

**ТЕХНОЛОГІЯ ЗАГОТІВЕЛЬНО-ШТАМПУВАЛЬНИХ РОБІТ  
У ВИРОБНИЦТВІ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»

**ТЕХНОЛОГІЯ ЗАГОТІВЕЛЬНО-ШТАМПУВАЛЬНИХ РОБІТ  
У ВИРОБНИЦТВІ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ**

Навчальний посібник до лабораторного практикуму

Харків «ХАІ» 2024

УДК 621.98:629.7.002(075.8)

T38

Колектив авторів:

А. С. Морголенко, С. Ю. Миронова, О. А. Павленко,  
О. В. Шипуль, С. О. Заклінський

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. В. Л. Чухліб,  
д-р техн. наук О. В. Андрєєв

T38      **Технологія** заготівельно-штампувальних робіт у виробництві літальних апаратів [Електронний ресурс] : навч. посіб. до лаб. практикуму / А. С. Морголенко, С. Ю. Миронова, О. А. Павленко, О. В. Шипуль, С. О. Заклінський. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2024. – 133 с.

Наведено визначення основних роздільних і формозмінювальних операцій згідно зі стандартом, описано суть класичних і прогресивних процесів виготовлення деталей методами тиску металів. Розглянуто технологічні процеси виготовлення деталей з листового матеріалу вирубуванням-пробиванням у штампах, витягуванням, обтягуванням, штампуванням еластичним середовищем, відбортюванням отворів. Виконано аналіз типових деталей, які отримують операціями, що вивчаються.

Подано довідкові матеріали для виконання розрахунків технологічних параметрів процесів. Викладено методики розрахунку енергосилових і технологічних параметрів описаних процесів, а також основні характеристики та конструкції обладнання, яке використовують у заготівельно-штампувальному виробництві.

Для студентів усіх факультетів, що вивчають технологію виробництва літальних апаратів.

Іл. 69. Табл. 28. Бібліогр.: 6 назв

**УДК 621.98:629.7.002(075.8)**

© Колектив авторів, 2024

© Національний аерокосмічний  
університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут», 2024

## СПИСОК СКОРОЧЕНЬ І ПОЗНАЧЕНЬ

$\sigma_B$  – тимчасовий опір розриву матеріалу заготовки (границя міцності);  
 $\sigma_s$  – границя текучості під час розтягання;  
 $\sigma_p$  – напруження розриву в небезпечному перерізі;  
 $\sigma_{зр}$  – опір зрізу;  
 $\delta$  – відносне подовження, %;  
 $\varepsilon$  – деформація;  
 $\psi$  – відносне звуження під час розтягання зразка, %;  
 $\mu$  – коефіцієнт контактного тертя;  
 $a, b$  – коефіцієнти, що характеризують інтенсивність зміцнення деформівного матеріалу;  
 $\sigma_1, \sigma_{тр}, \sigma_{зг}, \sigma_r, \sigma_n, \sigma_z, \sigma_t$  – напруження в певних ділянках (конкретні роз'яснення на схемах і в тексті опису);  
 $S$  – товщина вихідної листової або трубної заготовки;  
 $D$  – діаметр заготовки;  
 $d = d_n$  – діаметр деталі (середній діаметр остаточно одержуваної деталі внаслідок  $n$ -го переходу);  
 $d_1$  – середній діаметр деталі під час витягування після першого переходу;  
 $D_\phi$  – діаметр фланця;  
 $H$  – висота деталі після операції;  
 $L$  – периметр деталі в середньому перерізі;  
 $F$  – площа поперечного перерізу деталі або інша площа;  
 $R_m, R_n$  – радіуси заокруглення матриці й пуансона;  
 $R_1, R_2$  – радіуси кривизни;  
 $l_3, b_3$  – довжина і ширина заготовки;  
 $P$  – зусилля штампування для усунення всіх напружень у металі (вирубкування-пробивання, витягування, роздавання, відбортювання, обтягування);  
 $P_{max}$  – повне максимальне зусилля;  
 $Q_{пр}, Q_{зн}$  – зусилля прошовування й знімання деталі;  
 $P_e$  – експериментальне зусилля;  
 $Q$  – зусилля притискання під час витягування, вирубкування-пробивання;  
 $Q_e$  – експериментальне зусилля притискання;  
 $q$  – тиск притискання або тиск еластичного середовища;  
 $Q_1, Q_2$  – зусилля розтягання;

$T$  – зусилля, що розвивається столом преса;  
 $m$  – геометричний коефіцієнт витягування;  
 $m_1, m_2, m_3, m_n$  – геометричні коефіцієнти витягування на першому, другому, третьому і  $n$ -му переходах;  
 $m_{id}$  – ідеальний коефіцієнт витягування;  
 $n$  – кількість переходів;  
 $k_2, k_2^p, k_2^k$  – геометричні коефіцієнти обтягування: простого, з розтяганням, кільцевого;  
 $k_{гран}, k_{гран}^p, k_{гран}^k$  – граничні коефіцієнти обтягування: простого, з розтяганням, кільцевого;  
 $k_\mu, k_\mu^p, k_\mu^k$  – коефіцієнти, що враховують вплив тертя під час обтягування: простого, з розтяганням, кільцевого;  
 $k_p$  – коефіцієнт, що враховує вплив нелінійності схеми напружено-деформованого стану;  
 $\alpha, \beta$  – подовжній і поперечний кути охоплення обтяжного пуансона;  
 $\varphi, \theta$  – кути, що характеризують параметри процесу виготовлення деталей.

**БО** – базовий отвір;  
**ВМТ** – верхня мертва точка;  
**НМТ** – нижня мертва точка;  
**РТМ** – розрахунково-технологічні матеріали;  
**ШКП** – шаблоном контуру перерізу;  
**ШОК** – шаблон обрізання і кондуктор для свердлування отворів.

## ВСТУП

Заготівельно-штампувальні роботи, під час яких деталі виготовляються з листових матеріалів, є одними з основних процесів оброблення металів тиском у виробництві літальних апаратів.

Зі всього обсягу деталей літального апарата 60...70 % виготовляють у заготівельно-штампувальному виробництві. Серед штампувальних операцій найпоширенішими є такі операції, як вирубування-пробивання в штампах, витягування, обтягування, штампування еластичними середовищами, динамічне штампування і багато інших. Під час виконання операцій холодного листового штампування не відбуваються зсування великих обсягів матеріалу заготовки і значна зміна її вихідної товщини. Задані форми і розміри деталей забезпечуються формозміною плоскої листової або прямолінійної (профільної або трубчастої) заготовки шляхом деформування окремих ділянок. Найчастіше використовуваними напівфабрикатами в заготівельно-штампувальних роботах є листи, пресовані профілі й труби.

У цьому навчальному посібнику наведено лабораторні роботи з курсу «Технологія виробництва літальних апаратів» (розділ «Заготівельно-штампувальні роботи»). Основними завданнями лабораторного практикуму є:

- закріплення і поглиблення теоретичних знань;
- розвиток уміння застосовувати теоретичні знання для вирішення конкретних практичних завдань;
- набуття навичок самостійного проведення експерименту;
- розвиток здатності аналізувати результати експерименту, зіставляти їх із теоретичними положеннями і розрахунками.

Найбільша ефективність під час проведення лабораторних робіт досягається за активної участі кожного студента в проведенні експерименту, обробленні даних і виконанні розрахунків.

## ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

1. Лабораторні роботи розраховано на виконання їх протягом чотирьох академічних годин підгрупами з оптимальною кількістю студентів.

2. Під час проведення робіт від студентів потрібні акуратність і точність виконання вказівок викладача, що стосуються роботи на устаткуванні, а також безумовне дотримання правил техніки безпеки.

3. Кожна лабораторна робота виконується в такій послідовності:

- ознайомлення з описом лабораторної роботи;
- вивчення основних визначень, формул, схем, рисунків і їх фіксування в журналі для звіту;
- виконання необхідних розрахунків, підготовка таблиць, побудова графіків;
- вивчення інструкції з техніки безпеки з обов'язковим підписом у спеціальному журналі;
- вивчення установок, оснащення, штампів, устаткування, що використовуються для виконання експериментів;
- виконання експериментів відповідно до порядку роботи і завдання викладача з обов'язковим фіксуванням показань приладів і їх записом у журнал;
- оброблення експериментальних даних і оформлення звіту;
- здача лабораторної роботи викладачеві й отримання оцінки.

4. Підготовку устаткування, спостереження за роботою на експериментальних установках і забезпечення студентів необхідними матеріалами (зразками, приладами, інструментом тощо) здійснює лаборант або навчальний майстер лабораторії.

5. Після закінчення виконання лабораторної роботи студент оформляє звіт, що надає викладачеві, який проводить лабораторні заняття.

6. Опитавши студента за змістом лабораторної роботи і вислухавши відповіді на контрольні запитання, викладач вирішує питання про зарахування роботи.

7. Якщо роботу зараховано, викладач пише на звіті студента «Зараховано» і ставить оцінку в лабораторному журналі. Якщо оформлення звіту або відповіді на запитання незадовільні, то викладач може зарахувати тільки відпрацювання цієї роботи з написом «Роботу відпрацьовано». У такому випадку студент після додаткової підготовки має знову здавати цю роботу під час консультацій для отримання оцінки.

8. До екзамену з курсу «Технологія виробництва літальних апаратів» (розділ «Заготівельно-штампувальні роботи») допускаються лише ті студенти, які виконали і здали всі лабораторні роботи, передбачені навчальним планом.

# Лабораторна робота № 1

## ВИГОТОВЛЕННЯ ПЛОСКИХ ДЕТАЛЕЙ І ЗАГОТОВАНОК ІЗ ЛИСТОВОГО МАТЕРІАЛУ В ШТАМПАХ НА МЕХАНІЧНИХ ПРЕСАХ

**Мета роботи** – вивчення процесу виготовлення плоских деталей вирубуванням-пробиванням із листового матеріалу в штампах; розрахунок силових параметрів процесу і визначення оптимального зазору між пуансоном і матрицею залежно від товщини і механічних властивостей матеріалу.

### Теоретичні відомості

Вирубування і пробивання – найбільш поширені технологічні операції холодного штампування. Деталі та заготовки малих і середніх розмірів (не більш 600...800 мм в плані) з різних матеріалів виготовляють зі смуг в інструментальних штампах на механічних або гідравлічних пресах. Суть способу, що реалізується в операції вирубування-пробивання, полягає в тому, що деталі відокремлюються від заготовок (смуг) одночасно по всьому контуру різальними кромками пуансона і матриці штампа, виконаними відповідно до контурів деталей, що виготовляються.

**Вирубування** – повне відділення заготовки або виробу від вихідної заготовки по замкнутому контуру шляхом зсуву.

**Пробивання** – утворення в заготовці отвору або паза шляхом зсуву з видаленням (вилученням) частини металу у відхід.

Процес розподілу в штампах у разі вирубування-пробивання деякою мірою аналогічний процесу різання ножицями. Пуансон і матриця у вирубному штампі (рис. 1.1) виконують ті самі функції, що й верхній і нижній ножі ножиць, але різальні кромки штампів можуть мати контур будь-якої конфігурації (замкнутий або незамкнутий). Розглянемо суть процесу вирубування-пробивання деталі, яку потрібно виготовити в штампі послідовної дії (див. рис. 1.1).

Для отримання деталі, наведеної на ескізі, раціонально використовувати штамп послідовної дії, у якому деталь виготовляється за два переходи послідовно розташованими пуансонами під час переміщення заготовки між напрямними планками по площині матриці в указаному напрямку: 1-й перехід – пробиваються два внутрішні отвори в деталі; 2-й перехід – деталь вирубується по зовнішньому контуру.

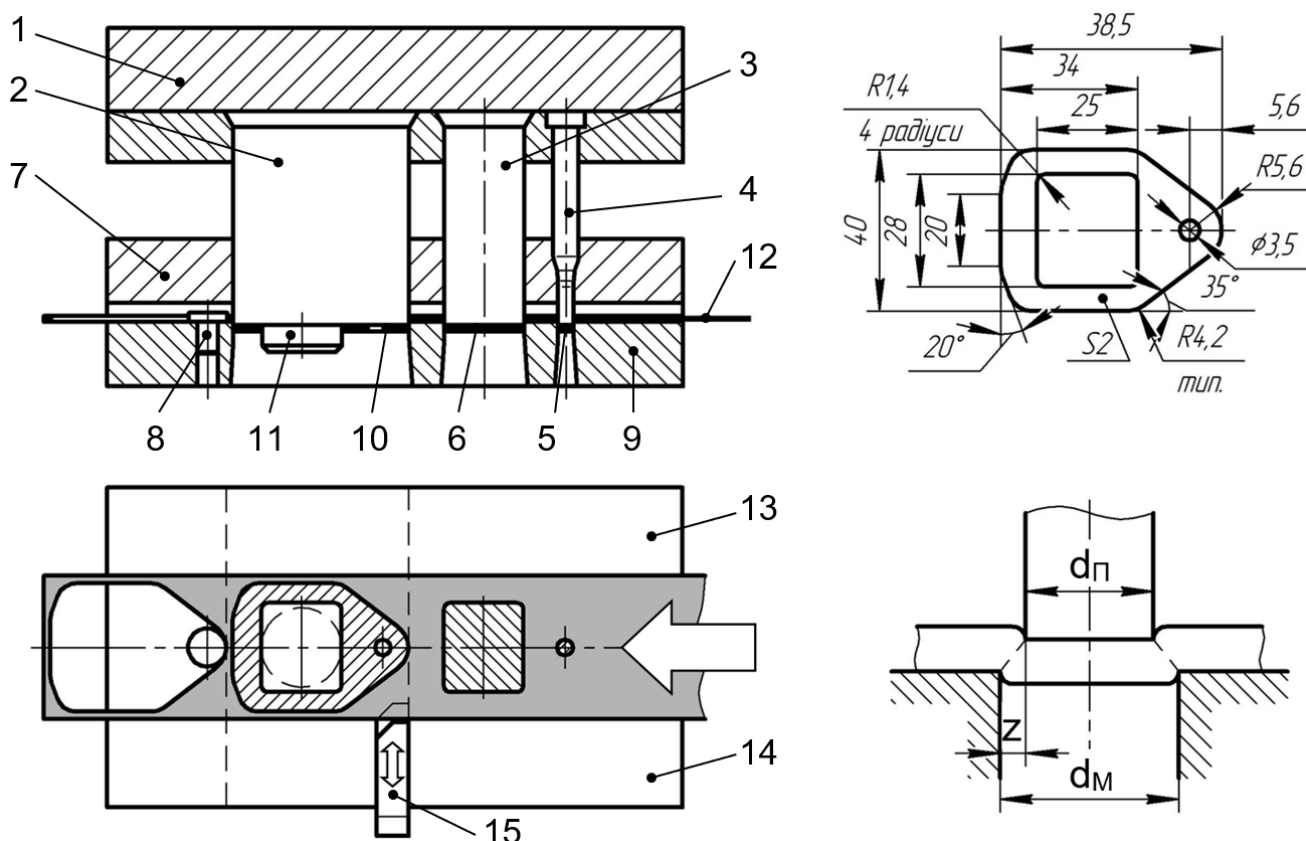


Рис. 1.1. Схема процесу вирубівання-пробивання (штампування) та ескіз деталі: 1 – пуансонотримач; 2 – пуансон для вирубівання деталі по зовнішньому контуру; 3, 4 – пуансони для пробивання отворів; 5, 6 – відходи; 7 – знімач; 8 – постійний упор; 9 – матриця; 10 – готова деталь; 11 – фіксатор; 12 – смуга; 13,14 – напрямна планка; 15 – тимчасовий упор

Смуга подається з правого боку вліво. Відходи від пробивання отворів у деталі випадають через отвори в матриці й у нижній плиті штампа. Деталь, яка вирубється, падає в отвір матриці у відведений для неї бункер.

Відповідно до схеми штампування (див. рис. 1.1) виготовлення деталі відбувається в такій послідовності. У вихідному положенні штампа верхній рухомий блок із пуансонами 2, 3, 4 розташовується зверху. Рухомий блок закріплюється в повзуні преса і має можливість рухатись зворотно-поступально. Між пуансонами 2, 3, 4 та матрицею, на якій розміщують смугу 12, є відстань, що дає змогу покласти її на площину матриці 9 між напрямними планками 13, 14. Смуга 12 подається рукою штампувальника або автоматично між напрямними планками 13, 14 до тимчасового упора 15, на який заздалегідь натискає робітник, висуваючи його в зону руху смуги.

Натисканням на педаль оператор-штампувальник умикає робочий хід преса, під час якого повзун із закріпленим на ньому верхом штампа з

пуансонами 2, 3, 4 виконує робочий хід униз. На першому переході пуансони 3 і 4 пробивають прямокутний і круглий отвори, а пуансон 2 робить холостий хід. Відходи 5 і 6 падають в отвір матриці у відповідний бункер. Після закінчення робочого ходу повзун із закріпленням на ньому верхом штампа переміщується у верхнє положення. Унаслідок залишкової пружної деформації смуга 12 охоплює пуансони і підіймається догори разом із ними. Через наявність у конструкції штампа знімача 7 смуга знімається з пуансонів 3 і 4 та повертається на площину матриці 9. У цей момент штампівник проштовхує смугу справа наліво до торкання її торцевого зрізу з постійним упором 8. Перший перехід закінчено. Після повторного натискання на педаль прес виконує другий робочий хід, пуансони 3, 4 пробивають отвори в другій деталі, а пуансон 2 вирубує першу деталь 10 по зовнішньому контуру. Перед вирубуванням фіксатор 11 на пуансоні 2 заходить у прямокутний отвір, який було отримано на попередньому переході, і центрує зовнішній контур деталі відносно цього отвору. Готова деталь 10 випадає через провальне вікно в матриці та в штамповій плиті в бункер із готовою продукцією. Після закінчення робочого ходу пуансони знову підіймаються у верхнє положення. Смуга 12 знову знімається з них і повертається на матрицю 9. Штампівник знову проштовхує смугу справа наліво, але тепер вона зупиняється через торкання з постійним упором 8 внутрішнім контуром вирубаного отвору. Так повторюють до закінчення смуги. Потім смугу, що перетворилася на відхід, знімають зі штампа, вставляють нову і все повторюється. Послідовність здійснення процесу вирубування по стадіях показано на рис. 1.2.

Процес розділення в штампі складається з пружної стадії, пластичної стадії і стадії сколювання. На *пружній стадії* відбувається пружне згинання металу з невеликим видавлюванням його в отвір матриці (див. рис. 1.2, а), при цьому напруження в металі не перевищує границі пружності. На *пластичній стадії* відбувається вдавлювання пуансона в метал і видавлювання його в отвір матриці (див. рис. 1.2, б).

Безпосередньо під різальною кромкою пуансона створюється напружений стан об'ємного стиснення, а під різальною кромкою матриці – напружений стан із напруженнями радіального розтягання. Об'ємне стиснення більш сприятливе для пластичної течії, ніж радіальне розтягання, крім того, останнє може бути причиною виникнення мікротріщин у зоні розподілу. До кінця другої (пластичної) стадії напруження поблизу різальних кромок досягають максимальної величини, яка відповідає опору металу зрізу. На третій стадії (*сколювання*) процесу вирубування біля різальних кромок матриці утворюються сколювальні тріщини (див. рис. 1.2, в). Після подальшого занурення пуансона і вичерпування місцевої пластичності

металу сколювальні тріщини виникають і біля різальних кромek пуансона (див. рис. 1.2, а, б). Ця послідовність сколювання підтверджується тим, що блискучий поясok, що відповідає пластичній стадії розподілу, на відходах значно ширший, ніж на деталях. Сколювальні тріщини спрямовані по лініях найбільших деформацій зсуву (поверхні ковзання), швидко поширюються на внутрішні шари металу і спричиняють відділення деталі, що вирубуються.

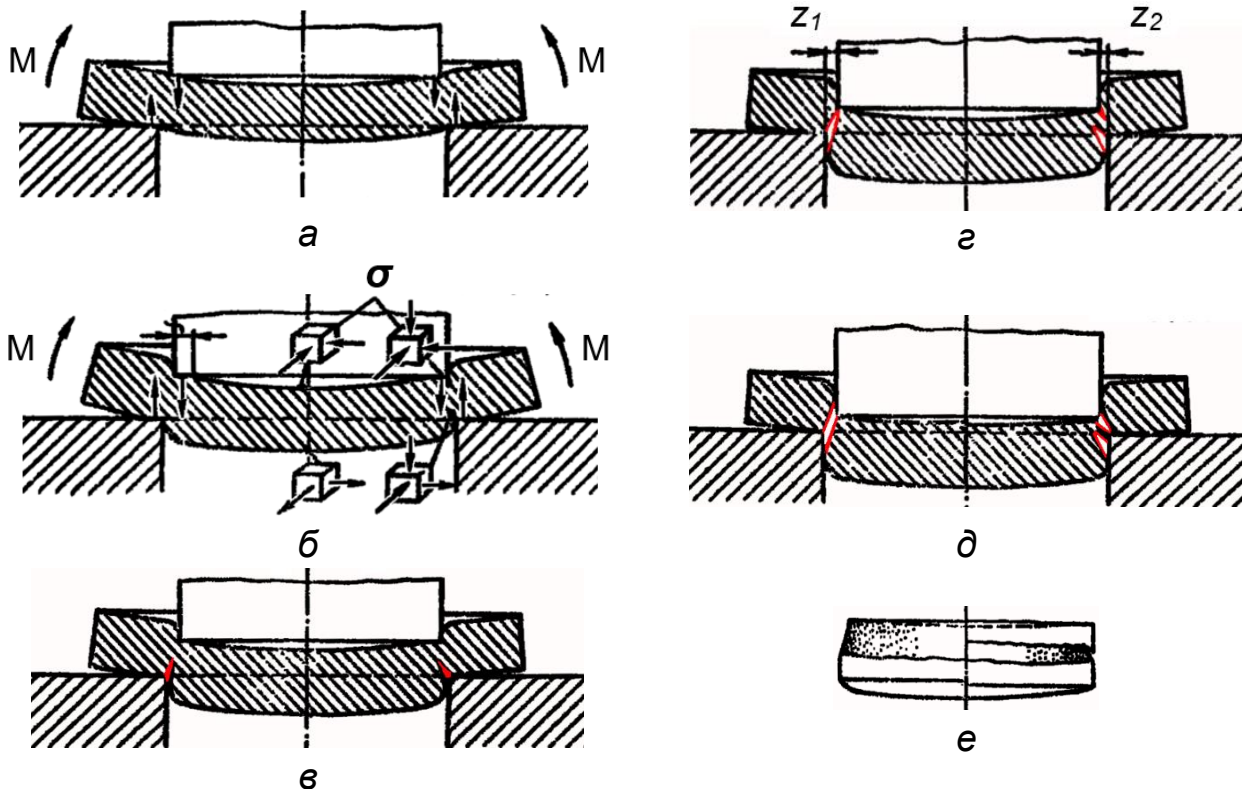


Рис. 1.2. Послідовність процесу вирубання і поверхня зрізу: ліворуч від осі – за умови нормального зазору  $z_1$  між пуансоном і матрицею; праворуч від осі – за умови малого зазору  $z_2$

У процесі подальшого руху пуансон проштовхує вирізану деталь через робочу шийку матриці. За умови нормального зазору між пуансоном і матрицею  $z_1$  поверхні зсуву (лінії ковзання), що виникають біля різальних кромek пуансона, збігаються з поверхнями і тріщинами, що виникли біля різальних кромek матриці й утворюють загальну криволінійну поверхню сколювання. За умови занадто малого або занадто великого зазору різко погіршується якість зрізу (див. рис. 1.2).

### Технологічні параметри процесу

**Зазори** між матрицею і пуансоном дуже впливають на процес різання листових матеріалів. Цей вплив відбивається на якості поверхні зрізу (рис. 1.3), опорі зрізу і стійкості штампів. Різноманіття виробничих умов і вимог, що ставляться до деталей щодо якості поверхні зрізу і точності

розмірів, не дають змоги встановити єдину величину зазору між матрицею і пуансоном, однаково придатну для всіх випадків штампування.

Як видно на рис. 1.1, зовнішні розміри деталі визначаються розмірами матриці, а розміри отворів, що пробивається в деталі, – розмірами пуансона. Зважаючи на це, установлюється і загальне правило визначення зазору  $z$ . Якщо здійснюється процес вирубкування, то порожнина матриці виготовляється за розмірами деталі, а зазор виконується завдяки зменшенню розмірів пуансона. Якщо ж пробивається отвір, то навпаки, пуансон виготовляється за розмірами деталі, а зазор спрямовується вбік кромки матриці та виконується завдяки збільшенню розмірів матриці.

На рис. 1.3 показано схеми розташування зазорів і допусків для круглих пуансонів і матриць.

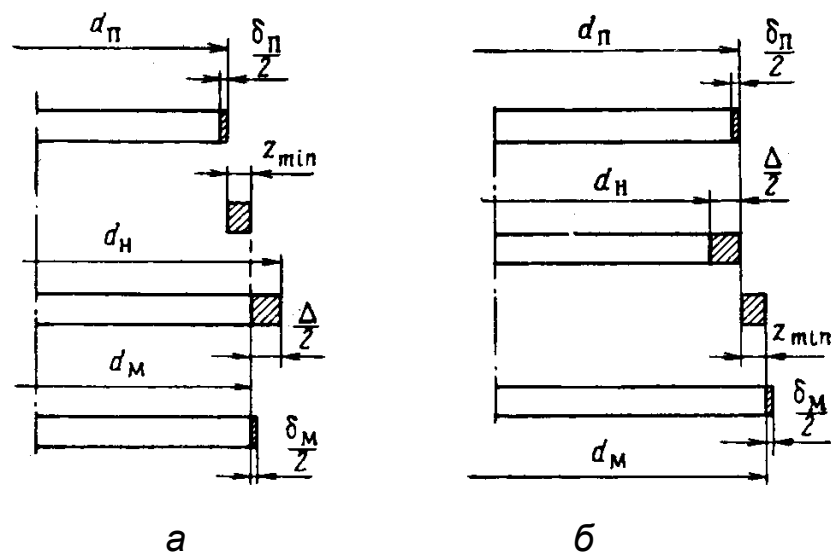


Рис. 1.3. Зазори і допуски для круглих пуансонів і матриць:

*а* – у вирубному штампі; *б* – у пробивному штампі ( $d_M$ ,  $d_P$  – номінальні розміри матриці та пуансона;  $d_H$  – номінальний розмір деталі;  $\Delta$  – допуск на розмір деталі;  $\delta_M$ ,  $\delta_P$  – допуски на розміри матриці й пуансона;  $z_{min}$  – мінімальний зазор між матрицею і пуансоном)

У разі спрацювання штампа, призначеного для утворення зовнішнього контуру (тобто вирубвання деталей), розмір порожнини матриці збільшується, тому за номінальний діаметр матриці  $d_M$  слід брати мінімальний розмір деталі:

$$d_M = (d_H - \Delta)^{+\delta_M}. \quad (1.1)$$

Відповідно, діаметр пуансона слід визначати за формулою

$$d_P = (d_H - \Delta - 2z_{min})^{-\delta_P}. \quad (1.2)$$

Під час роботи штампа внаслідок збільшення порожнини матриці й

зменшення діаметра пуансона величина зазору  $z_{min}$  буде поступово збільшуватися і досягне  $z_{max}$ , і в процесі подальшої експлуатації штамп уже не буде забезпечувати необхідної якості деталей. Допуски на розміри матриці  $\delta_m$  і пуансона  $\delta_n$  беруться на 3–4 квалітети вище за квалітет точності деталі. З огляду на те, що розмір отвору, який пробивається, визначається розміром пуансона, а розмір пуансона в міру спрацювання зменшується, вирази для визначення розмірів пуансонів і матриць під час пробивання отворів матимуть вигляд

$$\begin{aligned} d_n &= (d_H + \Delta)^{-\delta_n}, \\ d_m &= (d_H + \Delta + 2z_{min})^{+\delta_m}. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Для деталей більш складної форми (прямокутних, квадратних) необхідне сполучення пуансонів і матриць забезпечується тільки індивідуальним припасуванням. Під час проєктування вирубних штампів усі необхідні розміри вказуються тільки на кресленнику матриці, а пуансон припасовується з необхідним зазором по матриці. Під час проєктування пробивних штампів, навпаки, розміри вказуються тільки на кресленнику пуансона, а матриця припасовується по пуансону із забезпеченням необхідного зазору.

Практично під час виготовлення штампів не можна досягти абсолютної точності пуансонів і матриць. Для забезпечення достатнього строку експлуатації штампа і виготовлення на ньому якісних деталей необхідно виконувати цілком очевидні умови:

$$\begin{aligned} |\delta_n| + |\delta_m| &\leq z_{max} - z_{min}; \\ \delta_n &< \Delta; \delta_m < \Delta. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Чим більше відрізняються праві та ліві частини цих нерівностей, тим більші потенційні можливості мають штампи щодо строку експлуатації.

### ***Зусилля розподілу в процесах вирубування та пробивання.***

У процесі вирубування листового металу виникає складне неоднорідне силове поле, сконцентроване поблизу різальних кромek пуансона і матриці. На рис. 1.4 наведено схему сил, що діють на заготованку під час вирубування без притискання.

Пуансон звичайно вдавлюється в листову заготованку не по всій торцевій поверхні, а лише по кільцевому (або іншій формі) пояску шириною  $b$ . Таке саме вдавлювання відбувається і з боку матриці. Тиск пуансона і матриці по ширині пояска розподілено нерівномірно, як це показано на рис. 1.4. Його можна замінити рівнодійними питомих зусиль  $P_1$  і  $P_2$ , що припадають на одиницю довжини контуру діаметрів поясків  $d_1$  і  $d_2$ .

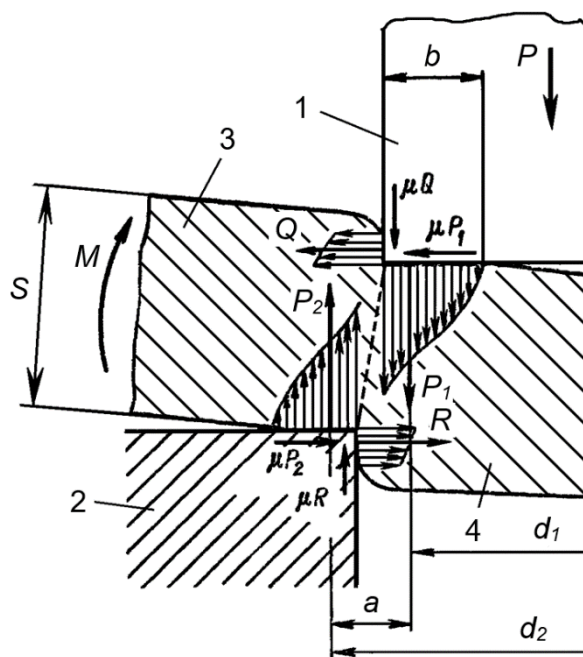


Рис. 1.4 – Схема сил, що діють на заготованку в процесі вирубання:  
1 – пуансон вирубний; 2 – матриця; 3 – заготованка; 4 – деталь

Таким чином, у процесі вирубання-пробивання утворюються сили  $P_1$  і  $P_2$  із плечем  $a$ , що створюють круговий (просторовий) згинальний момент  $M$ , під дією якого порівняно тонка заготованка згинається і випинається. Унаслідок згинання заготованки виникають сили стиснення на зовнішній поверхні пуансона і сили, що розпирають кромки матриці (на рис. 1.4 показано реактивні питомі зусилля  $Q$  і  $R$ ). На поверхню заготованки, крім нормальних сил, діють дотичні зусилля, утворені силами тертя ( $\mu P_1$ ,  $\mu Q$ ,  $\mu P_2$ ,  $\mu R$ ).

Через складність і неоднорідність силового поля під час вирубання-пробивання в технологічних розрахунках застосовується умовна технологічна величина – опір зрізу, що поєднує всі види опору металу, що вирізається, і автоматично враховує зміцнення металу до моменту сколювання:

$$\sigma_{зр} = \frac{P_{max}}{L S}, \quad (1.5)$$

де  $P_{max}$  – максимальне розрахункове зусилля розподілу;

$L$  – периметр деталі, що вирубуюється;

$S$  – товщина матеріалу.

Унаслідок експериментальних досліджень процесу вирубання-пробивання круглих деталей і отворів у заготовках із листової сталі різних товщини і марок встановлено кількісну залежність

$$\sigma_{зр} = (k_{заз} S/d + 0,6) \sigma_B, \quad (1.6)$$

де  $k_{ззз}$  – коефіцієнт, що залежить від відносного зазору  $z/S$ .

Якщо величина однобічного зазору  $z = 0,10S$ , коефіцієнт  $k_{ззз} = 1,2$ , то опір зрізу обчислюють за формулою

$$\sigma_{зр} = (1,2S/d + 0,6)\sigma_B \approx (1 + 2S/d)\sigma_S. \quad (1.7)$$

У практичних розрахунках опір зрізу визначають за спрощеною формулою  $\sigma_{зр} = (0,7 \dots 0,8)\sigma_B$ , а в більш точних – за довідковими таблицями (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Усереднені розрахункові значення  $\sigma_{зр}$

| Різні випадки<br>вирубування-пробивання |                                       | $\sigma_{зр}$                           |                                          |
|-----------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|
|                                         |                                       | Якщо $z = 0,10S$<br>( $k_{ззз} = 1,2$ ) | Якщо $z = 0,005S$<br>( $k_{ззз} = 3,0$ ) |
| Виру-<br>бування                        | Великі деталі ( $d \geq 1000S$ )      | $0,6\sigma_B$                           | $0,65\sigma_B$                           |
|                                         | Середні деталі ( $d \geq 50S$ )       | $0,7\sigma_B$                           | $0,8\sigma_B$                            |
|                                         | Дрібні деталі [ $d = (5 \dots 10)S$ ] | $0,8\sigma_B$                           | $(1 \dots 1,2)\sigma_B$                  |
| Проби-<br>вання                         | Отвір $d \leq (5 \dots 2,5)S$         | $0,6\sigma_B$                           | $(1,5 \dots 1,8)\sigma_B$                |
|                                         | Отвір $d \leq (2 \dots 1,5)S$         | $0,6\sigma_B$                           | $(2,0 \dots 2,6)\sigma_B$                |
|                                         | Отвір $d = S$                         | $0,6\sigma_B$                           | $3,6\sigma_B$                            |

Вираз для визначення максимального розрахункового зусилля розподілу в штампах із паралельними різальними кромками, необхідного для визначення технологічних параметрів і підбору устаткування, можна одержати з формули (1.5):

$$P_{max} = k_{зам} L S \sigma_{зр}, \quad (1.8)$$

де  $k_{зам} = 1,2$  – коефіцієнт, що враховує неоднорідність матеріалу і затуплення різальних кромок.

Однак для здійснення технологічного процесу вирубування-пробивання в обчисленнях необхідно враховувати такі зусилля:

- зусилля на проштовхування деталі через матрицю  $Q_{пр}$ ;
- зусилля на знімання деталі з пуансона  $Q_{зн}$  у разі застосування пружинного, гумового або пневматичного знімача.

З урахуванням виправлень формулу для розрахунку повного технологічного зусилля  $P_T$  можна записати як

$$P_T = P_{max} + Q_{пр} + Q_{зн}. \quad (1.9)$$

У процесі вирубування деталей після її відділення від заготовки (смуги) одержує залишкові пружні деформації (пружна післядія), що призводять до її застрягання в матриці. Те саме відбувається і з матеріалом (заготовкою), що залишається на пуансоні. Для проштовхування деталі через матрицю і знімання матеріалу з пуансона необхідно докласти певних зусиль  $Q_{пр}$  і  $Q_{зн}$ . Ці зусилля переважно залежать від виду матеріалу, його товщини, форми і розмірів контуру, що вирубується, а також значною мірою від величини зазору і ступеня змащення матеріалу (коефіцієнта тертя). Зусилля  $Q_{пр}$  залежить також від форми прохідного отвору матриці. У практичних розрахунках зусилля  $Q_{пр}$  і  $Q_{зн}$  зазвичай визначають у відсотковому відношенні від максимального зусилля процесу розподілу  $P_{max}$  за такими формулами:

$$Q_{пр} = c_{пр}P_{max}, Q_{зн} = c_{зн}P_{max}, \quad (1.10)$$

де  $c_{пр}$ ,  $c_{зн}$  – коефіцієнти, що враховують вплив різних факторів, значення яких можна брати з табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Значення коефіцієнтів  $c_{пр}$  і  $c_{зн}$  для конструкційних сталей і алюмінієвих сплавів

| Товщина матеріалу $S$ , мм | $c_{пр}$ | Значення $c_{зн}$ для різних типів штампів    |                              |                                               |
|----------------------------|----------|-----------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------|
|                            |          | Однопуансонний для вирубування або пробивання | Комбінований послідовної дії | Багатопуансонний для вирубування і пробивання |
| До 1,0                     | 0,05     | 0,2...0,06                                    | 0,06...0,08                  | 0,10...0,12                                   |
| 1,0...5,0                  | 0,08     | 0,06...0,08                                   | 0,10...0,12                  | 0,12...0,15                                   |

**Примітка.** Менші значення коефіцієнта  $c_{зн}$  вибирають для сталей, більші – для алюмінієвих сплавів.

Під час підбирання преса для здійснення процесу вирубування-пробивання обирається такий, номінальне зусилля якого є значно більшим (зазвичай на 25 %) за повне технологічне зусилля  $P_T$ , визначене за формулою (1.9):

$$P_{п} > P_{max} + Q_{пр} + Q_{зн}. \quad (1.11)$$

Такий підхід обумовлений тим, що преси виготовляють у певному інтервалі номінальних зусиль. Застосування преса з збільшеним зусиллям забезпечує підвищену жорсткість станини і, як наслідок, менші її пружні

коливання. Крім того, завдяки щадному режиму роботи зменшується зношування деталей преса та подовжується строк його експлуатації.

У процесі розподілу в штампах з пуансоном і матрицею, що мають паралельні різальні кромки, зусилля інтенсивно збільшується і досягає максимуму, після чого зменшується. Роботу, що витрачається на розподіл матеріалу під час вирубування-пробивання, можна визначити, якщо відома площа, обмежена кривою (рис. 1.5).

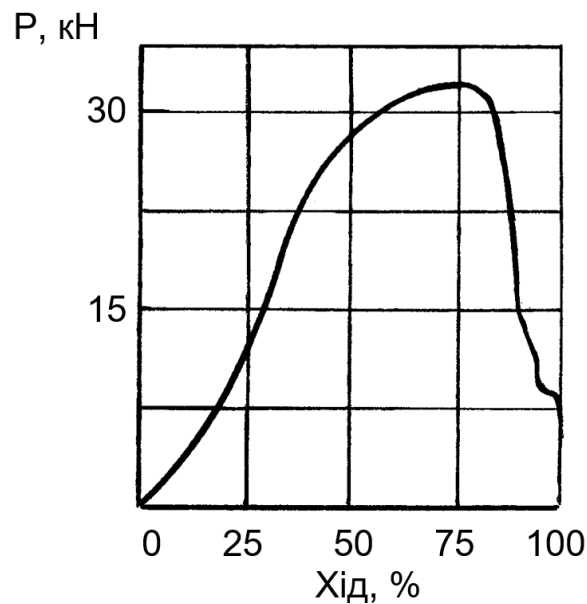


Рис. 1.5. Типова залежність зусилля вирубування-пробивання від ходу пуансона

**Устаткування і штампи** для виготовлення плоских деталей, що використовують у холодноштампувальному виробництві, вирізняються великою розмаїтістю.

За характерними ознаками штампи класифікують у такий спосіб:

- за характером виконуваної операції – вирубні, пробивні, відрізні, обрізні, надрізні, розрізні, зачисні;
  - за способом дії – штампи простої, послідовної та сполученої дії;
  - за конструкцією напрямних пристроїв – штампи без напрямних пристроїв, з напрямною плитою і з напрямними колонками (рис. 1.6);
  - за конструктивною складністю – інструментальні й спрощені.
- Інструментальні штампи розраховані на виготовлення десятків і сотень тисяч деталей, тому в них забезпечено точний напрямок пуансона і смуги; передбачено упори, фіксатори, знімачі й виштовхувачі; пуансони і матриці виготовляють зі зносостійких інструментальних сталей.

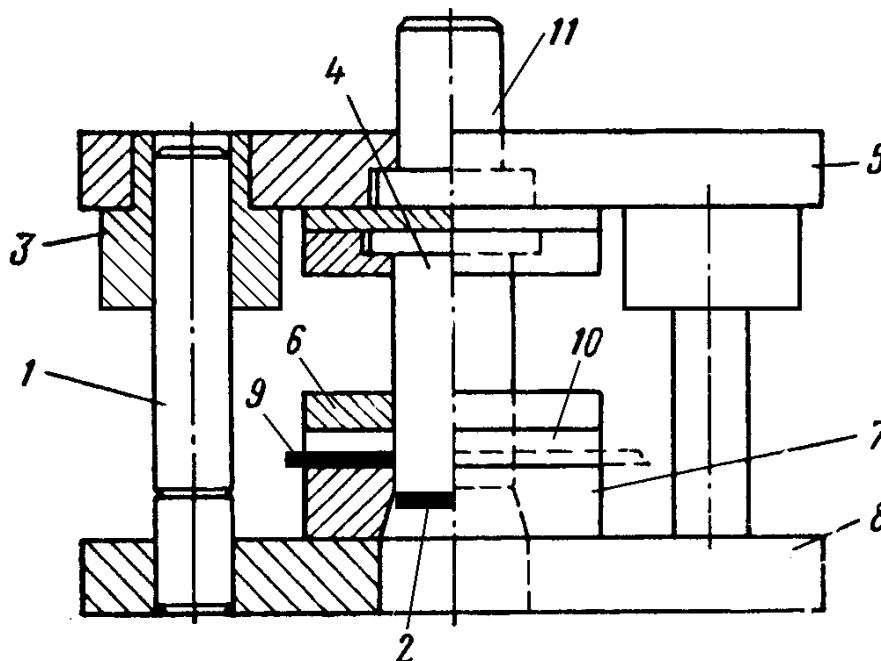


Рис. 1.6. Штмп із напрямними колонками: 1 – напрямні колонки;  
2 – готова деталь; 3 – напрямні втулки; 4 – пуансон; 5 – верхня плита;  
6 – знімач; 7 – матриця; 8 – нижня плита; 9 – смуга; 10 – напрямні планки;  
11 – хвостовик

Основним устаткуванням, що використовується в заготівельно-штампувальному виробництві для виготовлення плоских деталей і заготовок вирубанням-пробиванням із листового матеріалу, є корбові механічні преси. Такі преси вирізняються надійністю в роботі, економічністю і простотою керування.

Конструкцію корбового механічного преса показано на рис. 1.7.

Прес складається з таких основних вузлів: станини 13, повзуна 3, фрикційної муфти вмикання 11, гальма 6, приводу, систем змащування і керування. Обертний рух від електродвигуна 8 через клинопасову передачу 9 передається на маховик 12, що вільно обертається на корбовому валу 5. На цьому самому валу встановлено муфту вмикання 11 і гальмо 6. Корбовий вал 5 починає обертатися тоді, коли муфту 11 увімкнено.

Для зупинки корбового вала за умови вимкненої муфти використовують гальмо 6. Під час гальмування корбовий вал зупиняється, а маховик 12 продовжує вільно обертатися на корбовому валу 5. Гонок 4 перетворює обертання корбового вала на зворотно-поступальний рух повзуна 3. Ексцентрикову втулку 7 і кулачкову муфту 10 використовують для регулювання ходу повзуна. Гонок 4 з повзуном 3 з'єднуються гвинтом. Цей гвинт вкручено в гонок, а його кульова головка входить у відповідне гніздо повзуна. Таке з'єднання дає змогу змінювати відкриту і закриту висоти преса

з метою встановлення на прес штампів різної висоти. Робочий рух у корбових механічних пресах створюється за допомогою корбово-гонкового механізму. Корбовий вал 5 (див. рис. 1.7, а) через гонок 4 надає зворотно-поступального руху повзуну 3 преса. Повзун переміщується в напрямних 2. Крайнє верхнє положення, у яке піднімається повзун, називається верхньою мертвою точкою (ВМТ), а крайнє нижнє – нижньою мертвою точкою (НМТ). Відстань від стола 1 преса до нижнього торця повзуна, що розташовується у ВМТ або НМТ, називають відповідно відкритою або закритою висотою преса. Повний хід  $H$  повзуна – відстань між ВМТ і НМТ – дорівнює подвоєному радіусу кривошипа. Час, необхідний для ходу повзуна від ВМТ до НМТ і назад, називають часом подвійного ходу повзуна.

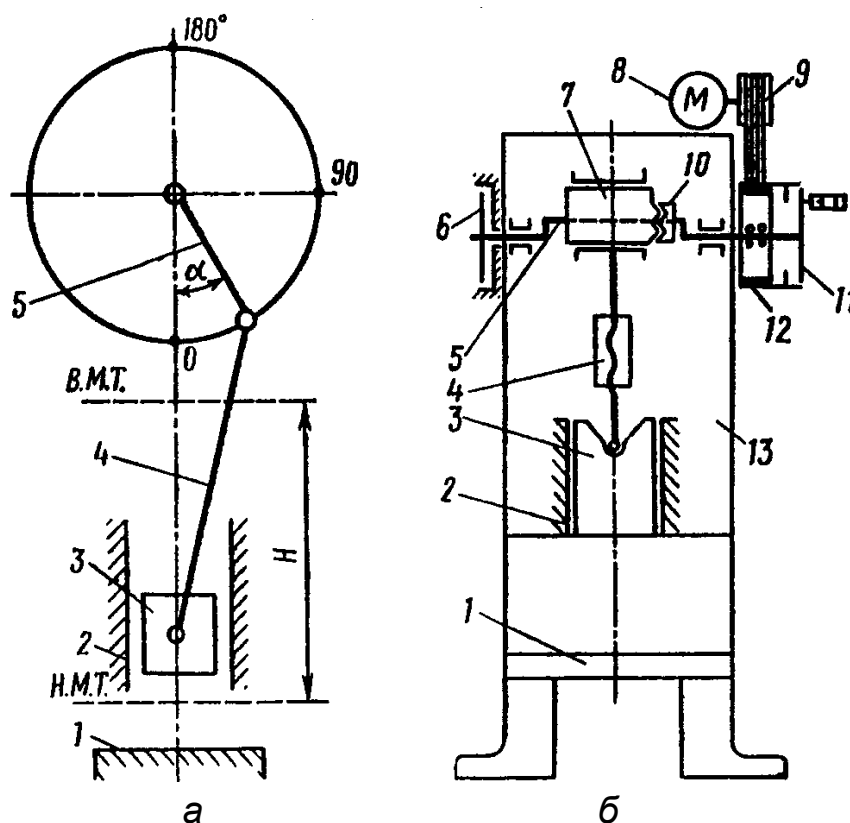


Рис. 1.7. Однокорбовий механічний прес простої дії:

а – схема руху корбово-гонкового механізму; б – схема обладнання (1 – стіл преса; 2 – напрямні; 3 – повзун; 4 – гонок; 5 – корбовий вал; 6 – гальмо; 7 – ексцентрикова втулка; 8 – електродвигун; 9 – клинопасова передача; 10 – кулачкова муфта; 11 – муфта; 12 – маховик; 13 – станина)

За принципом дії механічні преси бувають простої (з одним повзуном), подвійної (з двома повзунами – внутрішнім штампувальним і зовнішнім притискним) і потрійної (з трьома повзунами – зовнішнім притискним і двома внутрішніми штампувальними, що переміщуються в протилежних напрямках) дії.

