

## 21 З'ЄДНАННЯ ЗВАРЮВАННЯМ

### 21.1 Характеристика і призначення зварних з'єднань

Зварні з'єднання – основний тип нерознімних з'єднань. Це з'єднання деталей шляхом місцевого нагрівання їх матеріалу до розплавленого або пластичного стану без прикладання зовнішньої сили або з прикладанням зовнішньої сили (відповідно електродугове та контактне зварювання).

Зварні з'єднання належать до нерухомих, нерознімних, напружених з'єднань. Навантаження між звареними частинами передається безпосередньо через шов, який має приблизно таку саму міцність, як і основний метал конструкції.

Залежно від способу нагрівання розрізняють:

- ручне дугове зварювання металевим електродом;
- автоматичне дугове зварювання металевим електродом під флюсом;
- електрошлакове зварювання металевим електродом;
- контактне зварювання.

**Ручне дугове зварювання металевим електродом.** Електрод – сталевий стержень з товстим захисним покриттям, яке при плавленні виділяє велику кількість шлаку та газу, що утворює захисне середовище для шва і цим забезпечує підвищення його якості. Теплота, що виділяється від дуги, виникає між деталлю та електродом, оплавляє краї деталі і розплавляє електрод, метал з якого йде на формування шва. Ручне дугове зварювання виконується для з'єднання короткими швами, або складними за конфігураціями швами в індивідуальному та малосерійному виробництвах. З'єднуються деталі завтовшки 1...60 мм і більше.

**Автоматичне дугове зварювання металевим електродом під флюсом.** Зварювання виконується машинами. До флюсу входять шлакоутворювальні (для захисту від впливу зовнішнього середовища), легуючі та розкислювальні компоненти. Забезпечується висока продуктивність та якість зварних швів. Цей метод економічний для прямолінійних і кільцевих швів значної довжини, використовується у великосерійному і масовому виробництвах. Зварюються деталі завтовшки 2...180 мм і більше.

**Електрошлакове зварювання металевим електродом.** Джерелом нагрівання є теплота, що виділяється при проходженні струму від електроду до деталі через шлакову ванну. Зварюються деталі із сталі і чавуну завтовшки до 180 мм (станіни, корпуси).

**Контактне зварювання** використовується для з'єднання деталей, виготовлених із тонколистових елементів. Нагрівання стику з'єднуваних деталей відбувається теплотою, яка виділяється при проходженні електричного струму через стик деталей.

У сучасному виробництві широко використовуються спеціальні види зварювання. Для з'єднання деталей із високолегованих сталей, сплавів та кольорових металів застосовується зварювання в середовищі інертних газів (аргону, гелію). Поширюється зварювання за допомогою електронного променя, лазера, ультразвуку, вибуху, плазми тощо.

Зварювання використовують не тільки як спосіб з'єднання деталей, але й як технологічний спосіб виготовлення самих деталей. Зварні деталі у багатьох випадках заміняють литі та ковані. Використання зварних конструкцій дозволяє у багатьох випадках знизити витрати матеріалу або масу конструкції на 30...50%, зменшити вартість виробів у 1,5...2 рази.

Основна умова при проектуванні зварного з'єднання – це забезпечення рівномірності шва та з'єднаних деталей.

Переваги і недоліки зварних з'єднань представлені у табл. 21.1.

*Таблиця 21.1 – Переваги і недоліки зварних з'єднань*

Переваги	Недоліки
1 Відсутність додаткових з'єднувальних елементів	1 Поява температурних напружень і пов'язане з цим викривлення деталей після зварювання
2 Рівномірність шва і елементів деталей, що з'єднуються	2 Значна концентрація напружень в області зварних швів
3 Економія матеріалу та зменшення маси виробів	3 Знижена стійкість проти корозії
4 Висока продуктивність та простота процесу зварювання	4 Низька несуча здатність при вібраційному навантаженні
5 Можливість автоматизації процесу	5 Складність контролю шва
6 Герметичність швів	6 Залежність якості шва від кваліфікації зварника (у разі ручного зварювання)

## **21.2 Види зварних з'єднань і типи зварних швів**

Залежно від взаємного розміщення частин зварного з'єднання розрізняють такі види з'єднань (рис. 19.1):

- стикові (а);
- напусткові (б);
- таврові (в);
- кутові (г).

У курсі деталей машин звичайно вивчають два типи зварних швів (див. рис. 21.1): стикові (А); кутові (Б).

