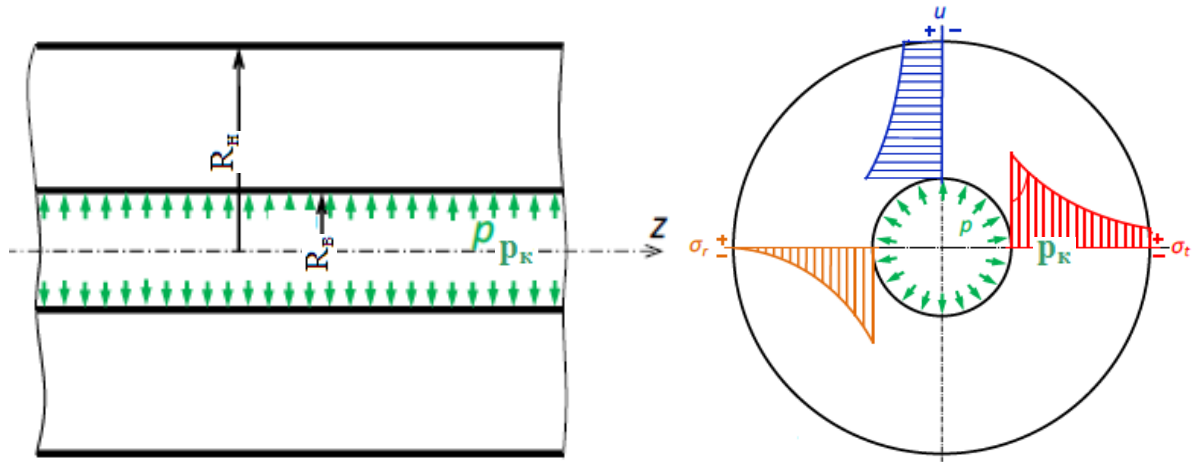


Рисунок 8.2 – Схема матриці під впливом тиску металу при пресуванні на внутрішню поверхню контейнера p_k у поздовжньому перерізі (ліворуч) та у поперечному перерізі (праворуч) з прикладами побудованих епюр напружень σ_r , σ_θ та переміщень u

Питання до самостійної підготовки

1. Чому контейнер – один із найбільш навантажених інструментів?
2. Навіщо будують епюри напружень σ_r , σ_θ та переміщень u ?
3. Навіщо розраховують еквівалентне напруження $\sigma_{еквIII}$?
4. Яка різниця між матрицею та контейнером?
5. Яка різниця між збірним (бандажованим) та цільним контейнером?

Практична робота 9

Розрахунок бандажованого контейнера на міцність при прямому пресуванні

Вихідні дані:

- 1) радіус отвору у контейнері R_v та зовнішній радіус контейнера R_n (див. Практичну роботу 8);
- 2) матеріал втулок контейнера – сталь марки 4Х2В, умовна межа текучості матеріалу $\sigma_{0,2} = 1050$ МПа, модуль пружності матеріалу $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, коефіцієнт температурного розширення $\alpha = 12,5 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$;

3) тиск металу під час пресування на внутрішню поверхню контейнера p_k (див. п. 1 у практичній роботі 8).

Знайти: внутрішній радіус зовнішньої втулки контейнера R_c , значення необхідного натягу δ , контактний тиск між зовнішньою та внутрішньою втулками контейнера p_c .

Теоретичні відомості

Основний тип контейнерів горизонтальних гідравлічних пресів – збірні (багатошарові) конструкції з двох – чотирьох (до шести) втулок, посаджених одна на одну з відповідним натягом. Така конструкція контейнера має такі переваги в порівнянні з монолітною (одношаровою):

1) збірна конструкція дозволяє при зносі замінювати лише внутрішню робочу втулку, а решту контейнера тривало експлуатувати без заміни;

2) застосування багатошарової конструкції з попереднім натягом втулок вирівнює розподіл напруження по товщині контейнера, що виникають у процесі пресування, тим самим підвищуючи його міцність та раціональне використання матеріалу втулок.

Порядок виконання практичної роботи

1. Визначити еквівалентне напруження $\sigma_{\text{екв}}$ за формулою:

$$\sigma_{\text{екв}} = p_k \frac{R_n}{R_n - R_g}.$$

2. Розрахувати коефіцієнт запасу міцності n за формулою:

$$n = \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_{\text{екв}}}.$$

Повинна виконуватись умова: $n \geq [n]$.

А допустиме значення коефіцієнта запасу міцності $[n] = 1,3 \div 2,0$.

Якщо коефіцієнт запасу міцності n недостатній, необхідно збільшити значення радіусу R_n та повторити розрахунок.

3. Визначити зовнішній радіус внутрішньої втулки контейнера R_c за формулою:

$$R_c = \sqrt{R_g R_n}.$$

4. Розрахувати значення необхідного натягу δ за формулою:

$$\delta = p_k \frac{2R_c R_n^2 (R_c^2 - R_g^2)}{E [R_n^2 (R_c^2 - R_g^2) + R_c^2 (R_n^2 - R_g^2)]}.$$

5. Визначити внутрішній радіус зовнішньої втулки контейнера $R_{сн}$ за формулою:

$$R_{сн} = R_c - \delta.$$

6. Розрахувати контактний тиск p_c між зовнішньою та внутрішньою втулками контейнера за формулою:

$$p_c = \frac{\delta E (R_n^2 - R_c^2)(R_c^2 - R_e^2)}{2R_c^3 (R_n^2 - R_e^2)}.$$

7. Визначити температуру нагрівання зовнішньої втулки Δt для забезпечення зборки з вибраним натягом δ за формулою:

$$\Delta t = \frac{\delta}{R_c} \frac{1}{\alpha} + (100 \div 150),$$

де α – коефіцієнт температурного розширення, $1/^\circ\text{C}$ (див. вихідні дані).

Розрахункове значення температури нагрівання зовнішньої втулки Δt не повинно перевищувати граничних значень – $500 \div 550^\circ\text{C}$.

Питання до самостійної підготовки

1. Які переваги та недоліки у бандажованого контейнера перед монолітним?
2. Як здійснюється зборка окремих частин бандажованого контейнера?
3. Які існують способи отримання в з'єднанні посадки з натягом?
4. Як розраховуються геометричні розміри контейнера?
5. Горизонтальні та вертикальні гідравлічні преса, які використовують для пресування.

Практична робота 10

Розрахунок на міцність контейнера із двох втулок при прямому пресуванні

Вихідні дані:

- 1) радіус отвору у контейнері R_v та зовнішній радіус контейнера R_n (див. Практичну роботу 8);
- 2) матеріал робочої (внутрішньої) 1^{ої} втулки контейнера – сталь марки 4Х2В з умовною межею текучості матеріалу $\sigma_{0,2} = 1050$ МПа, матеріал

зовнішньої 2^{ої} втулки контейнера – сталь марки 5ХНМ з умовною межею текучості матеріалу $\sigma_{0,2(2)} = 700$ МПа;

3) модулі пружності матеріалів обох втулок контейнера $E_1 = E_2 = 2 \cdot 10^5$ МПа; коефіцієнт температурного розширення $\alpha = 12,5 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$;

4) тиск металу під час пресування на внутрішню поверхню контейнера p_k (див. п. 1 у практичній роботі 8).

Знайти: еквівалентне напруження $\sigma_{\text{екв1}}$ і $\sigma_{\text{екв2}}$ на поверхнях втулок контейнера і побудувати епюри їхнього розподілу за товщиною втулок контейнера.

Теоретичні відомості

Розрахунок бандажованого контейнера на міцність зводиться до визначення еквівалентних напружень, що виникають на поверхнях сполучення втулок при його експлуатації, та оцінки умови міцності (рис. 10.1).