## Матеріали, інструмент, устаткування

Смуги з листового матеріалу таких марок і товщин:

- з алюмінієвого сплаву Д16М, АМцМ завтовшки 1,0...3,0 мм;
- зі сталі марок 08кп, сталі 45 завтовшки 1,0...3,0 мм.

Штамп для вирубування-пробивання послідовної дії, однокривошипний механічний прес простої дії.

## Порядок виконання роботи

1. Вивчити схему процесу вирубування-пробивання в інструментальному штампі (див. рис. 1.1, 1.2).
2. Ознайомитися з конструкцією штампа для вирубування-пробивання з напрямними колонками (див. рис. 1.6) і принципом роботи корбового механічного преса простої дії (див. рис. 1.7).
3. Виконати розрахунок параметрів за такими формулами:
  - зусилля процесу розподілу в штампі  $P_{max}$  (1.8);
  - зусиль проштовхування  $Q_{пр}$  і зняття  $Q_{зн}$  (1.10);
  - повного технологічного зусилля  $P_T$  (1.9).
4. Здійснити штампування деталі в штампі послідовної дії на корбовому пресі зі смуг різної товщини (1.0, 1.5, 2.0, 3.0) і різних матеріалів (алюмінієві сплави Д16М, АМцМ, сталь 08кп, сталь 45).
5. Вивчити якість поверхні зрізу отриманих деталей і встановити залежність зазору між пуансоном і матрицею від товщини матеріалу і його механічних характеристик.
6. Скласти звіт з лабораторної роботи.

## Зміст звіту

1. Визначення операцій вирубування і пробивання відповідно до стандарту; схема (див. рис. 1.1).
2. Основні положення розрахунку розмірів пуансона і матриці; схема (див. рис. 1.3).
3. Схема штампа для вирубування-пробивання (див. рис. 1.6).
4. Розрахунки, виконані за формулами (1.8)–(1.10).
5. Опис якості поверхні зрізу деталей, отриманих вирубуванням-пробиванням.
6. Загальні висновки з роботи й відповіді на контрольні запитання.

### **Контрольні запитання**

1. У чому полягає відмінність операцій вирубування і пробивання?
2. Як визначаються виконавчі розміри пуансонів і матриць у процесах вирубування і пробивання?
3. Від яких факторів залежить зусилля проштовхування і знімання в процесі вирубування-пробивання?
4. Чому вирубана деталь залишається в матриці, а відходи щільно охоплюють пуансон?
5. Як впливає відносний осьовий зазор між пуансоном і матрицею на технологічне зусилля вирубування-пробивання?

## Лабораторна робота № 2

### ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИТЯГУВАННЯ З ПРИТИСКАННЯМ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ В ІНСТРУМЕНТАЛЬНОМУ ШТАМПІ

**Мета роботи** – вивчення процесу витягування циліндричних деталей із притисканням заготовки; визначення технологічних параметрів витягування і проведення експериментальних досліджень.

#### Теоретичні відомості

**Витягування** – це процес утворення порожнистої заготовки або виробу з плоскої листової або порожнистої вихідної заготовки. Витягуванням виготовляється велика кількість порожнистих деталей різноманітних форм, що відрізняються одна від одної обрисом у плані, формою бічних стінок і конфігурацією дна (рис. 2.1).

У виробництві літальних апаратів витягування застосовується для виготовлення днищ баків, півсфер кульових балонів, корпусів приладів, обтічників повітряних гвинтів, передніх відсіків підвісних баків, закінцівок крил, кіля і стабілізатора, деталей капота і гондол двигунів, дверей, люків і їх окантовок, залізів, різних кожухів, ковпачків та інших деталей.

Витягуванням можна одержати складні за формою деталі з листової заготовки, більш міцні й жорсткі за умови меншої ваги порівняно зі складально-клепананими або звареними.

Цей процес має такі переваги: висока продуктивність, раціональне використання вихідного металу, висока точність відтворення необхідних розмірів і форми деталей і, отже, високий ступінь їх взаємозамінності.

**Суть процесу витягування.** Існує більше десятка схем витягування, а також велика кількість їх різновидів. Основними і найбільш розповсюдженими є схеми витягування в інструментальному штампі без притискання заготовки і з притисканням (рис. 2.2).

Витягування без притискання заготовки (див. рис. 2.2, а) застосовується для товстого матеріалу і неглибокого витягування, наприклад,  $S = (0,01...0,03)D$  і  $d = (0,6...0,8)D$ . У процесі витягування з притисканням (див. рис. 2.2, б) заготовка 2 притискається до матриці 3 із зусиллям  $Q$ . Така схема застосовується для глибокого витягування деталей із порівняно тонкого матеріалу:  $S = (0,001...0,02)D$  і  $d = (0,45...0,6)D$ .

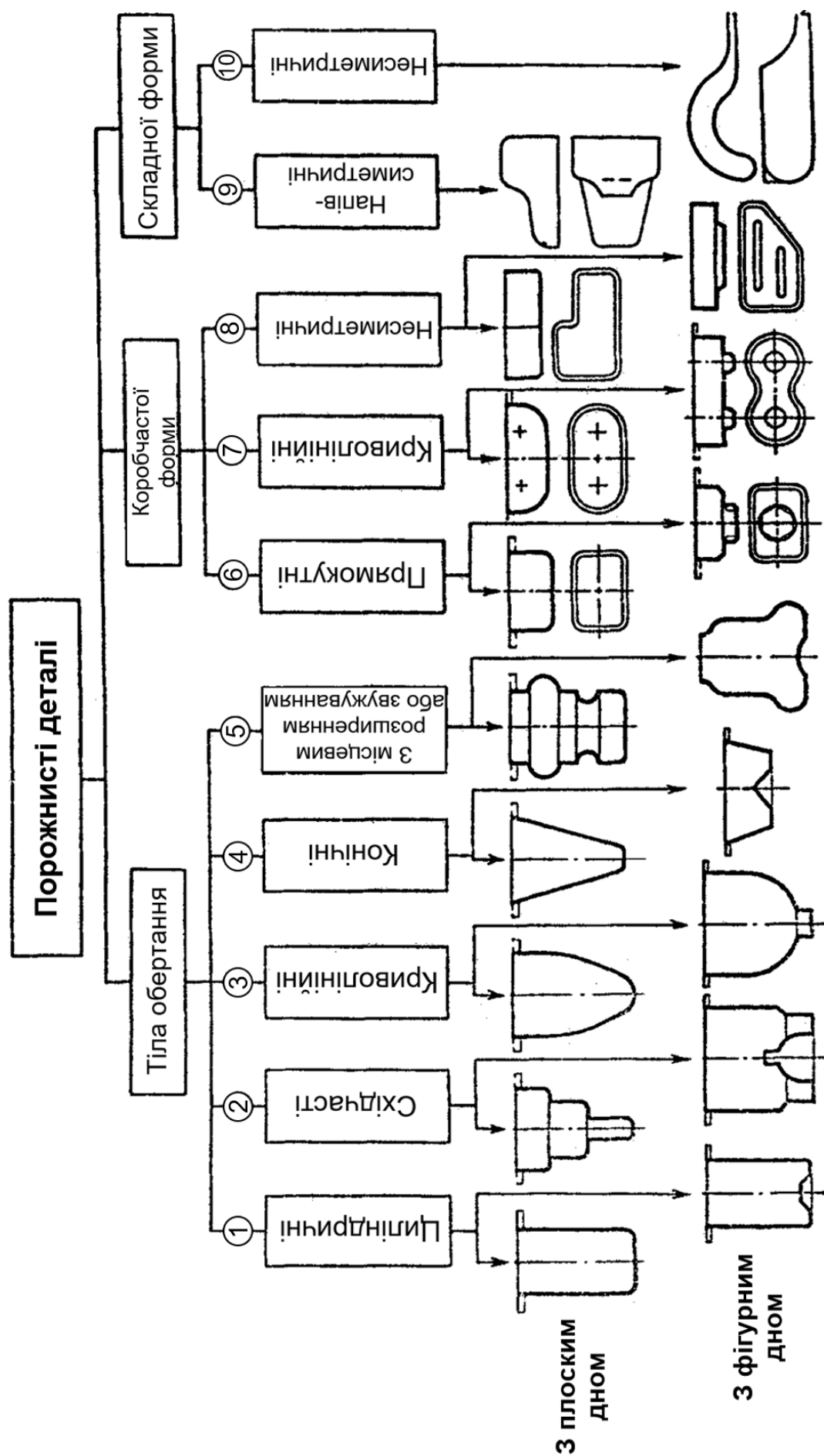


Рис. 2.1. Спрощений класифікатор деталей, що виготовляються витягуванням

Утворення деталі відбувається внаслідок руху пуансона 1 униз і його тиску на заготованку 2 (або руху матриці 3 вгору), унаслідок чого вона втягується в порожнину матриці, набуваючи необхідної форми.

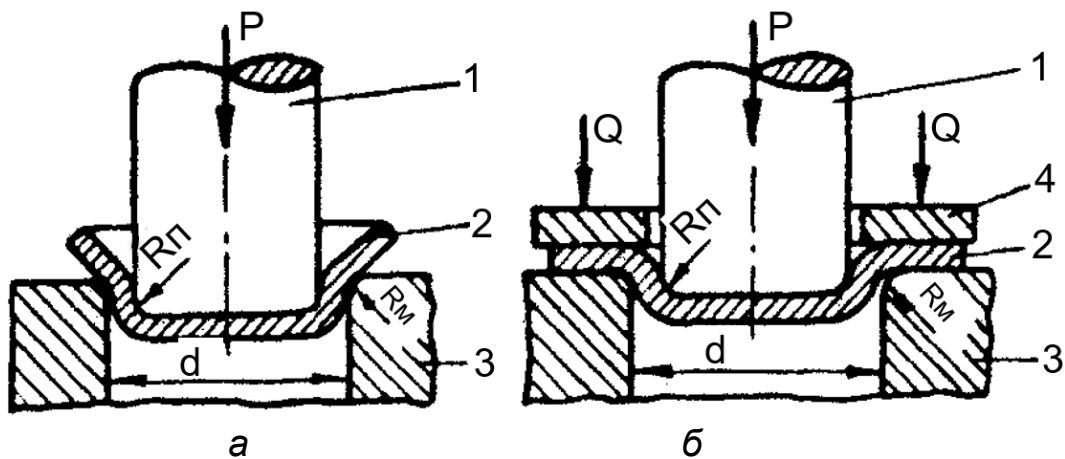


Рис. 2.2. Схеми витягування в штампах: а – без притискання заготовки; б – з притисканням заготовки (1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – матриця; 4 – притискне кільце)

У розглянутих схемах зусилля витягування  $P$  діє через пуансон 1 на донну частину деталі, що витягується, потім через вертикальну стінку передається на фланець заготовки. Фланець заготовки заведено називати основним середовищем деформації, а вертикальну стінку – зоною передавання зусилля. Під дією напружень тангенціального стискання і радіального розтягання відбувається згортання фланця заготовки.

Процес витягування циліндричної деталі з плоскої заготовки характеризується послідовним переміщенням металу з кільцевої частини заготовки ( $D - d$ ) у циліндричну. Унаслідок процесу витягування заготовка, що являє собою круг діаметром  $D$  із листового матеріалу товщиною  $S$ , перетворюється в циліндричний стакан діаметром  $d$  і висотою  $h$ , що має дно.

На рис. 2.3 наведено послідовність процесу витягування з притисканням заготовки. У вихідному положенні А заготованку 2 притиснуто до матриці 3 притискачем 4. З моменту дії пуансона 1 на заготованку і збільшення зусилля витягування настає початкова стадія I процесу (положення В і С), що характеризується локальною пластичною деформацією вільної кільцевої ділянки  $V'$  при затиснутому фланці, що зберігає свої початкові розміри  $D = D_{\phi}$ . Ділянку цього об'єму металу розташовано між затиснутим фланцем і пуансоном 1. Для наочності товщину металу листової заготовки, що входить до цієї ділянки, зачорнено. З моменту докладання зусилля витягування ділянка пластичної

деформації постійно збільшується. Ця стадія витягування здійснюється завдяки розтягання й стоншенню кільцевої ділянки об'ємом  $V'$ , причому найбільше стоншення виникає по межі ділянки з плоским дном, на яке впливає пуансон 1 із зусиллям витягування  $P$ . У міру збільшення зусилля витягування і переміщення пуансона розтягання й стоншення вільної кільцевої ділянки  $V'$  збільшуються. До кінця I стадії (положення С) завершується пластична деформація донної частини заготовки. Після досягнення рівноваги між розтяжним зусиллям і опором фланця деформуванню починається стадія II процесу витягування, що полягає в пластичній деформації фланця і втягуванні його в матрицю (положення Е і F). Таким чином, процес витягування з притисканням складається з двох стадій: початкової I і завершальної II.

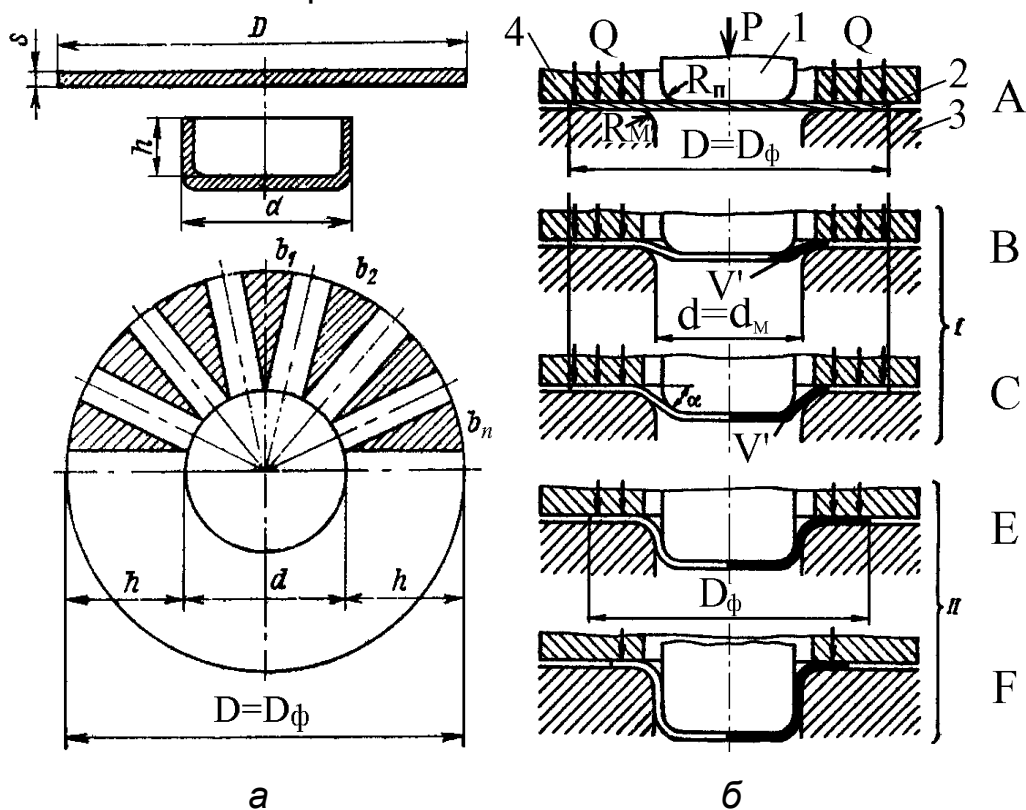


Рис. 2.3. Послідовність процесу витягування з притисканням заготовки:  
а – стадії процесу; б – схема згортки заготовки

Оскільки в процесі витягування відбувається втягування матеріалу заготовки 2 більшого діаметра  $D$  у матрицю 3 із заокругленням  $R_m$ , що має менший діаметр  $d$ , то природно, що у фланці з'являється надлишковий матеріал (див. рис. 2.3, б). Пояснити утворення надлишкового матеріалу можна після аналізу ділянок, з яких утворюються дно і циліндрична стінка стакану.

Для утворення дна достатньо заготовки діаметром  $d$ , а для циліндричної стінки висотою  $h$  необхідна заготовка діаметром  $D$  без

заштрихованих характерних трикутників  $b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$  (див. рис. 2.3, б). Наявність цих залишкових трикутних об'ємів металу призводить до виникнення складного напружено-деформованого стану у фланці, що в певних випадках спричиняє втрату стійкості фланця й утворення на ньому гофрів (рис. 2.4).

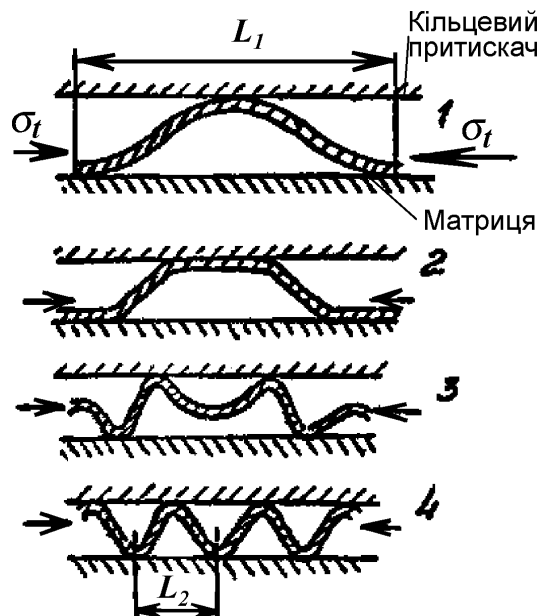


Рис. 2.4 Схема утворення гофрів

Процес утворення гофрів (етапи 1, 2, 3, 4, див. рис. 2.4) продовжується стрибкоподібно доти, доки не утвориться цілком стійкий дрібний гофр. Утворення гофрів на фланці заготовки є дефектом, і для усунення цього явища необхідне притискання заготовки.

### Технологічні розрахунки

Технологічні розрахунки в процесі витягування циліндричних деталей без фланця полягають у визначенні розмірів заготовки, геометричного і допустимого коефіцієнтів витягування, потрібної кількості переходів, у підрахунку поопераційних розмірів деталей, потрібних зусиль витягування і притискання фланця, розмірів  $R_m$ .

**Ступінь деформації і коефіцієнти витягування.** Залежно від співвідношення висоти і діаметра деталі, що витягується, а також відносної товщини заготовки витягування можна виконати за одну або кілька операцій. Необхідно здійснювати витягування за найменшу кількість операцій, що виконуються з максимально допустимим ступенем деформації. Ступінь деформації  $\varepsilon$  під час витягування циліндричних деталей вимірюється **ступенем витягування  $K$** :

$$K = \frac{D}{d}. \quad (2.1)$$

Водночас найпоширенішим показником ступеня деформації є коефіцієнт витягування  $m$  (геометричний)

$$m = \frac{d}{D} = \frac{1}{K}. \quad (2.2)$$

Чим більший ступінь деформації, тим менша величина коефіцієнта витягування. Витягування в штампах може здійснюватися за кілька переходів. Суть багатоперехідного витягування полягає в такому: під час другої і наступної операцій витягування заготовкою є циліндричний стакан, що внаслідок кожної наступної операції перетворюється на стакан меншого діаметра, але більшої висоти (рис. 2.5).

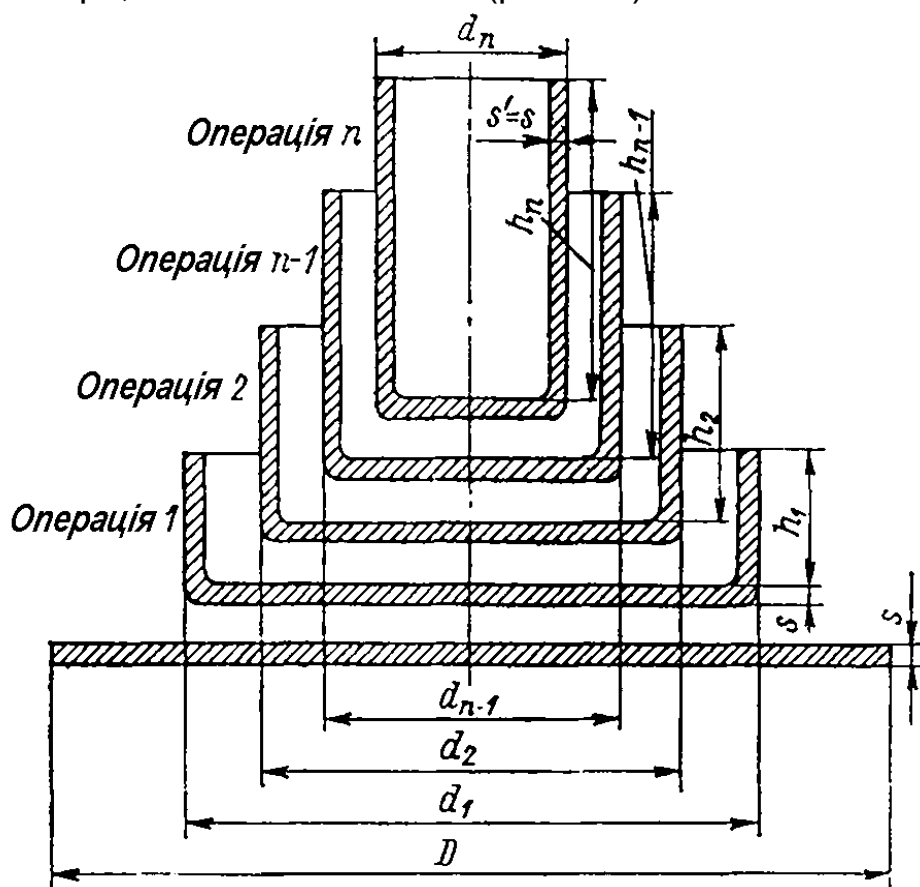


Рис. 2.5. Схема одержання порожнистого виробу діаметром  $d_n$  і висотою  $h_n$  із плоскої заготовки діаметром  $D$  багатоперехідним витягуванням

У процесі багатоперехідного витягування поопераційні геометричні коефіцієнти витягування визначаються так:

$$m_1 = \frac{d_1}{D}; m_2 = \frac{d_2}{d_1}; m_3 = \frac{d_3}{d_2}; \dots; m_n = \frac{d_n}{d_{n-1}}, \quad (2.3)$$

де  $d_1$  – діаметр стакана на першому переході, що дорівнює діаметру деталі  $d$ , отриманої за один перехід;

$d_2, d_3$  – діаметри заготовки-стакана після другого і третього переходів;  
 $d_n$  – середній діаметр остаточно одержуваного стакана-деталі,  $d_n = d$ .

Сумарний коефіцієнт витягування внаслідок  $n$  переходів

$$m = \frac{d_1}{D} \frac{d_2}{d_1} \frac{d_3}{d_2} \dots \frac{d_n}{d_{n-1}}, \quad (2.4)$$

тобто коефіцієнт витягування для деталі в процесі багатоперехідного витягування дорівнює добутку коефіцієнтів витягування на всіх переходах:

$$m = m_1 m_2 m_3 \dots m_n. \quad (2.5)$$

Як видно з наведених формул (2.3) і (2.4), коефіцієнт витягування  $m$  є геометричною характеристикою, тому його можна назвати **геометричним коефіцієнтом витягування**. Для кожного матеріалу існує коефіцієнт витягування, обумовлений граничною пластичністю матеріалу, це так званий **граничний коефіцієнт витягування**  $m_{\text{гран}}$ . За умови деякого ступеня деформації, що відповідає  $m_{\text{гран}}$ , відбувається руйнування заготовки, що витягується, зокрема, де бічна стінка деталі сполучається з плоским дном (**небезпечний переріз**). У виробничих умовах обмежуються робочим або допустимим коефіцієнтом витягування

$$m_{\text{роб}} = m_{\text{доп}} = (1,05 \dots 1,18) m_{\text{гран}}.$$

Про можливості виготовлення деталей роблять висновок, порівнюючи геометричний коефіцієнт витягування  $m$  із допустимим коефіцієнтом витягування  $m_{\text{доп}}$  для цієї марки матеріалу.

Значення допустимих коефіцієнтів витягування по переходах залежно від пластичності матеріалу, відносної товщини  $S/D$ , відносного радіуса заокруглення матриці  $R_m/S$  наведено в табл. 2.1. Ці коефіцієнти перевірено багаторічною практикою, вони є оптимальними для операцій витягування з притисканням циліндричних деталей без фланця.

Напруження в небезпечному перерізі можна записати у вигляді

$$\sigma = (\sigma_1 + \sigma_{\text{тер}}) e^{\mu\alpha} + \sigma_{\text{зг.м}} + \sigma_{\text{зг.п}}, \quad (2.6)$$

де  $e^{\mu\alpha}$  – множник Ейлера для урахування збільшення розтяжних напружень під час переходу рухомої заготовки через ребро матриці ( $\mu$  – коефіцієнт тертя на ребрі матриці;  $\alpha$  – кут охоплення;  $e = 2,72$  – основа натуральних логарифмів);  $\sigma_{\text{зг.м}}$ ,  $\sigma_{\text{зг.п}}$  – напруження на ділянках згинання заготовки по радіусах матриці й пуансона.

Таблиця 2.1

Значення допустимих коефіцієнтів витягування по переходах  
для циліндричних деталей без фланця

| Позначення допустимих коефіцієнтів для трьох переходів | Значення коефіцієнтів витягування при відносній товщині заготовки $(S/D)100$ , % |             |             |             |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
|                                                        | 2...1,5                                                                          | 1,5...1,0   | 1,0...0,5   | 0,5...0,2   |
| $m_{1доп}$                                             | 0,46...0,50                                                                      | 0,50...0,53 | 0,53...0,56 | 0,56...0,58 |
| $m_{2доп}$                                             | 0,70...0,72                                                                      | 0,72...0,74 | 0,74...0,76 | 0,76...0,78 |
| $m_{3доп}$                                             | 0,72...0,74                                                                      | 0,74...0,76 | 0,76...0,78 | 0,78...0,80 |

**Примітки:** 1. Менші значення коефіцієнтів витягування відповідають великим радіусам заокруглень:  $R_m = (8...10)S$ , а великі – малим радіусам:  $R_m = (4...6)S$ .

2. Наведені коефіцієнти належать до пластичних сталей і м'якої латуні, а також алюмінієвих сплавів Д16М, АМцМ. У процесі витягування менш пластичних матеріалів коефіцієнти витягування слід брати на 2 % більші за табличні.

Таким чином, найбільше за величиною напруження діє в матеріалі, що витягується, у небезпечному перерізі. Напруження тертя і напруження згину, що входять у вираз (2.6) є шкідливими. Якщо розглядати ідеалізовану схему і знехтувати цими складовими, то напруження в стінці виявляться такими, що дорівнюють напруженням у фланці заготовки:  $\sigma = \sigma_1$ .

Як показують експерименти, руйнування відбувається, якщо напруження  $\sigma_1$  дорівнює  $1,15 \sigma_B$ , тобто

$$\sigma = \sigma_1 = 1,15 \sigma_B. \quad (2.7)$$

Коефіцієнт витягування, що можна було б одержати в цих ідеальних умовах, називається **ідеальним** і позначається  $m_{i\partial}$ . У разі визначення  $\sigma_1$  (ідеальний випадок) задача зводиться до розгляду умов рівноваги кільцевого фланця, до внутрішньої поверхні якого прикладено рівномірне напруження  $\sigma_1$ , спрямоване до центра. Розв'язання рівняння рівноваги разом з умовою пластичності дає змогу визначити залежність  $\sigma_1 = f(m_{i\partial})$ . Для інженерних розрахунків залежність між напруженнями та ідеальним коефіцієнтом витягування має вигляд

$$\sigma_1 = a \left( \frac{1}{m_{i\partial}} - b \right) 1,15 \sigma_B, \quad (2.8)$$

де  $a$  і  $b$  – коефіцієнти, що характеризують інтенсивність зміцнення деформівного матеріалу в процесі витягування; для матеріалів Д16М

$\sigma_B = 200 \dots 220$  МПа і АМцМ  $\sigma_B = 120 \dots 140$  МПа;  $a = 0,75$ ;  $b = 0,96$ .

Спільним розв'язанням рівнянь (2.7) і (2.8) одержуємо

$$m_{id} = \frac{a}{1,15+ab}. \quad (2.9)$$

Цей коефіцієнт витягування є верхньою оцінкою штампованості матеріалу в ідеальних умовах.

**Визначення розмірів заготовки.** Розміри заготовки для витягування без стоншення циліндричних деталей визначаються з умови рівності площ поверхні готової деталі та заготовки. У цьому випадку заготовка має форму круга. Площа круга заготовки дорівнює сумі площ поверхонь готової деталі:

$$\frac{\pi D^2}{4} = \sum F_{дет}. \quad (2.10)$$

Для випадку витягування деталі типу стакан без фланця рівність (2.10) перетворюється на таке:

$$\frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi d^2}{4} + \pi d h, \quad (2.11)$$

де ліворуч записано площу круга-заготовки, а праворуч – суму площ дна стакану і бічної поверхні циліндра (за відсутності радіусів між дном і стінкою).

З рівняння (2.11) з урахуванням припуску на обрізання торця з фестонами можна визначити найбільший діаметр заготовки, що забезпечує якісний торець деталі:

$$D = 1,20 \sqrt{d^2 + 4dH}, \quad (2.12)$$

де  $H$  – висота готової деталі після обрізання фестонів.

**Визначення допустимого ступеня деформації витягування; розрахунок необхідної кількості переходів.** Допустиму величину ступеня деформації обчислюють за експериментально отриманими допустимими коефіцієнтами витягування. Геометричні коефіцієнти витягування циліндричних деталей без фланця розраховують за формулами (2.3) і (2.4).

Про можливість одержання циліндричної деталі без фланця роблять висновок, порівнюючи величину геометричного коефіцієнта витягування (формула (2.3)) із допустимим коефіцієнтом на першому переході для цієї марки матеріалу (див. табл. 2.1). Якщо геометричний коефіцієнт витягування більший за допустимий коефіцієнт для першого переходу  $m \geq m_{1прп}$ , то деталь можна одержати за один перехід. Якщо  $m < m_{1прп}$ , то

для одержання деталі потрібно кілька переходів. Допустимий на першому переході коефіцієнт витягування  $m_{1прп}$  вибирають меншим, ніж на другому  $m_{2прп}$  і наступних переходах. На практиці вважають, що на другому і наступному переходах допустимі коефіцієнти витягування є рівними.

З огляду на описані вище умови і вираз для коефіцієнта витягування при декількох переходах формулу (2.5) можна записати так:

$$m \geq m_{1доп} m_{2доп} \dots m_{nдоп} = m_{1доп} m_{2доп}^{n-1}. \quad (2.13)$$

При цьому враховано, що  $m_{2прп}$  дорівнює допустимим коефіцієнтам витягування на всіх наступних  $(n - 1)$  переходах.

Логарифмуючи вираз (2.13), отримуємо

$$\ln(m) \geq \ln(m_{1доп}) + \ln(m_{2доп}^{n-1}),$$

де визначаємо **кількість переходів**, необхідних для одержання готової деталі:

$$n \geq 1 + \frac{\ln(m) - \ln(m_{доп})}{\ln(m_{2доп})}. \quad (2.14)$$

Якщо після розрахунку за формулою (2.14) кількість переходів виявиться не цілим числом, то  $n$  слід округлити до найближчого більшого цілого числа.

**Розрахунок зусиль витягування і притискання.** На практиці для розрахунку зусиль витягування застосовують спрощені формули з огляду на те, що допустимі напруження в небезпечному перерізі мають бути меншими за руйнівні. Найбільше зусилля витягування має бути меншим за зусилля, необхідне для розриву деталі по перерізу, що сприймає зусилля витягування:

$$P \leq L S \sigma_p, \quad (2.15)$$

де  $L$  – значення периметра деталі в небезпечному перерізі;

$S$  – товщина вихідної заготовки;

$\sigma_p = \sigma_B(1 + \delta)$  – руйнівні напруження в небезпечному перерізі.

Формула для визначення максимального зусилля витягування, що враховує зусилля проштовхування, товщину матеріалу і геометричний коефіцієнт витягування, має вигляд

$$P_{max} = t \pi S d_n \left( \frac{1}{m} - 1 \right) \sigma_B, \quad (2.16)$$

де  $t$  – коефіцієнт, що враховує вплив зусилля проштовхування заготовки ( $t = 1, 2, \dots, 1, 3$ ).

Для розрахунку повного зусилля витягування необхідно визначати зусилля притискання. На практиці зусилля притискання для циліндричних деталей визначають за формулами:

– під час здійснення витягування на першому переході

$$Q = \frac{\pi}{4} (D^2 - (d_1 + 2R_m)^2) q; \quad (2.17)$$

– на наступних переходах у процесі витягування просторових заготованок

$$Q = \frac{\pi}{4} (d_{n-1}^2 - (d_n + 2R_m)^2) q, \quad (2.18)$$

де  $q$  – тиск притискання (за довідковими даними);

$D$  – діаметр заготовки;

$d_1$  – діаметр циліндричної деталі на першому переході;

$R_m$  – радіус заокруглення робочої кромки матриці.

Для м'якої сталі рекомендується такий тиск притискання: якщо  $S < 0,5$  мм, то  $q = 2,0 \dots 3,0$  МПа, якщо  $S > 0,5$  мм, то  $q = 1,5 \dots 2,5$  МПа; для сплавів на основі міді (латуні)  $q = 1,0 \dots 2,0$  МПа, для алюмінієвих сплавів  $q = 0,6 \dots 1,2$  МПа.

### Матеріали, інструмент, устаткування

Листовий матеріал завтовшки 1,0 мм з алюмінієвого сплаву АМцМ і заготовки різного розміру, виготовлені із цього матеріалу; спеціальний витяжний штамп із гідравлічним притиском; штангенциркуль; лінійка; рейсмус; гідравлічний прес із ручним насосом (рис. 2.6).

### Порядок виконання роботи

1. Вивчити конструкцію витяжного штампа з гідравлічним притискачем і преса з ручним насосом (див. рис. 2.6). На рисунку показано два положення: ліворуч – вихідне – до моменту початку витягування; праворуч – робоче – у процесі витягування деталі 18.

На пресі зусилля притискання створюється поршнем 16, що діє на кільцеву поверхню фланця заготовки 20. Тиск рідини на поршень 16 здійснюється за допомогою ручного насоса 2 за умови закритого вентиля 6, відкритого вентиля 22 і такому положенні розподільника 5, що забезпечує подавання рідини під тиском в циліндр притискача 15. Тиск у циліндрі притискача 15 контролюється манометром 21, за показниками якого можна розрахувати експериментальне зусилля притискання  $Q_e$ , Н. Наприклад, на першому переході:

$$Q_e = p' \frac{\pi(D-d_1)^2}{4}, \quad (2.19)$$

де  $p'$  – показання манометра 21, МПа;

$D, d_1$  – діаметри заготовки і стакана на першому переході, м.

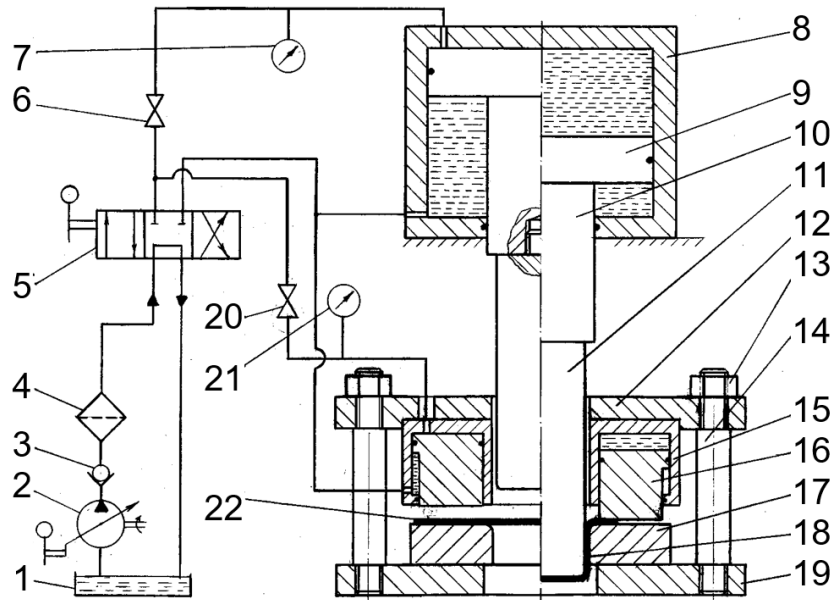


Рис. 2.6. Схема лабораторного гідравлічного преса і штамп з притискачем:

- 1 – гідравлічний бак; 2 – насос із ручним приводом; 3 – зворотний клапан;
- 4 – фільтр; 5 – чотирилінійний трипозиційний розподільник із ручним приводом; 6 – вентиль запірний магістралі силового циліндра;
- 7 – манометр силового циліндра; 8 – корпус силового циліндра;
- 9 – поршень; 10 – шток; 11 – витяжний пуансон; 12 – верхня плита штамп;
- 13 – гайка; 14 – напрямна колонка; 15 – корпус притискача; 16 – притискач;
- 17 – матриця; 18 – деталь; 19 – нижня плита штамп; 20 – заготовка;
- 21 – манометр магістралі циліндра притискача; 22 – вентиль запірний магістралі циліндра притискача

Експериментальне зусилля витягування створюється тиском рідини на поршень 9 і через шток 10 на витяжний пуансон 11, що, переміщуючись, діє на заготовку 20. Тиск рідини в силовому циліндрі 8 преса створюється ручним насосом 2 за умови відкритого вентиля 6, закритого вентиля 22 і такого положення розподільника 5, що забезпечує подання тиску в магістраль силового циліндра. Експериментальне зусилля витягування  $P_e$ , Н, можна розрахувати за формулою

$$P_e = p'' F_9, \quad (2.20)$$

де  $p''$  – показання манометра 7, МПа;

$F_9 = 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$  – площа поверхні поршня 9 силового циліндра.

2. Розрахувати зусилля витягування  $P_{max}$  за формулою (2.16), притискання  $Q$  за формулою (2.17) і напруження в небезпечному перерізі для стакана діаметром  $d = 26$  мм, отриманого із заготованок різного діаметра згідно з завданням. Визначити геометричний коефіцієнт витягування  $m$  за формулою (2.2) і допустимий коефіцієнт витягування  $m_{доп}$  за табл. 2.1. Отримані результати розрахунків занести до табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Розрахункові й експериментальні значення параметрів витягування

| №п/п | Параметри                                                                    | Номер експеримента |     |    |    |
|------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----|----|----|
|      |                                                                              | 1                  | 2   | 3  | 4* |
| 1    | Діаметр заготовки експериментальний $D_e$ , мм                               | 46                 | 48  | 50 | 52 |
| 2    | Геометричний коефіцієнт витягування $m$                                      |                    |     |    |    |
| 3    | Допустимий коефіцієнт витягування $m_{доп}$                                  |                    |     |    |    |
| 4    | Розрахункові зусилля притискання $Q$ , Н                                     |                    |     |    |    |
| 5    | Розрахункове зусилля витягування $P_{max}$ , Н                               |                    |     |    |    |
| 6    | Показання манометра силового циліндра $p''$ , кгс/см <sup>2</sup>            | 8                  | 8,5 | 9  | 10 |
| 7    | Показання манометра силового циліндра $p''$ , Па                             |                    |     |    |    |
| 8    | Експериментальне зусилля витягування $P_e$ , Н                               |                    |     |    |    |
| 9    | Експериментальні напруження в небезпечному перерізі $\sigma = P_e / LS$ , Па |                    |     |    |    |

3. Підготувати експериментальний штамп і прес для дослідження матеріалу на штампованість (див. рис. 2.6). Здійснити витягування циліндричних деталей типу стакан із заготованок різних діаметрів для параметрів, зазначених у табл. 2.2.

Під час проведення експериментів фіксувати і заносити до табл. 2.2 показання  $p''$  манометра 7, встановленого в магістралі силового циліндра преса (див. рис. 2.6).

Виконати розрахунки експериментальних значень потрібних зусиль витягування  $P_e$  для проведених експериментів за формулою (2.20) і напруження витягування  $\sigma = P_e / LS$  (див. формулу (2.15)). Отримані значення занести до табл. 2.2 (усі обчислення виконувати в системі СІ).

4. Скласти звіт з лабораторної роботи.

## Зміст звіту

1. Короткий опис суті процесу витягування й основних його схем (див. рис. 2.2).
2. Основні поняття, теоретичні положення і формули для визначення параметрів процесу: (2.2), (2.4), (2.7), (2.9), (2.12), (2.14), (2.16), (2.17).
3. Схема експериментального штампа з притискачем (див. рис. 2.6).
4. Порівняння експериментальних значень зусилля витягування з розрахунковими, отриманими за формулою (2.16), і визначення похибки розрахунку.
5. Графік залежності  $\sigma_e = f(m)$  й оцінювання впливу коефіцієнта витягування на напруження витягування.
6. Загальні висновки з роботи і відповіді на контрольні запитання.

## Контрольні запитання

1. Описати вплив зусилля притискання на якість деталі, що витягується.
2. Які деформації та напруження існують у зонах різних стадій процесу витягування?
3. Яким показником характеризується ступінь деформації під час витягування?
4. Поясніть суть граничного і допустимого коефіцієнтів витягування.

### Лабораторна робота № 3

## ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ РІЗНИХ ФАКТОРІВ НА ПРОЦЕС І ПОТРІБНЕ ЗУСИЛЛЯ ШТАМПУВАННЯ-ВИТЯГУВАННЯ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ

**Мета роботи** – вивчення впливу механічних характеристик металу, товщини заготовки, радіуса матриці, а також мастила між інструментом і заготовкою на потрібне зусилля витягування вісесиметричних деталей.

### Теоретичні відомості

**Витягування** – це процес утворення порожнистої заготовки або виробу з плоскої або порожнистої вихідної листової заготовки. Як впливає зі схеми витягування вісесиметричних деталей (рис. 3.1), зусилля витягування  $P$  діє через пуансон 1 на донну частину (ділянка А) деталі, а потім через вертикальну стінку (ділянка С і В) передається на фланець заготовки (ділянка F).

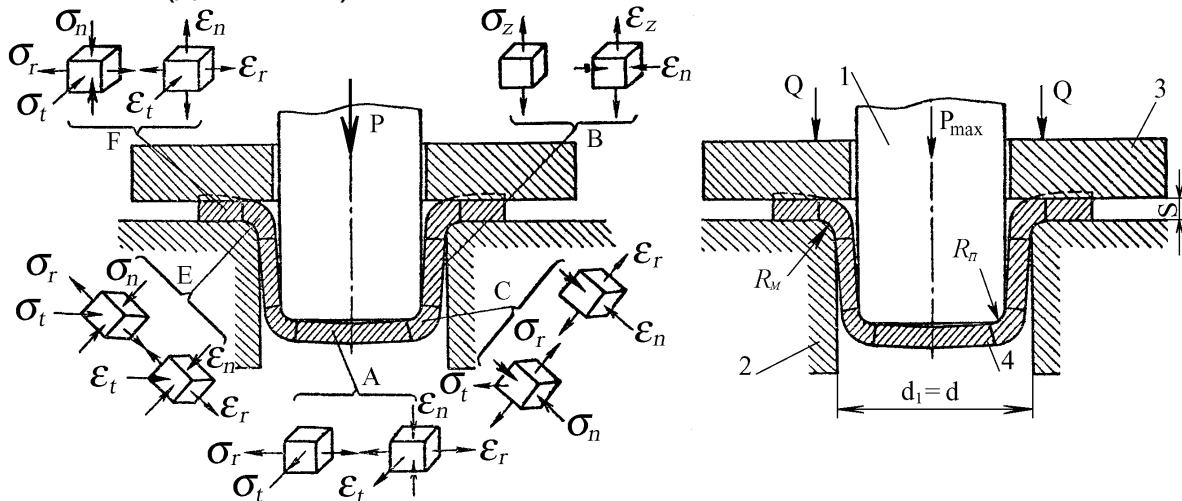


Рис. 3.1. Схема напружено-деформованого стану і зусилля, що діють в окремих ділянках у процесі витягування (1 – пуансон; 2 – матриця; 3 – притискач; 4 – заготовка)

Матеріал листової заготовки, що деформується в процесі витягування, можна поділити на характерні ділянки. Виконаємо аналіз напружено-деформованого стану матеріалу заготовки в характерних ділянках **А, В, С, Е, F**. Матеріал дна (ділянка **А**) перебуває в плоско-напруженому й об'ємно-деформованому станах. Деформації металу на ділянці **А** являють собою двостороннє рівномірне розтягання в площині дна й осьове стиснення і їх величина становить усього 1...3 % від загальної деформації. Циліндричну частину порожнистої деталі (ділянка **В**) розташовано в зазорі між матрицею 2 і пуансоном 1. Тут метал перебуває в лінійно-напруженому й об'ємно-деформованому станах.