Таврові та кутові з'єднання можуть виконуватися стиковими або кутовими швами.

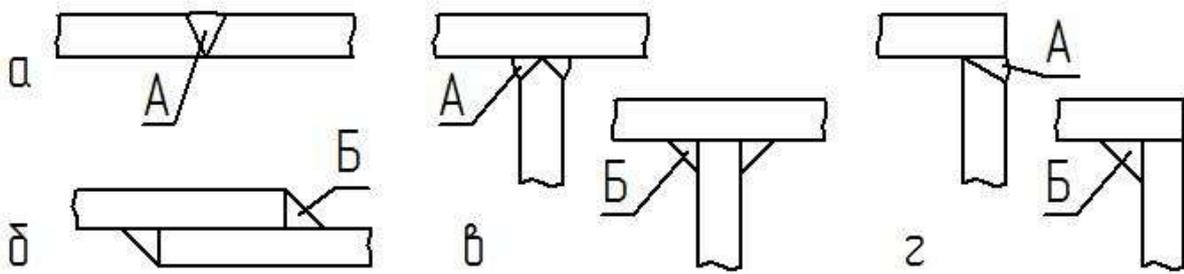


Рисунок 21.1 – Види зварних з'єднань і типи зварних швів

### 21.3 Стикові з'єднання

Схема стикового з'єднання зображена на рис. 21.2. Такі з'єднання можуть сприймати поздовжні та поперечні сили, обертальні та згинальні моменти. Стиковий шов виконується контактним або дуговим зварюванням.

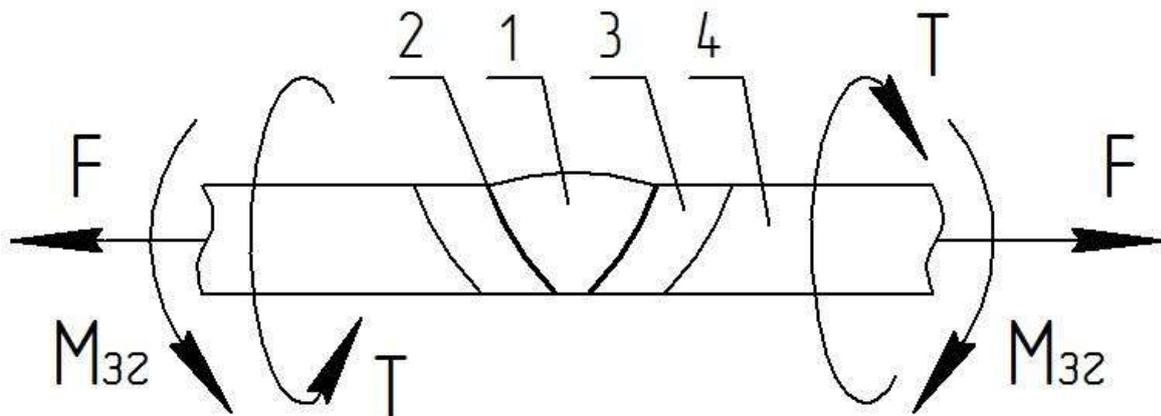


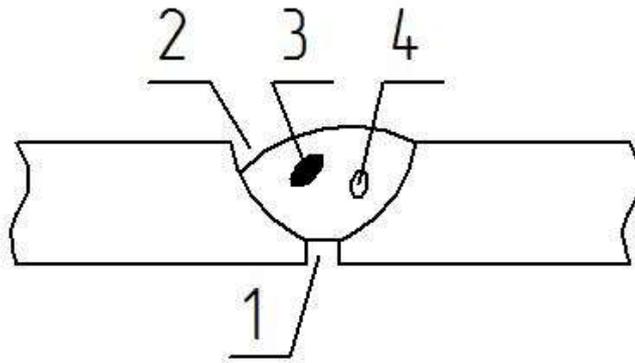
Рисунок 21.2 – Схема стикового з'єднання

У перерізі стикового з'єднання (див. рис. 21.1) виділяють: 1 – зварний шов; 2 – зону сплавлення; 3 – зону термічного впливу; 4 – основний матеріал.

Установлено, що при якісному виконанні зварювання руйнування з'єднання сталевих деталей відбувається головним чином у зоні термічного впливу. Тому в розрахунки на міцність закладають геометричні параметри цієї зони.