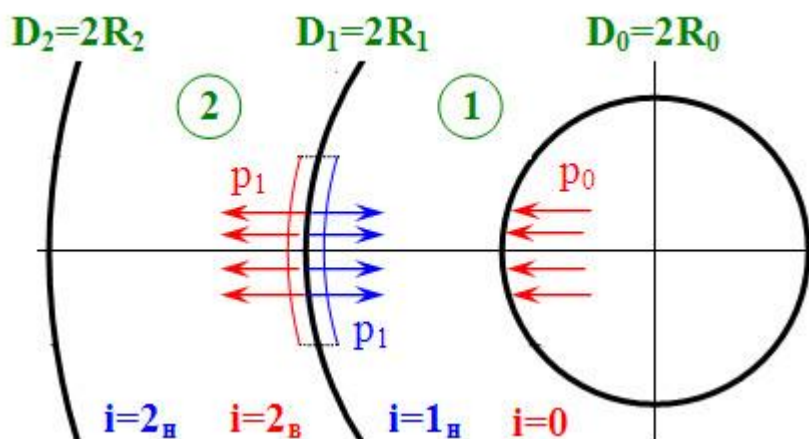


Рисунок 10.1 – Схема навантаження бандажованого контейнера (що складається з двох втулок) та позначення розрахункових поверхонь

Графічною ілюстрацією результатів розрахунку еквівалентних напружень є епюра їхнього розподілу за товщиною втулок контейнера (рис. 10.2). Вид епюри дозволяє зробити висновок про рівномірність навантаження на втулки і намітити, за необхідності, шляхи вирівнювання напруження – змінити величину натягів між втулками, діаметри втулок і т. д.

Порядок виконання практичної роботи

Прийняти та розрахувати (див. рис. 10.1):

– внутрішній та зовнішній діаметри бандажованого контейнера $D_0 = 2R_0 = 2R_в$; $D_2 = 2R_2 = 10R_в$, мм;

- тиск при прямому пресуванні металу на внутрішню поверхню бандажованого контейнера $p_0 = p_k$, МПа;
- величину натягу для забезпечення з'єднання внутрішньої та зовнішньої втулок контейнера за необхідною посадкою з натягом $2\delta = 0,3$ мм.

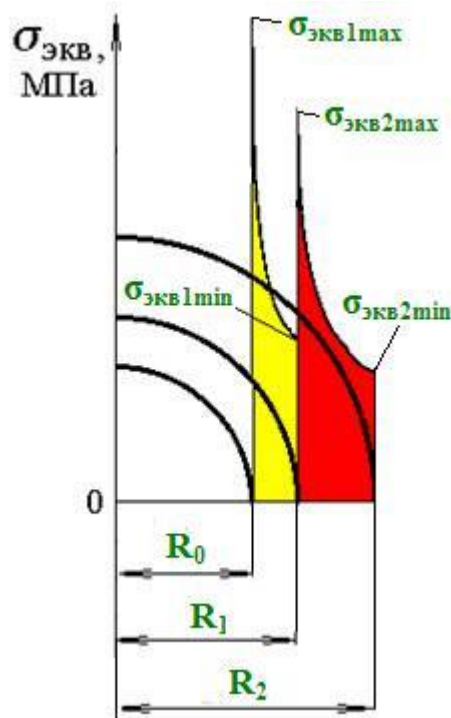


Рисунок 10.2 – Епюра еквівалентного напруження в бандажованому контейнері (що складається з двох втулок)

1. Визначити діаметр сполучення двох втулок бандажованого контейнера D_1 (мм) за формулою:

$$D_1 = 2R_1 = 4R_g,$$

де $R_g = R_0$ – радіус отвору в контейнері (значення внутрішнього радіусу робочої втулки контейнера див. в вихідних даних).

2. Визначити температуру нагрівання зовнішньої втулки Δt ($^{\circ}\text{C}$) для забезпечення зборки з вибраним натягом 2δ за формулою:

$$\Delta t = \frac{2\delta}{D_1} \frac{1}{\alpha} + (100 \div 150),$$

де α – коефіцієнт температурного розширення, $1/^{\circ}\text{C}$ (див. вихідні дані).

Розрахункове значення температури нагрівання зовнішньої втулки Δt не повинно перевищувати граничних значень – $500 \div 550^{\circ}\text{C}$.

3. Розрахувати контактний тиск p_1 (МПа) на поверхнях сполучення втулок контейнера після їх гарячої зборки за формулою:

$$p_1 = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2} \frac{2\delta}{D_1} \frac{(D_2^2 - D_1^2)(D_1^2 - D_0^2)}{2D_1^2(D_2^2 - D_0^2)}.$$

4. Для внутрішньої поверхні ($i = 0$; $D_0 = 2R_0$) внутрішньої (робочої) 1^{ої} втулки контейнера розрахувати тангенціальні $\sigma_{\theta 1в}$ та радіальні $\sigma_{r1в}$ напруження (МПа) від дії внутрішнього тиску p_0 (за умови відсутності всіх зовнішніх тисків на втулки контейнера) відповідно за формулами:

$$\sigma_{\theta 1в} = \left(1 + \frac{D_2^2}{D_0^2}\right) \frac{p_0 D_0^2}{D_2^2 - D_0^2}; \quad (10.1)$$

$$\sigma_{r1в} = \left(1 - \frac{D_2^2}{D_0^2}\right) \frac{p_0 D_0^2}{D_2^2 - D_0^2}. \quad (10.2)$$

5. Для внутрішньої поверхні ($i = 0$; $D_0 = 2R_0$) внутрішньої (робочої) 1^{ої} втулки контейнера розрахувати тангенціальні $\sigma_{\theta 1н}$ та радіальні $\sigma_{r1н}$ напруження (МПа) від дії зовнішнього тиску p_1 (за умови відсутності всіх внутрішніх тисків на втулки контейнера) відповідно за формулами:

$$\sigma_{\theta 1н} = -\left(1 + \frac{D_0^2}{D_1^2}\right) \frac{p_1 D_1^2}{D_1^2 - D_0^2}; \quad (10.3)$$

$$\sigma_{r1н} = -\left(1 - \frac{D_0^2}{D_1^2}\right) \frac{p_1 D_1^2}{D_1^2 - D_0^2}, \quad (10.4)$$

де p_1 – контактний тиск на поверхнях сполучення втулок контейнера після їх гарячої зборки (див. п. 3), МПа.

6. Тангенціальні $\sigma_{\theta 1}$ та радіальні σ_{r1} напруження розрахувати алгебраїчним підсумовуванням напружень, знайдених, відповідно, за формулами (10.1) та (10.3), (10.2) та (10.4):

$$\sigma_{\theta 1} = \sigma_{\theta 1в} + \sigma_{\theta 1н}; \quad (10.5)$$

$$\sigma_{r1} = \sigma_{r1в} + \sigma_{r1н}. \quad (10.6)$$

7. З урахуванням знайдених у п. 6 результуючих тангенціальних $\sigma_{\theta 1}$ та радіальних σ_{r1} напружень (див. формули (10.5) та (10.6)) визначити еквівалентні напруження $\sigma_{\text{екв1}}$ (МПа) на поверхні втулки контейнера $i = 0$ за четвертою (енергетичною) теорією міцності для плоского напруженого стану за формулою:

$$\sigma_{\text{экв1}} = \sqrt{\sigma_{\theta1}^2 + \sigma_{r1}^2 - \sigma_{\theta1}\sigma_{r1}}. \quad (10.7)$$

8. Для зовнішньої поверхні ($i = 1_{\text{н}}$; $D_1 = 2R_1$) внутрішньої (робочої) 1^{ої} втулки контейнера розрахувати тангенціальні $\sigma_{\theta1\text{в}}$ та радіальні $\sigma_{r1\text{в}}$ напруження (МПа) від дії внутрішнього тиску p_0 (за умови відсутності всіх зовнішніх тисків на втулки контейнера) відповідно за формулами:

$$\sigma_{\theta1\text{в}} = \left(1 + \frac{D_2^2}{D_1^2}\right) \frac{p_0 D_0^2}{D_2^2 - D_0^2}; \quad (10.8)$$

$$\sigma_{r1\text{в}} = \left(1 - \frac{D_2^2}{D_1^2}\right) \frac{p_0 D_0^2}{D_2^2 - D_0^2}. \quad (10.9)$$