На ділянці **С** переходу дна у вертикальну стінку в металі виникають напруження у вигляді двовісного розтягання й одновісного стиснення, що призводить до значного розтягання й стоншення матеріалу (стоншення може досягти 20...30 %). Ця ділянка **С** називається **небезпечним перерізом** через загрозу відриву дна від стінки внаслідок дії в ньому максимальних напружень  $\sigma_{max}$  і значного його стоншення. Це місце й обмежує можливість максимального використання пластичних властивостей металу, що штампують.

Ділянка **Е**, що розташована по радіусу заокруглення робочих кромek матриці, зазнає складної деформації. Така деформація спричинена одночасним згинанням і розтяганням заготовки. Це і веде до появи найбільших меридіональних (радіальних) розтягань і тангенціальних (окружних) стискань.

Ділянка заготовки **Ф**, що розташована під притискним кільцем, перебуває в об'ємно-деформованому й об'ємно-напруженому стані. У фланці заготовки виникають радіальні (меридіональні) розтяжні і тангенціальні (колові) стискальні напруження, а в перпендикулярному до нього напрямку – осьові стискальні напруження, якими через їх невелику величину на практиці часто нехтують.

Вертикальна стінка деталі, що витягується, є зоною передавання зусилля, фланець – основним середовищем деформації, а дно – зоною докладання зусилля. Таким чином, у процесі витягування з притисканням у деформованій заготовці отримуємо:

- напруження розтягання в радіально-меридіональному і стиснення в тангенційно-коловому напрямках, безпосередньо пов'язані з опором металу деформації;

- напруження  $\sigma_{тер}$ , спричинені тертям між заготовкою, притискачем і матрицею на її плоскій ділянці;

- напруження  $\sigma'_{тер}$ , спричинені тертям заготовки по кромці матриці;

- напруження від згинання  $\sigma_r$  заготовки під час заходження на заокруглену частину матриці й випрямлення під час сходження з неї.

Суму всіх цих напружень називають загальним опором (напруженням) витягування заготовки в отвір матриці в процесі витягування. Він рівнозначний напруженню, що утворюється внаслідок розподілу зусилля витягування  $P$  по площі поперечного перерізу порожнистого циліндра  $F \approx \pi d_{сер} S$ , де  $d_{сер}$  – середній діаметр,  $S$  – товщина матеріалу,  $d_n \approx d_{сер}$  – середній діаметр деталі на  $n$ -му переході. Кожну складову напруження можна визначити аналітичним шляхом за певних спрощувальних допущень.

Виявивши всі напруження, що виникають під час витягування, нескладно визначити і зусилля витягування. Зусилля витягування  $P$ , що передається через пуансон на деформівну заготованку, визначається добутком суми всіх напружень (їх максимального значення) на площу перерізу стінки деталі, що витягується. Існують теоретичні й емпіричні формули для визначення зусиль витягування. Теоретичні формули одержують складанням диференціальних рівнянь рівноваги нескінченно малого елемента, виділеного в зоні деформації, і розв'язанням їх разом із рівнянням умови пластичності. Емпіричні формули одержують на основі низки експериментів і використовують для орієнтовних розрахунків. Повне зусилля витягування  $P_{max}$ , необхідне для добору преса, можна визначити за формулою

$$P_{max} = P + Q + P_2, \quad (3.1)$$

де  $P$  – зусилля витягування на першому переході з плоскої листової заготовки;

$Q$  – зусилля притискання;

$P_2$  – зусилля проштовхування.

Зусилля витягування  $P$  на першому переході визначають за теоретичною формулою:

$$P = [(\sigma_1 + \sigma_{тер}) (1 + 1,6\mu) + \sigma_r] \pi d_1 S, \quad (3.2)$$

де  $\sigma_1$  – радіально-розтяжні напруження (без урахування сил згинання і тертя), безпосередньо пов'язані з опором металу деформуванню;

$\sigma_{тер}$  – напруження від дії сил тертя між заготованкою, притискачем і матрицею;

$\sigma_r$  – напруження від згинання на вхідній кромці матриці;

$\mu$  – коефіцієнт тертя;

$d_1$  – діаметр деталі, що витягується, після першого переходу витягування;

$S$  – товщина листової заготовки.

Для визначення складових у формулі (3.2) скористаємося такими залежностями:

$$\sigma_1 = a \left( \frac{1}{m_1} - b \right) \sigma_B; \sigma_{тер} = \frac{2\mu Q}{\pi d_1 S}; \sigma_r = \frac{\sigma_B S}{2R_m + S};$$

$$Q = 0,25\pi [D^2 - (d_1 + 2R_m)^2] q, \quad (3.3)$$

де  $a$  і  $b$  – коефіцієнти, що характеризують інтенсивність зміцнення деформівного металу в процесі витягування;

$\sigma_B$  – границя міцності під час розтягання;

$\mu$  – коефіцієнт тертя;

$D$  і  $d_1$  – діаметри листової заготовки і деталі після першого переходу;

$S$  – вихідна товщина заготовки;

$R_m$  – радіус заокруглення робочої кромки матриці;

$q$  – тиск притискання за табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Середні значення тисків притискання  $q$

| Матеріал                             | Тиск притискання $q$ , МПа |
|--------------------------------------|----------------------------|
| Алюмінієвий сплав Д16А-М             | 1,0...1,2                  |
| Алюмінієвий сплав Д16А-Т, В95        | 1,4...1,8                  |
| Алюмінієвий сплав АМцМ               | 1,2...1,5                  |
| Сталь: Ст. 3, сталь 20, $S < 0,5$ мм | 2,5...3,0                  |
| $S > 0,5$ мм                         | 2,0...2,5                  |

Підставивши у формулу (3.2) значення всіх складових, отриманих із залежностей (3.3), одержимо формулу для визначення  $P$ :

$$P = \pi d_1 S \left\{ \left[ a \left( \frac{1}{m_1} - b \right) \sigma_B + \frac{2\mu Q}{\pi d_1 S} \right] (1 + 1,6\mu) + \frac{\sigma_B S}{2R_m + S} \right\}, \quad (3.4)$$

де  $m_1 = d_1/D$  – коефіцієнт витягування на першому переході;

$Q$  – зусилля притискання (3.3);

$a$ ,  $b$ ,  $\mu$  – коефіцієнти, значення яких наведено в табл. 3.2.

Отримана залежність (3.4) дає можливість зрозуміти фізичну суть перебігу процесу і проаналізувати вплив різних факторів на цей процес.

Для наближеного розрахунку повного зусилля витягування  $P_{max}$  на основі формули (3.1) пропонується така залежність:

$$P_{max} = (1,5 \dots 1,6)P + Q, \quad (3.5)$$

де  $P$  – зусилля витягування, що визначається за формулою (3.4);

$Q$  – зусилля притискання, що визначається за формулою (3.3).

Максимальне зусилля  $P_{max}$  є однією з основних характеристик процесу витягування. Аналіз формул (3.4), (3.5) і схеми витягування (див. рис. 3.1) дає змогу зробити висновок, що основні фактори, які впливають на процес штампування-витягування, такі: механічні характеристики металу  $\sigma_B$ , товщина заготовки  $S$ , радіус заокруглення робочої кромки матриці  $R_m$ , зусилля притискання і геометричні розміри заготовки  $D$  і деталі  $d_1$ .

Таблиця 3.2

Значення коефіцієнтів  $a$ ,  $b$ ,  $\psi$ ,  $\mu$  у процесі витягування матеріалів із різними механічними властивостями ( $\sigma_B$  і  $\psi$ ) (температура +20 °С)

| №п/п | Марка матеріалу           | $\sigma_B$ , МПа | $\psi$ , % | $a$  | $b$        | $\mu$ ,<br>без мастила | $\mu$ ,<br>з мастилом |
|------|---------------------------|------------------|------------|------|------------|------------------------|-----------------------|
| 1    | Алюмінієвий сплав Д16М    | 200              | 10         | 0,75 | 0,96       | 0,25                   | 0,11...0,17           |
| 2    | АМцМ                      | 120              | 11         | 0,75 | 0,96       |                        |                       |
| 3    | Сталь 08кп                | 300              | 35         | 0,85 | 1,15...1,2 | 0,18...0,22            | 0,14...0,16           |
| 4    | Ст. 3                     | 400              | 27         | 0,8  | 1,1        |                        |                       |
| 5    | Сталь 10                  | 360              | 25         | 0,8  | 1,1        |                        |                       |
| 6    | Сталь 45                  | 600              | 20         | 0,75 | 1,1        |                        |                       |
| 7    | Неіржавіюча сталь 1Х18Н9Т | 600...800        | 25...35    | 0,8  | 1,1        | 0,3...0,35             | 0,25                  |
| 8    | Титановий сплав ОТ4       | 800              | 6          | 0,6  | 0,85       | 0,25...0,28            | 0,15...0,22           |

**Повне зусилля витягування** залежить від механічних характеристик металу ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_s$ ,  $\psi$ ) і змінюється в напрямку руху пуансона, досягаючи максимуму, якщо величина робочого ходу пуансона становить 0,4...0,6  $H$ , де  $H$  – повна глибина витягування. Вплив механічних характеристик матеріалу на форму кривої зусилля в напрямку робочого ходу показано на рис. 3.2. Ці експериментальні криві отримано за умови однакових розмірів заготовки й однакових коефіцієнтів витягування:  $D = 100$  мм,  $S = 1,5$  мм,  $m = 0,515$ ,  $d = 50$  мм. Як видно з графіка кривих, для матеріалів із більш високою границею міцності  $\sigma_B$  необхідне різке збільшення максимального значення зусилля витягування. На рис. 3.3 наведено типові діаграми зусиль витягування для алюмінієвого сплаву Д16М завтовшки 1 мм за умови різних значень коефіцієнта витягування  $m_1$ .

Криві показують, що зі зменшенням коефіцієнта витягування максимальні значення зусилля витягування за інших рівних умов збільшуються, а максимум зусилля наближається до осі ординат.

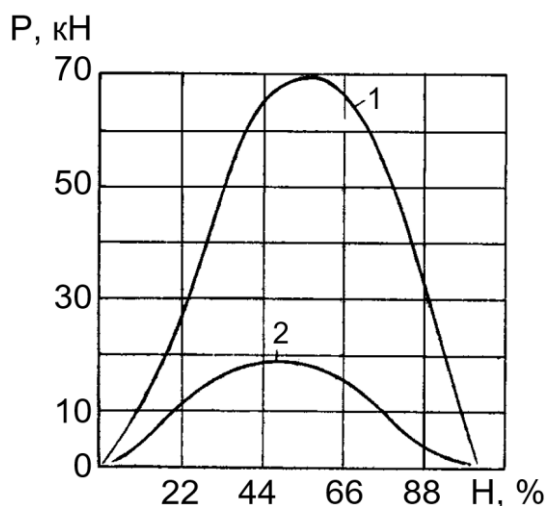


Рис. 3.2. Експериментальні криві зусилля витягування:

1 – сталь 08кп;

2 – алюмінієвий сплав Д16М

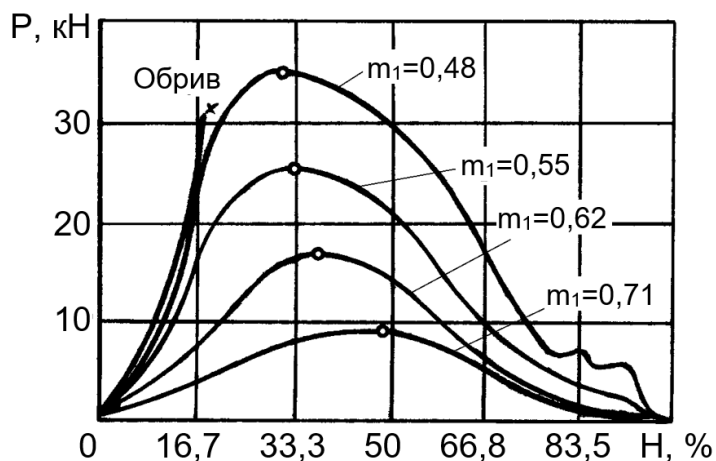


Рис. 3.3. Типові діаграми зусилля витягування для різних коефіцієнтів витягування  $m_1$

**Товщина матеріалу  $S$**  вихідної заготовки впливає як на абсолютну величину повного зусилля витягування, так і на інші параметри процесу (коефіцієнт витягування  $m_1$ ), а також складкоутворення. Оскільки під час витягування діаметр заготовки  $D$  більший за діаметр матриці  $d$ , то в процесі витягування заготовки 4 у матрицю 2 пуансоном 1 (див. рис. 3.1) за умови певних співвідношень  $S/D$  по краю фланця утворюються складки (гофри). Тут свою роль відіграє товщина заготовки. Залежно від відносної товщини заготовки витягування можна здійснювати із застосуванням притискання або без нього. На практиці встановлено, що чим менша різниця діаметрів заготовки  $D$  і  $d$  і чим більшим є відношення товщини  $S$  заготовки до її діаметра  $D$ , тим менша ймовірність утворення гофрів. Установлено, що гофри в процесі витягування будуть утворюватися в таких випадках:  $(S/D)100 \leq 4,5(1 - m_1)$  або якщо  $D - d > 22S$ . На рис. 3.4 зображено теоретичну криву, що характеризує залежність між відношенням товщини до діаметра заготовки і коефіцієнтом витягування  $m_1$  для матеріалу Д16М.

Ця крива є межею двох областей витягування – з утворенням складок і без них. Якщо при заданому коефіцієнті витягування  $m_1$  значення  $(S/D)100$  лежить нижче межевої кривої, то під час витягування складки не утворюються, а складові зусилля витягування, затрачуваної на розгладження складок, немає. Підбиваючи підсумок, можна сказати, що відносна товщина є основним критерієм для вибору способу витягування – з притисканням або без нього.

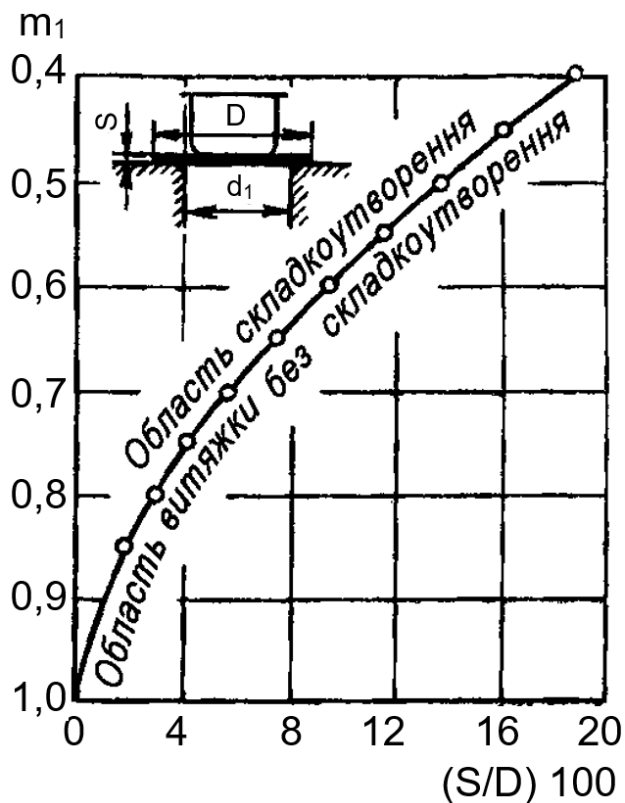


Рис. 3.4. Межова лінія початку складкоутворення

Розглянемо вплив **радіусів заокруглення** робочих кромek матриць і пуансонів. Радіус заокруглення матриці  $R_M$  впливає на перебіг процесу витягування і на такі параметри: напруження в матеріалі та зусилля, необхідне для витягування; утворення гофрів; стоншення матеріалу стінок; граничний коефіцієнт витягування і стійкість матриці. Аналіз формули (3.4) показує, що чим більший радіус заокруглення матриці  $R_M$ , тим менше зусилля потрібне для витягування. Однак надмірне збільшення радіуса  $R_M$  може призвести до того, що плоска частина заготовки занадто рано вийде з-під притискача, унаслідок чого в ній виникнуть гофри і складки, що можуть заклинитися в зазорі між пуансоном і матрицею. Через це може відбутися різке збільшення потрібного зусилля витягування і відрив дна. Це особливо небезпечно в процесі витягування деталей із порівняно тонких заготовок. Тому величини радіусів заокруглень кромek матриць має бути розділено за ступенем деформації та відносною товщиною заготовки. Радіус заокруглення пуансона  $R_n$  на зусилля витягування впливає незначно, але він впливає на стоншення матеріалу стінок біля дна виробу. Якщо радіус  $R_n$  малий, то знижується ефективна міцність у небезпечному перерізі, а отже, збільшується граничне значення коефіцієнта витягування. Оптимальну відносну величину радіусів  $R_M$  і  $R_n$  залежно від ступеня деформації та відносної товщини  $(S/D)100$  наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Оптимальна величина радіусів  $R_m$  і  $R_n$ 

| $\frac{S}{D} 100$ | Ступінь деформації                |         |                                 |         |
|-------------------|-----------------------------------|---------|---------------------------------|---------|
|                   | Великий ( $m = 0,45 \dots 0,52$ ) |         | Малий ( $m = 0,56 \dots 0,68$ ) |         |
|                   | $R_m/S$                           | $R_n/S$ | $R_m/S$                         | $R_n/S$ |
| 3                 | 5                                 | 3       | 3                               | 2       |
| 2                 | 6                                 | 4       | 4                               | 2,5     |
| 1,5               | 7,5                               | 5       | 5                               | 3       |
| 1,0               | 9                                 | 6       | 6                               | 4       |
| 0,8               | 10                                | 7       | 7                               | 4,5     |

**Призначення мастила**, а також його вплив на потрібне зусилля витягування й інші параметри процесу полягає в зменшенні тертя між матеріалом та інструментом. Унаслідок цього знижується потрібне зусилля витягування завдяки зменшенню зусилля проштовхування деталі й полегшується знімання деталі з пуансона. Вибір оптимальних мастильних матеріалів ґрунтується на двох теоріях: теорії межового шару і гідродинамічної теорії тертя. На практиці склад мастила добирають на основі дослідно-експериментальних даних з огляду на те, що мастило повинно мати такі властивості: створювати міцну плівку, здатну витримувати значні тиски; забезпечувати добре прилипання і рівномірний розподіл мастильного шару по поверхні; легко видалятися з поверхні деталей; не ушкоджувати механічно і хімічно поверхні інструменту й деталей; бути хімічно стійким і нешкідливим для робітника та навколишнього середовища.

У виробництві застосовується велика кількість мастил різного складу, що поділяють на дві групи: мастила без наповнювача і мастила з наповнювачем. Найкращими є мастила з великим вмістом наповнювача (крейда, тальк, графіт), що зменшують коефіцієнт тертя в 2–3 рази і підвищують стійкість штампів у 2–5 разів порівняно зі стійкістю штампів із застосуванням мастил без наповнювача. У штампувальному виробництві застосовуються різноманітні мастила на основі мильної води, машинного мастила й різних інших сумішей, а також графіт, тальк і їх суміші в різних пропорціях. Для матеріалів з алюмінієвих сплавів у процесі витягування будь-яких деталей як мастило використовують рослинну олію і машинне мастило, технічний вазелін. З метою використання корисних сил тертя змазувати слід витяжні кромки і поверхню матриці для запобігання їх від

спрацювання, налипання і задирок. Цю ж рекомендацію може бути застосовано в процесі витягування сферичних, параболічних і конічних деталей із тонкого матеріалу, що легко утворює гофри.

### Матеріали, інструмент, устаткування

Листовий матеріал різної товщини від 0,8 до 2,0 мм з алюмінієвого сплаву АМцМ (Д16АМ), сталі 08кп (Ст.3); заготовки діаметром  $D = 52$  мм, виготовлені із цього матеріалу; спеціальний витяжний штамп із гідравлічним притискачем і гідравлічний прес із ручним насосом (див. рис. 2.6); штангенциркуль; лінійка.

### Порядок виконання роботи

1. Визначити величини на основі схеми витяжного штампа і преса з ручним насосом:  $F_9$  – площа силового циліндра,  $F_{16}$  – площа поршня притискача, необхідні для розрахунку експериментальних зусиль.

2. Виконати розрахунок параметрів процесу для заготовок діаметром 52 мм (кількість заготовок і марки матеріалів визначає викладач) і різних значень  $S$  і  $R_m$ :

- зусилля притискання  $Q$  за формулою (3.3);
- максимальне зусилля витягування  $P_{max}$  за формулою (3.5).

3. Здійснити витягування вісесиметричних деталей типу стакан. Кількість експериментів і значення параметрів мають відповідати величинам, наведеним у табл. 2.4. У процесі експериментів фіксувати показання манометрів, установлених у магістралі притискача і силового циліндра преса (див. поз. 7 і 21, рис. 2.6). У другому, п'ятому, шостому, сьомому і восьмому експериментах записувати показання манометра 7 для визначення залежності зусилля витягування в напрямку руху витяжного пуансона. Розрахункові й експериментальні значення всіх параметрів процесу витягування занести до табл. 3.4.

4. На основі результатів експериментів побудувати графіки залежностей  $P_e = f(S)$ ,  $P_e = f(R_m)$ , на які нанести розрахункові значення  $P_{max}$ ; побудувати також графік  $P_e = f(H_n)$  (для випадку, зазначеного викладачем).

5. Скласти звіт з лабораторної роботи.

### Зміст звіту

1. Основні теоретичні положення; див. рис. 3.1, формули (3.1), (3.3), (3.4), (3.5); визначення витягування (за стандартом).
2. Графіки залежності експериментального зусилля витягування від

товщини заготовки, радіуса заокруглення матриці, ходу пуансона:

$$P_e = f(S), P_e = f(R_m), P_e = f(H_n).$$

3. Висновки про вплив мастила на процес витягування.
4. Відповіді на контрольні запитання.

Таблиця 3.4

Розрахункові й експериментальні значення

| Параметри процесу                  | Вихідні дані:<br>– діаметр заготовки $D = 52$ мм, $d_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ мм<br>– матеріал: алюмінієвий сплав <u>                    </u> |               |                     |                                                |           |                         |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------------|------------------------------------------------|-----------|-------------------------|
| Номер експеримента                 | Геометричні параметри, мм                                                                                                                          | $Q$ , Н (3.3) | $P_{max}$ , Н (3.5) | Показання манометра $p''$ , кг/см <sup>2</sup> | $P_e$ , Н | Хід пуансона $H_n$ , мм |
| 1                                  | $R_m = 6,0$                                                                                                                                        | $S = 0,8$     |                     |                                                |           |                         |
| 2                                  |                                                                                                                                                    | $S = 1,5$     |                     |                                                |           |                         |
|                                    |                                                                                                                                                    |               |                     |                                                |           |                         |
|                                    |                                                                                                                                                    |               |                     |                                                |           |                         |
| 3                                  |                                                                                                                                                    | $S = 2,0$     |                     |                                                |           |                         |
| 4                                  | $S = 1,5$                                                                                                                                          | $R_m = 4,0$   |                     |                                                |           |                         |
| 5<br>алюмінієвий сплав із мастилом |                                                                                                                                                    | $R_m = 6,0$   |                     |                                                |           |                         |
|                                    |                                                                                                                                                    |               |                     |                                                |           |                         |
|                                    |                                                                                                                                                    |               |                     |                                                |           |                         |
| 6                                  |                                                                                                                                                    | $R_m = 8,0$   |                     |                                                |           |                         |
| 7<br>сталь без мастила             | $S =$<br>$R_m =$                                                                                                                                   |               |                     |                                                |           |                         |
|                                    |                                                                                                                                                    |               |                     |                                                |           |                         |
|                                    |                                                                                                                                                    |               |                     |                                                |           |                         |
|                                    |                                                                                                                                                    |               |                     |                                                |           |                         |
| 8<br>сталь із мастилом             | $S =$<br>$R_m =$                                                                                                                                   |               |                     |                                                |           |                         |
|                                    |                                                                                                                                                    |               |                     |                                                |           |                         |
|                                    |                                                                                                                                                    |               |                     |                                                |           |                         |
|                                    |                                                                                                                                                    |               |                     |                                                |           |                         |

### Контрольні запитання

1. Які характерні ділянки є в заготовці, що деформується в процесі витягування? Який напружено-деформований стан буває в цих ділянках?
2. Як впливають геометричні й механічні характеристики листової заготовки на зусилля витягування?
3. Яка з геометричних характеристик заготовки є основним критерієм для вибору способу витягування?

4. У яких випадках витягування виконується з притисканням, а в яких – без притискання заготовки?
5. Яким фактором обмежується максимальна величина радіуса заокруглення матриці ***R<sub>m</sub>***?

## Лабораторна робота № 4 ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ПРОСТИМ ОБТЯГУВАННЯМ

**Мета роботи** – вивчення процесу простого обтягування і виконання технологічних розрахунків, ознайомлення з наявним устаткуванням, а також виконання експериментів.

### Теоретичні відомості

Існує велика кількість деталей літальних апаратів (рис. 4.1), що виготовляються з листа і мають радіус кривизни, який у кілька сотень і тисяч разів перевищує товщину заготовки. Виготовити такі деталі витягуванням, а саме переміщенням незатисненого фланця заготовки в матрицю, неможливо. Уникнути утворення складок у вільній зоні заготовки можна лише шляхом повного защемлення кромки заготовки. Формозміна при цьому буде відбуватися завдяки одночасному згинанню і розтяганню і, отже, стоншенню заготовки. За такої схеми матриця стає непотрібною і процес формоутворення можна здійснювати за допомогою одного лише пуансона за умови затиснених крамок заготовки.

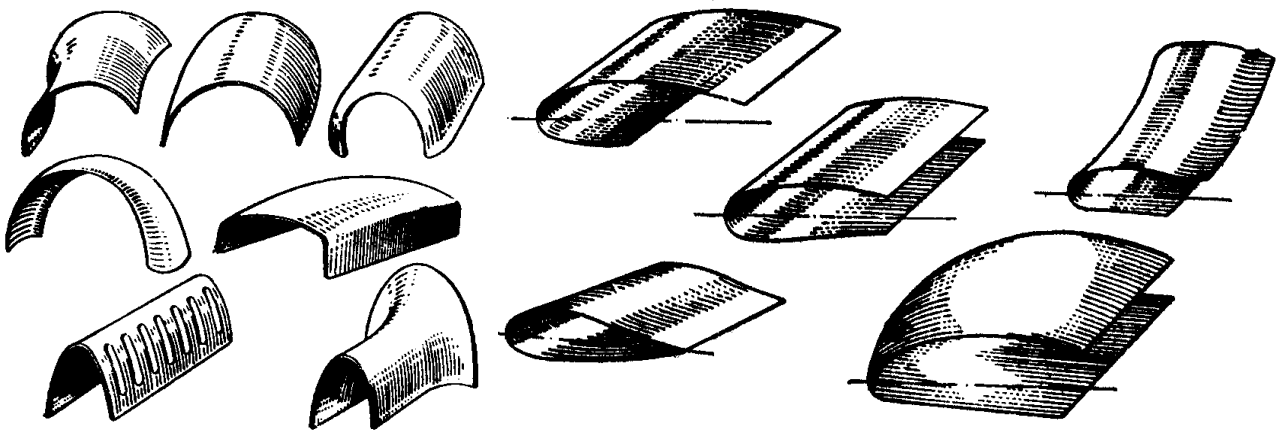


Рис. 4.1. Типові деталі, що одержуються простим обтягуванням з листа

**Обтягуванням** називається процес утворення заготовки заданої форми прикладанням розтяжних зусиль до її країв. Просте обтягування (за іншим визначенням – поперечне) застосовується переважно для виготовлення коротких обшивок або інших деталей одинарної та подвійної кривизни: обшивок фюзеляжу, носових частин і вузьких обшивок крила, обтічників оперення. Залежно від форми поперечного перерізу вихідного напівфабрикату розрізняють два види простого обтягування – обтягування листового й обтягування профільного матеріалів.

Під час простого обтягування формоутворення листової заготовки 2 здійснюється під дією зусилля обтягування  $T$ , що докладається до пуансона 1. При цьому розтяжні напруження в листі виникають завдяки силам реакції  $Q_1$  заготовки, закріпленої в затисках преса (рис. 4.2). Взаємне розташування векторів зусилля  $T$  і реакції  $Q_1$  близьке до паралельного. Існує два різновиди схеми простого обтягування: для деталей одинарної (див. рис. 4.2) і подвійної (рис. 4.3) кривизни.

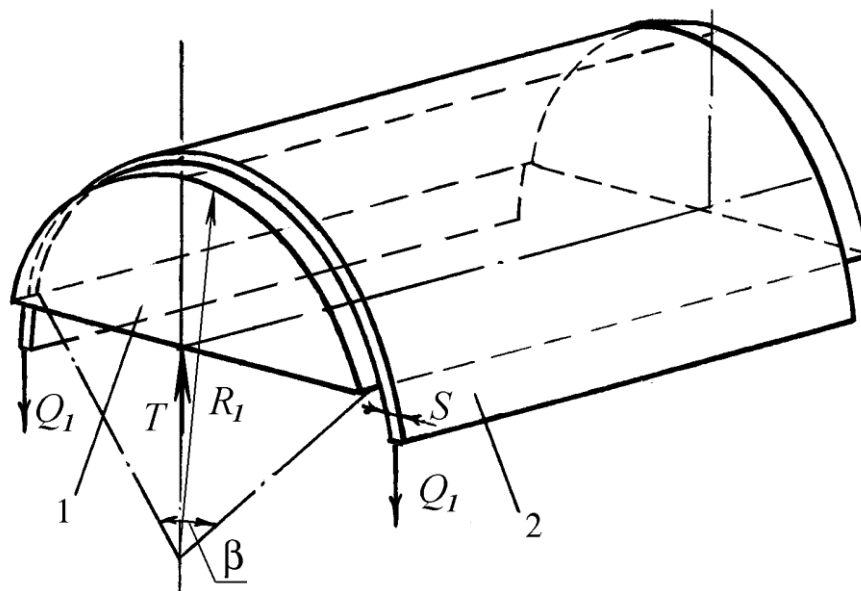


Рис. 4.2. Схема простого обтягування деталей одинарної кривизни радіусом  $R_1$ : 1 – обтяжний пуансон; 2 – листова заготовка

Розглянемо перебіг процесу простого обтягування на прикладі виготовлення деталей подвійної кривизни (див. рис. 4.3). Обтяжний пуансон 1 має двоопуклу кривизну поверхні з різними радіусами  $R_1$  і  $R_2$  поперечної та подовжньої кривизни відповідно. Дуги меншого радіуса  $R_1$  сполучаються з плоскими ділянками поверхні заготовки.

У міру переміщення пуансона 1 угору вузька смужка заготовки, що першою прилягає до пуансона, розтягується під дією сил  $T$  і  $Q$ . Унаслідок цього вузькі смужки, що розташовуються поруч із нею, деформуються й обтягують пуансон і так далі. Наприкінці процесу обтягування до пуансона приляжуть крайні смужки, тобто внутрішня поверхня заготовки цілком набуде форми пуансона.

Просте обтягування деталей одинарної кривизни застосовується переважно для виготовлення коротких обшивок (довжиною до трьох метрів). Характерна його особливість полягає в тому, що зусилля докладається на довгому боці заготовки. З погляду напружено-деформованого стану можна сказати, що відбувається згинання з

розтяганням. У разі виготовлення деталей одинарної кривизни напруження вздовж твірної обшивки не змінюються. Зовсім інший розподіл напружень і деформацій наявний у разі виготовлення обшивок подвійної кривизни (див. рис. 4.3). У такому разі все ускладнюється через те, що з появою подовжньої кривизни (радіус  $R_2$ ) напруження залежать від кута  $\beta$  і є неоднаковими вздовж усієї довжини обшивки  $b_3$ .

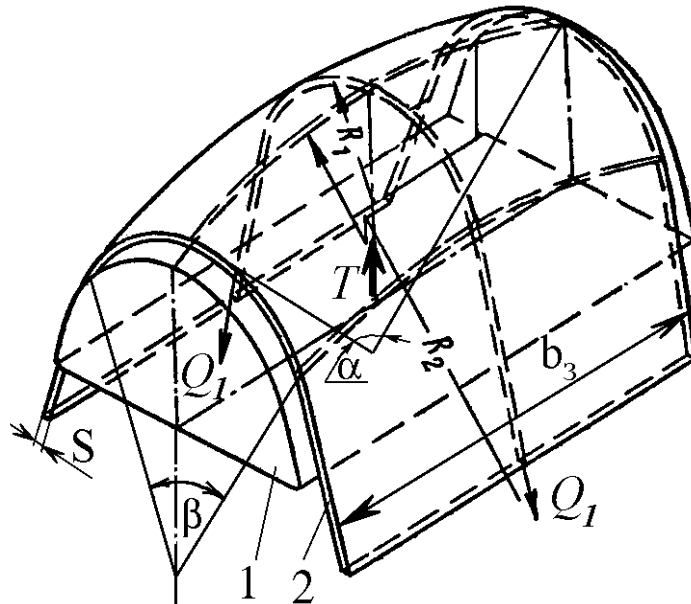


Рис. 4.3. Схема простого обтягування деталей подвійної кривизни радіусами  $R_1$  і  $R_2$

**Параметри процесу простого обтягування.** Визначення параметрів процесу обтягування має важливе значення для встановлення технологічних можливостей і призначення режимів самого процесу. Основними параметрами є:

- граничний ступінь деформації, що виражається геометричним коефіцієнтом обтягування  $k_r$ ;
- гранично допустимий ступінь деформації, що виражається граничним коефіцієнтом обтягування  $k_{гран}$ ;
- кількість переходів під час обтягування  $n$ ;
- розміри заготовки, з якої має бути виготовлено деталь заданої форми з урахуванням припусків на обрізання по периметру деталі;
- потрібне зусилля обтягування  $F_p$  і зусилля підйому стола преса  $T$ ;
- ступінь відповідності контуру отриманої деталі контуру пуансона.

**Геометричний коефіцієнт обтягування  $k_r$**  характеризує ступінь деформації металу в найнебезпечнішому місці заготовки. Формулу для визначення геометричного коефіцієнта обтягування можна записати в загальному вигляді

$$k_z = 1 + \ln \frac{l_{max}}{l_0 \frac{l_{max}}{l_0}} \quad (4.1)$$

Довжина заготовки між затискачами  $l_0$  (рис. 4.4) розраховується за формулою

$$l_0 = l_{кр} + 2(\Pi_1 + \Pi_2), \quad (4.2)$$

де  $l_{кр}$  – довжина кривої розгортки деталі в тому місці, де вона є найбільшою (визначається за креслеником, шаблоном перерізу або плазом);

$\Pi_1$  – припуск на обрізання заготовки (звичайно  $\Pi_1 = 10...20$  мм);

$\Pi_2$  – припуск між затискачем і торцем обрізання деталі, що залежить від конструкції преса і можливості близького підведення затискних губок до обтяжного пуансона ( $\Pi_2 = 100...150$  мм).

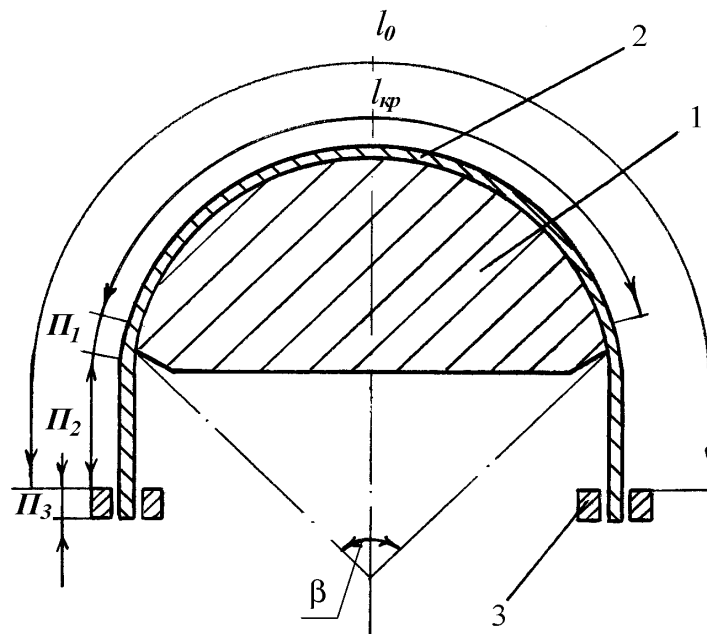


Рис. 4.4. Схема визначення довжини заготовки: 1 – пуансон для обтягування; 2 – листова заготовка; 3 – затискачі

Максимальна довжина заготовки  $l_{max}$  (див. рис. 4.5) визначається в найбільш деформованому місці після обтягування і розраховується за формулою

$$l_3 = l_{кр} + 2(\Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3), \quad (4.3)$$

де  $l_{кр}$  – довжина кривої розгортки деталі в тому місці, де вона є найбільшою (визначається за креслеником, шаблоном перерізу або плазом);

$\Pi_1$  – припуск на обрізання заготовки (звичайно  $\Pi_1 = 10...20$  мм);

$\Pi_2$  – припуск між затискачем і торцем обрізання деталі, що залежить від конструкції преса і можливості близького підведення затискних губок до обтяжного пуансона ( $\Pi_2 = 100...150$  мм);

$\Pi_3$  – припуск, необхідний для захоплення заготовки затискними губками ( $\Pi_3 = 50$  мм).

З огляду на деякі припущення формула (4.1) для обтягування деталей подвійної кривизни набуде вигляду

$$k_z = 1,01 + \frac{f}{l_0} k_\beta, \quad (4.4)$$

де  $f$  – стріла прогину деталі подвійної кривизни (див. рис. 4.5);

$k_\beta$  – коефіцієнт, що враховує величину кута  $\beta$  (визначається з табл. 4.1).

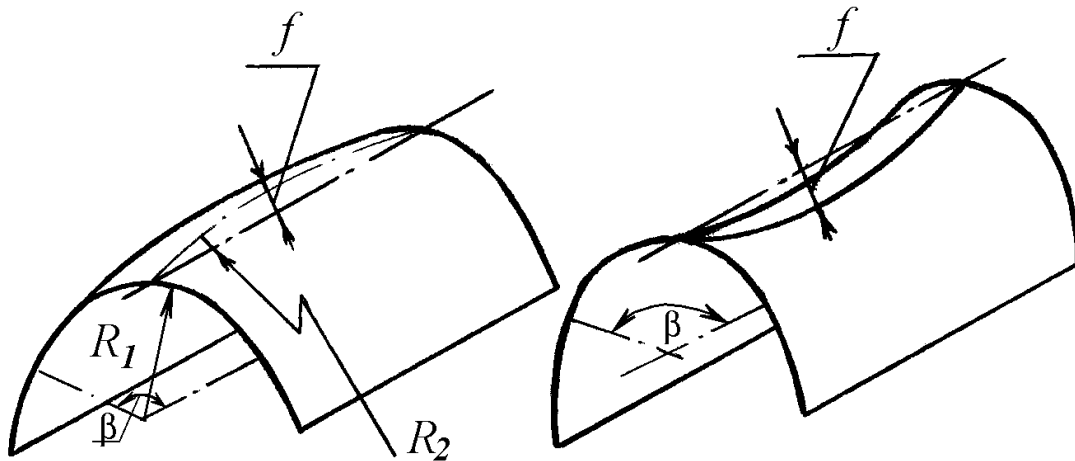


Рис. 4.5. Схема визначення стріли прогину  $f$  і кута охоплення  $\beta$  деталі подвійної кривизни

Таблиця 4.1

Значення коефіцієнта  $k_\beta$

| $\beta^\circ$ | 90°  | 100° | 120° | 140° | 160° | 180° |
|---------------|------|------|------|------|------|------|
| $\beta$ , рад | 1,57 | 1,75 | 2,09 | 2,44 | 2,79 | 3,14 |
| $k_\beta$     | 1,04 | 1,15 | 1,37 | 1,58 | 1,79 | 2,0  |

Реальні умови процесу обтягування характеризуються граничним коефіцієнтом обтягування, що визначається гранично допустимою деформацією розтягання матеріалу в найнебезпечнішому місці. З огляду на припущення граничний коефіцієнт можна виразити формулою

$$k_{гран} = 1 + 0,855 \frac{k_{зап} e_{ip}}{k_\mu}, \quad (4.5)$$

де  $k_{зап}$  – коефіцієнт запасу (безпеки) для різних матеріалів (наприклад,  $k_{зап} = 0,8$  для Д16АМ, В95;  $k_{зап} = 0,6$  для 30ХГСА, 1Х18Н9Т;  $k_{зап} = 0,5$  для ВТ5);

$k_\mu$  – коефіцієнт, що враховує вплив тертя (табл. 4.2);

$e_{ip}$  – інтенсивність деформації, за якої відбувається руйнування

матеріалу (визначається за діаграмою  $\sigma_i = f(e_i)$  або приблизно дорівнює подовженню  $\delta$  (табл. 4.3)).

Таблиця 4.2

Коефіцієнт  $k_\mu$ , що враховує вплив тертя за умови різних значень кута охоплення  $\beta$  пуансона заготованкою

| Марка матеріалу | Коефіцієнт $k_\mu$ |      |      |      |      |
|-----------------|--------------------|------|------|------|------|
|                 | 90°                | 120° | 140° | 160° | 180° |
| Д16АМ, АМгА-М   | 1,44               | 1,66 | 1,8  | 1,94 | 2,10 |
| В95             | 1,42               | 1,61 | 1,74 | 1,88 | 2,03 |
| Сталь 20        | 1,65               | 2,00 | 2,25 | 2,55 | 2,85 |
| 30ХГСА          | 1,50               | 1,75 | 1,93 | 2,12 | 2,32 |
| 1Х18Н9Т         | 1,30               | 1,40 | 1,48 | 1,60 | 1,70 |
| ВТ5             | 2,30               | 3,0  | 3,5  | 4,10 | 4,70 |

Таблиця 4.3

Механічні характеристики матеріалів

| Марка матеріалу | Границя міцності $\sigma_B$ , МПа | Подовження $\delta$ , % | Марка матеріалу | Границя міцності $\sigma_B$ , МПа | Подовження $\delta$ , % |
|-----------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------------------------|-------------------------|
| Д16АМ, АМгА-М   | 150...250                         | 14                      | 1Х18Н9Т         | 540...640                         | 40                      |
| В95             | 200...230                         | 14                      | АМг6            | 300...350                         | 16                      |
| 30ХГСА          | 750...850                         | 16                      | ВТ5             | 800...950                         | 15                      |

**Кількість переходів.** Процес обтягування має свої обмеження, обумовлені ступенем деформації того або іншого матеріалу, яку цей матеріал може зазнавати без руйнування. Якщо ступінь деформації, необхідний для повного обтягування деталі конкретної геометричної форми, є більшим, ніж це допускається пластичністю матеріалу, то виконати обтягування за один перехід не вдається. Однак із цього не випливає, що одержати деталь такої геометричної форми обтягуванням неможливо, тому що шляхом термічного оброблення можна відновити пластичність металу і проводити процес далі, тобто здійснити другий перехід процесу, а якщо потрібно, то і наступні.

Розрахувавши коефіцієнти за формулами (4.1) і (4.5), можна їх порівняти. Якщо  $k_f < k_{гран}$ , то деталь одержують обтягуванням за один перехід; якщо ні – за декілька переходів із термообробленням матеріалу. Кількість переходів  $n$  можна визначити за формулою

$$n = \lg k_2 / \lg k_{\text{гран}}. \quad (4.6)$$

Існують також експериментально отримані значення граничних коефіцієнтів обтягування для матеріалу Д16М. Так, для обшивок одинарної та подвійної кривизни з відпаленого матеріалу  $k_{\text{гран}} = 1,04 \dots 1,05$  (за умови  $S = 0,8 \dots 2,0$  мм і мінімальних радіусах обтягування), для матеріалу в стані постачання  $k_{\text{гран}} = 1,02 \dots 1,03$ .

**Розміри заготовки** необхідно знати для одержання деталі заданої форми і розмірів з огляду на всі деформації, що відбуваються під час її виготовлення.

Ширину заготовки  $b_3$  з огляду на її зменшення в процесі обтягування визначають за формулою

$$b_3 = (b_d + 2\Pi_4)[1 + 0,5k_\mu(k_2 - 1)], \quad (4.7)$$

де  $b_d$  – ширина розгортки деталі в найширшому місці (або групи деталей у процесі групового обтягування);

$\Pi_4$  – припуск на обрізання, що дорівнює 5...10 мм;

$k_\mu$  – коефіцієнт, що визначають за табл. 4.2;

$k_r$  – коефіцієнт, що розраховують за формулою (4.1) або (4.4).

Процес обтягування відбувається зі зменшенням ширини листа й стоншенням матеріалу, що необхідно враховувати під час визначення розмірів заготовки.

**Потрібне зусилля обтягування** розраховується з умови, що воно не може бути більшим розтяжних зусиль  $F_p$  у листі, під час яких заготовка руйнується. Розтяжні зусилля можна визначити за формулою

$$F_p = k_p b_3 S \sigma_B, \quad (4.8)$$

де  $b_3$  і  $S$  – ширина і товщина заготовки (див. рис. 4.3);

$k_p$  – коефіцієнт, що враховує вплив нелінійності схеми напружено-деформованого стану в процесі обтягування в момент, коли може відбутися руйнування (для обшивок одинарної кривизни  $k_p = 1,0$ , для обшивок подвійної кривизни  $k_p = f(k_r)$  і різний для різних матеріалів, а для листових матеріалів Д16АМ, АМгА-М коефіцієнт  $k_p \approx 1,0$  (рис. 4.6)).

Зважаючи на схему дії сил у процесі простого обтягування для деталей подвійної кривизни (див. рис. 4.3), з огляду на формулу (4.8) і коефіцієнт запасу, що дорівнює 1,1, зусилля  $T$ , що розвивається столом преса, можна визначити в такий спосіб:

$$T = 2,2 k_p b_3 S \sigma_B \sin\left(\frac{\beta}{2}\right), \quad (4.9)$$

де  $\beta$  – кут охоплення пуансона заготовкою.