Дефекти стикового шва бувають такими (рис. 21.3).

У розрахунках зварних з'єднань дефекти швів не враховують.



1 – непровар; 2 – підріз; 3 – шлак; 4 – газ  
Рисунок 21.3 – Дефекти стикового шва

### 21.3.1 Розрахунки стикових швів зварних з'єднань

Розрахункова схема зварного з'єднання стиковим швом представлена на рис. 21.4.

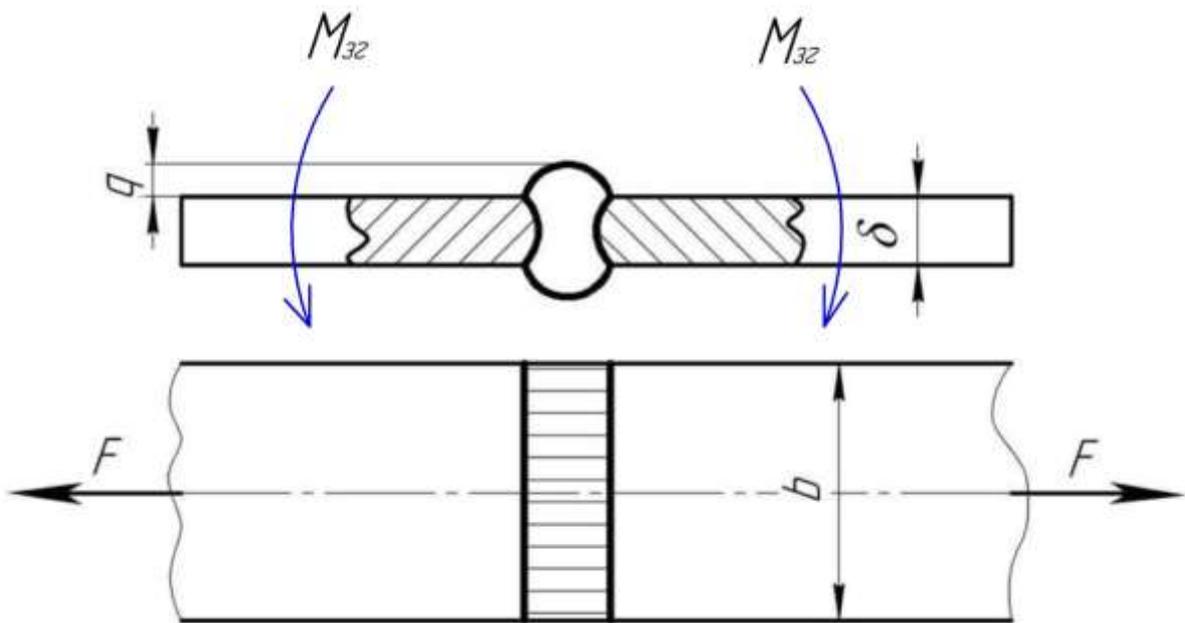


Рисунок 21.4 – Розрахункова схема зварного з'єднання стиковим швом

ова міцності для стикових швів залежить від схеми навантаження. кщо з'єднання навантажене силою розтягу  $F$  умова міцності має

ВИГЛ

$$\sigma_p = \frac{F}{A} = \frac{F}{l \cdot \delta} \leq [\sigma]_p, \quad (21.1)$$

де  $\sigma_p$  – напруження розтягу у шві (зоні термічного впливу);

$[\sigma]_p'$  – допустиме напруження для зварного з'єднання, яке залежить від допустимого напруження для основного металу, типу зварювання та електрода, режиму навантаження;

$l$  – довжина зварного шва.  $l = b$ ;

$b$  – ширина деталі;

$\delta$  – товщина деталі.

У разі коли зварний шов косий (рис. 21.5) довжина зварного шва дорівнює  $l = b / \sin \beta$ .