9. Для зовнішньої поверхні ($i = 1_{\text{н}}$; $D_1 = 2R_1$) внутрішньої (робочої) 1^{ої} втулки контейнера розрахувати тангенціальні $\sigma_{\theta1\text{н}}$ та радіальні $\sigma_{r1\text{н}}$ напруження (МПа) від дії зовнішнього тиску p_1 (за умови відсутності всіх внутрішніх тисків на втулки контейнера) відповідно за формулами:

$$\sigma_{\theta1\text{н}} = -\left(1 + \frac{D_0^2}{D_1^2}\right) \frac{p_1 D_1^2}{D_1^2 - D_0^2}; \quad (10.10)$$

$$\sigma_{r1\text{н}} = -\left(1 - \frac{D_0^2}{D_1^2}\right) \frac{p_1 D_1^2}{D_1^2 - D_0^2}, \quad (10.11)$$

де p_1 – контактний тиск на поверхнях сполучення втулок контейнера після їх гарячої зборки (див. п. 3), МПа.

10. Тангенціальні $\sigma_{\theta1}$ та радіальні σ_{r1} напруження розрахувати алгебраїчним підсумовуванням напружень, знайдених, відповідно, за формулами (10.8) та (10.10), (10.9) та (10.11):

$$\sigma_{\theta1} = \sigma_{\theta1\text{в}} + \sigma_{\theta1\text{н}}; \quad (10.12)$$

$$\sigma_{r1} = \sigma_{r1\text{в}} + \sigma_{r1\text{н}}. \quad (10.13)$$

11. З урахуванням знайдених у п. 10 результуючих тангенціальних $\sigma_{\theta1}$ та радіальних σ_{r1} напружень (див. формули (10.12) та (10.13)) визначити еквівалентні напруження $\sigma_{\text{экв1}}$ (МПа) на поверхні втулки контейнера $i = 1_{\text{н}}$ за четвертою (енергетичною) теорією міцності для плоского напруженого стану за формулою:

$$\sigma_{\text{экв1}} = \sqrt{\sigma_{\theta1}^2 + \sigma_{r1}^2 - \sigma_{\theta1}\sigma_{r1}}. \quad (10.14)$$

12. Визначити коефіцієнт запасу міцності для 1^{ої} втулки n_1 за формулою:

$$n_1 = \frac{\sigma_{0,2(1)}}{\sigma_{\text{экв1max}}}, \quad (10.15)$$

де $\sigma_{0,2(1)}$ – умовна межа текучості матеріалу робочої (внутрішньої) 1^{ої} втулки контейнера з 4Х2В (див. вихідні дані), МПа;

$\sigma_{\text{экв1max}}$ – максимальна величина з двох раніше розрахованих (див. формули (10.7) та (10.14)) еквівалентних напружень, відповідно, на поверхнях $i = 0$ і $i = 1_n$.

Повинна виконуватись умова: $n_1 \geq [n]$.

А допустиме значення коефіцієнта запасу міцності $[n] = 1,3 \div 2,0$.

13. Для внутрішньої поверхні ($i = 2_b$; $D_1 = 2R_1$) зовнішньої 2^{ої} втулки контейнери розрахувати тангенціальні $\sigma_{\theta 2_b}$ та радіальні $\sigma_{r 2_b}$ напруження (МПа) від дії внутрішнього тиску p_0 та контактного тиску p_1 на поверхнях сполучення втулок контейнера (за умови відсутності всіх зовнішніх тисків на втулки контейнера) відповідно за формулами:

$$\sigma_{\theta 2_b} = \left(1 + \frac{D_2^2}{D_1^2}\right) \left(\frac{p_0 D_0^2}{D_2^2 - D_0^2} + \frac{p_1 D_1^2}{D_2^2 - D_1^2}\right); \quad (10.16)$$

$$\sigma_{r 2_b} = \left(1 - \frac{D_2^2}{D_1^2}\right) \left(\frac{p_0 D_0^2}{D_2^2 - D_0^2} + \frac{p_1 D_1^2}{D_2^2 - D_1^2}\right). \quad (10.17)$$

14. На внутрішній поверхні ($i = 2_b$; $D_1 = 2R_1$) зовнішньої 2^{ої} втулки контейнера тангенціальні $\sigma_{\theta 2_n}$ та радіальні $\sigma_{r 2_n}$ напруження (МПа) дорівнюють 0, тому що у зовнішній втулці контейнера 2 відсутній зовнішній тиск (за умови відсутності всіх внутрішніх тисків на втулки контейнера), тобто.

$$\sigma_{\theta 2_n} = 0; \quad (10.18)$$

$$\sigma_{r 2_n} = 0. \quad (10.19)$$

15. Тангенціальні $\sigma_{\theta 2}$ та радіальні $\sigma_{r 2}$ напруження розрахувати алгебраїчним підсумовуванням напружень, знайдених, відповідно, за формулами (10.16) та (10.18), (10.17) та (10.19):

$$\sigma_{\theta 2} = \sigma_{\theta 2_b} + \sigma_{\theta 2_n}; \quad (10.20)$$

$$\sigma_{r 2} = \sigma_{r 2_b} + \sigma_{r 2_n}. \quad (10.21)$$

16. З урахуванням знайдених у п. 15 результуючих тангенціальних $\sigma_{\theta 2}$ та радіальних $\sigma_{r 2}$ напружень (див. формули (10.20) та (10.21)) визначити еквівалентне напруження $\sigma_{\text{экв2}}$ (МПа) на поверхні втулки контейнера $i = 2_b$ за четвертою (енергетичною) теорією міцності для плоского напруженого стану за формулою:

$$\sigma_{\text{экв}2} = \sqrt{\sigma_{\theta 2}^2 + \sigma_{r 2}^2 - \sigma_{\theta 2} \sigma_{r 2}}. \quad (10.22)$$

17. Для зовнішньої поверхні ($i = 2_{\text{н}}; D_2 = 2R_2$) зовнішньої 2^{ої} втулки контейнера розрахувати тангенціальні $\sigma_{\theta 2\text{в}}$ та радіальні $\sigma_{r 2\text{в}}$ напруження (МПа) від дії внутрішнього тиску p_0 та контактного тиску p_1 на поверхнях сполучення втулок контейнера (за умови відсутності всіх зовнішніх тисків на втулки контейнера) відповідно за формулами

$$\sigma_{\theta 2\text{в}} = \left(1 + \frac{D_2^2}{D_2^2}\right) \left(\frac{p_0 D_0^2}{D_2^2 - D_0^2} + \frac{p_1 D_1^2}{D_2^2 - D_1^2}\right); \quad (10.23)$$

$$\sigma_{r 2\text{в}} = \left(1 - \frac{D_2^2}{D_2^2}\right) \left(\frac{p_0 D_0^2}{D_2^2 - D_0^2} + \frac{p_1 D_1^2}{D_2^2 - D_1^2}\right). \quad (10.24)$$