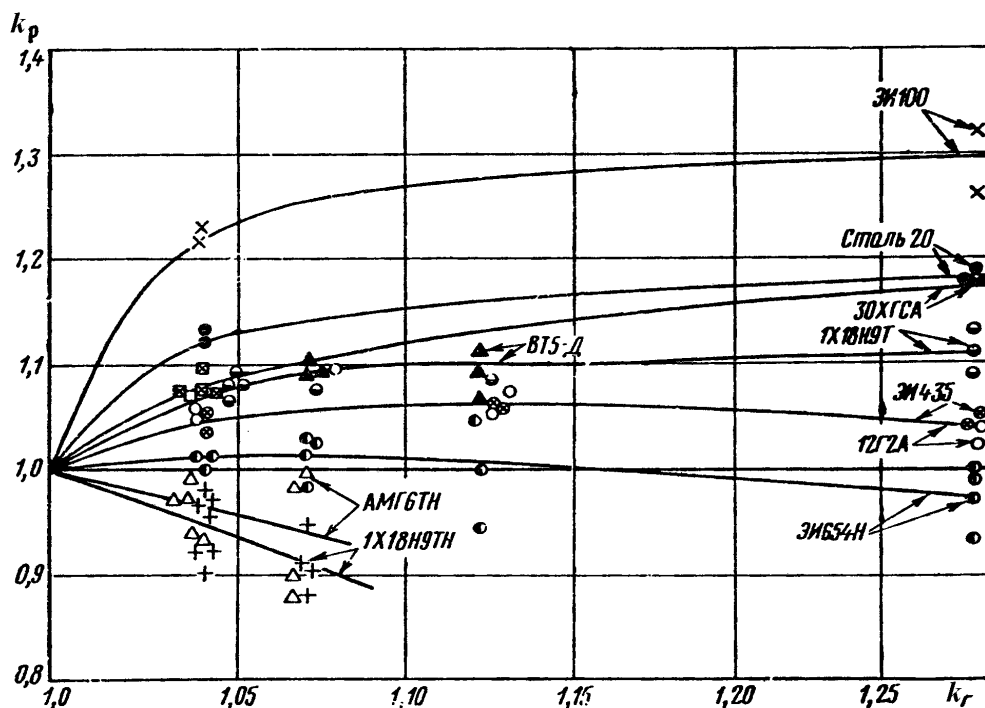


Рис. 4.6. Залежність коефіцієнта  $k_p$  від геометричного коефіцієнта  $k_r$  у процесі обтягування (експериментальні дані)

**Вплив мастила** на потрібне зусилля обтягування полягає в зменшенні тертя між матеріалом та інструментом для зменшення величини потрібного зусилля. Вибір оптимальних мастильних матеріалів ґрунтується на двох теоріях: теорії межового шару і гідродинамічної теорії тертя. На практиці склад мастила добирають на основі дослідно-експериментальних даних з огляду на те, що воно повинно мати такі властивості: створювати міцну плівку, здатну витримувати значні тиски; забезпечувати добре прилипання і рівномірний розподіл мастильного шару по поверхні; легко видалятися з поверхні деталей; не ушкоджувати поверхні обтяжних пуансонів і листових заготованок.

У виробничих умовах застосовується велика кількість мастил різного складу, що поділяють на дві групи: мастила без наповнювача і мастила з наповнювачами. Найкращими є мастила з великим вмістом наповнювача (крейда, тальк, графіт), що зменшують коефіцієнт тертя у 2–3 рази. Для матеріалів з алюмінієвих сплавів як мастило використовують мінеральну олію і машинне мастило (МС20), мастило НК50, технічний вазелін. Для оцінювання впливу тертя на процес обтягування можна навести значення коефіцієнтів тертя для алюмінієвих сплавів Д16М, АМцМ і сталі 08кп за умови різних складів мастила. Так, за відсутності мастила коефіцієнт тертя  $\mu = 0,2 \dots 0,25$ . Якщо як мастило використовувати мінеральну олію, то  $\mu = 0,11 \dots 0,17$ , а якщо мастило з наповнювачем, то коефіцієнт тертя становитиме  $\mu = 0,08 \dots 0,1$ .

### **Устаткування й оснащення для простого обтягування.**

Простим обтягуванням виготовляють деталі одинарної та подвійної кривизни двоопуклої й опукло-увігнутої форм із великим кутом ( $90\ldots 180^\circ$ ) охоплення пуансона, як показано на рис. 4.2 і 4.3. Для виготовлення таких деталей використовують обтяжні преси.

Схему гідравлічного обтяжного преса показано на рис. 4.7. Заготованку 2 розташовують на обтяжному пуансоні 1 і закріплюють самоустановлюваними затискачами 4, що шарнірно з'єднані з траверсами 5. Після закріплення заготованки в затискачах 4 траверси 5 установлюють так, щоб у натягнутому положенні заготованка сходила з поверхні пуансона 1 по дотичній до його контуру. Під дією силового циліндра преса 3 пуансон 1 переміщується вгору і згинає заготованку, а потім вона обтягується по пуансону.

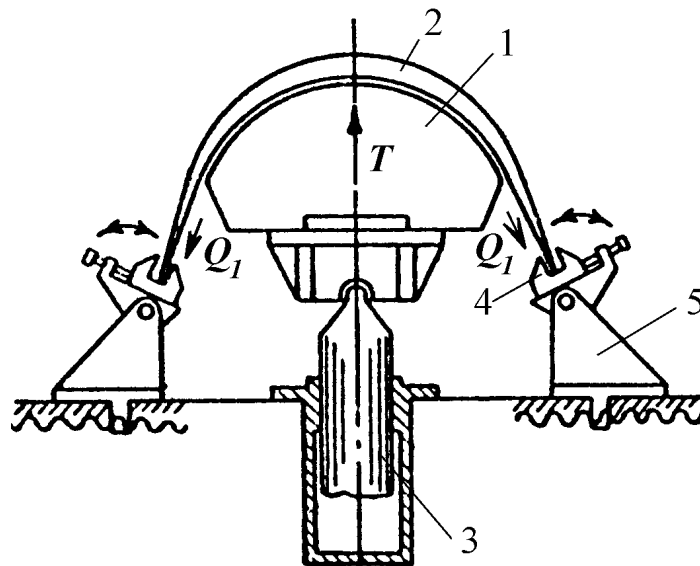


Рис. 4.7. Схема гідравлічного обтяжного преса марки ОП: 1 – обтяжний пуансон; 2 – заготованка; 3 – силовий циліндр; 4 – самоустановлюваний затискач; 5 – траверса

Оснащенням для виготовлення деталей методом простого обтягування є обтяжні пуансони, виконані за формою заданої деталі. Вартість цих обтяжних пуансонів порівняно з інструментальними штампами невелика, а виготовлення їх значно менш трудомістке. Конструктивно обтяжний пуансон являє собою болванку з кривизною робочої поверхні, що відповідає кривизні деталі. Як основний матеріал для їх виготовлення застосовують тверді породи дерева, пісоклейову масу, пластичні маси, цемент, вторинні алюмінієві сплави. Під час виготовлення обтяжних пуансонів для обтягування з підігрівом як матеріали використовують чавун, цинк, алюміній або їх сплави.

У табл. 4.4 подано деякі технічні характеристики гідравлічних обтяжних пресів, що широко використовуються для простого обтягування.

*Точність процесу* обтягування контролюється на кінцевій стадії виготовлення деталі. Для готових обшивок, що виготовляються обтягуванням, точність контролюється за щільністю їх прилягання у вільному стані до поверхні обтяжного пуансона, болванки або каркаса шаблонів контуру перерізу. Контрольовану обшивку встановлюють на еталон, при цьому вона має прилягати до еталона тільки під дією власної ваги. Такий метод контролю називається геометричним контролем контуру. У виробництві використовують ще один метод, який називається силовим контролем контуру обшивки. Цей метод полягає в тому, що обшивку притискають до ложементів контрольного стенда з певним зусиллям, що докладається через динамометр. Точність виготовленої обшивки визначається величиною зазору між обшивкою і робочою поверхнею еталона після докладання регламентованих зусиль (від 3 до 10 кг).

Таблиця 4.4

#### Характеристики обтяжних пресів

| Основні характеристики пресів                        | Обтяжні преси для простого обтягування |                     | Комбінований прес* ОП-5К |
|------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------|--------------------------|
|                                                      | ОП-2                                   | ОП-3                |                          |
| Найбільші розміри листа (товщина×довжина×ширина), мм | 2,0×4000×2400                          | 2,0×3000×2800       | 6,0×5500×2000            |
| Найбільше зусилля стола, кН                          | 6000                                   | 3600                | 2000                     |
| Вертикальний хід стола, мм                           | —                                      | 350                 | 500                      |
| Габарити преса (довжина×ширина×висота), мм           | 7200×4750×<br>×4500                    | 9000×4000×<br>×2490 | 9760×1200×<br>×4100      |
| Маса, т                                              | 50                                     | 40                  | 35                       |

\* У режимі простого обтягування.

Існують прилади, що працюють за принципом самоіндукції (рис. 4.8), забезпечуючи найбільшу точність вимірювання зазору між обтяжним пуансоном і готовою деталлю. Суть процесу вимірювання зазору полягає в тому, що обтяжний пуансон 1 або контрольне оснащення має сталеві стрижні 2, рівномірно розташовані в контрольованих перерізах.

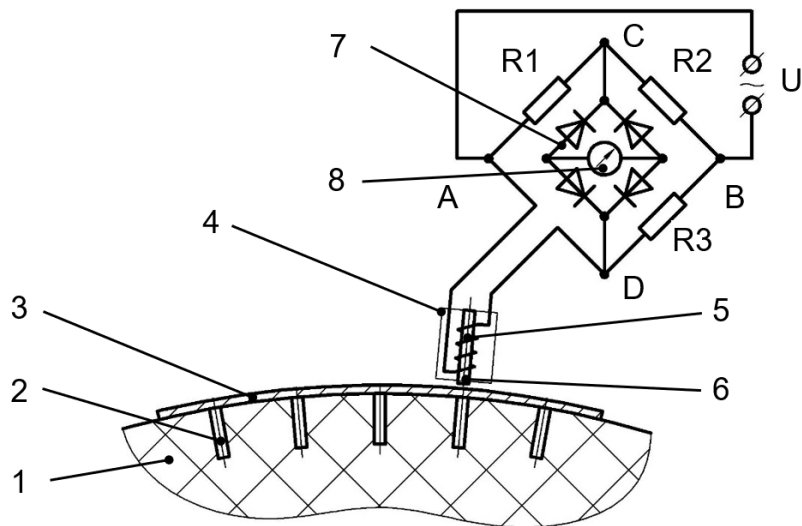


Рис. 4.8. Схема приладу для перевірки точності деталей:

1 – контрольне оснащення (еталон поверхні); 2 – сталевий стрижень;  
3 – деталь; 4 – датчик; 5 – електромагнітна котушка датчика; 6 – осердя  
електромагнітної котушки; 7 – випрямляч; 8 – вимірювальний прилад

Основою приладу є вимірювальний міст, який складається з трьох резисторів **R1**, **R2**, **R3** і електромагнітної котушки датчика 5, намотаної на металевому осерді 6. Резистори мають рівний електричний опір, а котушка виготовлена таким чином, щоб її опір дорівнював опорі резисторів. До електричної схеми в точках **A** і **B** підімкнено джерело змінного струму, який наводить електрорушійну силу в котушці. Оскільки опір резисторів **R1**, **R2**, **R3** і електромагнітної котушки датчика однаковий, то в початковий момент міст перебуває в збалансованому стані, різниці електричних потенціалів у точках **C** і **D** немає, а вимірювальний прилад 8 показує нульове значення.

У процесі вимірювань датчик 4 переміщується по криволінійній поверхні обшивки 3. Коли датчик опиниться напроти одного зі сталевих стрижнів 2 контрольного оснащення 1, то його електричний опір зміниться через явище самоіндукції. Зміна опорі буде пропорційною відстані від осердя датчика до сталевих стрижня, яка складається з товщини деталі та величини повітряного зазору між поверхнею контрольного оснащення і контрольованою обшивкою 3. У цей час вимірювальний міст втратить рівновагу (розбалансується) і між точками **C** і **D** виникне різниця електричних потенціалів, що буде зафіксовано вимірювальним приладом 8. Залишається зчитати з його шкали, відградуваної в міліметрах, величину повітряного зазору в контрольній точці та порівняти її з допустимим значенням. Якщо дійсні зазори між деталлю й еталоном перевищують допустимі, то проводять повторне обтягування-калібрування по тому самому пуансону.

Найточнішим і найсучаснішим методом перевірки деталей, виготовлених обтягуванням, є перевірка за допомогою контрольно-вимірювальних машин (КВМ) із ЧПК.

### Матеріали, інструмент, устаткування

Листовий прокат з алюмінієвого сплаву АМгЗ-М або АМц-М завтовшки 0,8...1,0 мм. Зразки з нанесеною на їх поверхню прямокутною координатною сіткою 3×3 мм. Лінійка, штангенциркуль, контрольні шаблони, каркас шаблонів контуру перерізу. Обтяжні пуансони з одинарною і подвійною кривизною. Гідравлічний прес і важільний пристрій для закріплення заготовки і передавання зусилля підйому стола обтяжним пуансоном.

### Порядок виконання роботи

1. Виконати розрахунки технологічних параметрів процесу обтягування деталей одинарної та подвійної кривизни за такими формулами:

- геометричний коефіцієнт обтягування  $k_r$  (4.2);
- граничний коефіцієнт обтягування  $k_{гран}$  (4.4);
- кількість переходів  $n$  (4.5);
- геометричні розміри заготовки  $l_3$  (4.6) і  $b_3$  (4.8);
- потрібне зусилля обтягування  $F_p$  (4.9) і зусилля підйому стола  $T$  (4.10).

Для розрахунків у викладача одержати вихідні дані:

- матеріал заготовки і його товщина  $S$ ;
- довжина розгортки деталі  $l_{кр}$  (за креслеником);
- ширина розгортки деталі  $b_d$ .

2. Ознайомитися з конструкцією експериментального преса, обтяжних пуансонів. Виконати обтягування двох деталей із нанесеною на поверхню сіткою 3×3 мм – одинарної та подвійної кривизни – без мастила і з мастилом. Фіксувати за допомогою манометра значення тиску  $p'$  у процесі обтягування.

3. Перевірити точність обводів отриманої деталі за шаблоном ШКП і щільність її прилягання до пуансона, при цьому не знімати обтягнуті заготовки з обтяжних пуансонів (зусилля обтягування зменшити до нуля). Удруге провести перевірку точності, використовуючи індукційний прилад (див. рис. 4.8).

Виконати розмітку контуру деталі за шаблоном ШОК, фіксуючи його по базових отворах пуансона.

4. Виміряти деформації координатної сітки на ділянках, указаних

викладачем. Виконати аналіз деформацій координатної сітки, нанесеної на поверхню заготовки в характерних ділянках. Зробити висновки про розподіл деформацій у цих ділянках.

Виміряти величину абсолютної деформації  $\Delta l$  і визначити зону максимальних деформацій заготовки (небезпечний переріз).

5. Занести до табл. 4.5 усі розрахункові й експериментальні значення параметрів.

6. Скласти звіт з лабораторної роботи.

Таблиця 4.5

Результати розрахунків і експериментів з визначення параметрів обтягування

| № п/п | Експеримент        |             | Параметри    |            |       |       |       |     |                  |       |
|-------|--------------------|-------------|--------------|------------|-------|-------|-------|-----|------------------|-------|
|       |                    |             | Розрахункові |            |       |       |       |     | Експериментальні |       |
|       |                    |             | $k_r$        | $k_{гран}$ | $l_z$ | $b_z$ | $k_p$ | $T$ | $p'$             | $T_z$ |
| 1     | Обтягування деталі | з мастилом  |              |            |       |       |       |     |                  |       |
| 2     | одинарної кривизни | без мастила |              |            |       |       |       |     |                  |       |
| 3     | Обтягування деталі | з мастилом  |              |            |       |       |       |     |                  |       |
| 4     | подвійної кривизни | без мастила |              |            |       |       |       |     |                  |       |

### Зміст звіту

1. Основні визначення і суть процесу простого обтягування; схеми: рис. 4.2, 4.3, 4.7; формули для визначення параметрів обтягування: (4.1)–(4.5), (4.7), (4.9).

2. Опис характеру зміни координатної сітки на поверхні деталей одинарної та подвійної кривизни в характерних ділянках.

3. Результати розрахунків і експериментів, занесені до табл. 4.5.

4. Загальні висновки з роботи й відповіді на контрольні запитання.

### Контрольні запитання

1. Як називається параметр процесу обтягування, що характеризує граничний ступінь деформації листової заготовки?

2. Поясніть фізичну суть геометричного і граничного коефіцієнтів обтягування.

3. Дайте характеристику основних деталей ЛА, що виготовляються методом простого обтягування.

4. Як закріплюється заготовка в обтяжному пресі та як вибирається її положення щодо пуансона?

5. За допомогою яких контрольних засобів можна виконати остаточне оцінювання точності контуру й обводів отриманої деталі?

## Лабораторна робота № 5

### ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ОБТЯГУВАННЯМ ІЗ РОЗТЯГАННЯМ І КІЛЬЦЕВИМ ОБТЯГУВАННЯМ

**Мета роботи** – вивчення процесів обтягування з розтяганням і кільцевим обтягуванням; виконання технологічних розрахунків, ознайомлення з характеристиками устаткування, а також виконання експериментів.

#### Теоретичні відомості

Обтягування з розтяганням застосовується під час формоутворення деталей подвійної кривизни, що мають великі розміри ( $L > 3$  м) і великі радіуси кривизни (рис. 5.1). Процес кільцевого обтягування застосовується як для калібрування і виправлення, так і для формоутворення деталей замкнутих контурів опуклої, увігнутої й опукло-увігнутої форм. Це різні шпангоути, кожухи, пояси, обичайки, ободи, циліндричні й конічні відсіки і камери згоряння (рис. 5.2).

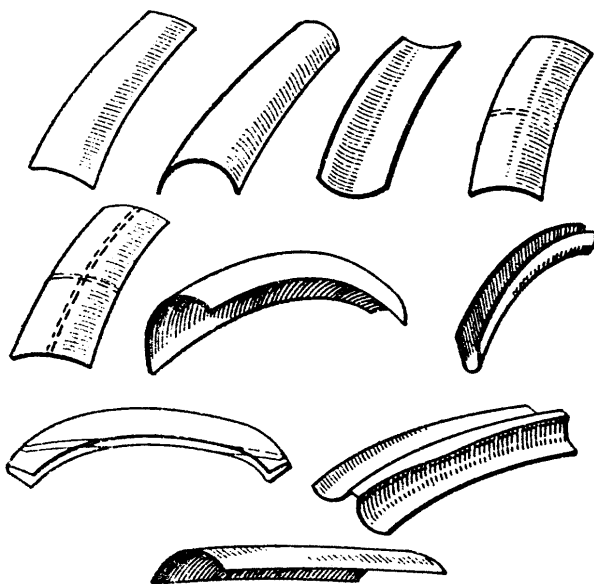


Рис. 5.1. Типові деталі, що виготовляються обтягуванням з розтяганням

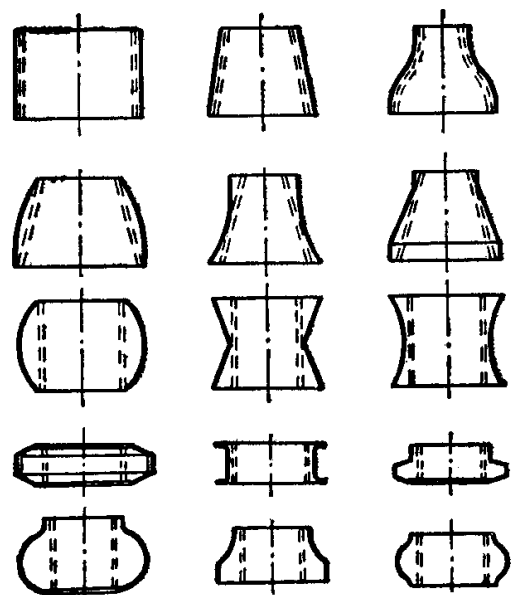


Рис. 5.2. Типові деталі, що виготовляються кільцевим обтягуванням

**Обтягування** – це утворення заготовки заданої форми докладанням розтяжних зусиль до її країв.

*Обтягування з розтяганням* (подовжнє обтягування) застосовується переважно для виготовлення обшивок подвійної кривизни з великими радіусами. Такі обшивки не вигідно виготовляти поперечним (простим) обтягуванням, тому що затискання за довгі сторони заготовки веде до

значного відходу матеріала (припуск для розташування затискача і на вільну ділянку заготовки становить приблизно 200 мм). Поздовжня кривизна обшивок подвійної кривизни зазвичай значно менша поперечної, а їх довжина сягає 7...10 м при ширині до 1,5 м.

Суть операції обтягування з розтяганням полягає в тому, що до плоскої або просторової листової заготовки докладаються розтяжні зусилля, через що заготовка обтягується по пуансону. На рис. 5.3, а наведено схему обтягування з розтяганням. Затискачі переміщуються в боки, створюючи в заготованці 2 розтяжні зусилля  $Q_2$ . Одночасно піднімається формблок 1, докладаючи до неї зусилля  $T$ . Сила підняття стола  $T$  і розтяжні зусилля  $Q_2$  діють під кутом, близьким до перпендикулярного.

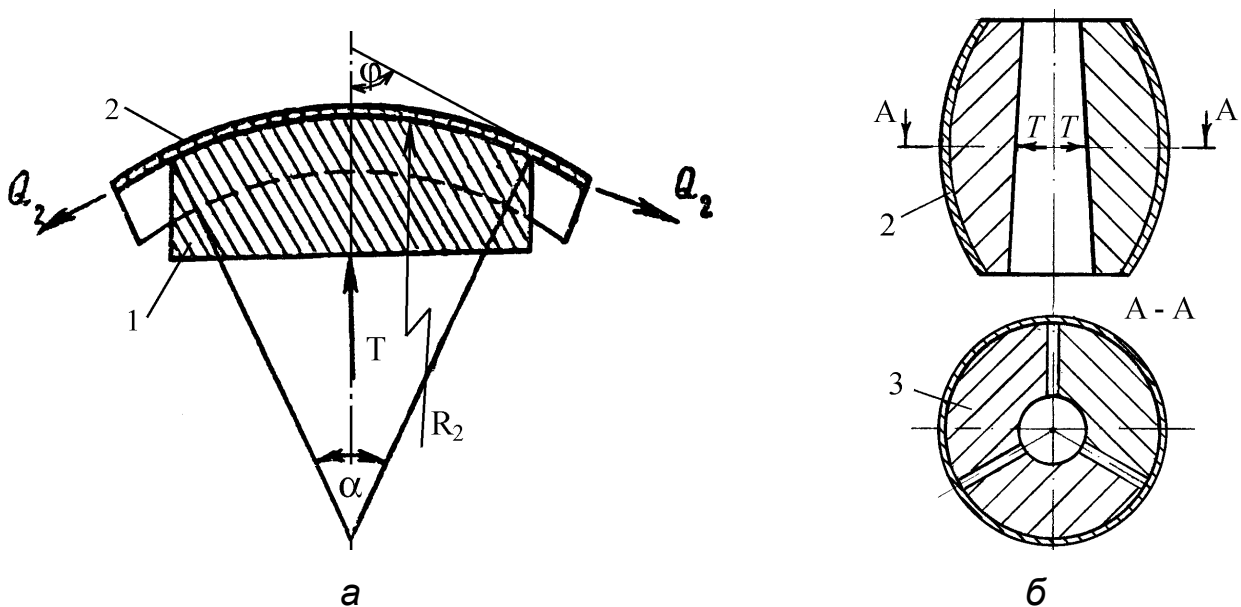


Рис. 5.3. Основні схеми обтягування листових матеріалів:  
а – обтягування з розтяганням; б – кільцеве обтягування  
(1, 3 – обтяжні пуансони, 2 – заготовка)

*Кільцеве обтягування* заготовки 2, що має замкнутий контур (рис. 5.3, б), здійснюється радіальним переміщенням розтискних секційних кулачків-пуансонів 3 під дією сили  $T$ .

Суть процесу кільцевого обтягування полягає в тому, що попередньо зігнута в кільце і зварена в місці стику листова заготовка 2 під дією зусиль  $T$ , створюваних зсередини за допомогою секцій розтискного пуансона 3, набуває нової форми завдяки збільшенню розмірів поперечних перерізів, яке супроводжується розтяганням матеріалу стінок у тангенціальному (дотичному до кола) напрямку.

Розглянемо картину напружень, що виникають у листовій заготованці

під дією моменту під час здійснення процесу обтягування, спочатку без докладання розтяжних зусиль  $Q_2$  (рис. 5.4, а). У крайніх точках перерізу заготовки виникають рівні за величиною напруження пружного і пластичного розтягання  $\sigma_1$  і стиснення  $\sigma_2$ .

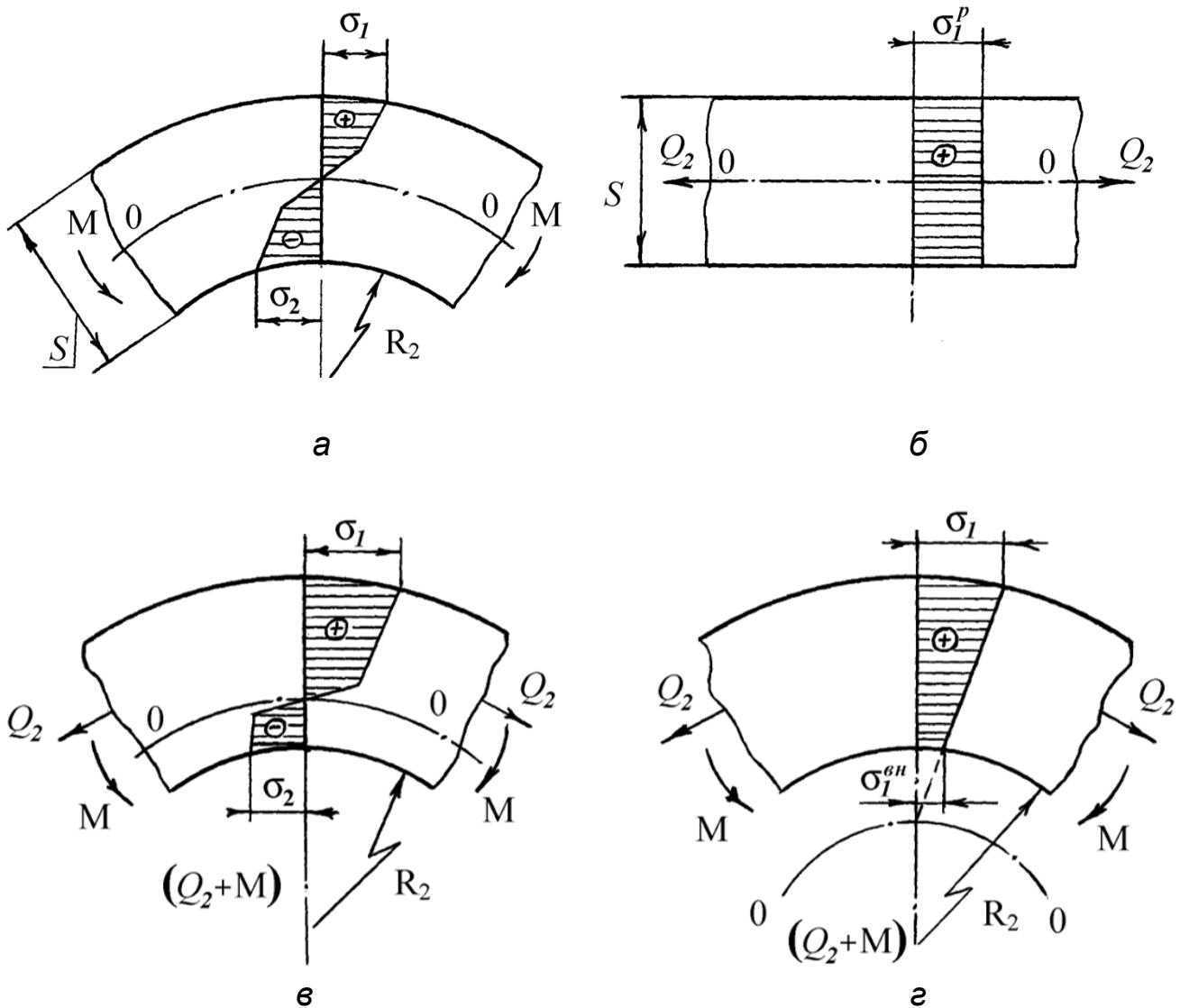


Рис. 5.4. Епюри напружень у перерізі листової заготовки:

а – під час навантаження згинальним моментом; б – під час навантаження розтяжними зусиллями; в, г – під час навантаження як згинальним моментом, так і розтяжними зусиллями

Після зняття моменту  $M$  заготовка під дією пружних напружень різного знака буде пружинити, тобто набувати форми, відмінної від форми пуансона. Для усунення пружинення по куту згинання необхідно, щоб процес формоутворення відбувався за умови напружень одного знака. У цьому випадку пружинення буде тільки по довжині заготовки (рис. 5.4, б). Якщо заготовку одночасно зі згинанням (рис. 5.4, а) розтягати (рис. 5.4, б), то розподіл сумарного напруження матиме один із виглядів, показаних

на рис. 5.4 в, г. У разі такого розподілу сумарного напруження, як на рис. 5.4, в, готова деталь матиме мінімальне кутове пружинення тільки внаслідок різниці напружень на внутрішніх і зовнішніх волокнах.

Обтягування з розтяганням характеризується найбільш рівномірним розподілом напружень по перерізу, унаслідок чого покращується якість деталі, що обтягується. З погляду поліпшення формоутворення найбільш вигідним способом є двостороннє обтягування, коли заготовка розтягується за умови закріплення її і за короткі, і за довгі боки.

Процес обтягування з розтяганням, на відміну від простого обтягування, можна поділити на чотири стадії (рис. 5.5).

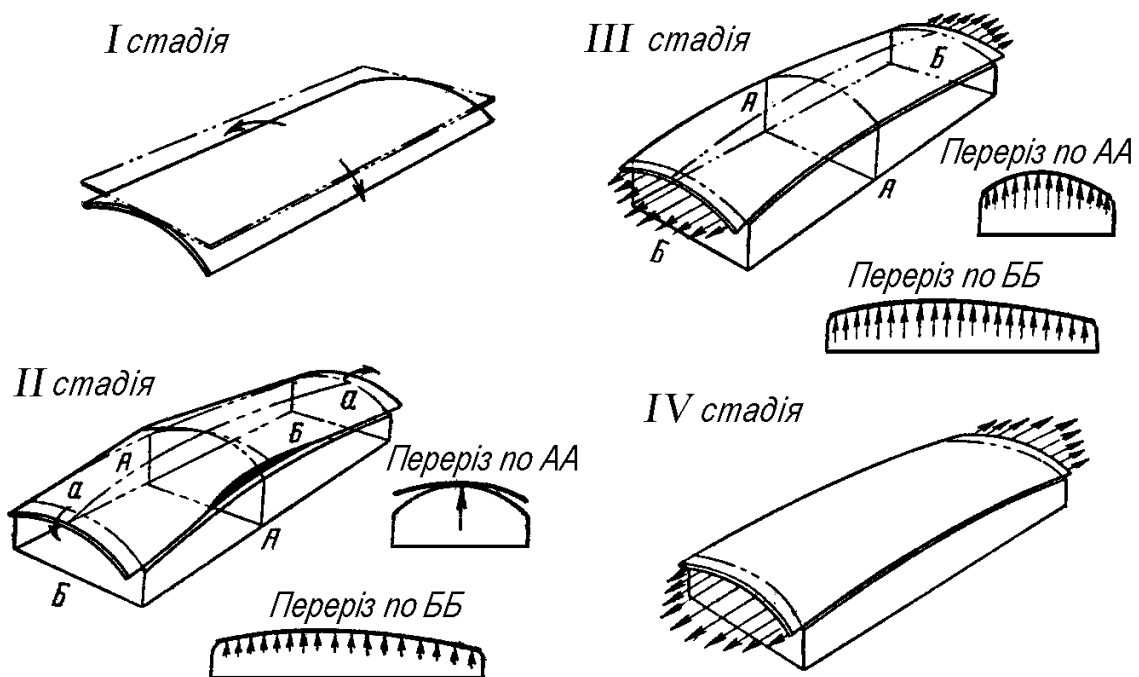


Рис. 5.5. Стадії процесу обтягування з розтяганням

На першій і другій стадіях відбувається згинання заготовки в поперечному і подовжньому (відповідно) напрямках до повного прилягання її до пуансона по гребнях обтяжного пуансона. Третя стадія процесу формоутворення деталі характеризується нерівномірним розтяганням волокон листа в подовжньому напрямку. На четвертій стадії розтягання заготовки, що вже набула форми пуансона, відбувається так само, як на третій стадії процесу простого обтягування. Подальше розтягання недоцільне, оскільки точність деталі при цьому майже не збільшується, а матеріал заготовки зайве деформується.

### Параметри процесу обтягування з розтяганням

Параметри процесу обтягування з розтяганням визначаються розрахунками, аналогічними розрахункам у процесі простого обтягування.

**Геометричний коефіцієнт обтягування з розтяганням  $k_{\Gamma}^p$**  також характеризує ступінь деформації металу в найнебезпечнішому місці заготовки за ідеальних умов. Загалом коефіцієнт буде визначатися за формулою (5.1). Якщо позначити розміри деталі так, як показано на рис. 5.6, то формулу для визначення геометричного коефіцієнта обтягування з розтяганням можна записати в такому вигляді:

$$k_{\Gamma}^p = 1,01 + \frac{4R_1}{l_0} \sin^2 \frac{\alpha}{4} \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}, \quad (5.1)$$

де  $R_1$  – радіус поперечної кривизни обшивки;  
 $l_0$  – довжина заготовки між затискачами;  
 $\alpha$  – кут охоплення обшивки за креслеником у подовжньому напрямку;  
 $\beta$  – кут охоплення обшивки за креслеником у поперечному напрямку.

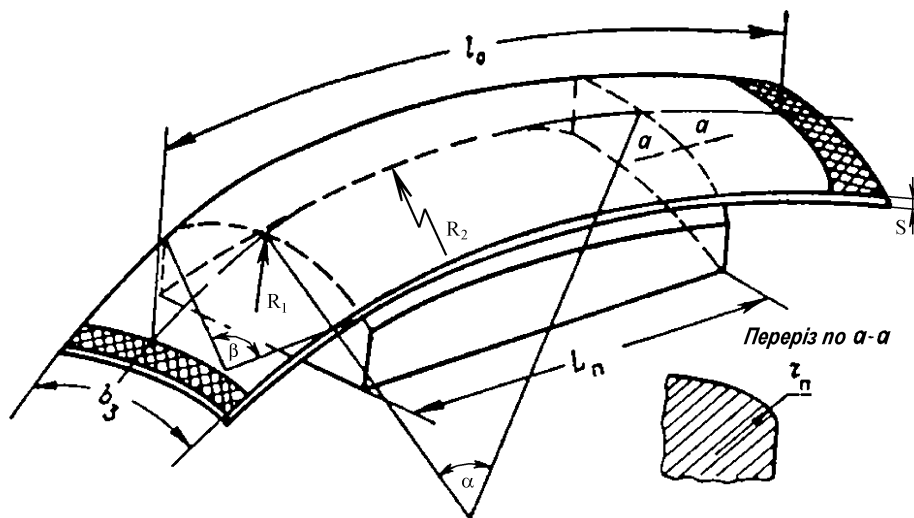


Рис. 5.6. Схема для розрахунку коефіцієнта обтягування з розтяганням:  $S$  і  $b_3$  – товщина і ширина листової заготовки;  $R_1$  і  $R_2$  – радіуси поперечної та подовжньої кривизни;  $\alpha$  і  $\beta$  – кути охоплення

**Граничний коефіцієнт обтягування  $k_{\Gamma}^p$  гран** визначають за залежністю

$$k_{\Gamma}^p = 1 + 0,855 \frac{k_{\text{зап}} e_{ip}}{k_{\mu}^p}, \quad (5.2)$$

де  $k_{\text{зап}}$  – коефіцієнт запаса (безпеки) (наприклад: для Д16М, В95  $k_{\text{зап}} = 0,8$ ; для 30ХГСА, 1Х18Н9Т  $k_{\text{зап}} = 0,6$ ; для ВТ5  $k_{\text{зап}} = 0,5$ );

$e_{ip}$  – інтенсивність деформації, за якої відбувається руйнування матеріалу (приблизно дорівнює відносному подовженню  $\delta$ , див. табл. 4.3);

$k_{\mu}^p$  – коефіцієнт, що враховує вплив тертя (табл. 5.1).

Таблиця 5.1

Значення коефіцієнта  $k_{\mu}^p$  у процесі обтягування з розтяганням

| Марка матеріалу | Кут охоплення $\beta$ |      |      | Марка матеріалу | Кут охоплення $\beta$ |      |      |
|-----------------|-----------------------|------|------|-----------------|-----------------------|------|------|
|                 | 10°                   | 20°  | 30°  |                 | 10°                   | 20°  | 30°  |
| Д16М            | 1,05                  | 1,10 | 1,15 | 1Х18Н9Т         | 1,03                  | 1,06 | 1,09 |
| В95-М           | 1,04                  | 1,09 | 1,14 | Сталь 20        | 1,07                  | 1,14 | 1,20 |
| 30ХГСА          | 1,06                  | 1,12 | 1,18 | ВТ5             | 1,14                  | 1,28 | 1,42 |

**Кількість переходів.** Як і будь-який технологічний процес, обтягування з розтяганням має свої обмеження, визначені ступенем деформації. Якщо ступінь деформації, необхідний для повного обтягування деталі, є більшим, ніж це допускається пластичністю матеріалу, то виконати обтягування за один перехід не вдається. Необхідно відновити пластичність металу шляхом термічного оброблення, після чого здійснити другий перехід обтягування, а потім, якщо це потрібно, і третій. Кількість переходів  $n$  можна визначити за формулою

$$n = \lg k_{\varepsilon}^p / \lg k_{\varepsilon_{\text{гран}}}^p \quad (5.3)$$

Отримане розрахункове значення  $n$  округляють до найближчого більшого числа. У процесі обтягування в декілька переходів сумарний коефіцієнт обтягування може становити  $k_{\Gamma}^p = 1,14 \dots 1,15$ . Для виготовлення деталей із великим коефіцієнтом обтягування застосовується підігрів, що дає змогу за один перехід одержати деталь з  $k_{\Gamma}^p = 1,4$ .

**Розміри заготовки** для обтягування з розтяганням обчислюють за формулами (5.4) і (5.5). З урахуванням коефіцієнтів для обтягування з розтяганням формули мають такий вигляд:

$$l_3 = l_{\text{кр}} + 2(\Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3), \quad (5.4)$$

$$b_3 = (b_{\partial} + 2\Pi_4)[1 + 0,5k_{\mu}^p(k_{\varepsilon}^p - 1)], \quad (5.5)$$

де  $l_{\text{кр}}$  – довжина кривої розгортки деталі в тому місці, де вона є найбільшою (визначається за креслеником, шаблоном перерізу або плазом);

$\Pi_1$  – припуск на обрізання заготовки (звичайно  $\Pi_1 = 10 \dots 20$  мм);

$\Pi_2$  – припуск між затискачем і торцем обрізання деталі, залежить від конструкції преса і можливості близького підведення затискних губок до обтяжного пуансона ( $\Pi_2 = 100 \dots 150$  мм);

$\Pi_3$  – припуск, необхідний для захоплення заготовки затискними губками ( $\Pi_3 = 50$  мм);

$\Pi_4$  – припуск на обрізання, що дорівнює 5...10 мм;

$b_3$  – ширина заготовки, мм;

$b_a$  – ширина розгорнення деталі в найширшому місці (або групи деталей у процесі групового обтягування);

$k_\mu^p$  – коефіцієнт, що визначають за табл. 5.1;

$k_2^p$  – коефіцієнт, що розраховується за формулою (5.1).

**Потрібні зусилля** для виконання обтягування з розтяганням визначають з огляду на ті самі міркування, що і для простого обтягування. Розтяжні зусилля  $Q_2$  у листі можна записати так:

$$Q_2 = k_p^p b_3 S \sigma_B, \quad (5.6)$$

де  $b_3$  – ширина заготовки;

$S$  – товщина матеріала заготовки;

$k_p^p$  – коефіцієнт, що враховує вплив нелінійності схеми напружено-деформованого стану в процесі обтягування;

$\sigma_B$  – границя міцності матеріалу.

Для обшивок подвійної кривизни коефіцієнт  $k_p^p$  має змінюватися зі зміною кривизни обшивки, причому по-різному для різних марок матеріалу. Для листових матеріалів з алюмінієвих сплавів Д16М, АМгМ, В95М коефіцієнт  $k_p^p$  близький до одиниці, для інших сплавів закони змінення коефіцієнта  $k_p^p$  залежно від величини геометричного коефіцієнта обтягування  $k_2^p$  наведено в спеціальній літературі.

Зусилля  $T$ , що розвивається столом преса в процесі обтягування з розтяганням (рис. 5.3, а), можна визначити в такий спосіб:

$$T = 2,2 Q_2 \cos \phi, \quad (5.7)$$

де  $\phi$  – кут між діючим зусиллям і дотичною до обшивки.

Підставивши значення  $Q_2$  з формули (5.6), одержимо

$$T = 2,2 k_p^p b_3 S \sigma_B \cos \phi, \quad (5.8)$$

**Устаткування й оснащення для обтягування з розтяганням.**

Для здійснення процесу обтягування з розтяганням використовуються спеціальні розтяжно-обтяжні преси, що працюють за схемою, поданою на рис. 5.7.

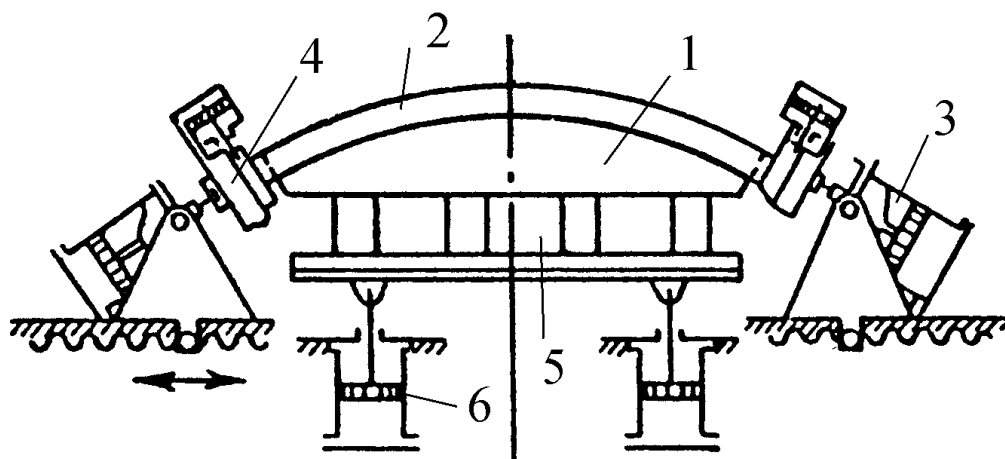


Рис. 5.7. Схема розтяжно-обтяжного преса: 1 – обтяжний пуансон; 2 – заготовка; 3 – гідроциліндри; 4 – затискачі; 5 – стіл; 6 – силовий циліндр преса

На стіл 5 преса встановлюють пуансон 1, а на ньому розміщують плоску або попередньо відформовану заготовку 2. Заготовку короткими сторонами закріплюють у затискачах 4 і гідроциліндрами 3 попередньо її розтягують. Далі піднімають стіл 5 за допомогою силових гідроциліндрів 6 і таким чином здійснюють притискання заготовки 2 до пуансона 1 по всій довжині. На розтяжно-обтяжних пресах формоутворення може здійснюватися за трьома варіантами:

- а) зусиллям, що виникає під час руху пуансона вгору;
- б) додатковим розтяжним зусиллям, докладеним гідроциліндрами 3;
- в) спільним докладанням усіх зусиль.

Найбільшого поширення набули гідравлічні розтяжно-обтяжні преси РО-1 і РО-3, технічні характеристики яких наведено в табл. 5.2.

Таблиця 5.2

#### Характеристики пресів для обтягування

| Основні характеристики преса                                         | Преси для обтягування з розтяганням |                 |
|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|
|                                                                      | РО-1                                | РО-3            |
| Найбільші розміри листа, що обтягується, мм (товщина×довжина×ширина) | 2,5×7000×1500                       | 6×8000×1800     |
| Найбільше зусилля стола, кН                                          | 2000                                | 3000            |
| Зусилля розтягання, кН                                               | 1100                                | 2100            |
| Габарити преса, мм (довжина×ширина×висота)                           | 13200×4630×3350                     | 15380×6250×7325 |
| Маса преса, т                                                        | 65,0                                | 180,0           |

## Параметри процесу кільцевого обтягування

Процес кільцевого обтягування відбувається подібно до процесу простого обтягування. Розбіжність полягає в тому, що в процесі кільцевого обтягування через наявність великої кількості секторів сили тертя в напрямку, дотичному до кола пуансона, відіграють меншу роль. Деформації в цьому напрямку наближаються до рівномірно розподілених, а, отже, напружено-деформований стан – до вісесиметричного.

Позначимо геометричні розміри заготовки і деталі, а також діючі сили, як показано на рис. 5.8. Тоді **геометричний коефіцієнт кільцевого обтягування** можна визначити за такою формулою:

$$k_z^k \approx k_\phi \frac{D_d}{D}, \quad (5.9)$$

де  $k_\phi = 1,01 \dots 1,03$  – коефіцієнт форми; менші значення беруться для деталей діаметром до 300 мм;

$D_d$  – зовнішній діаметр деталі;

$D$  – внутрішній діаметр деталі.