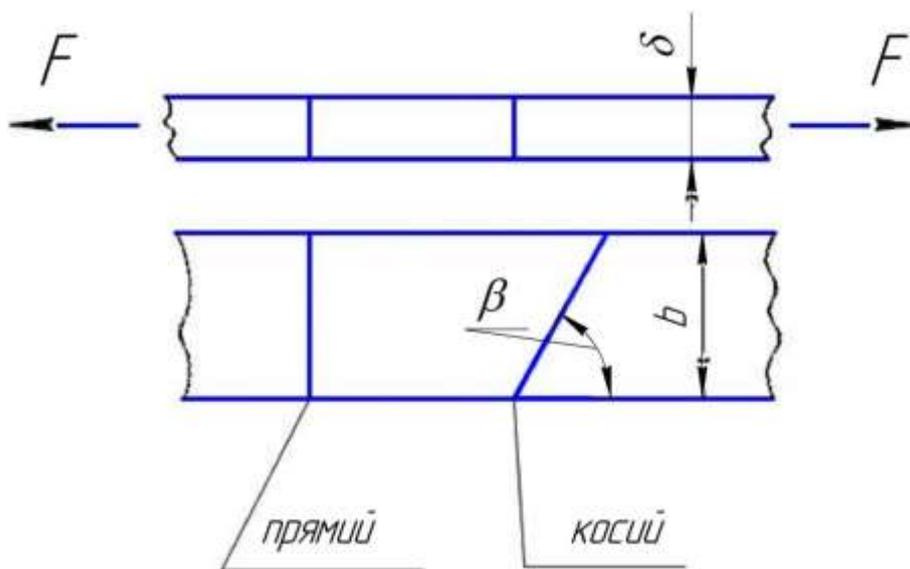


Рисунок 21.5 – Розрахункова схема зварного з'єднання стиковим швом

2 Якщо з'єднання навантажене моментом згину  $M_{32}$  умова міцності має вигляд

$$\sigma_{32} = \frac{M_{32}}{W_o} = \frac{M_{32}}{b \cdot \delta^2 / 6} \leq [\sigma]_{32}', \quad (21.2)$$

де  $\sigma_{32}$  – напруження згину у шві (зоні термічного впливу);

$[\sigma]_{32}'$  – допустиме напруження для зварного з'єднання, яке залежить від допустимого напруження для основного металу, типу зварювання та елек а, режиму навантаження.

кщо з'єднання навантажене силою розтягу  $F$  і моментом згину  $M_{32}$  ний шов знаходиться у складному напруженому стані:

$$\sigma_{екв} = \sigma_p + \sigma_{зз} = \frac{F}{b \cdot \delta} + \frac{M_{зз}}{b \cdot \delta^2 / 6} \leq [\sigma]_p, \quad (21.3)$$

## 21.4 Напунктові з'єднання

Напунктові з'єднання виконуються кутовими швами з розрахунковим перерізом у вигляді прямокутного трикутника (рис. 21.6).

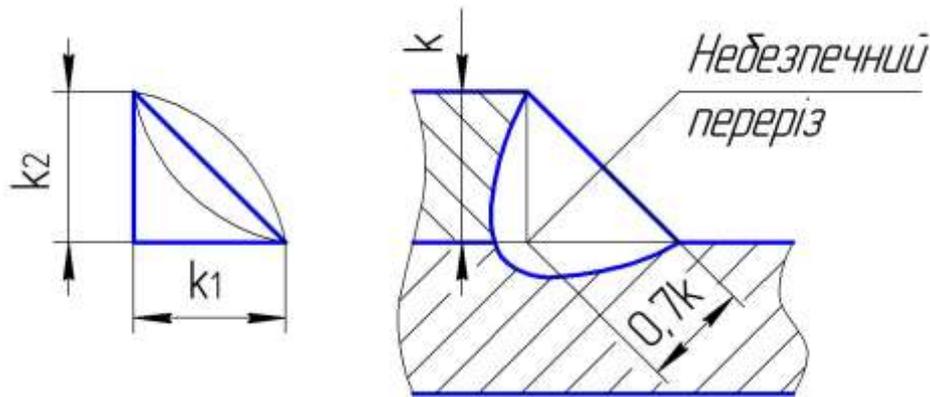


Рисунок 21.6 – Зварний кутовий шов

Залежно від співвідношення катетів розрізняють шви:

- нормальний ( $k_1 = k_2$ );
- посилений ( $k_1/k_2 = \frac{2}{1} \dots \frac{3}{1}$ );
- увігнутий, який отримують глибоким проплавленням або механічною обробкою;
  - випуклий, який не потрібно застосовувати, бо знижується міцність з'єднання.

Навантажувальна здатність конструкцій із посиленими та увігнутими швами завдяки меншій концентрації напружень (більш плавний перехід від однієї деталі до іншої) вища, ніж у з'єднань з нормальним швом.