18. На зовнішній поверхні ($i = 2_{\text{н}}; D_2 = 2R_2$) зовнішньої 2^{ої} втулки контейнера тангенціальні $\sigma_{\theta 2\text{н}}$ та радіальні $\sigma_{r 2\text{н}}$ напруження (МПа) дорівнюють 0, тому що у зовнішній 2^{ій} втулці контейнера відсутній зовнішній тиск (за умови відсутності всіх внутрішніх тисків на втулки контейнера), тобто:

$$\sigma_{\theta 2\text{н}} = 0; \quad (10.25)$$

$$\sigma_{r 2\text{н}} = 0. \quad (10.26)$$

19. Тангенціальні $\sigma_{\theta 2}$ та радіальні $\sigma_{r 2}$ напруження розрахувати алгебраїчним підсумовуванням напружень, знайдених, відповідно, за формулами (10.23) та (10.25), (10.24) та (10.26):

$$\sigma_{\theta 2} = \sigma_{\theta 2\text{в}} + \sigma_{\theta 2\text{н}}; \quad (10.27)$$

$$\sigma_{r 2} = \sigma_{r 2\text{в}} + \sigma_{r 2\text{н}}. \quad (10.28)$$

20. З урахуванням знайдених у п. 19 результуючих тангенціальних $\sigma_{\theta 2}$ та радіальних $\sigma_{r 2}$ напружень (див. формули (10.27) та (10.28)) визначити еквівалентні напруження $\sigma_{\text{экв}2}$ (МПа) на поверхні втулки контейнера $i = 2_{\text{н}}$ за четвертою (енергетичною) теорією міцності для плоского напруженого стану за формулою:

$$\sigma_{\text{экв}2} = \sqrt{\sigma_{\theta 2}^2 + \sigma_{r 2}^2 - \sigma_{\theta 2} \sigma_{r 2}}. \quad (10.29)$$

21. Визначити коефіцієнт запасу міцності для 2^{ої} втулки n_2 за формулою:

$$n_2 = \frac{\sigma_{0,2(2)}}{\sigma_{\text{экв}2\text{max}}}, \quad (10.30)$$

де $\sigma_{0,2(2)}$ – умовна межа текучості матеріалу зовнішньої 2^{ої} втулки контейнера з 5ХНМ (див. вихідні дані), МПа;

$\sigma_{\text{экв}2\text{max}}$ – максимальна величина з двох раніше розрахованих (див. формули (10.22) та (10.29)) еквівалентних напружень, відповідно, на поверхнях $i = 2_{\text{в}}$ і $i = 2_{\text{н}}$.

Повинна виконуватись умова: $n_2 \geq [n]$.

А допустиме значення коефіцієнта запасу міцності $[n] = 1,3 \div 2,0$.

22. Побудувати епюри розподілу еквівалентних напружень $\sigma_{\text{экв}1}$ і $\sigma_{\text{экв}2}$ (див. результати розрахунків еквівалентних напружень у п. 7, п. 11, п. 16 і п. 20) по товщині двох втулок контейнера. Зразок оформлення див. рис. 10.2.

23. Порівняти максимальні величини еквівалентних напружень $\sigma_{\text{экв}1\text{max}}$ і $\sigma_{\text{экв}2\text{max}}$ з величиною еквівалентного напруження $\sigma_{\text{эквIII}}$ у контейнері з однією втулкою (див. п. 5 в практичній роботі 8) та з величиною еквівалентних напружень $\sigma_{\text{экв}}$ у контейнері із двох втулок, але з одного матеріалу 4Х2В (див. п. 1 в практичній роботі 9).

Питання до самостійної підготовки

1. Яка з двох втулок контейнера (внутрішня чи зовнішня) більш навантажена в процесі прямого пресування?
2. Що може статися з бандажованим контейнером, якщо навантаження перевищать граничні?
3. Яка з двох втулок контейнера (внутрішня чи зовнішня) має більші поперечні розміри?
4. Навіщо розраховують коефіцієнт запасу міцності n ?
5. Матеріал 1^{ої} або 2^{ої} втулки контейнера є більш міцним і чому?

Практична робота 11

Розрахунок на міцність контейнера із трьох втулок при прямому пресуванні

Вихідні дані:

1) радіус отвору у контейнері $R_{\text{в}}$ та зовнішній радіус контейнера $R_{\text{н}}$ (див. Практичну роботу 8);

2) матеріал робочої (внутрішньої) 1^{ої} втулки контейнера – сталь марки 4Х2В з умовною межею текучості матеріалу $\sigma_{0,2} = 1050$ МПа, матеріал проміжної 2^{ої} та зовнішньої 3^{ої} втулки контейнера – сталь марки 5ХНМ з умовною межею текучості матеріалу $\sigma_{0,2(2)} = \sigma_{0,2(3)} = 700$ МПа;

3) модулі пружності матеріалів всіх втулок контейнера $E_1 = E_2 = E_3 = 2 \cdot 10^5$ МПа; коефіцієнт температурного розширення $\alpha = 12,5 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$;

4) тиск металу під час пресування на внутрішню поверхню контейнера $p_0 = p_k$ (див. Практичну роботу 10).

Знайти: еквівалентні напруження $\sigma_{\text{екв}1}$, $\sigma_{\text{екв}2}$ і $\sigma_{\text{екв}3}$ на поверхнях втулок контейнера і побудувати епюри їхнього розподілу за товщиною втулок контейнера.

Теоретичні відомості

Схема навантаження бандажованого контейнера, що складається з трьох втулок – 1^{ої} внутрішньої (робочої), 2^{ої} проміжної та 3^{ої} зовнішньої (рис. 11.1).

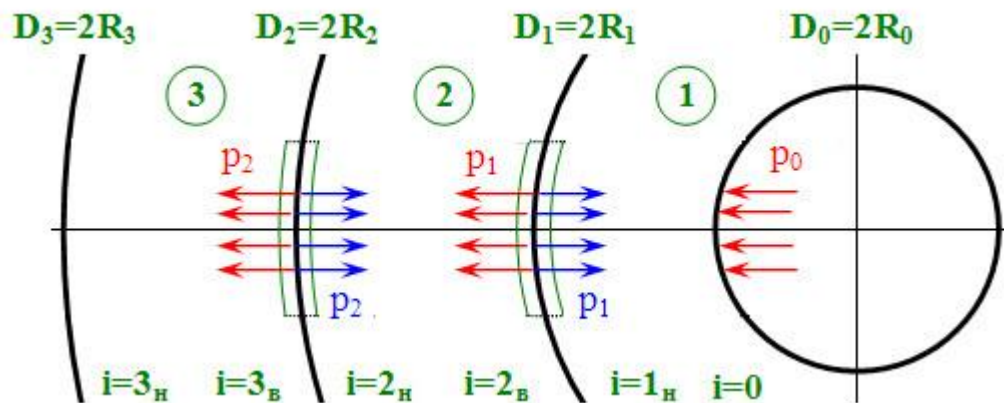


Рисунок 11.1 – Схема навантаження бандажованого контейнера (що складається з трьох втулок) та позначення розрахункових поверхонь

Графічною ілюстрацією результатів розрахунку еквівалентних напружень є епюра їхнього розподілу за товщиною втулок контейнера (рис. 11.2).

Порядок виконання практичної роботи

Прийняти та розрахувати (див. рис. 11.1):

– внутрішній та зовнішній діаметри бандажованого контейнера $D_0 = 2R_0 = 2R_b$; $D_3 = 2R_3 = 10R_e$, мм;

– величину натягу для забезпечення з'єднання 1^{ої} внутрішньої і 2^{ої} проміжної втулок контейнера по посадці з натягом $2\delta_1 = 0,2$ мм;

– величину натягу для забезпечення з'єднання 2^{ої} проміжної і 3^{ої} зовнішньої втулок контейнера по посадці з натягом $2\delta_2 = 0,1$.

1. Визначити діаметр сполучення 1^{ої} внутрішньої і 2^{ої} проміжної втулок бандажованого контейнера D_1 (мм) за формулою:

$$D_1 = 2R_1 = 4R_e,$$

де $R_0 = R_0$ – радіус отвору в контейнері (внутрішній радіус робочої втулки контейнера, див. вихідні дані).