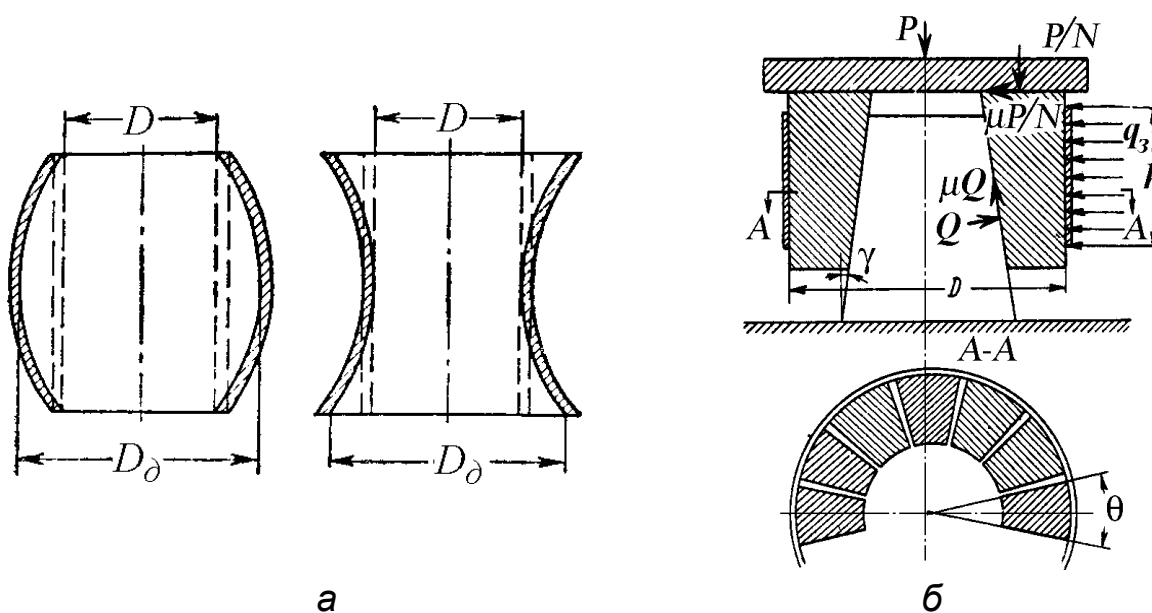


Рис. 5.8. Сили, що діють у процесі кільцевого обтягування:  
а – ескізи деталей; б – схема дії сил

Обчислення граничного коефіцієнта  $k_{\text{гран}}^k$  можна також виконати за раніше наведеною формулою (5.2). Однак у цю формулу слід підставляти коефіцієнт  $k_\mu^k$ , що враховує вплив тертя. З метою попереднього оцінювання формозміни можна скористатися такими експериментальними даними:

а) за один перехід можна виконувати кільцеве обтягування матеріалів:

АМцМ, 1Х18Н9Т, сталь 20 з коефіцієнтом  $k_{\Gamma}^K = 1,18...1,2$ ; АМгАМ з  $k_2^K = 1,16...1,19$ ;

б) для одержання деталей з  $k_2^K = 1,2$  майже для всіх матеріалів потрібно більше двох переходів.

**Кількість переходів** можна визначити за формулою (5.3). Однак на практиці враховують такі фактори, як нерівномірність деформацій по поверхні складних контурів, наявність огранювання (унаслідок великих зазорів між секторами пуансона). Для усунення перелічених факторів формоутворення деталей методом кільцевого обтягування виконують за дві операції. Попередньо деталь формується шляхом розтягання заготовки до розмірів, що на 2...3 % є меншими за розмірами, заданими на кресленку. Друга операція є калібрувальною.

**Розміри заготовки** для кільцевого обтягування визначаються формою і розмірами готової деталі. Вихідними заготовками переважно є зварені циліндричні або конічні з початковими розмірами, що є на 1...3 % меншими, ніж найменші з кінцевих розмірів деталі. Висоту вихідної циліндричної заготовки можна визначити за формулою

$$H = l_{кр}(1 + \Delta_2) + \Pi_5, \quad (5.10)$$

де  $l_{кр}$  – висота або довжина твірної згідно з креслеником;

$\Delta_2$  – відносне укорочення довжини твірної залежно від геометричного коефіцієнта обтягування (рис. 5.9);

$\Pi_5$  – припуск на обрізання, що дорівнює 8...12 мм.

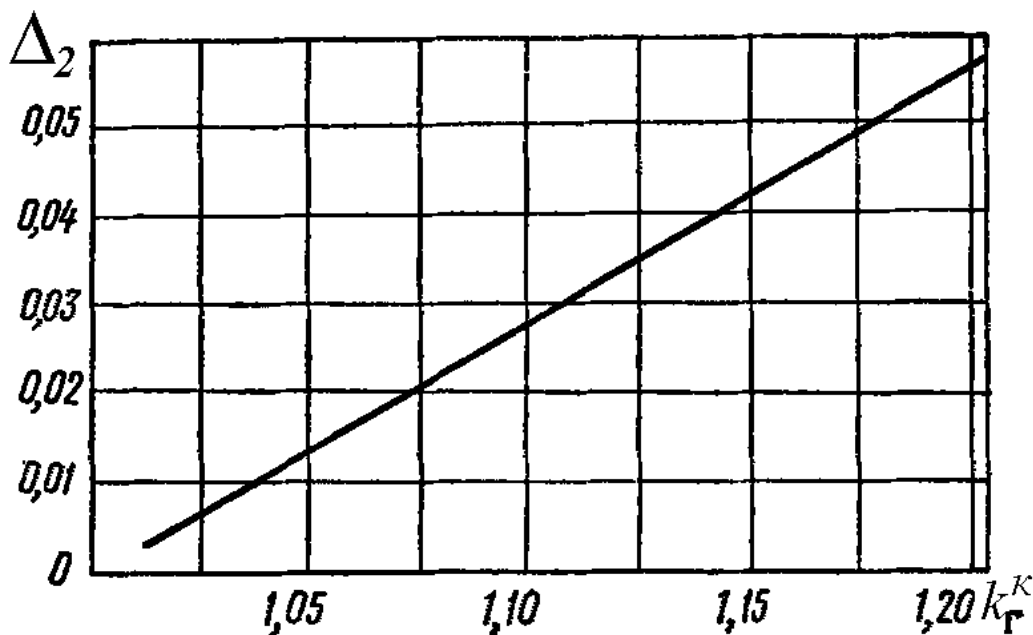


Рис. 5.9. Графік залежності відносного укорочення довжини твірної  $\Delta_2$  від  $k_2^K$

**Зусилля кільцевого обтягування** можна визначити в такий спосіб. Розглянемо рівновагу одного сектора розтискного пуансона (рис. 5.8, б), коли деталь має циліндричну форму. Якщо позначити зовнішнє зусилля, що діє на штоку робочого циліндра преса як  $P$ , кількість секторів розтискних пуансонів як  $N$ , то силами, що діють на сектор, будуть: сила, що дорівнює відношенню  $P/N$ , сила реакції клина  $Q$ , тиск  $q_3$ , що створюється розтяжною заготовкою, і сили тертя  $\mu P/N$  і  $\mu Q$  (усі коефіцієнти тертя взято однаковими). Розв'язавши всі необхідні рівняння і висунувши припущення, одержимо формулу для наближених розрахунків зусилля обтягування

$$P = \frac{2 \pi h S \sigma_B}{A}, \quad (5.11)$$

де  $h$  – висота деталі;

$S$  – товщина листової заготовки,

$$A = \frac{1 - \mu + \operatorname{tg} \gamma}{\mu + \operatorname{tg} \gamma} - \mu \quad (\text{рис. 5.10}).$$

**Устаткування й оснащення для кільцевого обтягування.** Для виготовлення деталей методом кільцевого обтягування (див. рис. 5.2) використовуються спеціальні радіально-розтяжні преси типу ПКД-1, ПКД-2, ПКД-3. Деталі являють собою тіла обертання діаметром від 300 до 1200 мм і висотою до 1000 мм.

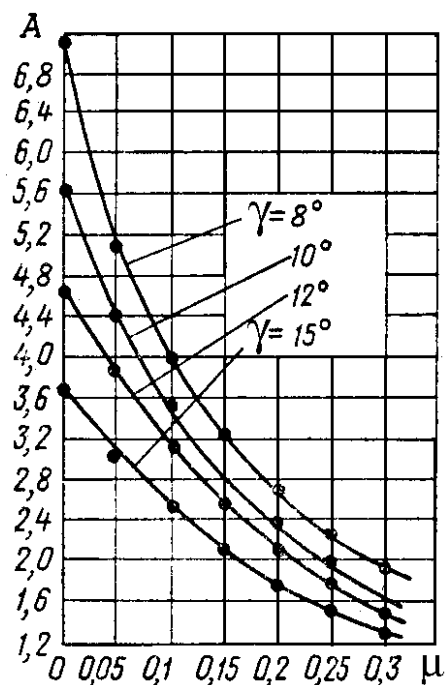


Рис. 5.10. Графік залежності коефіцієнта  $A$  від  $\mu$  і  $\gamma$

Попередньо заготовки деформуються на якому-небудь іншому оснащенні, з'єднуються методом зварювання в кільце і надалі піддаються

кільцевому обтягуванню. Основні характеристики пресів типу ПКД наведено в табл. 5.3. Як оснащення для здійснення процесу можуть використовуватися розтискні пуансони.

Таблиця 5.3

Характеристики пресів для кільцевого обтягування

| Основні характеристики преса                | Преси для кільцевого обтягування |               |
|---------------------------------------------|----------------------------------|---------------|
|                                             | ПКД-1                            | ПКД-3         |
| Найбільші розміри листа, що обтягується, мм | (діаметр×висота деталі)          |               |
|                                             | 1100×1000                        | 1400×1000     |
| Найбільше зусилля стола, кН                 | 4000                             | 2500          |
| Габарити преса, мм (довжина×ширина×висота)  | 2400×2200×4860                   | 4815×2780×600 |
| Маса преса, т                               | 30,0                             | 46,0          |

**Ступінь точності** виготовлення деталей обтягуванням з розтяганням і кільцевим обтягуванням є кінцевим параметром процесу. Під час виготовлення обшивок і оболонок одинарної та подвійної кривизни у виробничих умовах одержувана точність деталей – одне з найважливіших питань технології. Дослідження, проведені в напрямі підвищення точності, показали, що точність можна одержати до певних границь. Подальші деформації від прикладених розтяжних навантажень на точність деталей не впливають, а величина їх відхилень із деякого моменту стає постійною.

Контроль деталей після обтягування з розтяганням і кільцевим обтягуванням виконується безпосередньо по поверхні деталі після зняття технологічного зусилля стола **T** або зняття деталі з розтискних секторів пуансона. Методи контролю точності описано у відповідних РТМ. Суть цих методів описано в лабораторній роботі № 4, схему індукційного приладу наведено на рис. 4.8.

**Матеріали, інструмент, устаткування**

Для обтягування з розтяганням: листовий прокат з алюмінієвого сплаву АМгЗ-М або АМцМ завтовшки 0,8...10 мм; зразок із нанесеною на його поверхні прямокутною координатною сіткою 3×3 мм. Для кільцевого обтягування: заготованка у вигляді труби з алюмінієвого сплаву (діаметр **D** і висоту **H** задає викладач). Лінійка, штангенциркуль, контрольні шаблони і прилад з індукційним датчиком. Обтяжні пуансони подвійної кривизни і сектори розтискного пуансона для кільцевого обтягування. Гідравлічний прес і важільні пристрої для створення розтяжних зусиль.

## Порядок виконання роботи

1. Виконати розрахунки технологічних параметрів процесів обтягування з розтяганням і кільцевим обтягуванням за такими формулами:

- геометричні коефіцієнти обтягування:  $k_T^P$  за (5.1) і  $k_2^K$  за (5.9);
- граничний коефіцієнт  $k_{\text{гран}}^P$  за (5.2) (для кільцевого обтягування взяти експериментальне значення  $k_{2\text{гран}}^K = 1.2$ );
- кількість переходів  $n$  за (5.3);
- геометричні розміри заготованок:  $I_3$  за (5.4),  $b_3$  за (5.5),  $H$  за (5.10);
- потрібні зусилля: розтягання  $Q_2$  за (5.6) і обтягування  $T$  за (5.8), кільцевого обтягування  $P$  за (5.11).

Вихідними даними є (наводяться викладачем):

- матеріал заготовки і його товщина  $S$ ;
- довжина  $I_{кр}$  розгортки деталі відповідно до кресленика;
- ширина деталі  $b_d$ ;
- кути охоплення  $\alpha$  і  $\beta$  обтяжного пуансона листовою заготовкою і кут  $\varphi$ ;
- радіуси кривизни деталей  $R_1$  і  $R_2$ .

2. Ознайомитися з експериментальним пресом, обтяжними пуансонами і здійснити обтягування з розтяганням двох деталей: однієї без мастила, другої з мастилом.

3. Зменшити зусилля підйому стола до нуля, при цьому не знімати заготованку, отриману обтягуванням з розтяганням. Перевірити точність обводів отриманої деталі за шаблоном ШКП або щільність її прилягання до обтяжного пуансона приладом (див. рис. 4.8). Після цього виконати розмітку контуру деталі за шаблоном ШОК, зафіксувавши його по базових отворах обтяжного пуансона, і вирізати деталь.

4. Ознайомитися зі штампами для кільцевого обтягування і здійснити обтягування однієї деталі з трубчастої заготовки відповідно до розрахункових параметрів.

5. Виконати аналіз деформацій координатної сітки, нанесеної на поверхні заготовки у двох характерних ділянках. Зробити висновки.

6. Занести до табл. 5.4 усі розрахункові й експериментальні значення параметрів.

7. Скласти звіт з лабораторної роботи.

Таблиця 5.4

## Результати розрахунків і експериментів

| Експерименти                          | Параметри                        |                                                              |       |              |       |             |                  |            |
|---------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------|--------------|-------|-------------|------------------|------------|
|                                       | Розрахункові                     |                                                              |       |              |       |             | Експериментальні |            |
|                                       | $k_{\Gamma}^p$<br>$k_{\Sigma}^K$ | $k_{\Gamma_{\text{гран}}}^p$<br>$k_{\Sigma_{\text{гран}}}^K$ | $l_3$ | $b_3$<br>$H$ | $Q_2$ | $T,$<br>$P$ | $p'$             | $T_3, P_3$ |
| Обтягування з розтяганням             |                                  |                                                              |       |              |       |             |                  |            |
| Обтягування з розтяганням і змащенням |                                  |                                                              |       |              |       |             |                  |            |
| Кільцеве обтягування                  |                                  |                                                              |       |              |       |             |                  |            |

**Зміст звіту**

1. Основні визначення й опис суті процесів обтягування з розтяганням і кільцевим обтягуванням; схеми (рис. 5.3, 5.7, 5.8) і формули для визначення параметрів обтягування (5.1)–(5.6), (5.8)–(5.11).
2. Опис характеру зміни координатної сітки на поверхні деталей, отриманих обтягуванням з розтяганням і кільцевим обтягуванням.
3. Результати розрахунків і експериментів, занесені до табл. 5.4.
4. Загальні висновки з роботи й відповіді на контрольні запитання.

**Контрольні запитання**

1. Поясніть суть процесів обтягування з розтяганням і кільцевим обтягуванням.
2. Охарактеризуйте деталі ЛА, що виготовляються методом обтягування з розтяганням і кільцевим обтягуванням.
3. Поясніть характер розподілення напружень у перерізі заготовки на кінцевій стадії процесу обтягування з розтяганням.
4. Які фактори враховуються під час визначення кількості переходів у випадку виготовлення деталей кільцевим обтягуванням?

## Лабораторна робота № 6

### ФОРМОУТВОРЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ТРУБЧАСТИХ ЗАГОТОВАНОК ЕЛАСТИЧНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ

**Мета роботи** – вивчення процесу одержання деталей із трубчастих заготовок роздаванням із застосуванням еластичного середовища, експериментальне визначення залежності коефіцієнта навантаження від тиску в еластичному середовищі та визначення ступеня деформації еластичного середовища.

#### Теоретичні відомості

У конструкції сучасних літальних апаратів застосовується велика кількість деталей із труб. Це елементи пневматичних і гідравлічних систем, систем вентиляції, охолодження тощо. Такі деталі мають різноманітну конфігурацію (рис. 6.1). Різнманітні також технологічні процеси їх виготовлення. Найхарактернішими для цих технологічних процесів є операції обтиснення і роздавання.

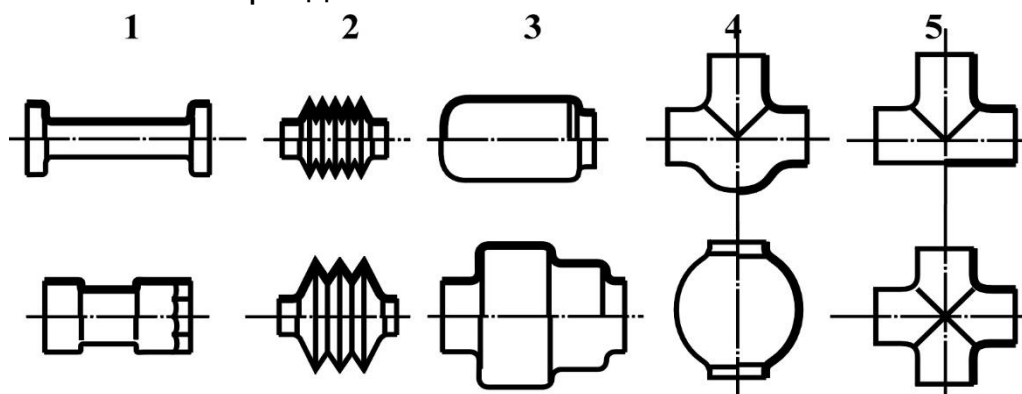


Рис. 6.1. Елементи трубопроводів авіаційних конструкцій:  
1 – перехідники; 2 – сильфони; 3 – компенсатори; 4 – корпуси;  
5 – фітинги

**Обтиснення** – зменшення розмірів поперечного перерізу частини порожнистої заготовки шляхом одночасної дії інструменту по всьому її периметру. Обтисненням звужують діаметр заготовки, одержуючи на кінці деталі менший діаметр із конічною перехідною частиною, виконують плоске або сферичне дно в порожнистих заготовках, виготовляють деталі східчастої або фасонної форми з порожнистої циліндричної заготовки. У процесі обтиснення заготовка заштовхується в матрицю інструментального штампа. Зусилля  $P$  докладається до торця заготовки (рис. 6.2). Характер навантаження, технологічний процес і конструкції штампів при цьому подібні до процесу витягування порожнистих деталей із листової заготовки.

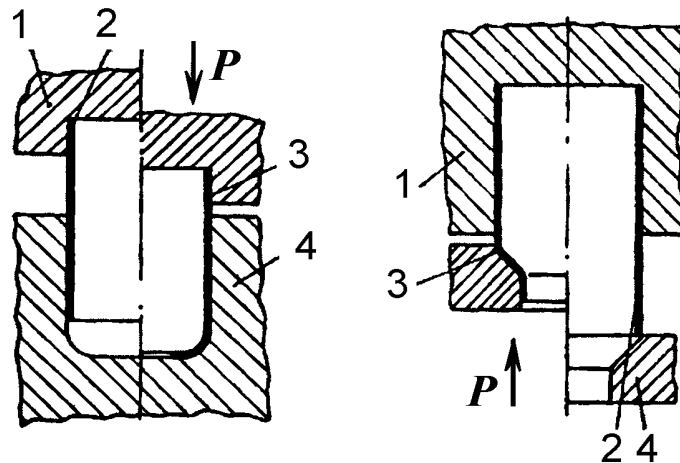


Рис. 6.2. Схема одержання деталей із трубчастих заготовок обтисненням: 1 – контейнер; 2 – заготовка; 3 – деталь; 4 – матриця

**Роздаванням** називається збільшення розмірів поперечного перерізу частини порожнистої заготовки шляхом одночасної дії інструменту по всьому її периметру. Роздаванням одержують сідчасті й фасонні деталі з пресованої трубчастої або звареної заготовки. Здійснюють роздавання за допомогою твердого або розтискного пуансона, а також за допомогою еластичного середовища – гуми, поліуретану або рідини.

Роздаванням в інструментальних штампах із використанням твердого або розтискного пуансона (рис. 6.3) не можна реалізувати без дорогого оснащення, виготовленого з дефіцитних інструментальних сталей. При цьому якість одержуваних деталей досить низька через секційний розтискний пуансон.

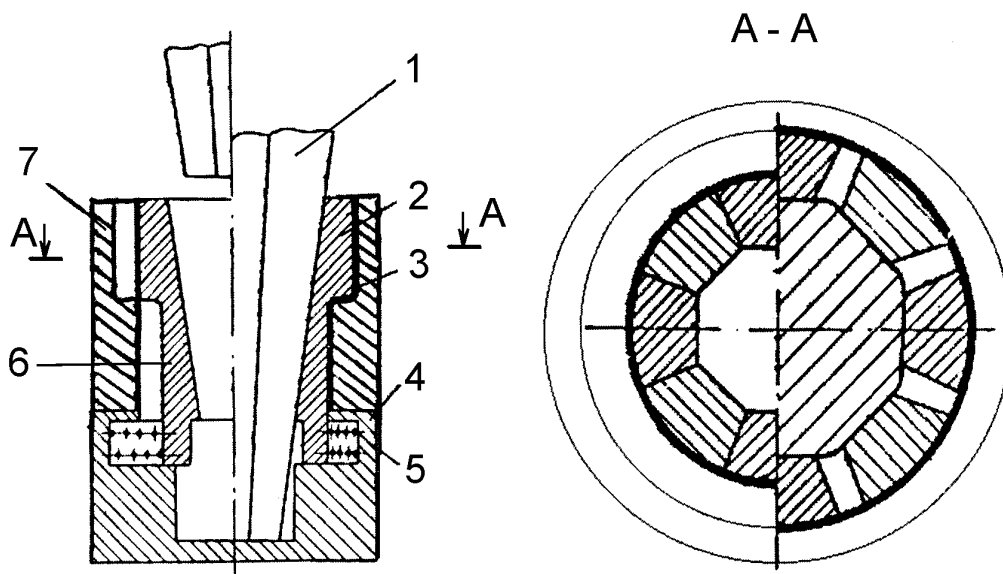


Рис. 6.3. Формоутворення деталей роздаванням розтискним пуансоном:  
1 – клин; 2 – розтискний пуансон; 3 – деталь; 4 – плита; 5 – пружина;  
6 – заготовка; 7 – матриця

Порівняно високі собівартість і трудомісткість виготовлення такого штампового оснащення є основними гальмівними факторами впровадження штампування деталей із листових і трубчастих заготовок у серійне і дрібносерійне виробництва, характерних для авіаційної галузі. За таких типів виробництва спеціальні інструментальні штампи цілком не спрацьовуються за дійсний строк їх експлуатації. Питомі витрати на оснащення, переналагодження устаткування і його амортизацію досить значні.

Останнім часом вирішального значення набуває впровадження гнучких технологій, що дають змогу швидко й ефективно перебудовувати виробництво на виготовлення нової продукції. У цих умовах важливу роль відіграють технологічні процеси, у яких застосовують лише один твердий формотвірний інструмент (пуансон або матрицю) і деформівне середовище – рідину, газ, еластомери або електромагнітне силове поле.

Оснащення, у якому застосовується еластичне середовище, є значно дешевшим (часто в десятки разів), ніж спеціальні або універсальні тверді штампи. Технологічні можливості такого оснащення набагато ширші, оскільки значно покращується якість деталей і спрощується процес видалення готової деталі зі штампа. Штампи для роздавання трубчастих заготовок еластичним середовищем, на відміну від дорогих і трудомістких інструментальних штамсів, являють собою універсальний контейнер 5 з укладеним у ньому еластичним середовищем 10 і твердим формотвірним інструментом-матрицею 6 (рис. 6.4). Це дає можливість у короткий строк перебудовувати виробництво на виготовлення нових деталей заміною лише одного дорогого елемента – матриці, при цьому металомісткість оснащення знижується в кілька разів і значно скорочуються строки підготовки виробництва.

Процес формоутворення деталі з трубчастої заготовки еластичним середовищем відбувається в такий спосіб. Вихідну трубчасту заготовку 7 поміщають у рознімну матрицю 6. У внутрішню порожнину трубчастої заготовки поміщають поліуретанову вкладку 10 (еластичне середовище). Усі частини, зібрані разом, уставляють у контейнер 5. Рухомий пуансон 8 опускається вниз і створює технологічне зусилля на торець поліуретанової вкладки 10. Еластичне середовище 10 діє на стінку трубчастої заготовки 7, що деформується, і повторює контур гравюри твердої матриці 6. Після досягнення потрібного тиску еластичного середовища матрицю 6 виштовхують за допомогою виштовхувача 13. Готова деталь 11 легко витягується з матриці завдяки вільному розбиранню секторів матриці.

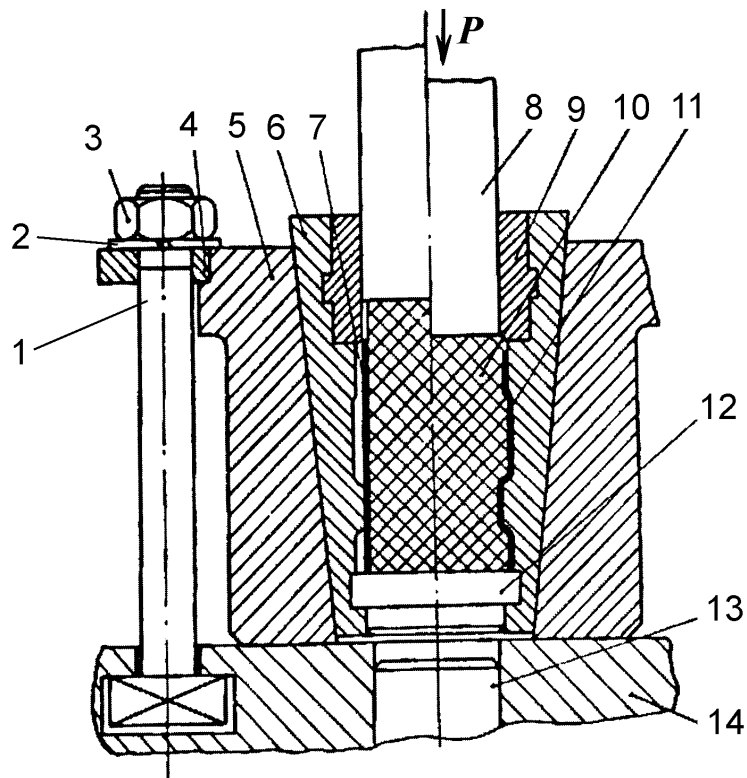


Рис. 6.4. Схема штампа для роздавання трубчастих заготовок еластичним середовищем: 1 – стяжний болт; 2 – шайба; 3 – гайка; 4 – притискне кільце; 5 – контейнер; 6 – рознімна матриця; 7 – заготовка; 8 – пуансон; 9 – напрямне кільце; 10 – поліуретанова вкладка (еластичне середовище); 11 – деталь; 12 – заглушка; 13 – виштовхувач; 14 – стіл преса

Останнім часом з'явилися такі нові синтетичні еластomers, як адипрени, авотани, вулгалани, поліуретани, що мають високі механічні властивості. Вони мають вищу, ніж гума, стійкість до ударних навантажень, зносостійкість, нижчий коефіцієнт тертя. Наприклад, широко застосовуваний поліуретан СКУ-7Л зберігає працездатність за умов тисків до 500 МПа, водночас гума втрачає свої властивості вже за умови тиску в 100 МПа. Різке збільшення виробництва нових синтетичних еластичних матеріалів дає змогу широко використовувати їх у заготівельно-штампувальному виробництві.

Поліуретан у процесі роздавання відіграє роль універсального формотвірного інструмента, що дає змогу уникати різкої концентрації навантажень, рівномірно прикладати до заготовки деформувальний тиск, створювати сприятливі схеми напружено-деформованого стану. Усе це дає можливість одержувати високоякісні деталі, зокрема досить складної просторової форми, що раніше виготовлялися зварюванням із декількох елементів.

## Технологічні розрахунки

Допустиме збільшення (за один перехід) діаметра порожнистої заготовки роздаванням обмежується граничним ступенем деформації, за якої починається місцеве стоншення, а потім і руйнування матеріалу заготовки. Величина допустимої деформації заготовки в процесі роздавання в холодному стані залежить від виду матеріалу і його механічних властивостей, відносної товщини матеріалу  $S/d_0$ , величини сил тертя й інших факторів. Можливість формозміни під час роздавання порожнистих заготовок характеризується **коефіцієнтом роздавання  $k_p$** :

$$k_p = \frac{\pi d_0}{L}, \quad (6.1)$$

де  $d_0$  – діаметр заготовки;  
 $L$  – її периметр після роздавання.  
 Для круглих деталей

$$k_p = \frac{d_0}{D_d}, \quad (6.2)$$

де  $D_d$  – діаметр деталі після роздавання.

Гранично допустимі значення  $k_p^{\text{доп}}$ , якщо  $S/d_0 \geq 0,02$ , для різних матеріалів наведено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Гранично допустимі значення  $k_p^{\text{доп}}$

| Матеріал           | Д16Т        | Д16М       | АМгМ        | АМг6        | АМц          |
|--------------------|-------------|------------|-------------|-------------|--------------|
| $k_p^{\text{доп}}$ | 0,78...0,84 | 0,75...0,8 | 0,72...0,75 | 0,75...0,82 | 0,7.....0,72 |

Роздавання відбувається зі зменшенням товщини стінки заготовки. Товщину стінки деталі  $S_d$  можна визначити за формулою

$$S_d = S \sqrt{\frac{\pi d_0}{L}} = S \sqrt{k_p}. \quad (6.3)$$

Якщо технічними умовами на виріб задана допустима величина  $S_d$ , то допустимий коефіцієнт роздавання

$$k_p^{\text{доп}} = \left( \frac{S_d}{S} \right)^2. \quad (6.4)$$

**Висоту заготовки** визначають з умови рівності об'єму металу заготовки і деталі  $H_0 \pi d_0 S = H_d L S_d$ . З урахуванням формули (6.3) одержуємо

$$H_0 = \frac{H_\partial}{\sqrt{k_p}}. \quad (6.5)$$

Якщо деталь має місцеве роздавання, то висота заготовки  $H_0$  визначається співвідношенням

$$H_0 = 1,1 \left[ \frac{h}{\sqrt{k_p}} + H_\partial - h \right], \quad (6.6)$$

де  $h$  – висота виступу роздавання;

$H_\partial$  – загальна висота деталі;

$1,1$  – поправковий коефіцієнт, що враховує осьове осідання (рис. 6.5).

У процесі штампування в міру зміцнення матеріалу в зоні роздавання тиск  $q$  усередині еластичного середовища має монотонно збільшуватися. Максимальний тиск наприкінці штампування має забезпечувати щільне прилягання всіх ділянок частини заготовки, що роздається, до матриці.

Недостатній тиск  $q$  унеможлиблює виконання повного оформлення всіх ділянок частини заготовки, що роздається, а надмірний тиск може призвести до руйнування поліуретану і заготовки. Таким чином, монотонне збільшення тиску має відбуватися в межах деякого діапазону. Ширина цієї зони робочих тисків залежить насамперед від характеристик пластичності, тобто здатності матеріалу пластично деформуватися без руйнування в умовах наявного напружено-деформованого стану.

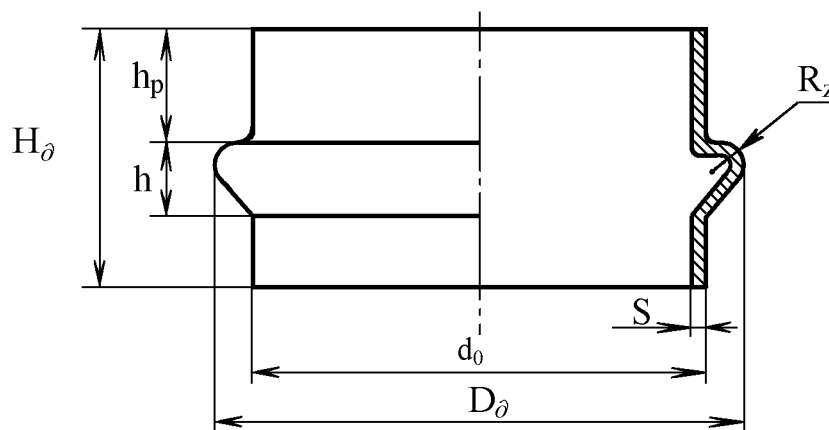


Рис. 6.5. Деталь типу компенсатора, що одержується роздаванням у штампі з використанням еластичного середовища (пуансона):  
 $d_0 = 63$  мм – діаметр заготовки;  $D_\partial = 77,3$  мм – діаметр роздавання;  
 $H_\partial = 34$  мм – висота деталі;  $h = 10$  мм – висота виступу роздавання;  
 $h_p = 15$  мм – відстань від торця заготовки до виступу роздавання;  
 $R_z = 3,0$  мм – радіус кривизни частини заготовки, що роздається;  
 $S$  – товщина заготовки

Умова рівноваги тонкостінного циліндра описується відомим рівнянням Лапласа

$$\sigma_{\theta}/R_{\theta} + \sigma_z/R_z = q/S_T, \quad (6.7)$$

де  $\sigma$ ,  $\sigma_z$  – тангенціальне й осьове розтяжні напруження, що виникають у стінці заготовки під дією тиску еластичного середовища  $q$ ;

$R_{\theta}$ ,  $R_z$  – поточні радіуси кривизни частини заготовки, що роздається, у поперечному і поздовжньому перерізах;

$S_T$  – поточна товщина стінки заготовки.

Розв'язуючи рівняння рівноваги (6.7) разом із рівнянням умови пластичності  $\sigma = \sigma_s$ , можна одержати вираз для мінімального необхідного тиску еластичного середовища всередині заготовки

$$q_{min} = \sigma_s S_T / R_{\theta} + \sigma_s S_T / R_z. \quad (6.8)$$

Значення максимального тиску еластичного середовища можна визначити на основі припущення про те, що граничні розтяжні тангенціальне  $\sigma_{\theta}$  і осьове  $\sigma_z$  напруження в зоні роздавання становлять величину, яка дорівнює тимчасовому опорові матеріалу під час розтягання, і оскільки  $R_{\theta} = D_{\partial}/2$ , то

$$q_{max} = 2\sigma_B S_{\partial} / D_{\partial} + \sigma_B S_{\partial} / R_z. \quad (6.9)$$

**Розрахунок зусилля** під час роздавання деталей у штампі із застосуванням еластичного середовища виконують за формулою

$$P = k_H q p_{max}, \quad (6.10)$$

де  $k_H$  – коефіцієнт навантаження, що враховує затікання еластичного середовища в зазори штампа, в'язкість середовища, втрати на тертя;

$q_{max}$  – тиск в еластичному середовищі;

$F_n$  – площа поперечного перерізу еластичного середовища (поліуретанової вкладки).

У процесі технологічних розрахунків дуже важливо знати потрібне зусилля преса для роздавання заготовки до повного прилягання всіх її ділянок до матриці, а отже, необхідно встановити залежність

$$k_H = P / (q_{max} F_n). \quad (6.11)$$

Стійкість еластичного середовища значною мірою залежить від ступеня його деформації за один робочий хід. Так, для поліуретану марки СКУ-7Л відносний ступінь деформації  $\varepsilon$  не має перевищувати 30 %:

$$\varepsilon = \left( \frac{\Delta H}{H_p} \right) 100 \%, \quad (6.12)$$

де  $\Delta H$  – робочий хід пуансона штампа;

$H_p$  – вихідна висота поліуретанової вкладки.

Таким чином, у процесі проєктування штампа необхідно контролювати ступінь деформації еластичного середовища для забезпечення його стійкості.

### Матеріали, інструмент, устаткування

Зразки – трубчасті заготовки зі сплаву АМг6 ( $\sigma_B = 230$  МПа) діаметром 63 мм з товщиною стінки 1,0 мм. Штмп для роздавання трубчастих заготовок з еластичною вставкою з поліуретану марки СКУ-7Л. Штангенциркуль; радіусомір. Гідравлічний витяжний прес подвійної дії для одно- і багатоперехідного витягування (моделі НВС 2-40 з максимальним технологічним зусиллям 400 кН).

### Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з роботою штампа (див. рис. 6.4) для роздавання трубчастої заготовки еластичним середовищем, установленого безпосередньо на гідропресі НВС 2-40. Штмп закріплюють на столі преса 14 за допомогою притискного кільця 4, болтів 1, шайб 2 і гайок 3. Виштовхувач преса 13 через заглушку 12 піднімає рознімну матрицю 6 у крайнє верхнє положення, матрицю витягують із контейнера 5 і розбирають, а виштовхувач 13 повертається в крайнє нижнє положення. У порожнині рознімної матриці 6 устанавлюють заготовку 7 з поліуретановою вставкою (еластичним середовищем) 10, що направляє кільце 9 і заглушку 12. Потім зібрану рознімну матрицю 6 поміщають у контейнер 5 і здійснюють робочий хід преса, унаслідок чого пуансон 8 діє на еластичне середовище 10, а через нього – на заготовку 7. Відбувається роздавання заготовки 7 і перетворення її в деталь 11. Після цього пуансон 8 повертається в крайнє верхнє положення, виштовхувач 13 преса діє на рознімну матрицю 6, піднімаючи її у крайнє верхнє положення. Матрицю витягують із контейнера 5, розбирають і з неї витягують відштамповану деталь 11. Виштовхувач 13 повертається в крайнє нижнє положення – і цикл повторюється.

2. Виконати такі технологічні розрахунки:

– визначити коефіцієнт роздавання в процесі одержання деталі (див. рис. 6.5), використовуючи формулу (6.2);

– визначити висоту вихідної заготовки  $H_0$ , використовуючи рис. 6.5 і формулу (6.6).

3. Здійснити штампування чотирьох деталей (див. рис. 6.5) в експериментальному штампі (див. рис. 6.4) у діапазоні зусиль преса 60...160 кН і виміряти розміри  $D_a$  і  $R_z$  отриманих деталей, після чого розрахувати величини максимального тиску  $q_{max}$  еластичного середовища за формулою (6.9) (товщину стінки деталі визначити за формулою (6.3)).

Використовуючи формулу (6.11), розрахувати значення коефіцієнта навантаження  $k_H$  для кожного виміру. Результати розрахунків і вимірів занести до табл. 6.2.

Таблиця 6.2

Результати розрахунків і вимірів

| № п/п | Зусилля преса $P$ ,<br>кН | $D_d$ ,<br>мм | $S_d$ ,<br>мм | $R_z$ ,<br>мм | $q_{max}$ ,<br>МПа | $k_H$ (6.11) |
|-------|---------------------------|---------------|---------------|---------------|--------------------|--------------|
| 1     |                           |               |               |               |                    |              |
| 2     |                           |               |               |               |                    |              |
| 3     |                           |               |               |               |                    |              |
| 4     |                           |               |               |               |                    |              |

4. Виміряти величину ходу пуансона в процесі штампування із зусиллям  $P = 160$  кН і визначити ступінь деформації поліуретанової вкладки за формулою (6.12).

5. Скласти звіт з лабораторної роботи.

### Зміст звіту

1. Короткий опис суті процесів формоутворення деталей із трубчастих заготовок. Визначення обтиснення і роздавання.

2. Ескізи штампа для роздавання трубчастих заготовок еластичним середовищем (див. рис. 6.4) і деталі типу компенсатора (див. рис. 6.5).

3. Технологічні розрахунки за формулами (6.2), (6.3), (6.6), (6.9), (6.11), (6.12).

4. Результати розрахунків і експериментів, занесені до табл. 6.2, і графік залежності  $k_H = f(q_{max})$ , його аналіз.

5. Загальні висновки про процес формоутворення запропонованої деталі еластичним середовищем і стійкості поліуретанової вкладки.

6. Відповіді на контрольні запитання.

### Контрольні запитання

1. Від чого залежить величина допустимого коефіцієнта роздавання?

2. Які переваги процесу роздавання трубчастих заготовок із використанням еластичного середовища?

3. У чому переваги використання поліуретану замість гуми під час штампування деталей еластичним середовищем?

4. Від чого залежить величина коефіцієнта навантаження в процесі формоутворення деталей роздаванням еластичним середовищем?

5. Чим визначається стійкість еластичного середовища під час штампування тонкостінних деталей?

## Лабораторна робота № 7

### ВІДБОРТОВУВАННЯ ОТВОРІВ У ЛИСТОВОМУ МАТЕРІАЛІ ЖОРСТКИМ ПУАНСОНОМ І ЕЛАСТИЧНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ

**Мета роботи** – вивчення процесу відбортювання отворів у листових заготовках із різних матеріалів, виявлення залежності допустимого коефіцієнта відбортювання від механічних властивостей матеріалу, експериментальне визначення залежності зусилля деформування від коефіцієнта відбортювання і порівняння його з розрахунковою.

#### Теоретичні відомості

**Відбортювання** – відгинання частини матеріалу вздовж контуру заготовки. Відбортювки широко використовуються в авіаційних деталях на зразок нервюр, стінок, перегородок тощо для підвищення їх жорсткості. Розрізняють два основні види відбортювання, що різняться характером деформації, схемою напруженого стану і виробничим призначенням: відбортювання отворів (внутрішня відбортювка) і відбортювання зовнішнього контуру (зовнішня відбортювка).

Відбортювання отворів зазвичай буває трьох типів: I – відбортювка, що має згин під кутом  $90^\circ$  (рис. 7.1); II – відбортювка, що має згин під кутом  $60^\circ$  (рис. 7.2, а); III – відбортювка тарілчаста, що має дно з отвором (рис. 7.2, б). Тарілчаста відбортювка без центрального отвору називається глухою.

Відбортювання часто застосовують замість операції витягування з наступним вирубанням дна, особливо в процесі виготовлення деталей із високими фланцями, витягування яких утруднено і потребує декількох переходів. Також відбортювання застосовується для утворення заглиблень під головки потайних болтів і заклепок, отворів під майбутню нарізь у тонколистових деталях.

**Напружено-деформований стан.** У процесі відбортювання отворів твердим пуансоном пластичній деформації піддається частина заготовки, розташована над або під отвором матриці. При цьому вона перебуває в плоско-напруженому стані – розтягання в радіальному і тангенціальному напрямках (рис. 7.3). Радіальні розтяжні напруження  $\sigma_r$  максимальні біля кромки матриці та дорівнюють нулю біля кромки отвору. Таким чином, метал біля отвору заготовки перебуває в умовах лінійного напруженого стану під дією лише тангенціального напруження  $\sigma_\theta$ , через що відбувається подовження-розтягання волокон у тангенціальному напрямку і зменшення товщини матеріалу, тобто звуження в поперечному напрямку. Зважаючи на все, умова пластичності в цьому місці така, що  $\sigma_\theta = \sigma_s$ .

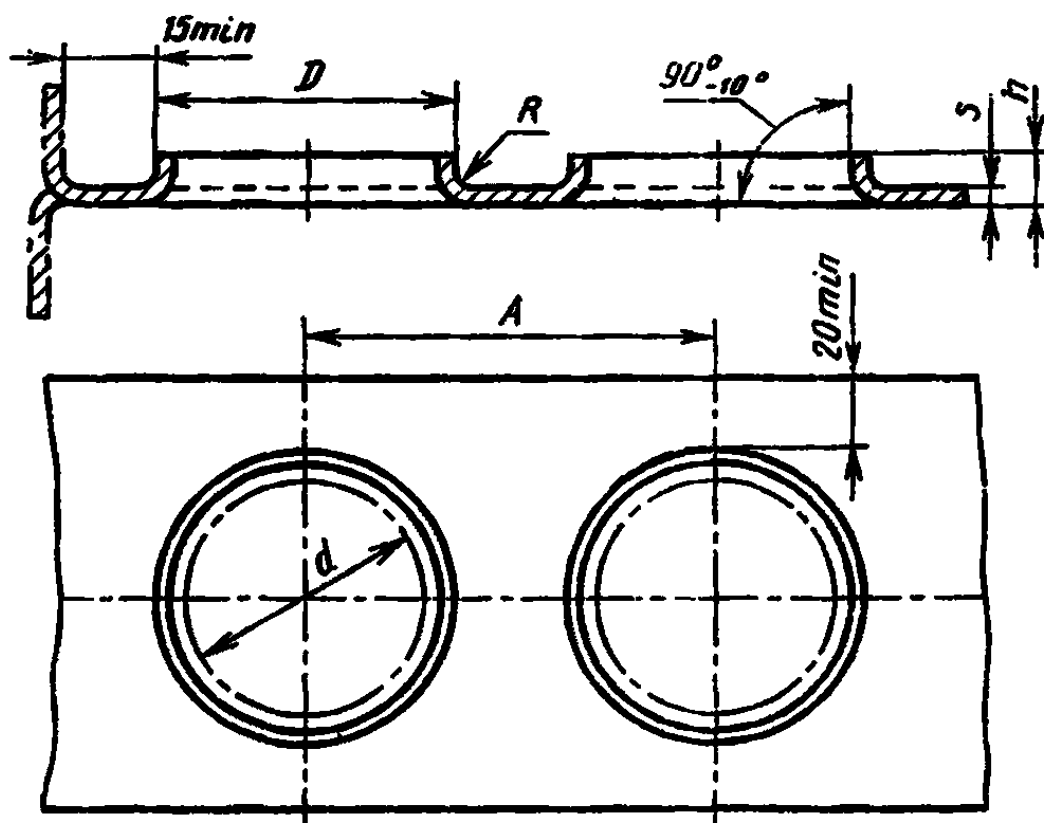
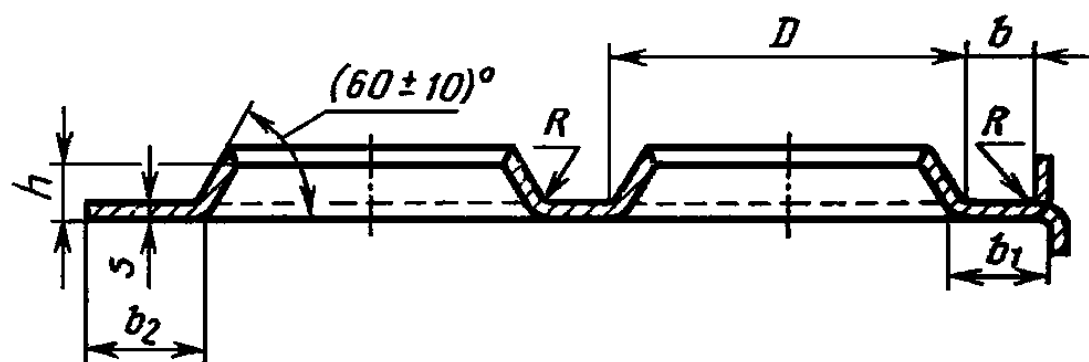
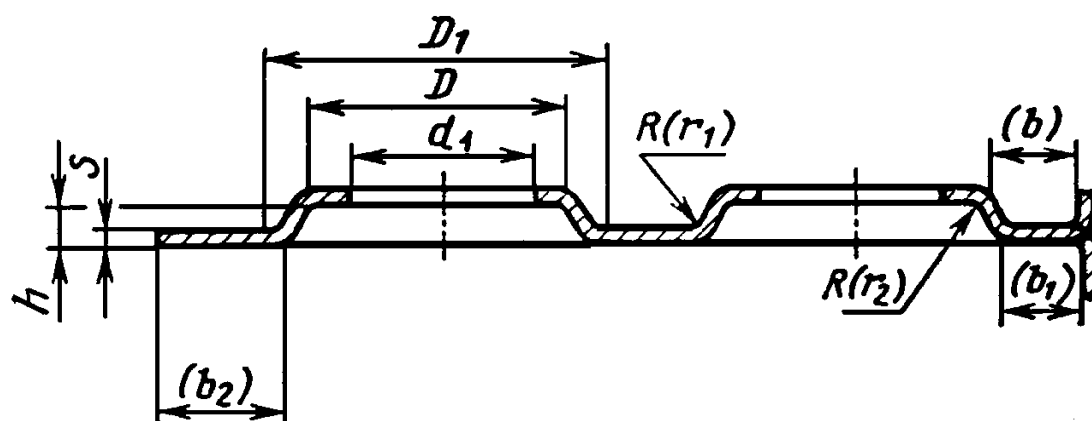


Рисунок 7.1 – Відбортівка типу I



a



б

Рис. 7.2. Відбортівки типів II (a) і III (б)

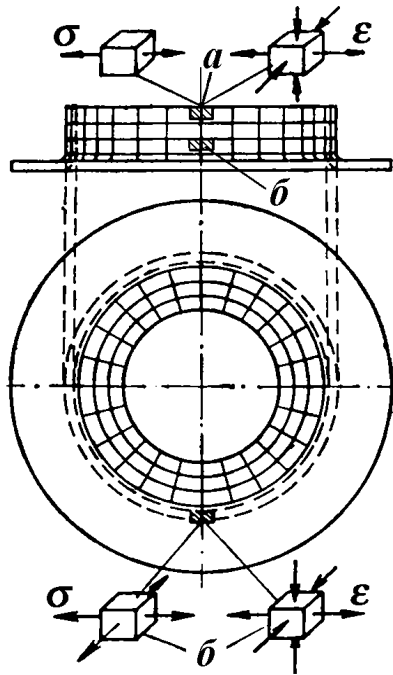


Рис. 7.3. Схеми напруженого ( $\sigma$ ) і деформованого ( $\epsilon$ ) станів заготовки в процесі відборткування, де  $a$  і  $b$  – ділянки відборткування

Ступінь деформації під час відборткування визначається відношенням діаметра отвору в заготованці  $d$  до діаметра борту  $D_{\text{відб}}$  і називається коефіцієнтом відборткування :

$$k_{\text{відб}} = d/D_{\text{відб}}, \quad (7.1)$$

де  $d$  – діаметр отвору для відборткування (рис. 7.4);

$D_{\text{відб}}$  – діаметр відборткування, виміряний по середній лінії.