Залежно від розміщення щодо навантаження у напунктових з'єднаннях розрізняють такі кутові шви (рис. 21.7):

- лобовий (поперечний, що утворює кут  $90^\circ$  з лінією дії сили) – 1;
- фланговий (поздовжній, паралельний лінії дії сили) – 2;
- скісний (під кутом до цієї лінії) – 3;
- комбінований, що складається з лобового та флангових швів – 1,2.

Уздовж лобових швів навантаження, а відповідно і напруження, розподіляються рівномірно (див. рис. 21.7). Уздовж флангових швів навантаження розподіляються нерівномірно, тому довжину флангових швів обмежують ( $l_\phi \cong 50 \cdot k$ ).

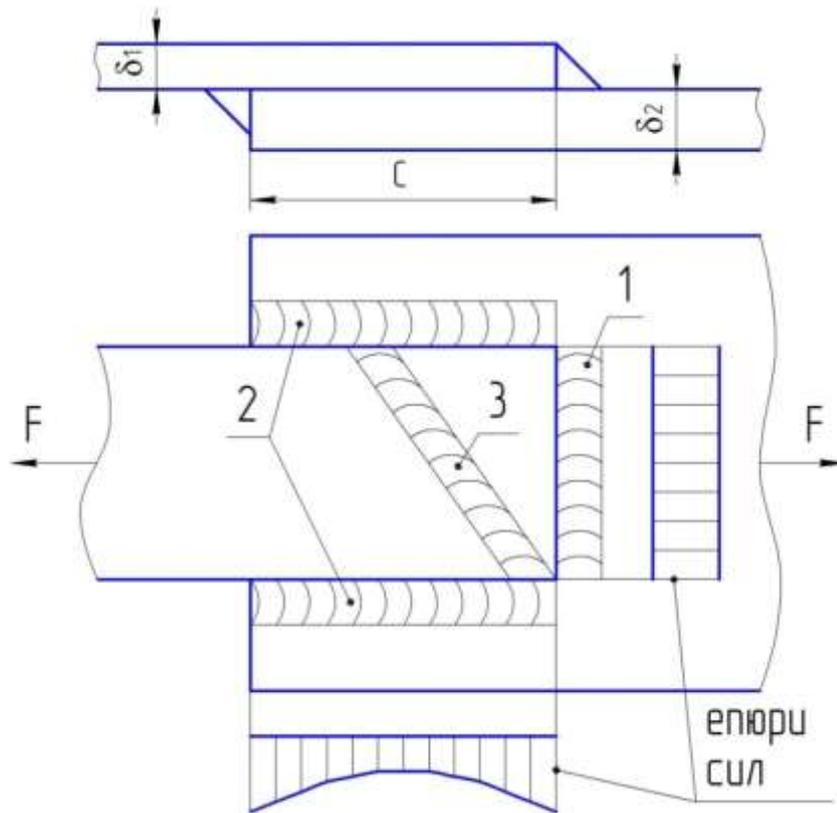


Рисунок 21.7 – Напусткове з'єднання

Особливості конструювання напусткових з'єднань такі:

- 1) катет шва повинен бути менше мінімальної товщини двох зварюваних деталей ( $k \leq \delta_{min}$ );
- 2) напуск  $c \geq 4 \cdot k$ ;
- 3) шви мають бути з двох боків з'єднання (див. рис. 21.7);
- 4) довжина шва  $l \geq 30 \text{ мм}$  для зниження впливу початку та кінця шва як менш якісних на міцність з'єднань;
- 5) довжина флангового шва  $l_{\phi} \leq (50 \dots 60)k$ .

#### 21.4.1 Розрахунок на міцність з'єднань з кутовими швами

Розрахунки на міцність усіх зварних з'єднань, виконаних кутовими швами, виконують за дотичними напруженнями зрізу, які виникають у площині бісектриси прямого кута (рис. 21.8) незалежно від діючого навантаження.

ова міцності для стикових швів залежить від схеми навантаження.

кщо з'єднання навантажене силою розтягу  $F$  умова міцності має

ВИГЛ

$$\tau_{зр} = \frac{F}{A} = \frac{F}{0,7 \cdot k \cdot l_p} \leq [\tau]_{зр}, \quad (21.4)$$

де  $\tau_{зр}$  – напруження зрізу у шві (зоні термічного впливу);

$[\tau]_{зр}$  – допустиме напруження для зварного з'єднання, яке залежить від допустимого напруження для основного металу, типу зварювання та електрода, режиму навантаження;

$l_p$  – розрахункова довжина зварних швів:

- у разі наявності тільки двох лобових або флангових швів розрахункова довжина зварних швів дорівнює:  $l_p = 2 \cdot l_n$  або  $l_p = 2 \cdot l_\phi$ ;
- у разі наявності комбінованих швів розрахункова довжина зварних швів дорівнює:  $l_p = 0,3 \cdot l_n + 1,5 \cdot l_\phi$ .