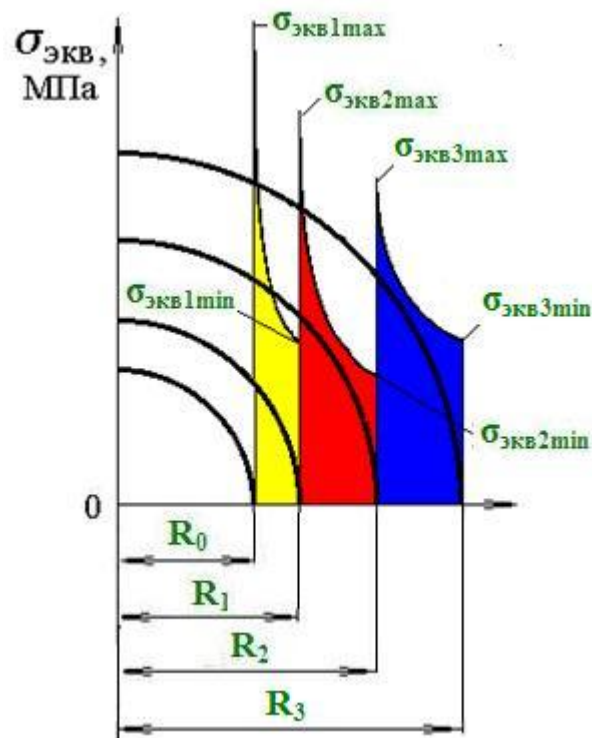


Рисунок 11.2 – Епюра еквівалентних напружень у бандажованому контейнері (що складається з трьох втулок)

Визначити діаметр сполучення 2^{ої} проміжної та 3^{ої} зовнішньої втулок бандажованого контейнера D_2 (мм) за формулою:

$$D_2 = 2R_2 = 7R_0.$$

2. Визначити температуру нагрівання 2^{ої} проміжної втулки Δt_1 ($^{\circ}\text{C}$) для забезпечення посадки її на внутрішню 1^у втулку з обраним натягом $2\delta_1$ за формулою:

$$\Delta t_1 = \frac{2\delta_1}{D_1} \frac{1}{\alpha} + (100 \div 150),$$

де α – коефіцієнт температурного розширення, $\frac{1}{^{\circ}\text{C}}$ (див. вихідні дані).

Визначити температуру нагрівання 3^{ої} зовнішньої втулки Δt_2 ($^{\circ}\text{C}$) для забезпечення посадки її на раніше зібрані по посадці з натягом 3^у внутрішню і 3^у проміжну втулки з обраним натягом $2\delta_2$ за формулою:

$$\Delta t_2 = \frac{2\delta_2}{D_2} \frac{1}{\alpha} + (100 \div 150).$$

Розрахункові значення температури нагрівання Δt_1 і Δt_2 не повинні перевищувати граничних значень – $500 \div 550$ °С.

3. Розрахувати контактний тиск p_1 (МПа) на поверхнях сполучення 1^{ов} внутрішньої і 2^{ов} проміжної втулок контейнера після їх гарячої зборки за формулою:

$$p_1 = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2} \frac{2\delta_1}{D_1} \frac{(D_2^2 - D_1^2)(D_1^2 - D_0^2)}{2D_1^2(D_2^2 - D_0^2)}.$$

Визначити контактний тиск p_2 (МПа) на поверхнях сполучення 2^{ов} проміжної та 3^{ов} зовнішньої втулок контейнера після гарячої зборки за формулою:

$$p_2 = \frac{2E_2E_3}{E_2 + E_3} \frac{2\delta_2}{D_2} \frac{(D_3^2 - D_2^2)(D_2^2 - D_1^2)}{2D_2^2(D_3^2 - D_1^2)}.$$

4. Для внутрішньої поверхні ($i = 0$; $D_0 = 2R_0$) 1^{ов} внутрішньої (робочої) втулки контейнера розрахувати тангенціальні $\sigma_{\theta_{1в}}$ та радіальні $\sigma_{r_{1в}}$ напруження (МПа) від дії внутрішнього тиску p_0 (за умови відсутності всіх зовнішніх тисків на втулки контейнера) відповідно за формулами:

$$\sigma_{\theta_{1в}} = \left(1 + \frac{D_3^2}{D_0^2}\right) \frac{p_0 D_0^2}{D_3^2 - D_0^2}; \quad (11.1)$$

$$\sigma_{r_{1в}} = \left(1 - \frac{D_3^2}{D_0^2}\right) \frac{p_0 D_0^2}{D_3^2 - D_0^2}. \quad (11.2)$$

5. Для внутрішньої поверхні ($i = 0$; $D_0 = 2R_0$) 1^{ов} внутрішньої (робочої) втулки контейнера розрахувати тангенціальні $\sigma_{\theta_{1н}}$ та радіальні $\sigma_{r_{1н}}$ напруження (МПа) від дії зовнішніх контактних тисків p_1 і p_2 (див. п. 3) відповідно до формул (за умови відсутності всіх внутрішніх тисків на втулки контейнера):

$$\sigma_{\theta_{1н}} = -\left(1 + \frac{D_0^2}{D_1^2}\right) \left(\frac{p_1 D_1^2}{D_1^2 - D_0^2} + \frac{p_2 D_2^2}{D_2^2 - D_0^2}\right); \quad (11.3)$$

$$\sigma_{r_{1н}} = -\left(1 - \frac{D_0^2}{D_1^2}\right) \left(\frac{p_1 D_1^2}{D_1^2 - D_0^2} + \frac{p_2 D_2^2}{D_2^2 - D_0^2}\right). \quad (11.4)$$

6. Тангенціальні $\sigma_{\theta 1}$ та радіальні $\sigma_{r 1}$ напруження розрахувати алгебраїчним підсумовуванням напружень, знайдених, відповідно, за формулами (11.1) та (11.3), (11.2) та (11.4):

$$\sigma_{\theta 1} = \sigma_{\theta 1\epsilon} + \sigma_{\theta 1н}; \quad (11.5)$$

$$\sigma_{r 1} = \sigma_{r 1\epsilon} + \sigma_{r 1н}. \quad (11.6)$$

7. З урахуванням знайдених у п. 6 результуючих тангенціальних $\sigma_{\theta 1}$ та радіальних $\sigma_{r 1}$ напружень (див. формули (11.5) та (11.6)) визначити еквівалентні напруження $\sigma_{\epsilon KB 1}$ (МПа) на поверхні 1^{ої} внутрішньої втулки контейнера $i = 0$ за четвертою (енергетичною) теорією міцності для плоского напруженого стану за формулою:

$$\sigma_{\epsilon KB 1} = \sqrt{\sigma_{\theta 1}^2 + \sigma_{r 1}^2 - \sigma_{\theta 1} \sigma_{r 1}}. \quad (11.7)$$

8. Для зовнішньої поверхні ($i = 1н$; $D_1 = 2R_1$) 1^{ої} внутрішньої (робочої) втулки контейнера розрахувати тангенціальні $\sigma_{\theta 1\epsilon}$ та радіальні $\sigma_{r 1\epsilon}$ напруження (МПа) від дії внутрішнього тиску p_0 (за умови відсутності всіх зовнішніх тисків на втулки контейнера) відповідно за формулами:

$$\sigma_{\theta 1\epsilon} = \left(1 + \frac{D_3^2}{D_1^2}\right) \frac{p_0 D_0^2}{D_3^2 - D_0^2}; \quad (11.8)$$

$$\sigma_{r 1\epsilon} = \left(1 - \frac{D_3^2}{D_1^2}\right) \frac{p_0 D_0^2}{D_3^2 - D_0^2}. \quad (11.9)$$

9. Для зовнішньої поверхні ($i = 1н$; $D_1 = 2R_1$) 1^{ої} внутрішньої (робочої) втулки контейнера розрахувати тангенціальні $\sigma_{\theta 1н}$ та радіальні $\sigma_{r 1н}$ напруження (МПа) від дії зовнішніх контактних тисків p_1 і p_2 (див. п. 3) відповідно до формул (за умови відсутності всіх внутрішніх тисків на втулки контейнера):

$$\sigma_{\theta 1н} = - \left(1 + \frac{D_0^2}{D_1^2}\right) \left(\frac{p_1 D_1^2}{D_1^2 - D_0^2} + \frac{p_2 D_2^2}{D_2^2 - D_0^2} \right); \quad (11.10)$$

$$\sigma_{r 1н} = - \left(1 - \frac{D_0^2}{D_1^2}\right) \left(\frac{p_1 D_1^2}{D_1^2 - D_0^2} + \frac{p_2 D_2^2}{D_2^2 - D_0^2} \right). \quad (11.11)$$