При цьому виходять із того, що по краю отриманої відбортки не має бути тріщин.

Діаметр отвору визначають за формулою

$$d = D_{\text{відб}} - 2(h - 0,43R_m - 0,72S), \quad (7.2)$$

де  $h$  – висота борту;

$R_m$  – радіус матриці;

$S$  – вихідна товщина листового матеріалу.

Граничне значення коефіцієнта відборткування можна розрахувати аналітично з огляду на величину відносного подовження елементарного кільця на краю стінки за формулою

$$k_{\text{відб}}^{\text{гран}} = 1 - \psi = 1/(1 + \delta), \quad (7.3)$$

де  $\delta$  – відносне подовження;

$\psi$  – відносне звуження для цього матеріалу.

Співвідношення між  $\delta$  і  $\psi$  визначається відомою залежністю  $\delta = \psi / (1 - \psi)$  за умови рівномірної деформації аж до руйнування. Більш точні значення  $k_{відб}^{гран}$  визначаються за  $\psi$ , тому що деформація під час руйнування зазвичай нерівномірна й однозначний зв'язок між  $\delta$  і  $\psi$  порушується.

На практиці надійніше користуватися експериментальними даними для визначення  $k_{відб}^{гран}$ , згідно з якими граничний коефіцієнт відбортювання залежить від таких факторів:

- виду матеріалу і його механічних властивостей;
- відносної товщини заготовки  $S/D_{відб}$ ;
- характеру оброблення і стану кромки отвору заготовки (пробивання або свердлування, наявність або відсутність задирок);
- форми робочої частини пуансона (циліндричний пуансон із заокругленням, конічний або сферичний).

Максимальне зусилля можна визначити за умови найбільших напружень  $\sigma_{max}$ , що діють на межі середовища деформації (див. рис. 7.4).

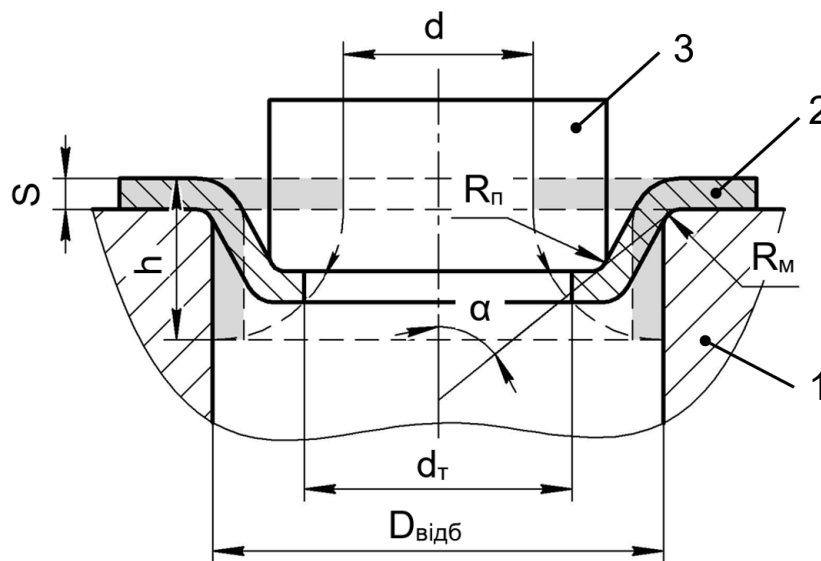


Рис. 7.4. Схема до розрахунку відбортювання плоским пуансоном:

1 – матриця; 2 – заготовка; 3 – пуансон

Якщо знехтувати впливом тертя і згинання, то найбільші напруження можна визначити як

$$\sigma_{max} = \sigma_s \left( 1 - d_t / D_{відб} \right), \quad (7.4)$$

де  $d$  – поточний діаметр отвору.

З цього випливає те, що максимальне зусилля відбортювання

$$P_{max} = \pi D_{відб} S \sigma_{max} \cos \alpha_{max}. \quad (7.5)$$

Можна зробити висновок, що зусилля відбортювання змінне по ходу пуансона, причому внаслідок збільшення  $d$  в міру опускання пуансона зусилля відбортювання має зменшуватися, а внаслідок зменшення кута  $\alpha$  – збільшуватися.

Оскільки контактна площа по бічній поверхні пуансона збільшується в міру переміщення пуансона, то збільшується і дія сил тертя.

Крім того, за деякого переміщення пуансона поява ділянок згинання і випрямлення веде до збільшення  $\sigma_{max}$ . Таким чином, можна вважати, що найбільшу величину напруження  $\sigma_{max}$  одержать не на самому початку деформування, а під час переміщення пуансона. Величини цього переміщення, а отже, і кута  $\alpha$  визначаються значенням кінцевої висоти борту.

Аналіз деформованого стану під час відбортювання показує, що в першому наближенні розрахунки можна виконувати за умови незмінності ширини частини заготовки, що відбортювається, у процесі деформування. У цьому випадку можна вважати, що максимальне зусилля відбортювання буде відповідати проникненню пуансона в матрицю на глибину, що дорівнює сумі  $(R_m + R_n)$ , коли кут  $\alpha$  стає таким, що дорівнює нулю.

Використання умови сталості ширини частини заготовки, що відбортювається, у процесі деформування дає змогу одержати формулу для визначення  $d$ , що відповідає моменту, коли  $\alpha = 0$ :

$$d_T^{\alpha=0} = d + 0,57(R_m + R_n + S). \quad (7.6)$$

Таким чином, з урахуванням сил тертя і згинання теоретична формула для визначення максимального зусилля відбортювання набуває вигляду

$$P_{max} = \pi D_{відб} \sigma_s \left( 1 - \frac{d_T^{\alpha=0}}{D_{відб}} + \frac{S}{2R_n+S} + \frac{S}{4R_m+2S} \right) (1 + 1,6\mu), \quad (7.7)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт тертя.

У цій формулі не враховано вплив на величину  $P_{max}$  зміцнення і зміни товщини заготовки в процесі деформування. Проте запропоновану формулу з достатньою точністю можна застосовувати в розрахунках під час відбортювання в умовах деформації в холодному стані, тому що зміцнення і зміна товщини заготовки впливають на величину  $P_{max}$  і деякою мірою компенсують одне одного.

Для наближеного визначення  $P_{max}$  запропоновано спрощену формулу:

$$P_{max} = 1,5 \pi (D_{відб} - d) S \sigma_B. \quad (7.8)$$

У процесі відбортювання *еластичним середовищем* (рис. 7.5) відбортювка в меридіональному напрямку залишається майже прямою. Тиск, що деформує борт, зазвичай визначають як суму двох доданків, один із яких визначається умовою згинання заготовки на ребрі матриці, а другий – умовами деформування відбортювки:

$$q_{max} = \left( \frac{\sigma_S S^2}{2h^2} + \frac{2\sigma_S S}{D_{відб}} \right), \quad (7.9)$$

тоді максимальне зусилля деформування

$$P_{max}^e = k_n q_{max} F_n, \quad (7.10)$$

де  $k_n$  – коефіцієнт навантаження, що враховує затікання еластичного середовища в зазори штампа, в'язкість середовища, втрати на тертя;

$q_{max}$  – тиск, визначений за формулою (7.9);

$F_n$  – площа поперечного перерізу еластичного середовища (діаметр еластичної подушки дорівнює діаметру заготовки).

Для поліуретану СКУ-7Л  $k_n = 1,6$  у процесі відбортювання.

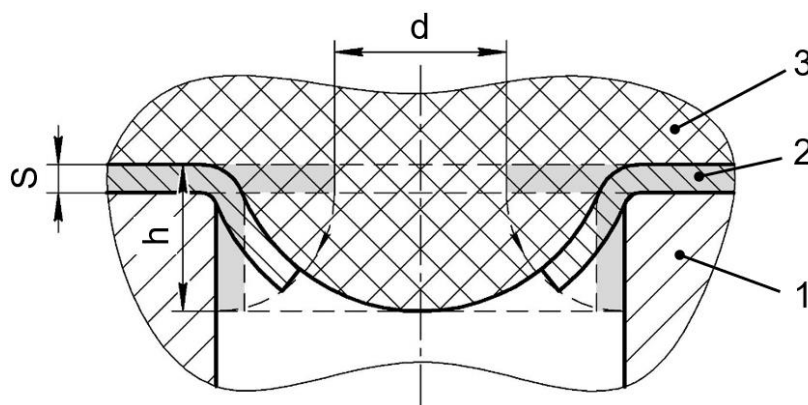


Рис. 7.5. Схема до розрахунку відбортювання еластичним середовищем:

1 – матриця; 2 – заготовка; 3 – еластичне середовище

Відбортювання в штампах із застосуванням поліуретану можна використовувати для деталей, що штампуються в холодному стані з матеріалів товщиною до  $S = 1,5$  мм. Відбортювання деталей поліуретаном із більш товстих матеріалів недоцільне, оскільки спричиняє різке зменшення стійкості поліуретанової подушки.

У штампах із застосуванням поліуретану можна виконувати глухі відбортювання з одночасним пробиванням дна, при цьому необхідно враховувати, що товщина матеріалу заготовки має бути не більшою ніж 0,5 мм. Приклад процесу відбортювання без попередньо вирубаного отвору наведено на рис. 7.6.

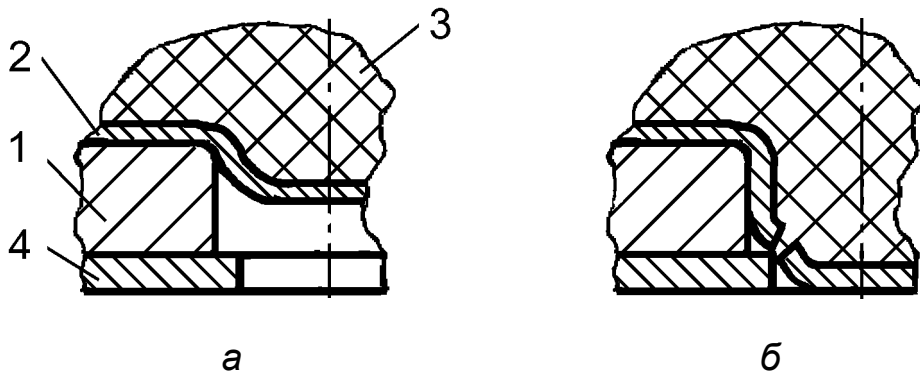


Рис. 7.6. Схема процесу відбортювання з одночасним пробиванням отвору еластичним середовищем: *а* – стадія глухого відбортювання; *б* – стадія пробивання отвору (1 – матриця; 2 – заготовка; 3 – поліуретан; 4 – вирізний шаблон)

Під час відбортювання круглого контуру з попередньо вирубаним отвором за умови товщини матеріалу понад 0,5 мм рекомендується застосовувати технологічну прокладку з пластичного металу для підвищення рівномірності деформації. При цьому діаметр технологічної прокладки  $D_{\text{п}} = 1,5D_{\text{відб}}$ ;  $S_{\text{п}} = (0,5 \dots 1,0)S$  (рис. 7.7).

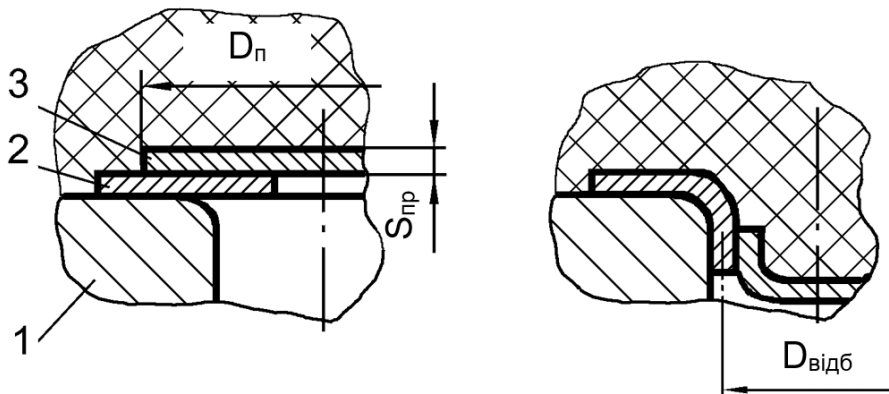


Рис. 7.7. Схема процесу відбортювання з використанням технологічної прокладки: 1 – матриця; 2 – заготовка; 3 – технологічна прокладка

У процесі відбортювання мінімальні значення  $R_{\text{м}}$  і  $R_{\text{п}}$  такі самі, як і під час згинання, і беруться залежно від властивостей матеріалу.

Найменша товщина матеріалу біля краю бортів визначається із закону сталості об'єму металу під час деформування і при будь-якому методі відбортювання визначається формулою

$$S\sqrt{k_{\text{відб}_{\text{min}}}} \quad (6.11)$$

## Матеріали, інструмент, устаткування

Зразки – листові заготовки з двох-трьох матеріалів, що вирізняються граничною пластичністю,  $\varnothing 70$  мм і  $\varnothing 40$  мм, завтовшки 1,0 мм. Штampi для відбортювання отворів із жорстким пуансоном (рис. 7.8) і еластичним середовищем (рис. 7.9); штангенциркуль; ручний гідравлічний прес і гідравлічний прес моделі HVC 2-40.

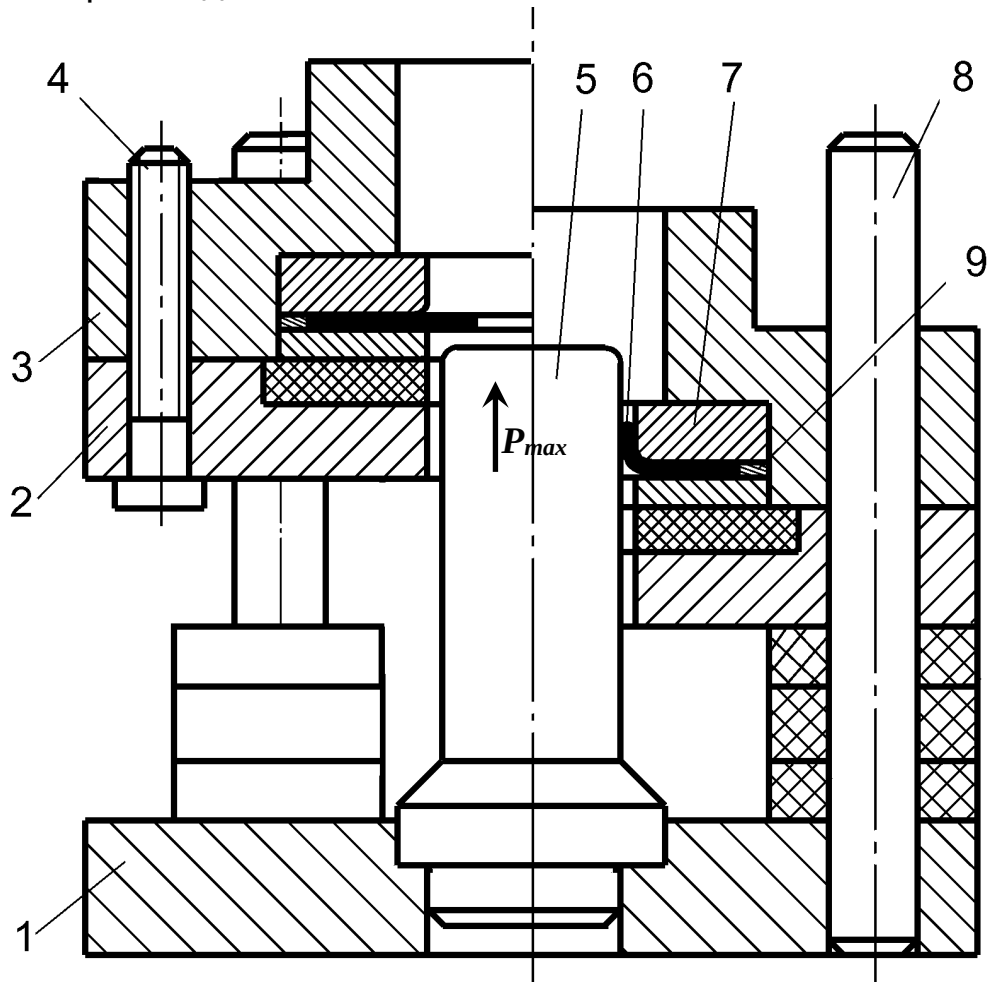


Рис. 7.8. Схема експериментального штампa для відбортювання отворів із жорстким пуансоном: 1 – нижня плита штампa; 2 – притискач; 3 – верхня плита штампa; 4 – гвинт; 5 – пуансон; 6 – деталь; 7 – матриця; 8 – напрямна колонка; 9 – центрувальне кільце

## Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з роботою устаткування і конструкцією штампів для відбортювання отворів (див. рис. 7.8 і 7.9).
2. Виконати такі технологічні розрахунки:
  - визначити коефіцієнти відбортювання і діаметр отворів у заготовках для одержання деталей із відбортюваннями типу I (див. рис. 7.1), використовуючи формули (7.1), (7.2);

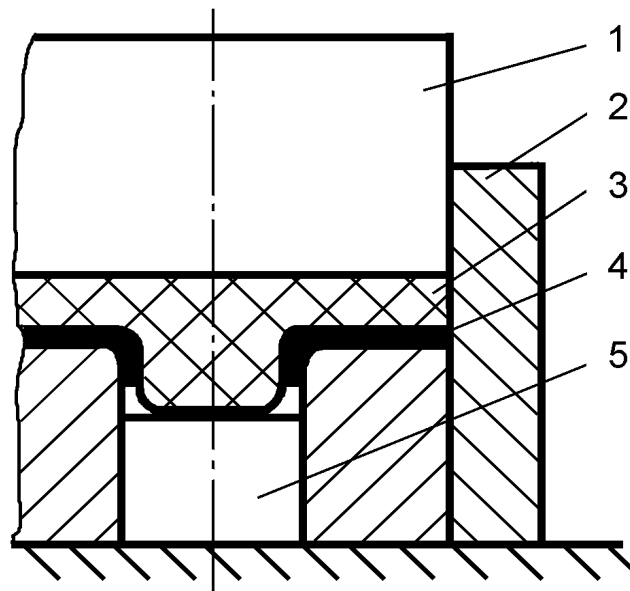


Рис. 7.9. Схема експериментального штампа для відбортювання еластичним середовищем: 1 – пуансон; 2 – контейнер; 3 – еластичне середовище; 4 – деталь; 5 – вкладка

- визначити максимальні значення зусиль відбортювання для деформування жорстким пуансоном за формулами (7.5), (7.7) і (7.8) і еластичним середовищем за формулою (7.10);
- визначити товщину кромки борту за формулою (7.11).

3. Здійснити відбортювання заготованок з кожного матеріалу в штампі із жорстким пуансоном (див. рис. 7.8), при цьому розпочати з діаметра отвору  $d$ , зазначеного викладачем, зменшуючи  $d$  на 1 мм у кожній заготованці до появи тріщин на кромці борту, фіксувати тиск за манометром преса для кожного робочого ходу. Результати експерименту занести до табл. 7.1.

4. Виконати відбортювання заготованок у штампі з еластичним середовищем (див. рис. 7.9) із застосуванням технологічної прокладки (див. рис. 7.7) і без неї, при цьому розпочати з діаметра отвору  $d$ , заданого викладачем. Результати вимірювань занести до табл. 7.2.

5. Побудувати за даними результатів вимірювань і розрахунків залежності  $P(k_{\text{відб}})_{\text{max}}$ ,  $P_{\text{max}}^{\mathfrak{A}(k_{\text{відб}})}$  для двох марок матеріалів під час відбортювання в штампі із жорстким пуансоном і для випадків із технологічною прокладкою та без неї в штампі з еластичним середовищем.

6. Сформулювати висновки з виконаної роботи і оформити звіт.

Таблиця 7.1

Результати розрахунків і експериментів з відбортювання  
в штампі із жорстким пуансоном

| Номер експерименту | Марка матеріалу | Діаметр отвору $d$ , мм | Коефіцієнт відбортювання $k_{відб}$ | Товщина кромки борту, мм |              | Тиск за манометром, Н/мм <sup>2</sup> | Максимальне зусилля $P_{max}$ , Н |              | Висота борту $h$ , мм | Наявність тріщин на кромці |
|--------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------|---------------------------------------|-----------------------------------|--------------|-----------------------|----------------------------|
|                    |                 |                         |                                     | Експериментальна         | Розрахункова |                                       | Експериментальне                  | Розрахункове |                       |                            |
|                    |                 |                         |                                     |                          |              |                                       |                                   |              |                       |                            |
|                    |                 |                         |                                     |                          |              |                                       |                                   |              |                       |                            |

Таблиця 7.2

Результати розрахунків і експериментів з відбортювання  
еластичним середовищем

| Номер експерименту | Наявність технологічної прокладки | Коефіцієнт відбортювання $k_{відб}$ | Товщина кромки борту, мм |              | Максимальне зусилля $P_{max}$ , Н |              | Висота борту $h$ , мм | Наявність тріщин на кромці |
|--------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------|-----------------------------------|--------------|-----------------------|----------------------------|
|                    |                                   |                                     | Експериментальна         | Розрахункова | Експериментальне                  | Розрахункове |                       |                            |
|                    | Є                                 |                                     |                          |              |                                   |              |                       |                            |
|                    |                                   |                                     |                          |              |                                   |              |                       |                            |
|                    | Немає                             |                                     |                          |              |                                   |              |                       |                            |
|                    |                                   |                                     |                          |              |                                   |              |                       |                            |

### Зміст звіту

1. Короткий конспект із визначенням процесу відбортювання, схемами (див. рис. 7.4, 7.5) і формулами (7.1), (7.2), (7.3), (7.5), (7.7), (7.8), (7.10) для розрахунку  $k_{відб}$ ,  $k_{відб}^{гран}$ ,  $d$ ,  $P_{max}$ .
2. Ескізи експериментальних штампів (див. рис. 7.8 і 7.9).
3. Результати розрахунків і експериментів (див. табл. 7.1, 7.2).
4. Графіки залежностей  $P_{max} = f(k_{відб})$ ,  $P_{max}^e = f(k_{відб})$ .
5. Загальні висновки з роботи й відповіді на контрольні запитання.

### Контрольні запитання

1. Від яких факторів залежить граничний коефіцієнт відбортювання  $k_{відб}^{гран}$ ?
2. Від чого залежить величина максимального зусилля відбортювання жорстким пуансоном?
3. Як визначити діаметр попередньо вирубаного отвору для відбортювання ?
4. Для чого застосовується відбортювання в авіаційних деталях?
5. Опишіть варіанти схем відбортювання еластичним середовищем.
6. Від чого залежить ступінь стоншення матеріалу краю борту?

## **Лабораторна робота № 8**

### **ШТАМПУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ЛИСТОВОГО МАТЕРІАЛУ**

### **ЕЛАСТИЧНИМИ СЕРЕДОВИЩАМИ**

**Мета роботи** – ознайомлення з технологічними особливостями процесів штампування-вирубівання і згинання-формування листових деталей еластичним середовищем, визначення їх силових параметрів. Експериментальне дослідження впливу різних факторів на величину кута пружинення деталей.

#### **Теоретичні відомості**

Звичайні методи штампування, що широко застосовуються в багатосерійному і масовому виробництві, недостатньо ефективні та нерациональні в умовах дрібносерійного і швидкопереналагоджуваного виробництва, тому що виготовлення конструктивно складних і дорогих штамів потребує тривалого часу, а зроблені витрати не окупаються.

Необхідність швидкого освоєння виробів потребує застосування в зазначених умовах технологічних процесів із використанням дешевого універсального або частково універсального оснащення. До таких процесів належить штампування еластичними середовищами.

Штампування еластичними середовищами використовується для здійснення різних процесів: згинання, витягування, формування, розкроювання (зазвичай разом з іншими процесами) тощо. За допомогою штампування виготовляються різні деталі (нервюри, шпангоути і їх деталі, діафрагми, стінки, перегородки, напівпатрубки тощо) з алюмінієвих і титанових сплавів, нержавійних сталей та інших матеріалів. Номенклатура деталей (рис. 8.1), виготовлених за допомогою штампування еластичними середовищами, містить кілька тисяч найменувань, а трудомісткість, що припадає на цей вид робіт, становить 15 % від загальної трудомісткості заготівельно-штампувальних робіт.

Штампування еластичними середовищами здійснюється на гідравлічних плунжерних пресах і пресах прямої дії, а також на листоштампувальних молотах.

На гідравлічних плунжерних пресах переміщення контейнера здійснюється плунжером преса. Значні розміри контейнерів, що мають робочу площу до 6 м<sup>2</sup>, а також універсальність матриці дають змогу виконувати групове штампування деталей і одержувати за один хід преса 5–10 деталей і більше, що з погляду продуктивності компенсує тихохідність цих пресів.

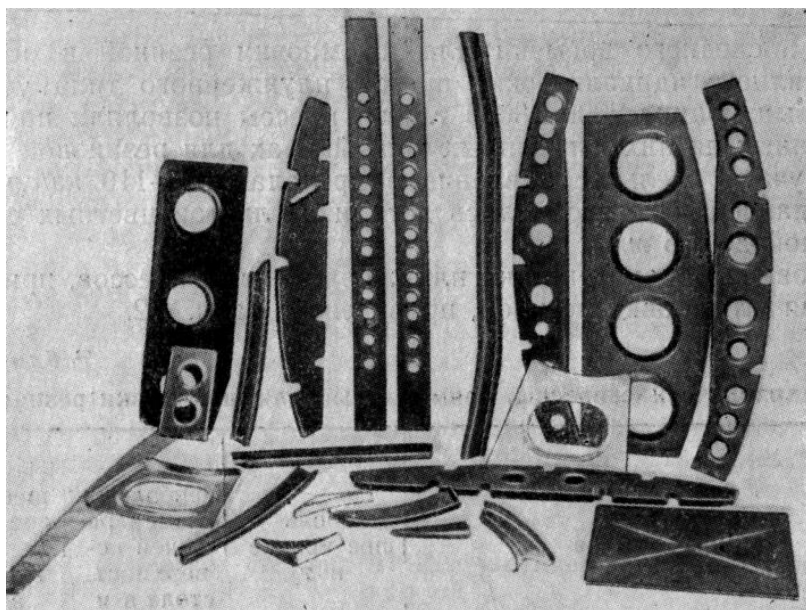


Рис. 8.1. Типові деталі, отримані формоутворенням еластичним середовищем

Використання для виготовлення деталей високоміцних сплавів, підвищення вимог до якості та точності, потреба в зниженні трудомісткості довідних робіт викликали необхідність застосування в процесі штампування еластичними середовищами більш високих тисків – приблизно 30...40 МПа і більше. Подальше збільшення потужності плунжерних пресів із метою підвищення робочого тиску є недостатньо ефективним. Зважаючи на сказане, найбільш широко застосовуються безплунжерні преси для штампування еластичним середовищем (прямої дії).

Конструктивне виконання пресів цього типу різне, але в цілому вони значно дешевші за плунжерні преси з такими самими характеристиками.

Основні технічні характеристики деяких спеціалізованих гідропресів для штампування еластичними середовищами наведено в табл. 8.1.

Таблиця 8.1

Гідропреси для штампування еластичними середовищами

| Модель преса | Зусилля, кН | Деформувальний тиск, МПа | Розміри стола, м |
|--------------|-------------|--------------------------|------------------|
| П307 (ПШР-1) | 9600        | 30                       | 1,2×2,0          |
| П5650        | 100000      | 100                      | 0,7×1,4          |
| П5054        | 240000      | 100                      | 1,2×2,0          |
| ЯО6019       | 600000      | 100                      | 1,5×4,0          |
| QRD-600      | 600000      | 100                      | 1,2×4,1          |

Застосування пресів із підвищеним тиском значно розширило технологічні можливості штампування еластичними середовищами. Преси з деформувальним зусиллям 100 МПа забезпечують групове бездовідне штампування майже всієї номенклатури деталей з алюмінієвих сплавів і обмеженої номенклатури деталей із титанових сплавів, високоміцних сталей та інших матеріалів, що важко деформуються. Для бездовідного штампування в холодному стані деталей із титанових сплавів та інших матеріалів, що важко деформуються, необхідні деформувальні тиски 100...150 МПа і більше. Застосування ж технологічного нагрівання під час формоутворення деталей на зазначених пресах потребує здійснення спеціальних заходів, значно збільшує цикл оброблення, ускладнює оснащення й у цілому підвищує собівартість деталей.

Перспективним напрямом вважається динамічне штампування еластичними середовищами на молотах різної конструкції, зокрема й на високошвидкісних молотах, сконструйованих у Харківському авіаційному інституті. Устаткування цього типу за умови меншої металомісткості забезпечує створення деформувальних тисків більше 100 МПа. При цьому простіше вирішуються питання формоутворення нагрітих заготовок.

Розглянемо особливості процесів вирубування-пробивання і згинання-формування еластичним середовищем.

#### ***Вирубування-пробивання еластичним середовищем.***

Вирубування-пробивання еластичним середовищем застосовується переважно в дрібносерійному виробництві під час виготовлення порівняно великих заготовок і деталей із тонколистового матеріалу (завтовшки до 2 мм). Як інструмент використовуються пуансони-копіри (вирізні шаблони), контур яких відповідає контуру заготовки, що вирізається, а висота залежить від робочих тисків. За умови тисків 8...10 МПа висота пуансона-копіра становить 8...10 мм. У разі використання поліуретану, що допускає тиск більший за 100 МПа, висоту пуансона-копіра може бути знижено до 2...3 мм. Матеріалом для виготовлення пуансонів-копірів є інструментальна сталь.

Процес вирубування еластичним середовищем (рис. 8.2) можна поділити на такі етапи:

- притискання припуску (**A**) заготовки 2 за допомогою еластичної подушки 1 до підштампової плити 3;
- защемлення частини припуску (**b**), що запобігає переміщенню припуску (**A**) до торця пуансона-копіра 4;
- розподіл матеріалу по контуру пуансона-копіра під дією розподіленого навантаження на ділянці припуску (**c**).

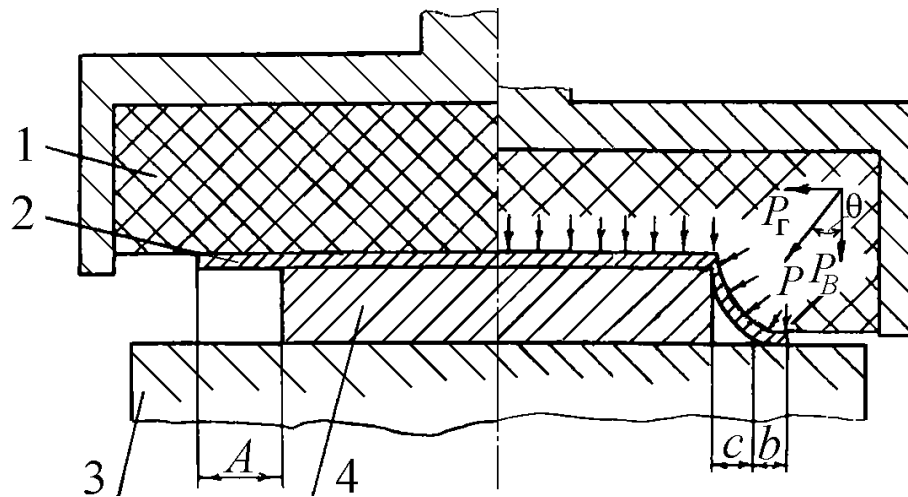


Рис. 8.2. Схема процесу вирубання еластичним середовищем (ліворуч – вихідне положення, праворуч – кінець процесу):

1 – еластична подушка; 2 – заготованка; 3 – підштампова плита;  
4 – пуансон-копір

З рис. 8.2 видно, що під дією вертикальної складової вектора тиску  $P_B = P \cos \theta$  відбувається розподіл матеріалу, а під дією горизонтальної складової  $P_F$  – підтягування припуску до торця пуансона-копіра. Зрівноважування горизонтальної складової  $P_F$  вектора тиску відбувається завдяки силі тертя між затисненою частиною припуску й еластичною подушкою.

Для практичних розрахунків тиску, необхідного для вирубання зовнішнього контуру, використовується формула

$$q_{вир} = \frac{\sigma_{зр} S L}{1,1 H_n (L + 1,57 H_n)}, \quad (8.1)$$

де  $\sigma_{зр}$  – опір матеріалу зрізу;

$S$  – товщина матеріалу, що вирубється;

$L$  – периметр деталі;

$H_n$  – висота пуансона-копіра.

Необхідний тиск для пробивання отвору визначається за допомогою виразу

$$q_{пр} = \frac{\sigma_{зр} S L}{F} k_1 k_2, \quad (8.2)$$

де  $L$  – периметр отвору;

$F$  – площа отвору;

$k_1$  – коефіцієнт форми отвору (для круглих отворів  $k_1 = 1$ , для квадратних –  $k_1 = 0,8 \dots 0,9$ , для трикутних –  $k_1 = 0,7 \dots 0,8$ );

$k_2$  – коефіцієнт, що залежить від співвідношення діаметра отвору (або вписаного круга)  $d$  і висоти  $H_n$  пуансона-копіра (визначається за табл. 8.2).

Значення коефіцієнта  $k_2$ 

| Відношення діаметра отвору до товщини пуансона-копіра ( $d/H_n$ ) | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
|-------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $k_2$                                                             | 1,0 | 1,3 | 1,6 | 1,9 | 2,2 | 2,5 |

Розрахунок тиску для пробивання отворів, для яких  $d/H_n > 10$ , виконують за формулою, аналогічною (8.1):

$$q_{пр} = \frac{\sigma_{зр} S L}{1,1 H_n (L - 1,57 H_n)}. \quad (8.3)$$

Слід зазначити, що енергоємність процесу прямо залежить від величини площі поліуретанової (гумової) подушки, тобто чим більша площа подушки, тим більше зусилля преса буде потрібне для вирубування пробивання тієї самої деталі.

Необхідне зусилля преса визначають за формулою

$$P = k_n q_{max} F_n, \quad (8.4)$$

де  $k_n$  – коефіцієнт навантаження, що враховує затікання еластичного середовища в зазори штампа, в'язкість середовища, втрати на тертя;

$q_{max}$  – тиск, більший з отриманих значень  $q_{вир}$  і  $q_{пр}$ ;

$F_n$  – площа еластичної подушки в контейнері преса.

Необхідні тиски  $q$  розраховуються по всіх елементах контуру деталі, з яких згодом вибирається найбільший.

Якість зрізу і точність деталей, що одержують штампуванням-вирубуванням еластичним середовищем, істотно залежать від міцнісних властивостей розділюваного матеріалу і величини деформувальних тисків. Для пластичних матеріалів підвищення тисків штампування-вирубування забезпечує високу якість і точність деталей у разі використання традиційної схеми навантаження. Виготовлення деталей із малопластичних металів штампуванням-вирубуванням поліуретаном традиційними методами найчастіше призводить до незадовільної якості поверхні зрізу. Причиною є переважання в механізмі розподілу пружно-пластичного згинання з розтяганням, що спричиняє утворення сколювальної тріщини з боку дії еластичного середовища з наступним довільним її поширенням. Унаслідок чого кромка зрізу має вигляд крихкого зламу, контур розподілу виходить за межі різального інструмента, по всьому контуру деталі з'являються задирки. Незадовільна якість кромок деталей із малопластичних матеріалів після штампування-вирубування еластичним середовищем потребує застосу-

вання спеціальних засобів для підвищення якості зрізу. Засобами, спрямованими на удосконалювання процесу штампування-вирубання, можна вважати штампування на пуансонах-копірах, зменшених по висоті, штампування із застосуванням опорних рамок зі скосом і бічним обтисненням заготовки, а також із протитиском.

### ***Згинання-формування деталей еластичним середовищем.***

Згинання-формування деталей еластичним середовищем здійснюють на формблоках, контури яких відповідають внутрішнім контурам деталей. Відмітною рисою операції є те, що зовнішній згинальний момент створюється не зосередженою, а розподіленою силою. При цьому, крім деформацій, характерних для операцій згинання, на ділянках із криволінійними бортами відбувається деформація металу, властива операції витягування (на опуклих ділянках бортів) або відбортовування (на увігнутих ділянках бортів). Зазвичай одночасно зі згинанням бортів на деталях формуються рифти і відбортовування, розташовані в стінці деталі. У цілому цей комплекс процесів у виробничих умовах називається **формуванням**.

Тиск  $q$  еластичного середовища, необхідний для згинання плоского борту, визначимо з умови рівності згинальних моментів внутрішніх і зовнішніх сил. Якщо припустити, що тиск  $q$  на заготовку по всій площі борту, що відгинається, однаковий, то деформувальна сила під час виконання операції (рис. 8.3) дорівнюватиме  $aBq$ , плече –  $a/2$ , а зовнішній згинальний момент –

$$M_{\text{зовн}} = \frac{qa^2B}{2}, \quad (8.5)$$

де  $q$  – тиск у контейнері;

$a$  – плече;

$B$  – довжина борту, що відгинається.

Момент внутрішніх сил

$$M_{\text{вн}} = \frac{\sigma_s BS^2}{4}. \quad (8.6)$$

Прирівнявши вирази (8.5) і (8.6), одержимо

$$\frac{qa^2B}{2} = \frac{\sigma_s BS^2}{4},$$

звідки

$$q = \sigma_s \frac{S^2}{2a^2}, \text{ або } q = \sigma_s \frac{S^2}{2(A-R_{\text{вн}}\phi)^2}, \quad (8.7)$$

де  $\sigma_s$  – границя текучості матеріалу;

$S$  – товщина матеріалу;  
 $A$  – довжина розгортки борту, що відгинається;  
 $R_{вн}$  – внутрішній радіус згину деталі;  
 $\varphi$  – кут згинання в радіанах.

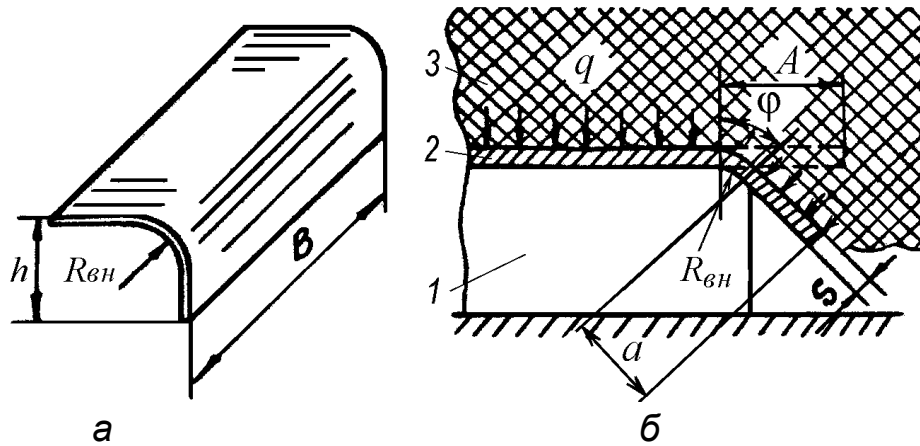


Рис. 8.3. Схема процесу згинання еластичним середовищем:  
 а – готова деталь; б – проміжне положення (1 – формблок;  
 2 – заготовка; 3 – еластичне середовище)

Як видно з виразу (8.7), тиск  $q$  зі збільшенням кута  $\varphi$  збільшується, досягаючи максимального значення наприкінці операції. Тиск залежить головним чином від матеріалу ( $\sigma_s$ ), товщини заготовки ( $S$ ) і радіуса згину ( $R_{вн}$ ). Тиск  $q_{кр}$ , необхідний для деформування криволінійного борту, можна подати у вигляді

$$q_{кр} = q + q_2, \quad (8.8)$$

де  $q$  – тиск, необхідний для згинання борту по ребру формблока (визначається за допомогою виразу (8.7) як для згинання прямолінійного борту);

$q_2$  – тиск, необхідний для пластичного розтягання борту в тангенціальному напрямку (для увігнутого борту) або пластичного стиснення борту в тому самому напрямку (для опуклого борту).

Значення складової тиску  $q_2$  можна приблизно розрахувати з умови рівноваги малої ділянки борту для відповідного випадку.

З урахуванням формули (8.8) визначити тиск формоутворення криволінійного борту можна за виразами:

а) для увігнутого борту

$$q_{кр}^{увігн} = \frac{\sigma_s S^2}{2(A - R_{вн}\varphi)^2} + \frac{\sigma_s S}{R_{бн}}; \quad (8.9)$$

б) для опуклого борту

$$q_{кр}^{опукл} = \frac{\sigma_s S^2}{2(A - R_{вн}\phi)^2} + \frac{\sigma_s S}{R_б} (1 - 0.5 \ln \frac{R_з}{R_б}), \quad (8.10)$$

де  $R_б$  – радіус борту (увігнутого або опуклого) у плані;

$R_з$  – радіус заготовки розгортки деталі.

У наведених залежностях не враховано зміцнення металу, а товщину заготовки вважають незмінною. Тому значення питомих тисків  $q$ , обчислені за формулами (8.7), (8.9), (8.10), слід брати як наближені.

Необхідно відзначити, що під час згинання-формування борту по увігнутому контуру в тангенціальному напрямку діє деформація розтягання і товщина заготовки зменшується, тобто технологічні можливості процесу обмежуються утворенням тріщин із наступним розривом кромки. Під час згинання-формування борту по опуклому контуру, коли в тангенціальному напрямку діє деформація стиснення, товщина заготовки трохи збільшується, а якщо тангенціальні напруження перевищують критичні, то заготовка втрачає стійкість і технологічні можливості операції обмежуються через утворення складок.

Розрахункові величини технологічних параметрів процесу згинання-формування визначаються в основному за емпіричними залежностями і надалі уточнюються під час формоутворення перших деталей.

Після зняття тиску через наявність пружних деформацій матеріалу деталі кут згинання борту збільшується на деякий кут  $\phi_{пр}$ , який називається *кутом пружинення* (рис. 8.4).

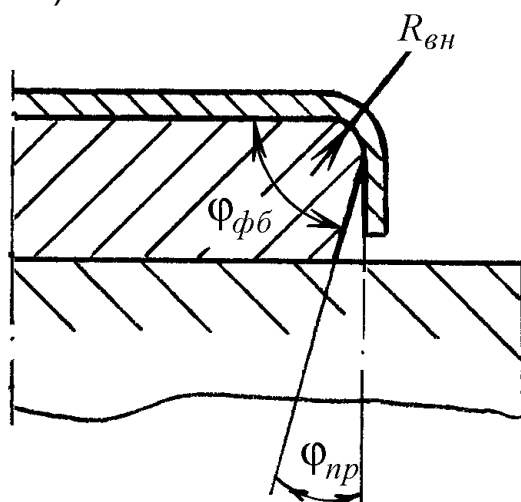


Рис. 8.4. Формблок

Кут пружинення залежить від механічних властивостей матеріалу заготовки, товщини, напрямків волокон, радіуса і кута згинання деталі, умов тертя й інших факторів. Аналітично визначити величину кута пружинення складно. Звичайно величину кута пружинення визначають на

основі статистичних даних і надалі уточнюють під час відпрацьовування технологічного процесу. Для компенсації пружних деформацій згинних деталей кути нахилу стінок формблоків коректують на величину кутів пружинення (див. рис. 8.4):

$$\varphi_{фб} = \varphi_{дет} - \varphi_{пр}. \quad (8.11)$$

З метою зменшення вартості та трудомісткості виготовлення формблоків найчастіше для їх виробництва використовують плитковий бакеліт. У процесі згинання-формування деталей із матеріалів, що важко деформуються, застосовують формблоки зі сталі, Ак-6, Д16 та інших матеріалів.