10. Тангенціальні $\sigma_{\theta 1}$ та радіальні $\sigma_{r 1}$ напруження розрахувати алгебраїчним підсумовуванням напружень, знайдених, відповідно, за формулами (11.8) та (11.10), (11.9) та (11.11):

$$\sigma_{\theta 1} = \sigma_{\theta 1\epsilon} + \sigma_{\theta 1н}; \quad (11.12)$$

$$\sigma_{r 1} = \sigma_{r 1\epsilon} + \sigma_{r 1н}. \quad (11.13)$$

11. З урахуванням знайдених у п. 10 результуючих тангенціальних $\sigma_{\theta 1}$ та радіальних σ_{r1} напружень (див. формули (11.12) та (11.13)) визначити еквівалентні напруження $\sigma_{\text{екв}1}$ (МПа) на поверхні 1^{ої} внутрішньої втулки контейнера $i = 1_{\text{н}}$ за четвертою (енергетичною) теорією міцності для плоского напруженого стану за формулою:

$$\sigma_{\text{екв}1} = \sqrt{\sigma_{\theta 1}^2 + \sigma_{r1}^2 - \sigma_{\theta 1}\sigma_{r1}}. \quad (11.14)$$

12. Визначити коефіцієнт запасу міцності для 1^{ої} внутрішньої втулки n_1 за формулою:

$$n_1 = \frac{\sigma_{0,2(1)}}{\sigma_{\text{екв}1\text{max}}}, \quad (11.15)$$

де $\sigma_{0,2(1)}$ – умовна межа текучості матеріалу 1^{ої} робочої (внутрішньої) втулки контейнера з 4Х2В (див. вихідні дані), МПа;

$\sigma_{\text{екв}1\text{max}}$ – максимальна величина з двох раніше розрахованих (див. формули (11.7) та (11.14)) еквівалентних напружень, відповідно, на поверхнях $i = 0$ і $i = 1_{\text{н}}$.

Повинна виконуватись умова: $n_1 \geq [n]$.

А допустиме значення коефіцієнта запасу міцності $[n] = 1,3 \div 2,0$.

13. Для внутрішньої поверхні ($i = 2_{\text{в}}$; $D_1 = 2R_1$) 2^{ої} проміжної втулки контейнера розрахувати тангенціальні $\sigma_{\theta 2\text{в}}$ та радіальні $\sigma_{r2\text{в}}$ напруження (МПа) від дії внутрішнього тиску p_0 та контактного тиску p_1 на поверхнях сполучення втулок контейнера (за умови відсутності всіх зовнішніх тисків на втулки контейнера) відповідно за формулами:

$$\sigma_{\theta 2\text{в}} = \left(1 + \frac{D_3^2}{D_1^2}\right) \left(\frac{p_0 D_0^2}{D_3^2 - D_0^2} + \frac{p_1 D_1^2}{D_3^2 - D_1^2}\right); \quad (11.16)$$

$$\sigma_{r2\text{в}} = \left(1 - \frac{D_3^2}{D_1^2}\right) \left(\frac{p_0 D_0^2}{D_3^2 - D_0^2} + \frac{p_1 D_1^2}{D_3^2 - D_1^2}\right). \quad (11.17)$$

14. Для внутрішньої поверхні ($i = 2_{\text{в}}$; $D_1 = 2R_1$) 2^{ої} проміжної втулки контейнера розрахувати тангенціальні $\sigma_{\theta 1\text{н}}$ та радіальні $\sigma_{r1\text{н}}$ напруження (МПа) від дії зовнішнього контактного тиску p_2 (див. п. 3) відповідно до формул (за умови відсутності всіх внутрішніх тисків на втулки контейнера):

$$\sigma_{\theta 1\text{н}} = - \left(1 + \frac{D_0^2}{D_1^2}\right) \frac{p_2 D_2^2}{D_2^2 - D_0^2}; \quad (11.18)$$

$$\sigma_{r1\text{н}} = - \left(1 - \frac{D_0^2}{D_1^2}\right) \frac{p_2 D_2^2}{D_2^2 - D_0^2}. \quad (11.19)$$

15. Тангенціальні $\sigma_{\theta 2}$ та радіальні $\sigma_{r 2}$ напруження розрахувати алгебраїчним підсумовуванням напружень, знайдених, відповідно, за формулами (11.16) та (11.18), (11.17) та (11.19):

$$\sigma_{\theta 2} = \sigma_{\theta 2\epsilon} + \sigma_{\theta 2H}; \quad (11.20)$$

$$\sigma_{r 2} = \sigma_{r 2\epsilon} + \sigma_{r 2H}. \quad (11.21)$$

16. З урахуванням знайдених у п. 15 результуючих тангенціальних $\sigma_{\theta 2}$ та радіальних $\sigma_{r 2}$ напружень (див. формули (11.20) та (11.21)) визначити еквівалентні напруження $\sigma_{\text{екв}2}$ (МПа) на поверхні 2^{ої} проміжної втулки контейнера $i = 2_{\epsilon}$ за четвертою (енергетичною) теорією міцності для плоского напруженого стану за формулою:

$$\sigma_{\text{екв}2} = \sqrt{\sigma_{\theta 2}^2 + \sigma_{r 2}^2 - \sigma_{\theta 2}\sigma_{r 2}}. \quad (11.22)$$

17. Для зовнішньої поверхні ($i = 2_H$; $D_2 = 2R_2$) 2^{ої} проміжної втулки контейнера розрахувати тангенціальні $\sigma_{\theta 2B}$ та радіальні $\sigma_{r 2B}$ напруження (МПа) від дії внутрішнього тиску p_0 та контактного тиску p_1 на поверхнях сполучення втулок контейнера (за умови відсутності всіх зовнішніх тисків на втулки контейнера) відповідно за формулами:

$$\sigma_{\theta 2\epsilon} = \left(1 + \frac{D_3^2}{D_2^2}\right) \left(\frac{p_0 D_0^2}{D_3^2 - D_0^2} + \frac{p_1 D_1^2}{D_3^2 - D_1^2}\right); \quad (11.23)$$

$$\sigma_{r 2\epsilon} = \left(1 - \frac{D_3^2}{D_2^2}\right) \left(\frac{p_0 D_0^2}{D_3^2 - D_0^2} + \frac{p_1 D_1^2}{D_3^2 - D_1^2}\right). \quad (11.24)$$

18. Для зовнішньої поверхні ($i = 2_H$; $D_2 = 2R_2$) 2^{ої} проміжної втулки контейнера розрахувати тангенціальні $\sigma_{\theta 1H}$ та радіальні $\sigma_{r 1H}$ напруження (МПа) від дії зовнішнього контактного тиску p_2 (див. п. 3) відповідно до формул (за умови відсутності всіх внутрішніх тисків на втулки контейнера):

$$\sigma_{\theta 2H} = -\left(1 + \frac{D_0^2}{D_2^2}\right) \frac{p_2 D_2^2}{D_2^2 - D_0^2}; \quad (11.25)$$

$$\sigma_{r 2H} = -\left(1 - \frac{D_0^2}{D_2^2}\right) \frac{p_2 D_2^2}{D_2^2 - D_0^2}. \quad (11.26)$$

19. Тангенціальні $\sigma_{\theta 2}$ та радіальні $\sigma_{r 2}$ напруження розрахувати алгебраїчним підсумовуванням напружень, знайдених, відповідно, за формулами (11.23) та (11.25), (11.24) та (11.26):

$$\sigma_{\theta 2} = \sigma_{\theta 2\epsilon} + \sigma_{\theta 2H}; \quad (11.27)$$

$$\sigma_{r2} = \sigma_{r2\theta} + \sigma_{r2H}. \quad (11.28)$$

20. З урахуванням знайдених у п. 19 результуючих тангенціальних $\sigma_{\theta 2}$ та радіальних σ_{r2} напружень (див. формули (11.27) та (11.28)) визначити еквівалентні напруження $\sigma_{\text{екв}2}$ (МПа) на поверхні 2^{oi} проміжної втулки контейнера $i = 2_H$ за четвертою (енергетичною) теорією міцності для плоского напруженого стану за формулою:

$$\sigma_{\text{екв}2} = \sqrt{\sigma_{\theta 2}^2 + \sigma_{r2}^2 - \sigma_{\theta 2}\sigma_{r2}}. \quad (11.29)$$

21. Визначити коефіцієнт запасу міцності для 2^{oi} проміжної втулки n_2 за формулою:

$$n_2 = \frac{\sigma_{0,2(2)}}{\sigma_{\text{екв}2\text{max}}}, \quad (11.30)$$

де $\sigma_{0,2(2)}$ – умовна межа текучості матеріалу 2^{oi} проміжної втулки контейнера з 5ХНМ (див. вихідні дані), МПа;

$\sigma_{\text{екв}2\text{max}}$ – максимальна величина з двох раніше розрахованих (див. формули (11.22) та (11.29)) еквівалентних напружень, відповідно, на поверхнях $i = 2_B$ і $i = 2_H$.

Повинна виконуватись умова: $n_2 \geq [n]$.

А допустиме значення коефіцієнта запасу міцності $[n] = 1,3 \div 2,0$.

22. Для внутрішньої поверхні ($i = 3_B$; $D_2 = 2R_2$) 3^{oi} зовнішньої втулки контейнера розрахувати тангенціальні $\sigma_{\theta 3B}$ та радіальні σ_{r3B} напруження (МПа) від дії внутрішнього тиску p_0 та контактних тисків p_1 і p_2 (див. п. 3) відповідно до формул (за умови відсутності всіх зовнішніх тисків на втулки контейнера):

$$\sigma_{\theta 3\theta} = \left(1 + \frac{D_3^2}{D_2^2}\right) \left(\frac{p_0 D_0^2}{D_3^2 - D_0^2} + \frac{p_1 D_1^2}{D_3^2 - D_1^2} + \frac{p_2 D_2^2}{D_3^2 - D_2^2}\right); \quad (11.31)$$

$$\sigma_{r3\theta} = \left(1 - \frac{D_3^2}{D_2^2}\right) \left(\frac{p_0 D_0^2}{D_3^2 - D_0^2} + \frac{p_1 D_1^2}{D_3^2 - D_1^2} + \frac{p_2 D_2^2}{D_3^2 - D_2^2}\right). \quad (11.32)$$

23. На внутрішній поверхні ($i = 3_B$; $D_2 = 2R_2$) 3^{oi} зовнішньої втулки контейнера тангенціальні $\sigma_{\theta 2H}$ та радіальні σ_{r2H} напруження (МПа) дорівнюють 0, тому що у 3^{ii} зовнішній втулці контейнера відсутній зовнішній тиск (за умови відсутності всіх внутрішніх тисків на втулки контейнера), тобто:

$$\sigma_{\theta 3H} = 0; \quad (11.33)$$

$$\sigma_{r3H} = 0. \quad (11.34)$$

24. Тангенціальні $\sigma_{\theta 3}$ та радіальні $\sigma_{r 3}$ напруження розрахувати алгебраїчним підсумовуванням напружень, знайдених, відповідно, за формулами (11.31) та (11.33), (11.32) та (11.34):

$$\sigma_{\theta 3} = \sigma_{\theta 3\epsilon} + \sigma_{\theta 3\eta}; \quad (11.35)$$

$$\sigma_{r 3} = \sigma_{r 3\epsilon} + \sigma_{r 3\eta}. \quad (11.36)$$

25. З урахуванням знайдених у п. 24 результуючих тангенціальних $\sigma_{\theta 3}$ та радіальних $\sigma_{r 3}$ напружень (див. формули (11.35) та (11.36)) визначити еквівалентні напруження $\sigma_{\text{екв}3}$ (МПа) на поверхні 3^{oi} зовнішньої втулки контейнера $i = 3_{\epsilon}$ за четвертою (енергетичною) теорією міцності для плоского напруженого стану за формулою:

$$\sigma_{\text{екв}3} = \sqrt{\sigma_{\theta 3}^2 + \sigma_{r 3}^2 - \sigma_{\theta 3}\sigma_{r 3}}. \quad (11.37)$$

26. Для зовнішньої поверхні ($i = 3_{\eta}$; $D_3 = 2R_3$) 3^{oi} зовнішньої втулки контейнера розрахувати тангенціальні $\sigma_{\theta 3\eta}$ та радіальні $\sigma_{r 3\eta}$ напруження (МПа) від дії внутрішнього тиску p_0 та контактних тисків p_1 і p_2 (див. п. 3) відповідно до формул (за умови відсутності всіх зовнішніх тисків на втулки контейнера):

$$\sigma_{\theta 3\epsilon} = \left(1 + \frac{D_3^2}{D_0^2}\right) \left(\frac{p_0 D_0^2}{D_3^2 - D_0^2} + \frac{p_1 D_1^2}{D_3^2 - D_1^2} + \frac{p_2 D_2^2}{D_3^2 - D_2^2}\right); \quad (11.38)$$

$$\sigma_{r 3\epsilon} = \left(1 - \frac{D_3^2}{D_0^2}\right) \left(\frac{p_0 D_0^2}{D_3^2 - D_0^2} + \frac{p_1 D_1^2}{D_3^2 - D_1^2} + \frac{p_2 D_2^2}{D_3^2 - D_2^2}\right). \quad (11.39)$$

27. На зовнішній поверхні ($i = 3_{\eta}$; $D_3 = 2R_3$) 3^{oi} зовнішньої втулки контейнера тангенціальні $\sigma_{\theta 3\eta}$ та радіальні $\sigma_{r 3\eta}$ напруження (МПа) дорівнюють 0, тому що у 3^{ii} зовнішній втулці контейнера відсутній зовнішній тиск (за умови відсутності всіх внутрішніх тисків на втулки контейнера), тобто:

$$\sigma_{\theta 3\eta} = 0; \quad (11.40)$$

$$\sigma_{r 3\eta} = 0. \quad (11.41)$$

28. Тангенціальні $\sigma_{\theta 3}$ та радіальні $\sigma_{r 3}$ напруження розрахувати алгебраїчним підсумовуванням напружень, знайдених, відповідно, за формулами (11.38) та (11.40), (11.39) та (11.41):

$$\sigma_{\theta 3} = \sigma_{\theta 3\epsilon} + \sigma_{\theta 3\eta}; \quad (11.42)$$

$$\sigma_{r 3} = \sigma_{r 3\epsilon} + \sigma_{r 3\eta}. \quad (11.43)$$

29. З урахуванням знайдених у п. 28 результуючих тангенціальних $\sigma_{\theta 3}$ та радіальних σ_{r3} напружень (див. формули (11.42) та (11.43)) визначити еквівалентні напруження $\sigma_{\text{екв}3}$ (МПа) на поверхні 3^{ої} зовнішньої втулки контейнера $i = 3_n$ за четвертою (енергетичною) теорією міцності для плоского напруженого стану за формулою:

$$\sigma_{\text{екв}3} = \sqrt{\sigma_{\theta 3}^2 + \sigma_{r3}^2 - \sigma_{\theta 3}\sigma_{r3}}. \quad (11.44)$$

30. Визначити коефіцієнт запасу міцності для 3^{ої} зовнішньої втулки n_3 за формулою:

$$n_3 = \frac{\sigma_{0,2(3)}}{\sigma_{\text{екв}3\text{max}}}, \quad (11.45)$$

де $\sigma_{0,2(3)}$ – умовна межа текучості матеріалу 3^{ої} зовнішньої втулки контейнера з 5ХНМ (див. вихідні дані), МПа;

$\sigma_{\text{екв}3\text{max}}$ – максимальна величина з двох раніше розрахованих (див. формули (11.37) та (11.44)) еквівалентних напружень, відповідно, на поверхнях $i = 3_v$ і $i = 3_n$.