### **Матеріали, інструмент, устаткування**

Комплекти заготованок, пуансонів-копірів, формблоків; кутомір; штангенциркуль; гідравлічний прес Д-2434А з номінальним зусиллям 2000 кН.

### **Порядок виконання роботи**

1. Ознайомитися з описом лабораторної роботи. Виконати ескізи пуансона-копіра, формблока.

2. Проаналізувати формули (8.1)–(8.3). На запропонованих викладачем пуансонах-копірах виділити контури (зовнішній, внутрішній, отвору), що потребують найбільших тисків штампування-вирубубування. Для визначення цих контурів виконати розрахунок потрібних тисків для штампування-вирубубування (розміри і матеріал заготовки визначаються викладачем, необхідні геометричні розміри контурів одержати виміром безпосередньо з пуансонів-копірів).

3. Розрахувати потрібне зусилля преса за формулою (8.4). Площу еластичної подушки в контейнері преса задає викладач.

4. Здійснити штампування-вирубубування (у присутності викладача) деталей на запропонованих пуансонах-копірах. Виміряти тиск у гідроциліндрі преса за манометром у момент обрізування (чути клацання). Розрахувати зусилля штампування-вирубубування деталей.

5. Порівняти експериментальне і розрахункове зусилля процесу штампування-вирубубування.

6. Виконати згинання-формування еластичним середовищем деталей з різними кутами згинання.

7. Виміряти кутоміром кути згинання на формблоках і отриманих деталях (номенклатуру формблоків і матеріал заготованок визначає викладач).

8. Розрахувати необхідні тиски для згинання-формування деталей на запропонованих формблоках (формули (8.4), (8.7), (8.9), (8.10)).

9. Визначити кути пружинення на основі вимірів п. 7 і побудувати графік залежності кутів пружинення деталей від кутів згинання формблоків  $\varphi_{пр} = f(\varphi_{фб})$ .

10. Зробити висновки з роботи, оформити звіт з лабораторної роботи.

### **Зміст звіту**

1. Основні розрахункові залежності: (8.1), (8.3), (8.4), (8.7), (8.9), (8.10); результати розрахунків, їх порівняння з експериментальними даними (відповідно до порядку виконання роботи).

2. Графік залежності  $\varphi_{пр} = f(\varphi_{фб})$ .

3. Загальні висновки з роботи й відповіді на контрольні запитання.

### **Контрольні запитання**

1. Переваги і недоліки процесу штампування еластичним середовищем.

2. Які фактори впливають на величину кута пружинення?

3. Як впливає збільшення питомого тиску на згинання-формування еластичним середовищем?

4. Як дібрати прес для здійснення конкретного процесу штампування еластичним середовищем?

5. З яких матеріалів виготовляють формблоки для згинання-формування еластичним середовищем?

## Лабораторна робота № 9

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗГИНАННЯ ЛИСТОВОГО МАТЕРІАЛУ В ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ ШТАМПАХ

**Мета роботи** – вивчення процесу згинання листового матеріалу та явища пружинення, проведення технологічних розрахунків і вивчення впливу різних факторів на точність деталей, отриманих згинанням.

#### Теоретичні відомості

**Згинання** – це операція формування або зміни кутів між частинами заготовки або надання їй криволінійної форми (рис. 9.1).

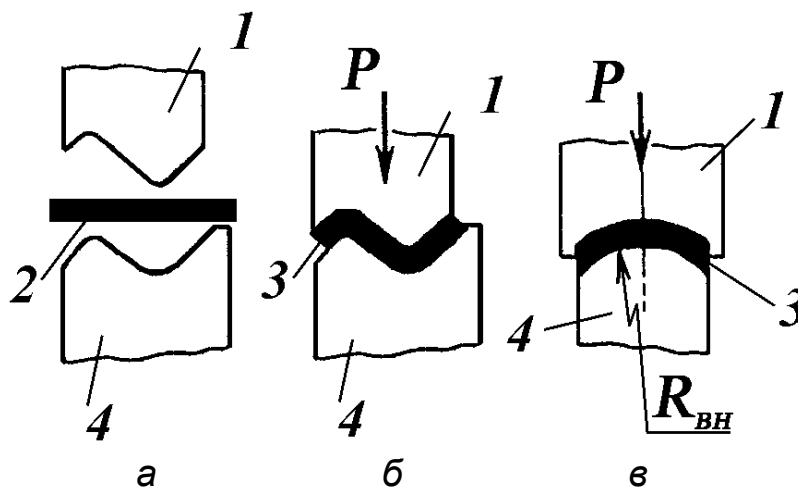


Рис. 9.1. Схеми згинання: а – початкове положення; б – згинання зі зміною кутів між частинами заготовки; в – згинання з наданням криволінійної форми (1 – згинальний пуансон; 2 – заготовка; 3 – готова деталь; 4 – матриця)

Згинання є операцією штампування листового металу, що змінює форму, і широко використовується в процесі виготовлення деталей із просторовими формами. Згинанням можливе виготовлення деталей літальних апаратів великої номенклатури (рис. 9.2): циліндричних та конічних обшивок; обічайок корпусів і баків; профілів шпангоутів; стрингерів; деталей трубопровідних систем; кутникових компенсаторів, накладок, кронштейнів та інших деталей.

Залежно від розмірів і форми деталі, форми поперечного перерізу початкової заготовки і характеру виробництва згинання здійснюється в штампах на корбово-гонкових, ексцентрикових, фрикційних і гідравлічних пресах, на спеціальних ручних або механізованих пристроях, на спеціальних листозгинальних і профілезгинальних верстатах, валкових і спеціальних верстатах із ЧПК.

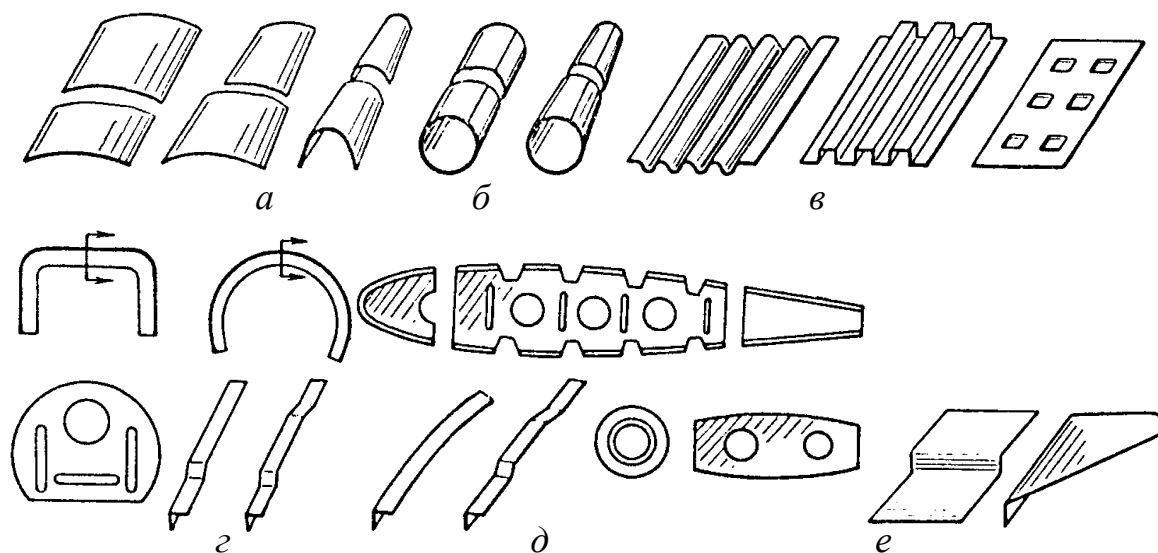


Рис. 9.2. Типові штамповані деталі, отримані згинанням із листів:  
 а – циліндрична й конічна обшивка; б – обичайки корпусів і баків;  
 в – гофровані панелі; г – деталі шпангоутів: профілі, стінки, стійки;  
 д – деталі нервюр: пояси та стійки, книця; е – кутники, компенсатори,  
 накладки, кронштейни

**Суть процесу згинання** листового матеріалу полягає в пружно-пластичній деформації початкової плоскої або прямої заготовки і перетворенні її на просторову деталь одинарної кривизни. На рис. 9.3 показано згинальні технологічні схеми.

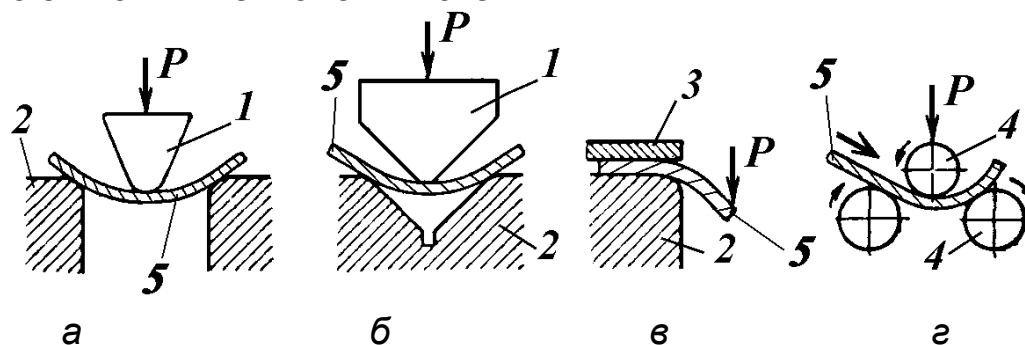


Рис. 9.3. Схеми згинальних операцій: а – вільне згинання; б – згинання зі стисненням; в – консольне згинання; г – згинання прокатуванням  
 (1 – згинальний пуансон; 2 – опора або матриця; 3 – притискач;  
 4 – ролики або валки; 5 – заготовка)

Під час виконання операції згинання (рис. 9.4, а) поперечні перерізи заготовки **ABCD** в зоні згину повертаються відносно нейтрального шару **0-0** на певний кут  $\varphi$ , унаслідок чого плоска заготовка перетворюється на деталь просторової форми з прямолінійними твірними. Деталь характеризується радіусом згину (внутрішнім  $R_{вн}$  і зовнішнім  $R$ ) і кутом згинання  $\varphi$ .

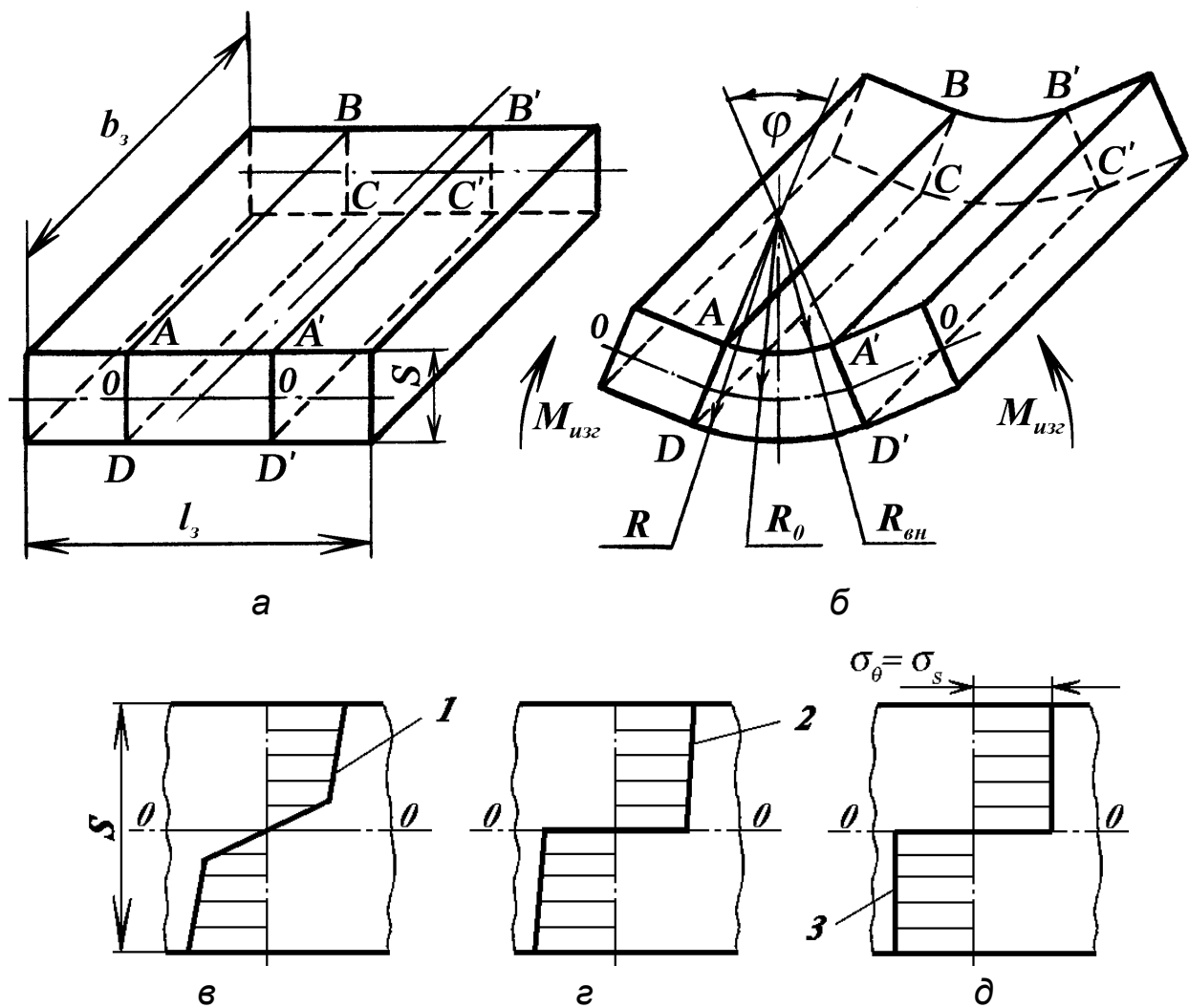


Рис. 9.4. Розподіл деформацій і напружень під час згинання:  
а – початкова заготовка; б – зігнута деталь; в, г, д – різні випадки  
розподілу нормальних напружень

Шари металу, що примикають до згинального пуансона, стискаються і коротшають поздовжньо і розтягуються в поперечному напрямку. Зовнішні шари (вільні або дотичні до матриці) розтягуються і витягуються поздовжньо і стискаються поперечно. Між подовженим і укороченим шарами є нейтральний шар **0-0**, довжина якого дорівнює початковій довжині заготовки ( $l_z$ ). Під час згинання листового матеріалу відбувається спотворення поперечного перерізу, що полягає в зменшенні товщини і збільшенні ширини в місці згину. Унаслідок стоншення матеріалу і спотворення форми поперечного перерізу нейтральний шар у місці згину зміщується від середини перерізу в бік малого радіуса. Під час згинання широких смуг і листів їх товщина також зменшується, але майже без спотворення поперечного перерізу, оскільки поперечній деформації протидіє опір матеріалу великої ширини.

Існує кілька основних способів згинання в штампах (рис. 9.5). Згинання без притискання застосовується для деталей низької точності (9–12 квалітет). Згинання з притисканням застосовується для деталей підвищеної точності (7–8 квалітет), тому що таке згинання не дає змоги заготованці зміщуватися в процесі згинання. Більш висока точність згинання (5–6 квалітет) досягається завдяки додатковій фіксації заготованки, а також калібруванню.

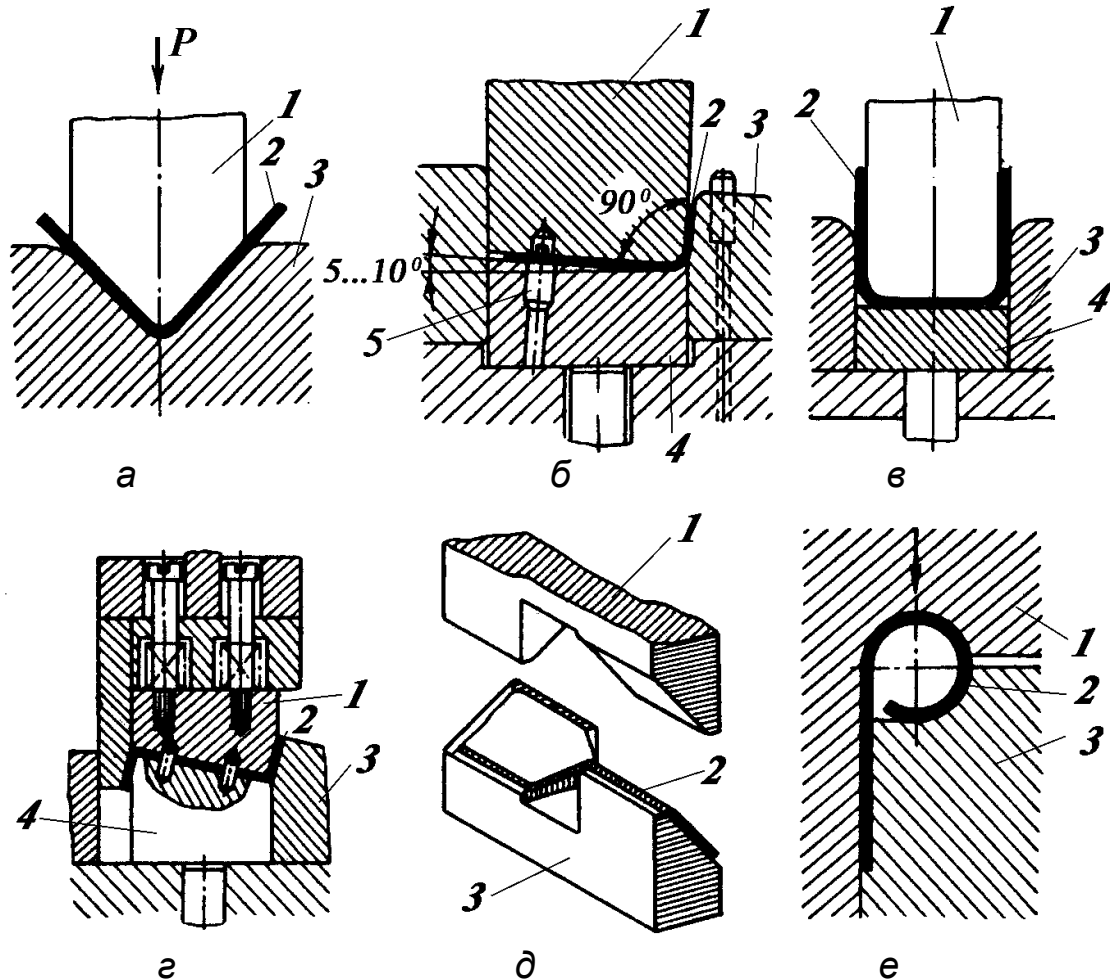


Рис. 9.5. Способи згинання в штампах: а – кутове згинання без притискання; б – кутове згинання несиметричних деталей із притисканням; в – двокутове згинання з притисканням і без нього; г – двокутове згинання в різні боки; д – згинання скручуванням; е – торцеве згинання (1 – пуансон; 2 – заготованка; 3 – матриця; 4 – притискач-виштовхувач; 5 – фіксатор)

**Напружено-деформований стан заготованки.** Коли на заготованку в поперечному перерізі діє зосереджена згинальна сила  $P$  або згинальний момент  $M_{зг}$ , на зовнішніх шарах виникають напруження розтягання і напруження стиснення в шарах, прилеглих до згинального

пуансона. Розподіл напружень по висоті може мати різні залежності, що відповідають пружному (див. рис. 9.4, в), пружно-пластичному (див. рис. 9.4, г) або пластичному (див. рис. 9.4, д) згинанню. При цьому пружно-пластичне та пластичне згинання може бути без зміцнення та зі зміцненням.

В основу теоретичного аналізу згинання покладено гіпотезу плоских перерізів, згідно з якою початкові плоскі перерізи заготовки в процесі деформування зберігаються. З рис. 9.4, а, б видно, що перерізи **ABCD** і **A'B'C'D'** у вигнутій заготовці тільки повернулися відносно один одного, перестали бути паралельними, але залишалися плоскими. При цьому зовнішні волокна **AA'** металу заготовки розтягнулися, а внутрішні **волокна DD'** стиснулися. Розтягнуті та стиснуті зони розділено нейтральним шаром, у якому напруження й деформації дорівнюють нулю.

У практичних умовах гіпотеза плоских перерізів виконується за умови пружних і малих пружно-пластичних деформацій. При великих пластичних деформаціях плоскі перерізи дещо спотворюються, але цим можна знехтувати в технічних розрахунках.

У процесі згинання з великими деформаціями в металі, крім поздовжніх розтягальних і стискальних напружень, утворюються радіальні стискальні напруження. Вони виникають унаслідок тиску зовнішніх шарів металу на внутрішні шари і досягають найбільшого значення в нейтральному шарі. Залежно від відношення внутрішнього радіуса **R<sub>вн</sub>** заготовки, що згинається, до товщини **S** у металі виникає різноманітний напружено-деформований стан.

Якщо **R<sub>вн</sub>/S > 5**, то деформація металу відбувається в умовах лінійного згину. Якщо **R<sub>вн</sub>/S < 5**, то здійснюється згинання:

- вузьких смуг (**b<sub>з</sub> < 3S**) – плоско-напружений і об'ємно-деформований стан;
- широких смуг (**b<sub>з</sub> > 3**) – об'ємно-напружений і плоско-деформований стан.

Технологічні параметри процесу згинання включають зусилля, кут пружинення, розмір заготовки та мінімальний радіус згину. Задачі визначення необхідних значень зусилля, кута пружинення під час згинання, мінімального радіуса згину, довжини заготовки розв'язуються на основі загальних положень про напружено-деформований стан заготовки за умови пластичного згинання радіусами, що дорівнюють двом і більше товщинам заготовки, тому розрахунки параметрів процесу можуть виконуватися на основі *схеми лінійного напруженого стану за умови, що нейтральний шар збігається із серединною поверхнею, а товщина заготовки залишається незмінною.*

## Параметри процесу згинання

**Пружинення деталі.** Операція згинання, що являє собою процес пластичної деформації, супроводжується також пружною деформацією, яка підпорядковується закону Гука. Характер пружної деформації обумовлений тим, що об'єм деформованого металу під впливом зовнішніх навантажень змінюється і після розвантаження відновлюється. Унаслідок дії залишкових пружних деформацій *зігнута деталь частково відновлює свою форму (пружинить)*. Через це форма готової деталі після згинання відрізняється від форми матриці. Таке явище називається пружинення і є негативним фактором, оскільки спотворює форму готової деталі. Для того щоб отримати задані значення кута і радіуса після згинання, необхідно змінити кут і радіус на інструментах (пуансон, матриця) на величину кута пружинення. Подібно до величини залишкових напружень і пружного пружинення, які проявляються в зміні кривизни і кута згинання, можна встановити на підставі теореми про розвантаження, згідно з яким зв'язок між напруженнями і деформаціями під час розвантаження підпорядковується закону Гука. Використовуючи теорему про розвантаження для простого випадку згинання з моментом  $M_{зг}$  (рис. 9.6), можна записати:

$$\frac{1}{R_{зал}} = \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_{пруж}}, \quad (9.1)$$

де  $R_{зал}$  – залишковий радіус кривизни;

$R_0$  – радіус нейтрального шару (реальна кривизна);

$R_{пруж}$  – радіус фіктивної (пружної) кривизни, спричиненої тим самим моментом, але з припущенням, що деформація відбувається в пружній зоні.

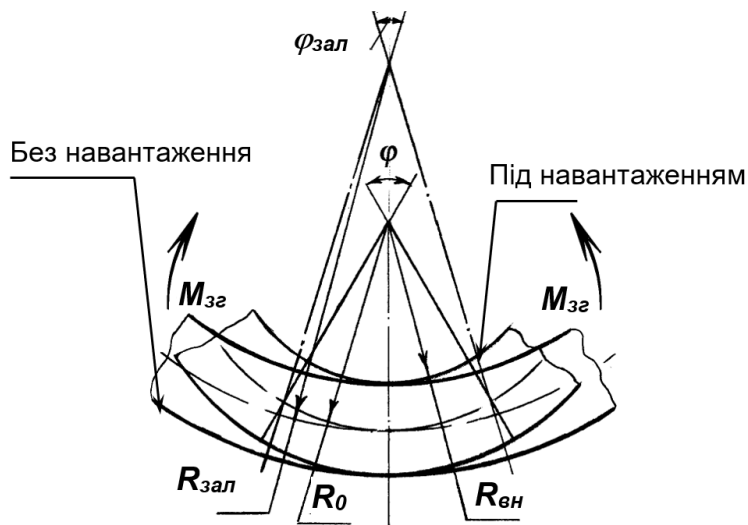


Рис. 9.6. Визначення залишкового радіуса згину

Дійсну кривизну  $1/R_0$  заготовки, досягнуту в процесі згинання, можна виміряти (вона дорівнює кривизні пуансона) або визначити розрахунковим способом, а фіктивну кривизну визначають за допомогою рівняння, відомого з курсу опору матеріалів:

$$\frac{1}{R_{\text{пруж}}} = \frac{M_{\text{вн}}}{EJ}, \quad (9.2)$$

де  $M_{\text{вн}}$  – момент внутрішніх сил;

$E$  – модуль пружності;

$J = b_3 S^3 / 12$  – момент інерції прямокутного перерізу заготовки шириною  $b_3$  і товщиною  $S$ .

Після розв'язання рівняння (9.1) щодо залишкового радіуса кривизни  $R_{\text{зал}}$  можна визначити залишковий кут згинання  $\varphi_{\text{зал}}$ , з огляду на умову, що довжина волокна в нейтральному шарі є постійною. Різниця між кутом згинання  $\varphi$  і залишковим кутом  $\varphi_{\text{зал}}$  називається **кутом пружинення**:

$$\varphi_{\text{пр}} = \varphi - \varphi_{\text{зал}}. \quad (9.3)$$

Формулу для визначення кута пружинення для прямокутної смуги можна записати в такому вигляді:

$$\varphi_{\text{пр}} = \frac{M_{\text{зг}} R_0}{EJ} \varphi = 3 \frac{\sigma_s}{E} \left( \frac{R_{\text{вн}}}{S} + 0,5 \right) \varphi. \quad (9.4)$$

Слід зазначити, що у формулі (9.4) не враховується зміцнення металу. Під час точних розрахунків необхідно враховувати ефект зміцнення металу за допомогою апроксимації кривої зміцнення по лінійній або степеневій залежності. Аналіз формул (9.3) і (9.4) показує, що на величину кута пружинення має істотний вплив відношення границі текучості до модуля пружності. Зміцнення підвищує границю текучості, тому наклепаний метал пружинить більше, ніж відпалений. Більш інтенсивно зміцнені метали мають більшу пружність. Зі збільшенням кута згинання  $\varphi$  і відносного радіуса  $R_{\text{вн}}/S$  пружинення збільшується, а інтенсивність цього збільшення визначається зміцненням матеріалу, що видно з даних табл. 9.1. Пружинність заготовки під час згинання з відносним радіусом  $R_{\text{вн}}/S < 10$  оцінюється тільки кутом пружинення. При цьому зміна радіуса незначна і не враховується. Якщо згинання здійснюється в штампах по великому радіусу ( $R_{\text{вн}}/S > 10$ ), то корегування форми згинального інструмента для урахування пружинення має проводитися не тільки по куту  $\varphi$ , але і по радіусу  $R_{\text{вн}}$ .

Зважаючи на сказане вище, можна зауважити, що величина пружинення під час згинання залежить від таких основних факторів: механічних властивостей і товщини листового матеріалу, радіуса згину і форми деталі, способу згинання і типу штампа (див. табл. 9.1).

На пружинення матеріалу істотно впливає величина неоднорідності його механічних властивостей.

Таблиця 9.1

Кути пружинення  $\varphi_{пр}$  під час однокутового вільного згинання (V-подібні) в штампі

| Матеріал                                                     | Товщина матеріалу $S$ ,<br>мм | Кут пружинення $\varphi_{пр}$ , град.,<br>при співвідношенні $R_{вн}/S$ |            |          |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------------|----------|
|                                                              |                               | До 1                                                                    | Від 1 до 5 | Більше 5 |
| Сталь ( $\sigma_B$ до 300 МПа), алюмінієві сплави Д16М, АМцМ | До 0,8                        | 4                                                                       | 5          | 6        |
|                                                              | Від 0,8 до 2,0                | 2                                                                       | 3          | 4        |
|                                                              | Більше 2                      | 0                                                                       | 1          | 2        |
| Сталь ( $\sigma_B = 400...500$ МПа)                          | До 0,8                        | 5                                                                       | 6          | 8        |
|                                                              | Від 0,8 до 2,0                | 2                                                                       | 3          | 5        |
|                                                              | Більше 2                      | 0                                                                       | 1          | 3        |
| Алюмінієвий сплав Д16Т                                       | До 0,8 (відпалений)           | 2                                                                       | 4          | 6,5      |
|                                                              | Більше 0,8 (загартований)     | 4,5                                                                     | 8,5        | 14       |

**Нейтральний шар і мінімальні радіуси згину.** Для визначення розмірів заготовки під час згинання необхідно знати положення нейтрального деформаційного шару, довжина якого залишається постійною. У процесі листового штампування доводиться мати справу переважно з гнучкими заготовками, ширина яких у багато разів перевищує товщину. Процес згинання відбувається в області невеликих пружно-пластичних деформацій. З огляду на ці особливості вважається, що нейтральний шар проходить через середину товщини  $S$  заготовки, яка гнеться.

З одного боку, у процесі конструювання деталей з листа вигідніше мати якнайменші радіуси згину. У цьому випадку деталь матиме великий момент інерції і, отже, більшу жорсткість. З іншого боку, мінімально допустимий радіус згину обмежений гранично допустимою деформацією на зовнішніх (розтягнутих) шарах заготовки, що згинається. Тому встановлення мінімально допустимих значень радіуса внутрішнього згину деталі та радіуса пуансона  $R_{внтін}$  має дуже важливе значення для запобігання появі тріщин та отримання бездефектних деталей. Допустимими деформаціями можна вважати деформації розтягання або відносного звуження.

Значення мінімальних радіусів згину для широко використовуваних матеріалів наведено в довідниках, нормативних і керівних технічних матеріалах. Для деяких матеріалів мінімальні відносні радіуси наведено в таблиці 9.2.

Таблиця 9.2

Відносні мінімальні радіуси згину  $R_{\text{внmin}}/S$  заготованок з листового металу під кутом згинання  $90^\circ$

| Матеріал                | Стан матеріалу                                         |                   |                    |                   |
|-------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
|                         | Відпалений<br>або нормалізований                       |                   | Наклепаний         |                   |
|                         | Розташування лінії згину відносно<br>напрямку прокатки |                   |                    |                   |
|                         | Поперек<br>волокон                                     | Уздовж<br>волокон | Поперек<br>волокон | Уздовж<br>волокон |
| Алюміній АД, АД1        | 0                                                      | 0,3... 0,4        | 0,5                | 0,8               |
| Д16М                    | 1,0                                                    | 1,5               | 1,5                | 2,5               |
| Д16Т                    | 2,0                                                    | 3,0               | 3,0                | 4,0               |
| АМцАМ                   | 0                                                      | 0,4... 0,5        | 0,6                | 0,9               |
| 0,8 кп                  | —                                                      | 0,3               | 0,2                | 0,5               |
| Сталь 15, Сталь 20, Ст3 | 0,1                                                    | 0,5               | 0,5                | 1,0               |
| Сталь 45, Сталь 50, Ст6 | 0,5                                                    | 1,0               | 1,0                | 1,7               |

**Примітки:**

1. Під час згинання під кутом до напрямку прокатки слід брати середні проміжні значення залежно від кута ліній згинання.
2. Якщо на зовнішньому боці заготовки є задирки, радіус згину слід збільшити в 1,5–2 рази, оскільки задирка є концентратором напружень.
3. Під час згинання товстих пластин (понад 8 мм) рекомендується використовувати великі радіуси згину.
4. Коли кут згинання сягає  $120...150^\circ$ , наведені значення слід помножити на 1,2–1,3, а якщо кут менший за  $90^\circ$  – на 0,8–1,0.

**Визначення розмірів заготовки під час згинання є технологічним завданням, без якого неможливо виготовити деталь, що відповідає кресленнику. Довжина заготовки  $l_z$  (див. рис. 9.4, а) для зігнутих деталей визначається як розгортка деталі по нейтральному шару (рис. 9.7). Щоб розрахувати довжину заготовок, потрібно:**

- а) визначити положення нейтрального шару деформацій, який зберігає свою довжину незмінною після згинання;
- б) розділити контур штампованої деталі на елементи, що являють собою відрізки прямої та частини окружності;
- в) підсумовують довжини цих відрізків (довжини прямих ділянок

підсумовуються без змін, а довжини криволінійних ділянок підсумовуються з урахуванням деформації матеріалу).

Можливі два основні випадки згинання: по окружності деякого радіуса (див. рис. 9.7, а); під кутом без внутрішнього заокруглення, якщо  $R_{вн} < 0,3S$  (див. рис. 9.7, б).

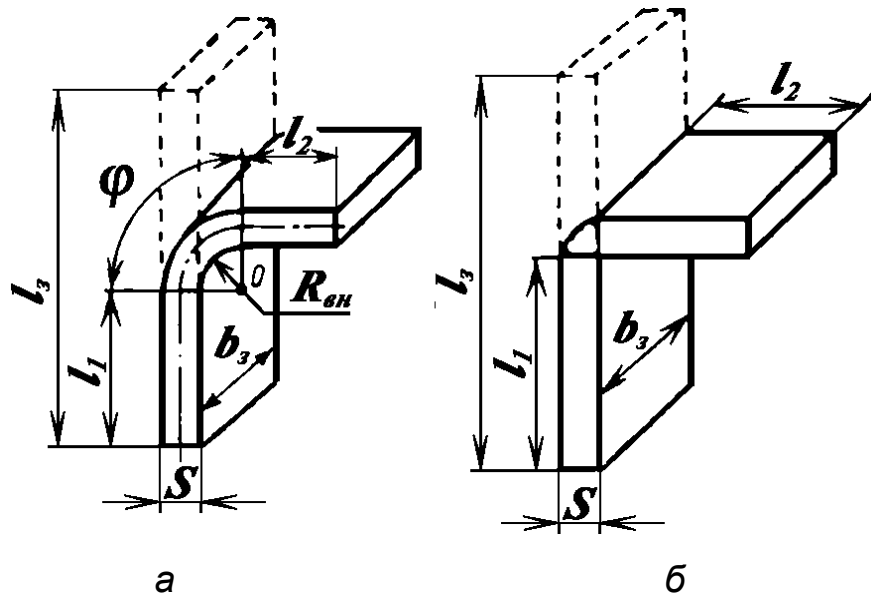


Рис. 9.7. Розрахунок довжини заготовки під час згинання:  
а – по окружності деякого радіуса  $R_{вн}$ ; б – під кутом без внутрішнього заокруглення

Довжину заготовки деталі, отриманої згинанням по кривій визначеного радіуса з одним перегином і кутом  $\phi$ , визначають за формулою

$$l_3 = l_1 + l_2 + l_0 = l_1 + l_2 + \frac{\pi\phi}{180^\circ} (R_{вн} + kS), \quad (9.5)$$

де  $k$  – коефіцієнт, що характеризує положення нейтрального шару;

$l_1, l_2$  – довжина прямолінійних ділянок;

$l_0$  – довжина криволінійної ділянки.

Під час наближеного визначення розгортки для деталей із радіусом  $R_{вн} \geq 3S$  можна без великої похибки вважати  $k = 0,5$ , тобто розглянути розгортання по середньому шару. Для менших радіусів необхідно врахувати зміщення нейтрального шару від середнього шару і вважати  $k = 0,38$ , якщо  $R_{вн} = 0,5S$ ;  $k = 0,42$ , якщо  $R_{вн} = S$  і  $k = 0,46$ , якщо  $R_{вн} = 2S$ .

Довжину заготовки для згинання деталей під кутом без заокруглення ( $R_{вн} < 0,3S$ ) розраховують за формулою, складеною на основі рівності об'ємів заготовки і деталі з урахуванням стоншення в зоні згину:

$$l_3 = l_1 + l_2 + \dots + l_n + l_{n+1} + n \cdot 0,5S, \quad (9.6)$$

де  $n$  – кількість прямих ділянок;

$l_1, \dots, l_n$  – довжини прямих ділянок.

У процесі виготовлення складних і відповідальних виробів рекомендується після розрахунку довжини заготовки за формулами (9.5) і (9.6) перевірити це експериментальним способом.

**Згинальні моменти і згинальні зусилля.** Величина зовнішнього згинального моменту  $M_{зг}$  під час згинання визначають з умови його рівності моменту дії внутрішніх сил  $M_{вн}$ , причому останню можна обчислити, знаючи розподіл нормальних напружень у зонах розтягання і стиснення. Силу згинання можна визначити з рівності моментів:  $M_{зг} = M_{вн}$ . У табл. 9.3 наведено спрощені формули для різних схем згинання. Характеристика зміни сили  $P$  від ходу пунсона  $H$  під час однокутового згинання показано на рис. 9.8.

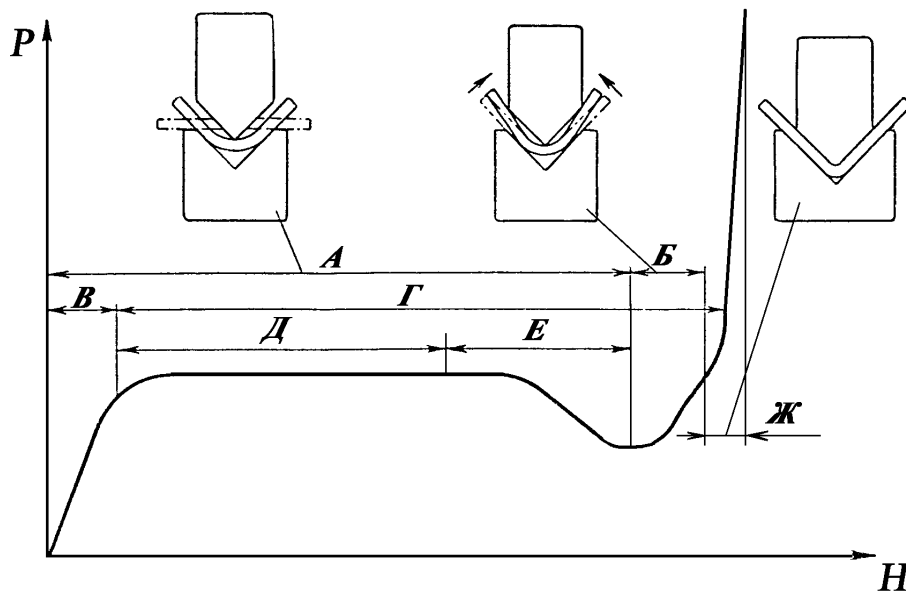
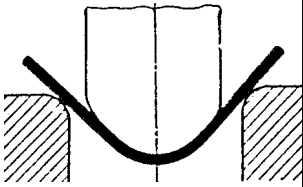
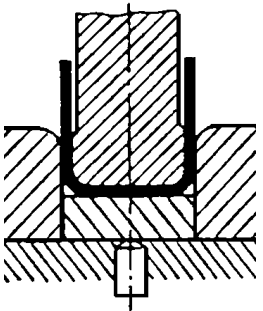
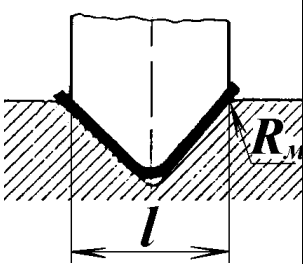


Рис. 9.8. Зміна зусилля під час однокутового згинання залежно від ходу пунсона ( $A$  – вільне згинання;  $Б$  – перегин;  $B$  – пружне згинання;  $Г$  – пластичне згинання;  $Д$  – пластичний поворот кінців;  $Е$  – ковзання;  $Ж$  – правка та калібрування)

Згідно з результатами проведених експериментів максимальне значення згинальної сили  $P$  за умови відстані між опорами  $l = (6 \dots 12)S$  наявне в діапазоні кутів згинання  $\varphi = 30 \dots 60^\circ$ . Основними факторами, що впливають на згинальне зусилля, є відносні значення  $P/S$  і  $L/S$ . У разі згинання з калібруванням згинальне зусилля визначається не стільки процесом згинання, скільки процесом калібрування, що потребує значних тисків.

Таблиця 9.3

## Формули для розрахунку згинального зусилля

| № п/п | Тип згинання                                                         | Схема згинання                                                                      | Згинальне зусилля                                                                |
|-------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | Вільне однокутове<br>або напівкругле                                 |    | $P = k_4 \frac{b_3 S^2}{l} \sigma_B \quad (9.7)$                                 |
| 2     | Двокутове в матриці:<br><br>без калібрування<br><br>з калібруванням  |    | $P = 2,5 b_3 S \sigma_B k_5 \quad (9.8)$<br><br>$P_K = qF \quad (9.9)$           |
| 3     | Однокутове в матриці:<br><br>без калібрування<br><br>з калібруванням |  | $P = k_6 \frac{S^2}{l} b_3 \sigma_B \quad (9.10)$<br><br>$P_K = qF \quad (9.11)$ |

**Примітка.** Умовні позначення:  $l$  – відстань між опорами матриці;  $k_4 = 1,5$  – коефіцієнт вільного згинання;  $k_5$  – коефіцієнт для двокутового згинання;  $k_6 \approx 1,4$  – коефіцієнт однокутового згинання в матриці;  $P_K$  – зусилля калібрування;  $q$  – питома сила (або тиск) калібрування (табл. 9.4);  $F$  – площа калібрування.

Під час визначення кінцевого згинального зусилля за допомогою калібрування (правки) тиск  $q$  визначають за експериментальними даними (див. табл. 9.4), а площу правки  $F$ , розташовану під пуансоном, визначають за такими залежностями:

- якщо  $\varphi = 60^\circ$ ,  $F = b_3 [2l_3 - 3,5(R_{вн} + S + R_M)]$ ;
- якщо  $\varphi = 90^\circ$ ,  $F = b_3 [1,4l_3 - 2(R_{вн} + S + R_M)]$ ;
- якщо  $\varphi = 120^\circ$ ,  $F = b_3 [1,1l_3 - (R_{вн} + S + R_M)]$ , (9.12)

де  $R_M$  – радіус матриці;  $l_3$ ,  $b_3$ ,  $R_{вн}$ ,  $S$  (див. рис. 9.4, 9.7).

Таблиця 9.4

Орієнтовні значення тиску калібрування (правки)  
в процесі однокутового згинання в штампах

| Матеріал          | Товщина<br>матеріалу<br>$S$ , мм | Тиск $q$ , МПа,<br>за умови співвідношень $R_{en}/S$ |      |     |
|-------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------|------|-----|
|                   |                                  | 2                                                    | 3    | 5   |
| Алюміній (м'який) | 1...2                            | 1,5                                                  | 1,3  | 1,0 |
|                   | 2...5                            | 2,0                                                  | 1,7  | 1,3 |
| 08кп              | 1...2                            | 1,7                                                  | 1,5  | 1,2 |
|                   | 2...5                            | 2,5                                                  | 2,0  | 1,5 |
| Сталь 30, Д16АТ   | 1...2                            | 4,0                                                  | 3,5  | 2,7 |
|                   | 2...5                            | 5,5                                                  | 4,75 | 3,5 |

### Матеріали, інструмент, обладнання

Заготовки для згинання з листового матеріалу таких марок і товщин:

- алюмінієві сплави Д16М, Д16Т, АМцМ завтовшки 1...3 мм;
- сталі із різним вмістом вуглецю (08кп, сталь 30 тощо) завтовшки 1...3 мм.

Штамп для однокутового згинання з різними радіусами згинального пуансона (5, 10, 20 мм) та постійним кутом згинання  $\varphi$ . Радіусомір, кутомір, штангенциркуль, лінійка. Гідравлічний прес.

### Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з конструкцією експериментального штампа, пуансона і матриці для згинання. Ескізувати згинальний пуансон і матрицю.

2. Розрахувати технологічні параметри згинальних деталей (вихідні дані, задані викладачем) із заготовок листового металу за такими залежностями:

- кут пружинення (9,4);
- розміри заготовок (9,5);
- згинальне зусилля без калібрування (9.10) і з калібруванням (9.11).

3. Виконати згинання деталі з однаковим кутом згинання  $\varphi$  з листових заготовок (кількість деталей, марки матеріалів і розміри зразків  $S$ ,  $b_3$ ,  $l_1$ ,  $l_2$  визначає викладач) і виконати необхідні вимірювання на зразках. Заповнити табл. 9.5.

Таблиця 9.5

## Початкові дані та результати експериментів

| Матеріал зразка     | Границя текучості матеріалу $\sigma_s$ , МПа | Радіус згину (пуансона) $R_{вн1}$ , мм | Залишкові кути згинання $\varphi_{зал}$ на заготованці та кути пружинення $\varphi_{пр}$ , град. |                |                   |                  |
|---------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------------------|------------------|
|                     |                                              |                                        | Без калібрування                                                                                 |                | З калібруванням   |                  |
|                     |                                              |                                        | $\varphi_{зал}$                                                                                  | $\varphi_{пр}$ | $\varphi_{зал}^K$ | $\varphi_{пр}^K$ |
| Д16АМ (АМцМ)        | 108 (50)                                     | 2,0                                    |                                                                                                  |                |                   |                  |
|                     |                                              | 5,0                                    |                                                                                                  |                |                   |                  |
|                     |                                              | 10,0                                   |                                                                                                  |                |                   |                  |
| 08кп                | 170                                          | 2,0                                    |                                                                                                  |                |                   |                  |
|                     |                                              | 5,0                                    |                                                                                                  |                |                   |                  |
|                     |                                              | 10,0                                   |                                                                                                  |                |                   |                  |
| Сталь 30 (Сталь 45) | 280 (360)                                    | 2,0                                    |                                                                                                  |                |                   |                  |
|                     |                                              | 5,0                                    |                                                                                                  |                |                   |                  |
|                     |                                              | 10,0                                   |                                                                                                  |                |                   |                  |

**Примітка:** Модуль пружності для алюмінієвих сплавів становить  $0,72 \cdot 10^6$  МПа, для сталей –  $2,02 \cdot 10^6$  МПа.

4. Побудувати за результатами проведених експериментів графіки залежностей  $\varphi_{пр}^K = f(R_{вн})$  і  $\varphi_{пр}^K = f(\sigma_s)$ .

5. Скласти звіт з лабораторної роботи.

**Зміст звіту**

1. Основні визначення, опис суті процесу згинання див. рис. 9.1, 9.3, 9.4 і формули (9.3)–(9.6), (9.10), (9.11).

2. Основні схеми згинання в штампах (табл. 9.3).

3. Результати вимірювань, занесені до табл. 9.5, і графіки залежностей  $\varphi_{пр}^K = f(R_{вн})$  і  $\varphi_{пр}^K = f(\sigma_s)$ .

4. Загальні висновки з роботи й відповіді на контрольні запитання.

**Контрольні запитання**

1. Які існують способи згинання в штампах?

2. Які існують графіки розподілу нормальних напружень? Що таке нейтральний шар деформацій?

3. У чому суть пружинення деталі після зняття зовнішніх технологічних навантажень? Як визначити кут пружинення?

4. Від яких факторів залежить кут пружинення під час однокутового згинання? Що таке мінімальний радіус згину? Від яких факторів залежить його величина?

5. Як визначити розміри заготовки під час згинання по окружності певного радіуса?

6. Який принцип лежить в основі визначення згинального зусилля? Як визначається зусилля згинання з калібруванням (правкою) в кінці ходу преса?

7. Які фактори мають вплив на величину згинального зусилля? Поясніть механізм впливу кожного з них.

## Лабораторна робота №10

### ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ІЗ ПРОФІЛІВ ЗГИНАННЯМ

**Мета роботи** – вивчення процесу згинання профілів, виконання технологічних розрахунків, а також експериментів зі згинання профілів еластичним середовищем.

#### Теоретичні відомості

Виготовлення деталей літальних апаратів із профілів (пресованих або гнутих) передбачає такі основні операції: різання профілів по довжині; обрізання скосів, радіусів; фасонне торцювання; свердлування отворів; утворення місцевих вирізів, малкування; підсікання та згинання.

**Згинання** – операція утворення чи зміни кутів між частинами заготовки чи надання їй криволінійної форми. Згинання є найбільш складною та трудомісткою операцією технологічного процесу виготовлення деталей із профілів. Згинанням із профілів отримують деталі такої номенклатури: профілі шпангоутів, пояси та стійки нервюр, шпангоути баків, стрингери, накладки, кронштейни, кутники-компенсатори (рис. 10.1). Деталі з профілів відповідають за своїм призначенням, тому до точності їх розмірів і збереження форми перерізу висуваються високі вимоги.

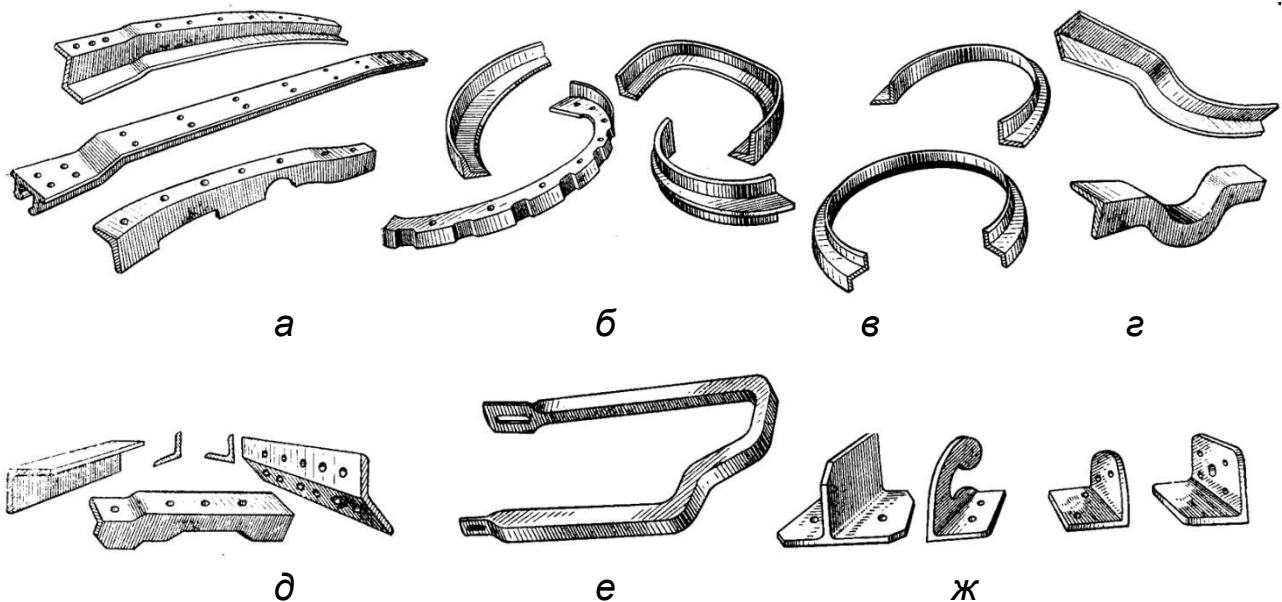


Рис. 10.1. Класифікація деталей, одержуваних із профілів: а – невеликої кривизни (стрингери); б – великої кривизни з кутом згинання до  $180^\circ$  (шпангоути); в – великої кривизни з кутом згинання до  $360^\circ$ ; г – знакозмінної кривизни; д – прямі; е – з місцевими вигинами за малими радіусами; ж – короткі зі складним контуром

**Особливості процесу згинання профілів.** Процес згинання профілів має свої особливості, які обумовлені формою перерізу профілю. Перша особливість – наявність вертикальних полиць, значно навантажених і деформованих через великі відстані від нейтральної осі перетину, друга – розбіжність площини згину з головними осями інерції перерізу, що спричиняє косе згинання і закручування деталі. Аналізуючи процес згинання пресованих профілів, слід пам'ятати, що нейтральний шар заготовки збігається з лінією, яка проходить через центри тяжіння перерізів. Під час використання гіпотези плоских перерізів епюри деформацій та напружень у розтягнутій і стислій зонах не мають взаємно відображеного вигляду. Дуже важливо, як профіль розташований відносно площини згину. Різна орієнтація профілю (навіть найпростішого перерізу, наприклад кутового) дає якісно різний вигляд деформованого стану (рис. 10.2).

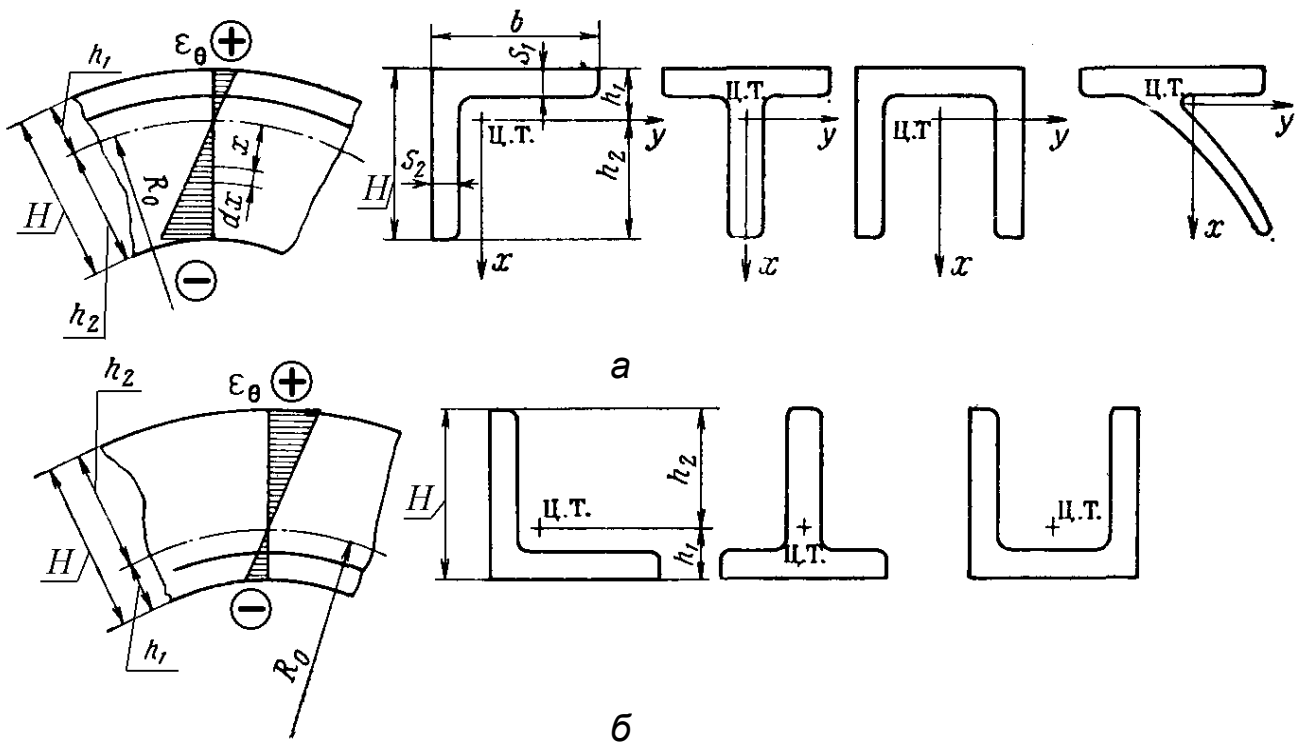


Рис. 10.2. Згинання профілів різних перерізів з різною орієнтацією:  
а – вертикальна стінка піддається стисканню; б – вертикальна стінка  
піддається розтягання (ц.т. – центр тяжіння перерізу)

Як показано на рис. 10.2, а, максимальна деформація – деформація стиснення, і за умов достатньо великої кривизни та тонкої стінки профілю тут можлива втрата стійкості, можуть з'явитися гофри. Цей дефект і обмежуватиме технологічні можливості операції. Як показано на рис. 10.2, б, та сама максимальна деформація – розтягання, і технологічні можливості операції обмежуються вже не втратою стійкості, а гранично допустимою деформацією розтягання (міцністю на розрив).

## Способи згинання профілів

Згинання профілів можна виконувати всіма відомими методами (див. рис. 9.3). У виробництві залежно від номенклатури одержуваних деталей застосовують такі способи згинання профілів: вільне згинання, згинання в штампах, згинання прокатуванням у роликах, згинання розкочуванням, згинання з розтяганням, згинання намотуванням, згинання з розтяганням і одночасним розкочуванням роликом. **Вільне згинання** здійснюють в універсальних штампах на спеціальних згинальних пресах. При цьому способі форма інструмента не залежить від форми деталі, яку згинають, що дає змогу з використанням одного комплекту оснащення виготовляти деталі з різними радіусами кривизни. Формоутворення здійснюється між опорами матриці шляхом вільного згинання заготовки та відповідного переміщення її відносно пуансона. Спосіб використовується переважно під час правильно-довідних робіт в одиничному виробництві.

**Згинання в штампах** здійснюють пуансоном і матрицею, які мають форму та розміри, що відповідають формі та розмірам готової деталі. Різновидом згинання в штампах є згинання еластичним середовищем. Роль універсальної матриці відіграє контейнер з еластичним середовищем, що спрощує виготовлення оснащення. Згинання в штампах ефективно лише під час виготовлення деталей невеликої довжини (до 500 мм) та стріли прогину, що не перевищує половини висоти полиці. За умови великої кривизни операція виконується за два і більше переходів.

**Згинання прокатуванням у роликах** – один із найпоширеніших способів згинання профілів. Здійснюється на три- та чотирироликових профілезгинальних верстатах типу ПГ (рис. 10.3).

Згинальні ролики виконані за формою поперечного перерізу профілю і розташовуються за симетричною або несиметричною схемою. Принцип дії трироликових верстатів (рис. 10.3, б) полягає в тому, що заготовка-профіль, вставлена між роликами 2, під дією тиску з боку згинального ролика 3 отримує місцевий вигин. Під дією сил тертя, що виникають між приводними роликами 2 і заготовкою-профілем, заготовка переміщається. Принцип дії чотирироликових верстатів (рис. 10.3, а, в) полягає в тому, що заготовка-профіль, вставлена між приводними роликами 1 і 2, під дією натиску з боку згинальних роликів 3 отримує прогин, а потім простягається між роликами 1 і 2, унаслідок чого виходить деталь із заданим радіусом кривизни.

Технологічний процес згинання профілів прокатуванням у роликах має низку недоліків: операція трудомістка і складається з великої кількості проходів із контрольними вимірами деталі. Профілі під час прокатування

закручуються та замалковуються. Перспективним напрямом у подальшому розвитку способу згинання прокатуванням є використання роликів верстатів із числовим програмним керуванням.

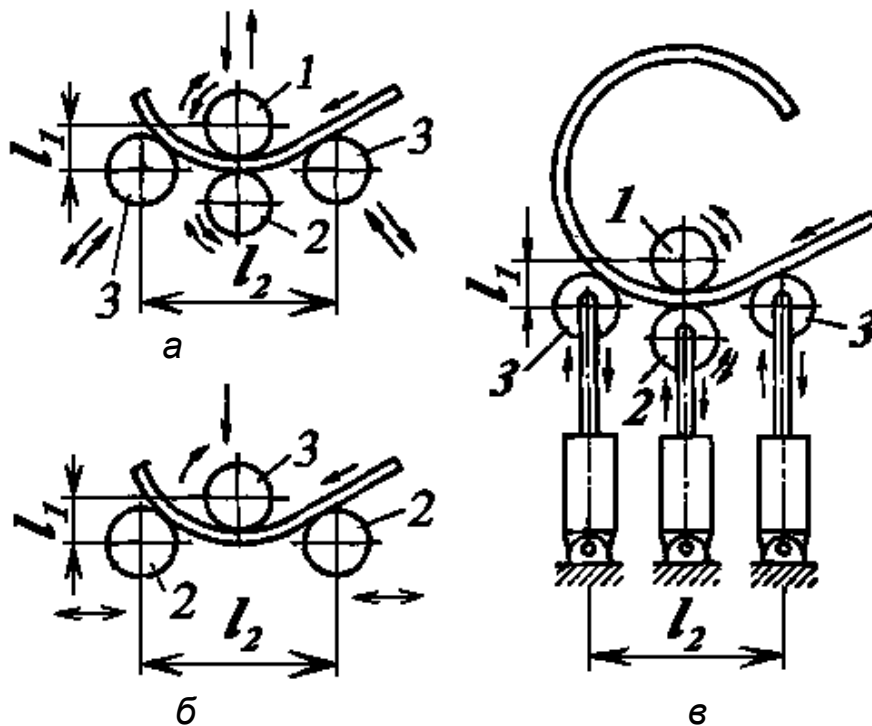


Рис. 10.3. Згинання-прокатування в роликах: а, в – за чотирироlikовою схемою; б – за трироlikовою схемою

**Згинання профілів із розтяганням** – один із найбільш продуктивних способів отримання профільних деталей, що забезпечує досить високий рівень їх точності. Суть згинання з розтяганням полягає в тому, що, крім зовнішнього згинального моменту, до заготовки докладають поздовжні розтяжні сили, які зменшують згинальний момент (рис. 10.4). Заготовку 1, затиснуту в патронах 5 верстата, спочатку розтягують до стану пластичності розтяжними гідроциліндрами 6, а потім, залишаючи її в розтягнутому стані, згинають за допомогою згинального гідроциліндра 4 по обтяжному пуансону 2, закріпленому на столі 3 верстата (рис. 10.4, а). Якщо порівняти з розглянутими вище способами, згинання з розтяганням має такі переваги: меншу величину пружинення після зняття зовнішнього навантаження і, отже, більшу точність; щодо невисокої вартості оснащення; досить високу продуктивність.

**Згинання профілів розкочуванням** (ротаційним обтисканням) є одним із способів виготовлення деталей з профілів із несиметричними перерізами (рис. 10.5). Суть процесу полягає в тому, що під час прокатування горизонтальної полиці заготовки 1 у роликах 2 і 3 її довжина має збільшуватися завдяки стоншенню. Під впливом напружень стиснення

в перерізі з'являється момент, що згинає вертикальну полицю в площині, яка паралельна горизонтальній полиці. Згинання розкочуванням можна застосувати тільки під час виготовлення деталей із полицею, розташованою на зовнішній стороні кута, що згинається.

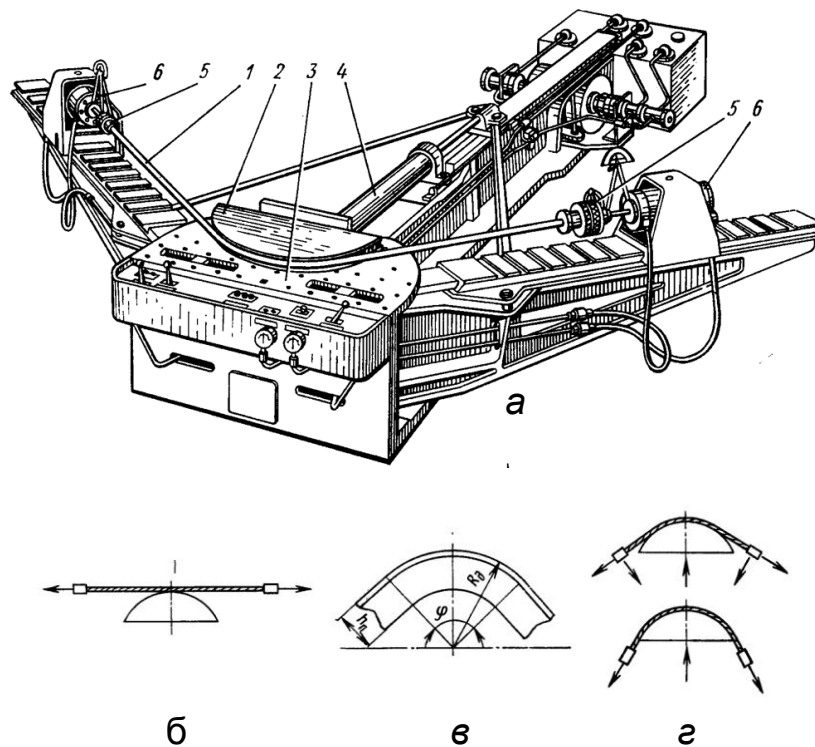


Рис. 10.4. Згинання з розтяганням на прикладі верстата типу ПГР:  
 а – загальний вигляд верстата; б – схема розтягання; в – схема згинання;  
 г – схема обтягування (1 – заготованка; 2 – пуансон обтяжний; 3 – стіл;  
 4 – згинальний циліндр; 5 – патрон верстата; 6 – розтяжний циліндр)

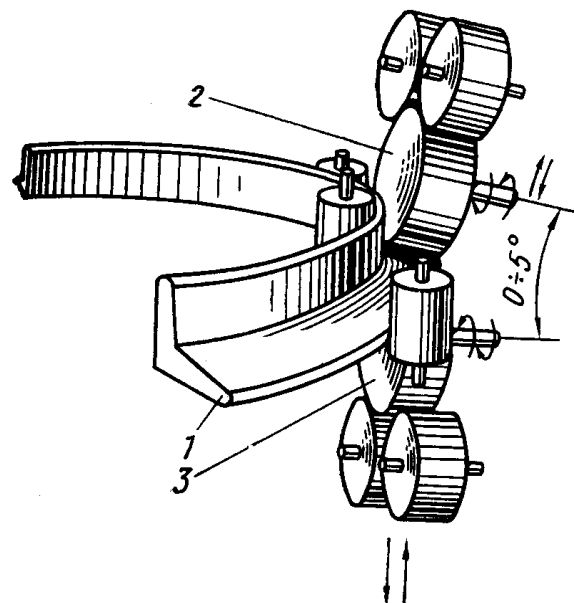


Рис. 10.5. Згинання профілів методом розкочування полиць:  
 1 – заготованка; 2, 3 – ролики

## Параметри процесу згинання профілів

Для розроблення технологічних процесів виготовлення деталей згинанням із профілів необхідно вирішити низку завдань щодо визначення основних параметрів, від яких залежить точність та економічність їх виготовлення. Найважливішими з них є:

- визначення довжини заготовки (щоб виготовити деталь згідно з кресленням);
- розрахунок силових параметрів; необхідність у їх визначенні виникає в процесі вибору обладнання для формоутворення відомими способами та розроблення нових способів згинання;
- розрахунок пружинення під час пластичного згинання; для отримання деталей із заданою кривизною необхідно розрахунковим шляхом визначити величину пружинення та врахувати її в процесі формоутворення;
- визначення раціональної форми технологічного оснащення, що забезпечує виготовлення деталей із заданою точністю; форма оснащення має визначатися з огляду на всі фактори, що впливають на точність процесу формоутворення.

Усі розрахунки параметрів процесу засновано на теорії пластичного згинання, яка використовує аналітичну залежність між напруженнями та пружно-пластичними деформаціями з функцією певного виду. Найбільш точним аналітичним виразом істинної діаграми за умови складного напружено-деформованого стану є залежність  $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$ , яку апроксимують такими функціями:

- лінійною (у пружній області)

$$\sigma_i = E\varepsilon_i; \quad (10.1)$$

- степеневою (у пластичній області)

$$\sigma_i = K\varepsilon_i^n, \quad (10.2)$$

де  $\sigma_i$ ,  $\varepsilon_i$  – інтенсивність напружень і деформацій;

$E$  – модуль пружності під час розтягання,

$K$  і  $n$  – константи матеріалу (довідкові дані).

Константи  $K$  і  $n$  зручно виразити за допомогою основних механічних характеристик матеріалу:

$$n = \frac{\lg(\sigma_B/\sigma_S)}{\lg(\varepsilon_B/\varepsilon_S)}; \quad K = \frac{\sigma_B}{\varepsilon_B^n}. \quad (10.3)$$

**Під час розрахунку силових параметрів** пружно-пластичного згинання профілю застосовуються основні гіпотези та припущення,

наведені в літературі. Запишемо момент внутрішніх сил, що діє в перерізі тонкостінного профілю від докладених зовнішніх навантажень (рис. 10.6):

$$M_{\text{зов}} = \frac{1}{R_0} EJ_{\text{пр}} + \frac{1}{R_0^n} KJ_{\text{пл}}, \quad (10.4)$$

де  $R_0$  – радіус нейтрального шару профілю;

$J_{\text{пр}}$ ,  $J_{\text{пл}}$  – моменти інерції пружно-деформованої та пластично-деформованої зон перерізу відносно нейтральної осі.

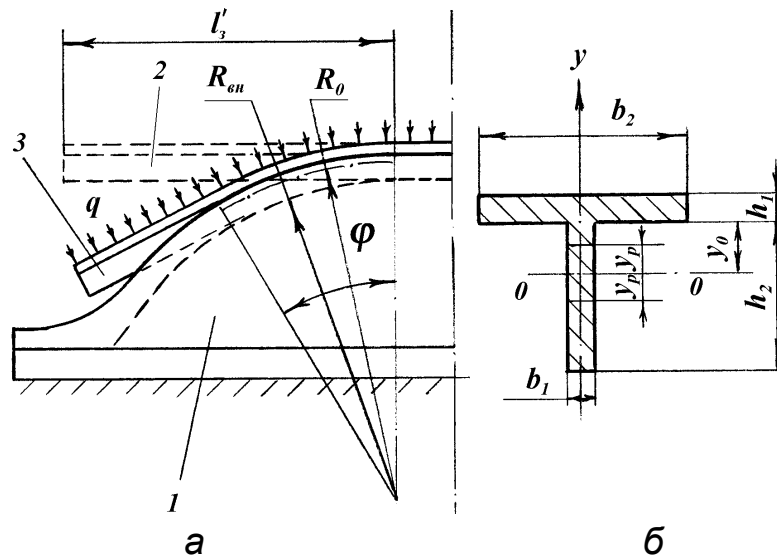


Рис. 10.6. Згинання профілю еластичним середовищем: а – схема докладення зовнішніх навантажень (1 – оправка; 2 – заготованка з профілю; 3 – деталь); б – переріз профілю

Для таврового перерізу, що розглядається (див. рис. 10.6, б), складеного з прямокутних елементів, вирази для визначення  $J_{\text{пр}}$  і  $J_{\text{пл}}$  можна записати як

$$J_{\text{пр}} = \frac{2}{3} b_1 y_p^3,$$

$$J_{\text{пл}} = \frac{b_1 h_1^{n+2}}{n+2} \left\{ [(1 - \bar{y}_0)^{n+2} + \bar{y}_0^{n+2} - 2\bar{y}_p^{n+2}] + \bar{b}_2 [(\bar{y}_0 + \bar{h}_2)^{n+2} - \bar{y}_0^{n+2}] \right\}. \quad (10.5)$$

У рівнянні (10.5) і надалі використовуються абсолютні та відносні (з рискою над символом) позначення (див. рис. 10.6, б):  $\bar{y}_0 = y_0/h_1$  – відносна ордината нейтральної осі;  $\bar{b}_2 = b_2/b_1$  – відносна ширина полиці;  $\bar{h}_2 = h_2/h_1$  – відносна висота стінки;  $\bar{y}_p = y_p/h_1$  – відносна ордината точки переходу з лінійної в степеневу залежність.

Абсолютну величину  $y_p$  визначають за формулою

$$y_p = \pm R_0 \varepsilon_p = \pm R_0 \left( \frac{K}{E} \right)^{\frac{1}{1-n}}. \quad (10.6)$$

Однією зі складних задач є визначення положення нейтрального шару по перерізу профілю. Це положення можна знайти, якщо розв'язати рівняння рівноваги внутрішніх сил у перерізі профілю:

$$\int_{F_{розт}} \sigma dF = \int_{F_{ст}} \sigma dF, \quad (10.7)$$

де  $F_{розт}$  и  $F_{ст}$  – площини, у яких діють напруження розтягання та стиснення.

Після інтегрування та перетворення отримаємо рівняння  $y_0 = f(b, h)$  для різноманітних розрахункових випадків. Однак розв'язання цих рівнянь у явному вигляді неможливе. Величину  $y_0$  можна визначити за графіками  $y_0 = f(b, h, R_0)$ , які отримано розрахунками з використанням наведених вище залежностей для конкретних співвідношень розмірів таврового профілю. На рис. 10.7 зображено графіки для профілів таврового перерізу з алюмінієвих сплавів Д16Т і Д16М.

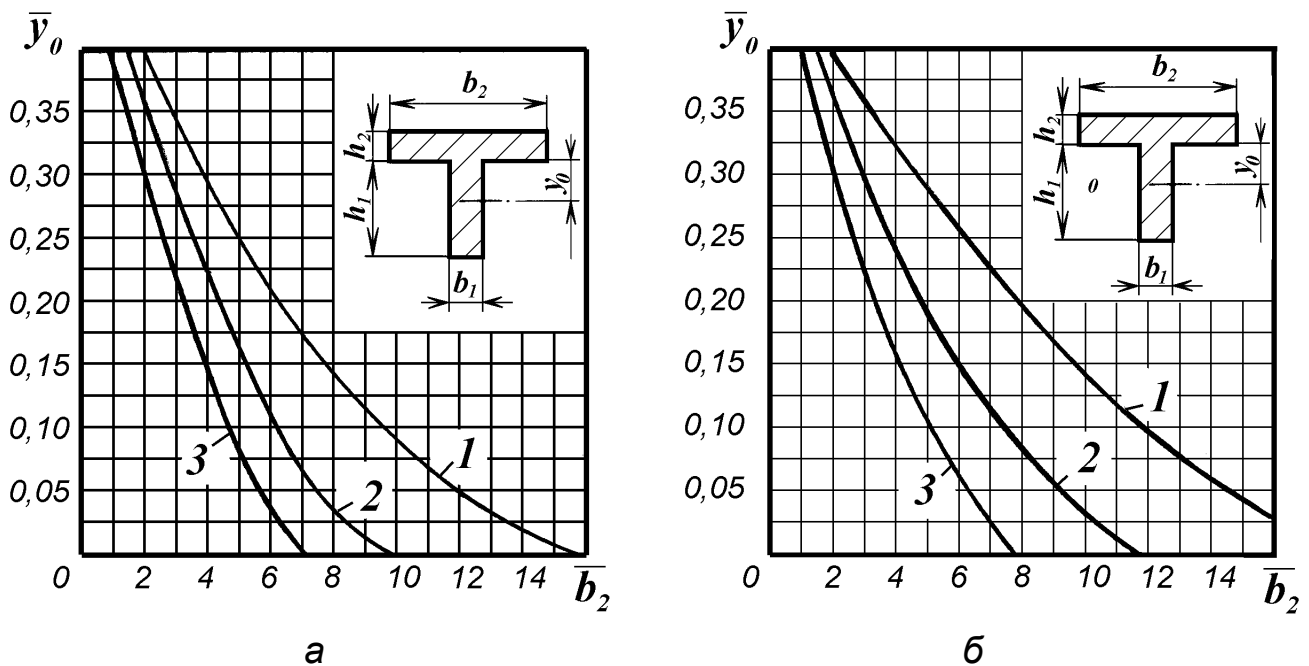


Рис. 10.7. Положення нейтральної осі під час згинання профілю таврового перерізу: а – матеріал Д16Т; б – матеріал Д16М (1 – для  $\bar{h}_2 = 0,1$ ; 2 – для  $\bar{h}_2 = 0,15$ ; 3 – для  $\bar{h}_2 = 0,2$ )

Після визначення положення нейтрального шару й обчислення всіх констант і моментів можна визначити момент внутрішніх сил інерції за формулою (10.4). З огляду на наведену на рис. 10.6 схему, момент зовнішніх сил можна записати в такому вигляді:

$$M_{32} = \frac{1}{2} q b_2 (l'_3 - R_0 \phi)^2, \quad (10.8)$$

де  $q$  – тиск еластичного середовища;

$b_2$  і  $l'_3$  – розміри ділянки профілю, що згинається;

$R_0$  – радіус нейтрального шару;

$\phi$  – кут згинання.

З умови рівності моментів зовнішніх і внутрішніх сил ( $M_{32} = M_{вн}$ ) можна визначити тиск еластичного середовища, необхідний для згинання профілю:

$$q = \frac{2 \left( \frac{EJ_{пп}}{R_0} + \frac{KJ_{пл}}{R_0^n} \right)}{b_2 (l'_3 - R_0 \phi)^2}. \quad (10.9)$$

У практичних розрахунках тиск еластичного середовища, необхідний для згинання профілю, з достатньою точністю можна визначити за спрощеною формулою:

$$q = \frac{2KJ_{пл}}{b_2 (l'_3 - R_0 \phi)^2 R_0^n}. \quad (10.10)$$

Зусилля преса, необхідне для згинання профілів еластичним середовищем, визначиться за формулою

$$P = k_7 q F_n, \quad (10.11)$$

де  $k_7$  – коефіцієнт запасу, що дорівнює 1,2...1,3;

$q$  – тиск еластичного середовища, розрахований за формулою (10.10);

$F_n$  – площа робочої поверхні еластичного середовища.

**Розрахунок пружинення матеріалу** під час пластичного згинання заготовки з профілю можна виконати за допомогою теореми про розвантаження. Відповідно до цієї теореми пружна деформація під час розвантаження пластично деформованого тіла визначається за законом Гука. У цій теоремі вводяться поняття справжнього пластичного та фіктивного пружного станів тіла, що деформується. Справжнім пластичним станом вважають справжню картину пластичного деформування. Фіктивний пружний стан розуміють як такий стан, за якого під дією тих самих (що й за справжнього стану) зовнішніх навантажень з'являються не пластичні, а пружні напруження і деформації. Звичайно, цей стан є нереальним, але такий опис процесу дає змогу довести, що залишкова деформація, яку треба визначити, дорівнює різниці між деформаціями металу за умови справжнього пластичного і фіктивного пружного станів. По суті, фіктивна кривизна є величиною, на яку зменшується створена в активній стадії

деформації кривизна нейтральної лінії пластично зігнутого елемента внаслідок пружинення матеріалу під час розвантаження.

Таким чином, кривизну нейтральної лінії, що залишається після розвантаження пластично зігнутого елемента, можна визначити за допомогою виразу:

$$\overline{\chi_0} = \chi_0 \left[ 1 - \left( \frac{J_{\text{пр}}}{J} + \frac{KJ_{\text{пл}}}{EJ} \chi_0^{n-1} \right) \right], \quad (10.12)$$

де  $\overline{\chi_0}$  – кривизна нейтральної лінії після розвантаження;

$\chi_0$  – кривизна нейтральної лінії під навантаженням ( $\chi_0 = 1/R_0$ , радіус  $R_0$  визначається за креслеником деталі).

Ураховуючи, що кривизна в перерізі зігнутого елемента взаємопов'язана з радіусом як  $\chi_0 = 1/R$ , можна визначити залишковий радіус кривизни, а потім і залишковий кут згинання  $\varphi_{\text{зал}}$ , зважаючи на умову, що довжина волокна в нейтральному шарі постійна (див. рис. 10.6):

$$R_0 \varphi = R_{\text{зал}} \varphi_{\text{зал}}. \quad (10.13)$$

Різниця між кутом згинання  $\varphi$  та залишковим кутом  $\varphi_{\text{зал}}$  називається *кутом пружинення*  $\varphi_{\text{пр}}$ . З огляду на наведені вище залежності можна записати формулу для кута пружинення :

$$\varphi_{\text{пр}} = \varphi \left\{ 1 - R_0 \chi_0 \left[ 1 - \left( \frac{J_{\text{пр}}}{J} + \frac{KJ_{\text{пл}}}{EJ} \chi_0^{n-1} \right) \right] \right\}, \quad (10.14)$$

де  $J = b_2 h_1^3 / 12 + y_0^2 b_2 h_1 + b_1 h_2^3 / 12$  – момент інерції всієї площі поперечного перерізу відносно центра тяжіння профілю.

Вплив форми та розмірів поперечного перерізу на величину пружинення враховано в значеннях  $J$ ,  $J_{\text{упр}}$ ,  $J_{\text{пл}}$ , які визначають за наведеними вище залежностями.

### Матеріал, інструмент, обладнання

Пресовані профілі – кутник, тавр з алюмінієвих сплавів Д16Т, Д16М або інших марок. Лінійка, контрольні шаблони. Штамп для згинання еластичним середовищем і гідравлічний прес.

### Порядок виконання роботи

1. Розрахувати параметри процесу згинання профільної заготовки еластичним середовищем (вихідні дані – розміри перерізу профілю, марка матеріалу тощо – задає викладач) за такими залежностями:

– довжину заготовки  $l_z$  (9.5);

- тиск еластичного середовища  $q$ , необхідний для згинання профілю (10.10);
- зусилля преса  $P$  (10.11);
- кривизну нейтральної лінії після розвантаження  $\overline{\chi}_0$  (10.12);
- кут пружинення  $\varphi_{пр}$  (10.14).

2. Ознайомитись із конструкцією експериментального штампа.

Штамп для штампування деталей із профілів таврового або кутового перерізу еластичним середовищем (рис. 10.8) складається з верхньої рухомої штампової плити 1 і закріпленого на ній універсального контейнера 2. У середині контейнера розташоване еластичне середовище 3 (поліуретан марки СКУ-7).

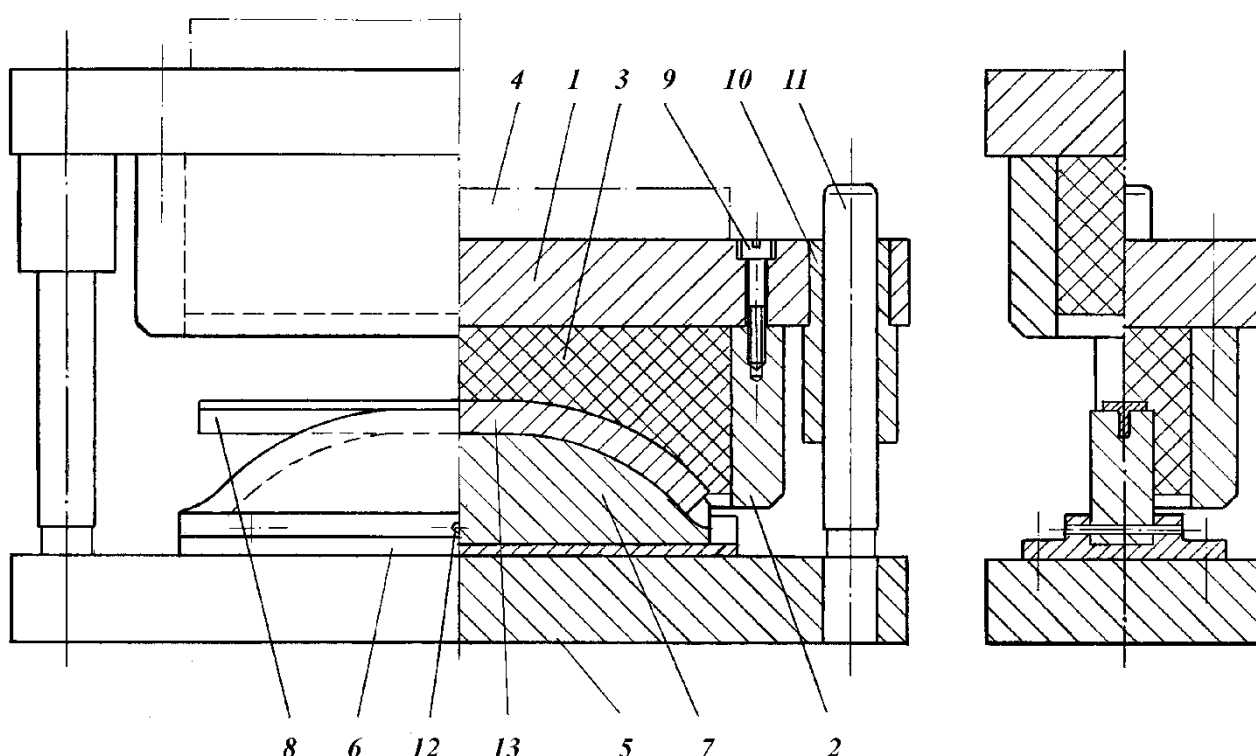


Рис. 10.8. Схема штампа для штампування деталей із профілів еластичним середовищем

Верхня рухома штампова плита через шток 4 взаємодіє з рухомою траверсою гідравлічного преса. На нижній підштамповій плиті 5 закріплюють кронштейн 6, на який установлюють змінний формблок 7 для згинання профілів. Над формблоком розташовується профільна заготовка 8, яка своїми вертикальними полицями входить у пази формблока. Штампування деталей здійснюється в такій послідовності. Заготовку 8 розміщують на формблоці 7 і центрують відповідно до взятої схеми деформування. Для кожної конкретної деталі виготовляють окремий формблок, який відповідає формі та розмірам готової деталі. Траверса

гідравлічного преса, діючи через шток 4, переміщує верхню штампову плиту вниз 1 з контейнером 2. Еластичне середовище 3, розміщене в замкнутому контейнері 2, впливає на заготованку і створює рівномірний тиск на всіх полицях профілю, притискаючи їх до поверхонь формблока 7. Унаслідок деформування процесу профільна заготованка повторює конфігурацію формблока 7.

3. Здійснити штампування деталі з пресованого тавра (кутника) еластичним середовищем в експериментальному штампі. Значення тиску в робочому циліндрі  $q_{\text{експ}}$  визначити за манометром гідравлічного преса. Обчислити експериментальне значення згинального зусилля  $P_{\text{експ}}$  для профілю, порівняти його з розрахованим раніше зусиллям преса  $P$ .

4. Виміряти кути згинання на відштампованій деталі та виконати контроль кривизни за допомогою шаблонів.

5. Скласти звіт з лабораторної роботи.

### Зміст звіту

1. Визначення операції згинання відповідно до стандарту. Основні схеми згинання (див. рис. 9.3), формули (10.1)–(10.4), (10.8) та особливості процесу згинання профілів (див. рис. 10.2).

2. Схема штампу для штампування еластичним середовищем (див. рис. 10.8).

3. Схеми основних способів згинання профілів у виробництві (див. рис. 10.3, 10.4, б – г).

4. Результати розрахунків і вимірів відштампованої деталі.

5. Загальні висновки з роботи й відповіді на контрольні запитання.

### Контрольні запитання

1. Який вплив на картину розподілу деформацій по перерізу має орієнтація профілю та його полиць?

2. Яким має бути поперечний переріз згинальних роликів на верстаті типу ПГ під час згинання з прокатуванням профілю, що має перетин двотавра?

3. Якими функціями можна апроксимувати залежність  $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$  ?

4. У чому суть теореми про розвантаження та як за її допомогою можна визначити кривизну деталі?

5. На якому положенні ґрунтується методика визначення тиску, необхідного для згинання деталей еластичним середовищем?

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

Авіаційні матеріали та їх обробка: підручник / за ред. Ю. М. Терещенка. – Київ : Вища освіта, 2003. – 303 с.

Заготівельно-обробні технології у виробництві аерокосмічних літальних апаратів : навч. посіб. У 2 ч. Ч. 1. / Г. Ф. Арістов, О. В. Гайдачук, В. М. Кобрін та ін. – Київ : УкрНДІАТ, 2001. – 310 с.

Технологія виробництва літальних апаратів: підручник. У 2 кн. Кн. 1. Технологія виробництва деталей літальних апаратів / І. А. Гриценко, К. А. Животовська, В. М. Король, О. В. Мамлюк, Ю. М. Терещенко; за ред. Ю. М. Терещенка. – Київ : Вища освіта, 2004. – 448 с.

Технологія літакобудування: підручник. У 2 ч. Ч.1. Типові технологічні процеси виготовлення деталей літальних апаратів / А. П. Кудрін, М. С. Кулик, Г. М. Зайвенко, Л. Г. Волянська; за ред. М. С. Кулика. – Київ : Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2009. – 368 с.

Boljanovic, V. Sheet metal forming processes and die design / V. Boljanovic. – New York : Industrial Press Inc., 2006. – 219 p.

Suchy, I. Handbook of Die Design, Second Edition. / I. Suchy. – New York : The McGraw-Hill Company, 2005. – 711 p.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| СПИСОК СКОРОЧЕНЬ І ПОЗНАЧЕНЬ .....                                                                                                              | 3   |
| ВСТУП.....                                                                                                                                      | 5   |
| ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ .....                                                                                                                        | 6   |
| Лабораторна робота № 1. ВИГОТОВЛЕННЯ ПЛОСКИХ ДЕТАЛЕЙ<br>І ЗАГОТОВАНOK ІЗ ЛИСТОВОГО МАТЕРІАЛУ В ШТАМПАХ<br>НА МЕХАНІЧНИХ ПРЕСАХ.....             | 7   |
| Лабораторна робота № 2. ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИТЯГУВАННЯ<br>З ПРИТИСКАННЯМ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ<br>В ІНСТРУМЕНТАЛЬНОМУ ШТАМПІ.....                  | 21  |
| Лабораторна робота № 3. ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ РІЗНИХ ФАКТОРІВ<br>НА ПРОЦЕС І ПОТРІБНЕ ЗУСИЛЛЯ ШТАМПУВАННЯ-ВИТЯГУВАННЯ<br>ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ..... | 35  |
| Лабораторна робота № 4. ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ЛІТАЛЬНИХ<br>АПАРАТІВ ПРОСТИМ ОБТЯГУВАННЯМ .....                                                   | 46  |
| Лабораторна робота № 5. ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ЛІТАЛЬНИХ<br>АПАРАТІВ ОБТЯГУВАННЯМ ІЗ РОЗТЯГАННЯМ І КІЛЬЦЕВИМ<br>ОБТЯГУВАННЯМ .....                | 60  |
| Лабораторна робота № 6. ФОРМОУТВОРЕННЯ ДЕТАЛЕЙ<br>ІЗ ТРУБЧАСТИХ ЗАГОТОВАНOK ЕЛАСТИЧНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ .....                                        | 74  |
| Лабораторна робота № 7. ВІДБОРТОВУВАННЯ ОТВОРІВ У<br>ЛИСТОВОМУ МАТЕРІАЛІ ЖОРСТКИМ ПУАНСОНОМ І ЕЛАСТИЧНИМ<br>СЕРЕДОВИЩЕМ .....                   | 83  |
| Лабораторна робота № 8. ШТАМПУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ЛИСТОВОГО<br>МАТЕРІАЛУ ЕЛАСТИЧНИМИ СЕРЕДОВИЩАМИ .....                                            | 94  |
| Лабораторна робота № 9. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗГИНАННЯ<br>ЛИСТОВОГО МАТЕРІАЛУ В ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ ШТАМПАХ.....                                     | 104 |
| Лабораторна робота №10. ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ЛІТАЛЬНИХ<br>АПАРАТІВ ІЗ ПРОФІЛІВ ЗГИНАННЯМ .....                                                  | 119 |
| БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....                                                                                                                     | 131 |

Навчальне видання

**Морголенко Анатолій Сергійович,  
Миронова Світлана Юріївна,  
Павленко Олексій Анатолійович та ін.**

## **ТЕХНОЛОГІЯ ЗАГОТІВЕЛЬНО-ШТАМПУВАЛЬНИХ РОБІТ У ВИРОБНИЦТВІ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ**

Редактор А. Г. Литвин

Зв. план, 2024

Підписано до видання 31.12.2024

Ум. друк. арк. 7,4. Обл.-вид. арк. 8,31. Електронний ресурс

---

Видавець і виготовлювач

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

<http://www.khai.edu>

Видавничий центр «ХАІ»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

[izdat@khai.edu](mailto:izdat@khai.edu)

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів  
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001