Повинна виконуватись умова: $n_3 \geq [n]$.

А допустиме значення коефіцієнта запасу міцності $[n] = 1,3 \div 2,0$.

31. Побудувати епюри розподілу еквівалентних напружень $\sigma_{\text{екв}1}$, $\sigma_{\text{екв}2}$ і $\sigma_{\text{екв}3}$ (див. результати розрахунків еквівалентних напружень в п. 7, п. 11, п. 16, п. 20, п. 25 і п. 29) по товщині трьох втулок контейнера. Зразок оформлення див. на рис. 11.2.

32. Порівняти максимальні величини еквівалентних напружень $\sigma_{\text{екв}1\text{max}}$, $\sigma_{\text{екв}2\text{max}}$ і $\sigma_{\text{екв}3\text{max}}$ з величиною еквівалентного напруження $\sigma_{\text{еквIII}}$ у контейнері з однією втулкою (див. п. 5 в практичній роботі 8), з величиною еквівалентних напружень $\sigma_{\text{екв}}$ у контейнері з двох втулок, але з одного матеріалу 4Х2В (див. п. 1 в практичній роботі 9) та з величиною еквівалентних напружень $\sigma_{\text{екв}1\text{max}}$ і $\sigma_{\text{екв}2\text{max}}$ у контейнері з двох втулок з різних матеріалів (див. п. 12 та п. 21 в практичній роботі 10).

Питання до самостійної підготовки

1. Який бандажований контейнер витримає більші навантаження, той що складається з двох втулок чи трьох втулок?
2. Які мастила використовуються при прямому пресуванні?
3. Для чого при пресуванні використовується прес-шайба?
4. Яким чином з контейнера видаляється прес-остаток?
5. З якими схемами пресування можна поєднувати пряме пресування?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. **Дмитриев, А.М.** Аппроксимация кривых упрочнения металлов / А. М. Дмитриев, А. Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. – 2002. – №6. – С. 16–21.
2. Теорія і технологія прокатного, волочильного та пресувального виробництва : конспект лекцій для студентів спеціальності 136 «Металургія» усіх форм навчання / укл. О. В. Чучин. – Краматорськ : ДДМА, 2018. – 36 с.
3. **Воронцов, А.Л.** Теория штамповки выдавливанием / А. Л. Воронцов. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 721 с.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Дані для побудови кривої зміцнення за варіантами для практичної роботи 1

№ варіанта	Матеріал	Експериментальна точка i									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		для експериментальної точки i значення логарифмічної деформації e_i									
		$e_1 =$ $= 0,2$	$e_2 =$ $= 0,4$	$e_3 =$ $= 0,6$	$e_4 =$ $= 0,8$	$e_5 =$ $= 1,0$	$e_6 =$ $= 1,2$	$e_7 =$ $= 1,4$	$e_8 =$ $= 1,6$	$e_9 =$ $= 1,8$	$e_{10} =$ $= 2,0$
		для логарифмічної деформації e_i значення напруги плинності σ_{si}									
		σ_{s1}	σ_{s2}	σ_{s3}	σ_{s4}	σ_{s5}	σ_{s6}	σ_{s7}	σ_{s8}	σ_{s9}	σ_{s10}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	А1	118	133	138	146	153	156	162	166	169	171
2	АД1	95	118	125	132	136	140	152	161	169	177
3	АМц	136	154	162	171	178	182	186	190	194	197
4	АМц (відпал.)	140	165	180	188	192	195	198	200	203	205
5	АМц (напівна- гарт.)	190	200	215	220	225	228	230	235	237	238
6	АМц (нагарто- ваний)	195	205	220	225	230	233	235	240	242	243
7	АДЗЗ (відпал.)	200	215	230	235	240	252	260	269	278	285
8	АМг1	236	253	264	271	280	283	286	293	296	301
9	АМг2	205	230	280	320	330	340	345	358	367	374
10	М1	275	315	365	386	400	422	432	440	446	450
11	М2	220	278	330	365	390	422	445	461	480	506
12	М3	299	330	375	396	405	425	435	442	450	455
13	БрКН 1-3	340	450	495	510	560	580	600	616	628	636

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
14	Л62	455	530	595	660	700	757	795	825	860	897
15	Л63	334	455	544	620	691	740	800	843	874	902
16	Л68	440	510	552	596	612	641	662	680	694	702
17	Л70	432	518	570	610	642	667	693	704	745	754
18	АРМКО-залізо (відпал.)	420	470	492	517	532	545	558	572	580	593
19	АРМКО-залізо	420	500	550	600	650	695	730	762	790	815
20	сталь 08 кп	495	565	645	705	720	780	850	870	894	910
21	сталь 10	520	620	770	770	780	794	805	817	827	835
22	сталь 15	582	674	720	756	789	928	851	874	896	910
23	сталь 15 кп	518	600	664	701	743	770	795	815	843	860
24	сталь 20	610	685	760	812	860	895	922	935	947	960
25	сталь 20Х	600	700	760	810	853	880	907	937	964	992

ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 – Вихідні дані для практичних робіт 2 – 11

№ варіанта	Матеріал	Геометричні розміри, мм				Коефіцієнт тертя μ	Коефіцієнти		
		a	b	H	lk		α_1	α_2	α_3
1	A1	58	95	70	4	0,25	0,1	0,3	0,5
2	АД1	55	90	85	3	0,2	0,5	0,7	0,9
3	АМц	52	90	80	5	0,15	0,4	0,6	0,8
4	АМц (відпал.)	50	85	70	4	0,5	0,3	0,5	0,7
5	АМц (напівнагарт.)	48	80	75	3	0,4	0,2	0,4	0,6
6	АМц (нагартований.)	45	80	70	5	0,2	0,1	0,3	0,5
7	АД33 (відпал.)	42	70	60	4	0,35	0,5	0,7	0,9
8	АМГ1	40	60	55	3	0,25	0,4	0,6	0,8
9	АМГ2	38	60	50	5	0,3	0,3	0,5	0,7
10	М1	35	45	40	4	0,1	0,2	0,4	0,6
11	М2	32	40	40	3	0,5	0,1	0,3	0,5
12	М3	30	60	50	5	0,4	0,5	0,7	0,9
13	БрКН 1-3	28	40	40	4	0,1	0,4	0,6	0,8
14	Л62	25	40	35	3	0,15	0,3	0,5	0,7
15	Л63	20	35	35	5	0,4	0,2	0,4	0,6
16	Л68	18	30	30	4	0,35	0,1	0,3	0,5
17	Л70	15	35	30	3	0,3	0,5	0,7	0,9
18	АРМКО-залізо (відп.)	12	20	25	5	0,25	0,4	0,6	0,8
19	АРМКО-залізо	10	20	20	4	0,2	0,3	0,5	0,7
20	сталь 08 кп	7	12	15	3	0,15	0,2	0,4	0,6
21	сталь 10	3	7	10	2	0,1	0,1	0,3	0,5

Навчальне видання

ТЕОРІЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ПРОКАТНОГО, ВОЛОЧИЛЬНОГО ТА ПРЕСУВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

**Методичні вказівки
до практичних та самостійних робіт**

**для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти,
студентів спеціальностей 136 "Металургія" та
131 «Прикладна механіка» денної та заочної форм навчання**

Укладач

ЧУЧИН Олег Володимирович

Редагування і комп'ютерне верстання

І. І. Дьякова

28/2019. Формат 60 x 84/16. Ум. друк. арк.. 5,16.
Обл.-вид. арк. 3,16. . Тираж пр. Зам. №

Видавець і виготівник
Донбаська державна машинобудівна академія
84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 1633 від 24.12.2003