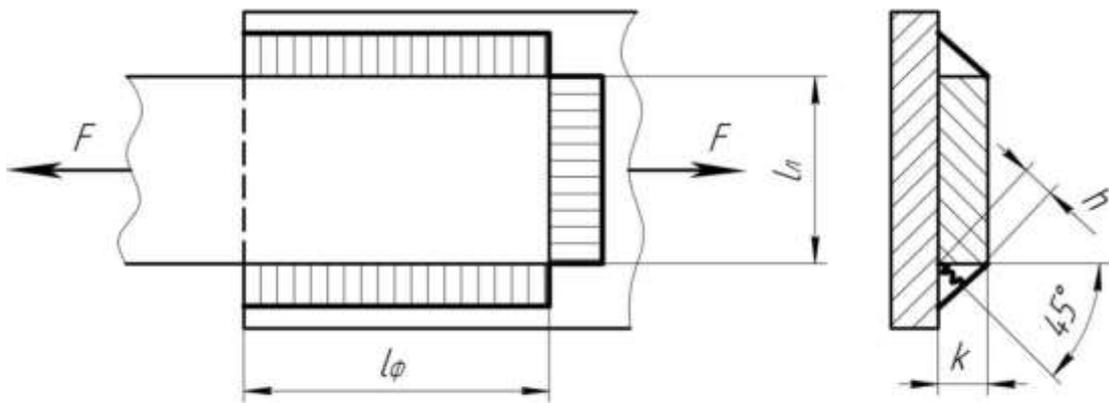


Рисунок 21.8 – Розрахункова схема

Коли на з'єднання діють кілька силових факторів, доцільно використовувати принцип суперпозиції

$$\tau = \sum_{i=1}^k \tau_i \leq [\tau], \quad (21.5)$$

де  $\tau_i$  – дотичні напруження зрізу, зумовлені дією  $i$ -го силового фактора. Причому в окремих випадках мають на увазі геометричну суму.

### 21.5 Допустимі напруження при розрахунках зварних з'єднань

Норми допустимих напружень у зварних швах установлюють із урахуванням конкретних якісних показників зварювання й характеру навантаження зварного шва (табл. 21.2), у залежності від допустимих напружень матеріалу з'єднувальних деталей –  $[\sigma]_{рдет}$ .

$$[\sigma]_{p\text{дет}} = \frac{\sigma_T}{S}.$$

$\sigma_T$  – границя текучості матеріалу деталей, що зварюються;  
 $S = 1,2 \dots 1,8$  – коефіцієнт запасу міцності.

Таблиця 21.2 – Допустимі напруження для зварних швів при статичному навантаженні

Вид технологічного процесу зварювання	Допустимі напруження у швах		
	$[\sigma]_p$	$[\sigma]_{ст}$	$[\tau]_{зр}$
Автоматична під флюсом; ручна електродами Е42А, Е50А; контактна стикова	$[\sigma]_{p\text{дет}}$	$[\sigma]_{p\text{дет}}$	$0,65 \cdot [\sigma]_{p\text{дет}}$
Ручна дугова електродами Е42, Е50	$0,9 \cdot [\sigma]_{p\text{дет}}$	$[\sigma]_{p\text{дет}}$	$0,6 \cdot [\sigma]_{p\text{дет}}$
Контактна точкова	–	–	$0,5 \cdot [\sigma]_{p\text{дет}}$

При циклічному навантаженні зварного шва

$$[\tau]_r = [\tau] \cdot \gamma,$$

де  $\gamma = \frac{1}{(0,6 \cdot k_e \pm 0,25) - (0,6 \cdot k_e \mp 0,25) \cdot r}$  – поправочний коефіцієнт;

$k_e$  – ефективний коефіцієнт концентрації напружень:

- для кутових флангових швів  $k_e = 3,4$ ;
- для лобових швів при ручному зварюванні  $k_e = 2,3$ ;
- при автоматичному зварюванні  $k_e = 1,7$ ;

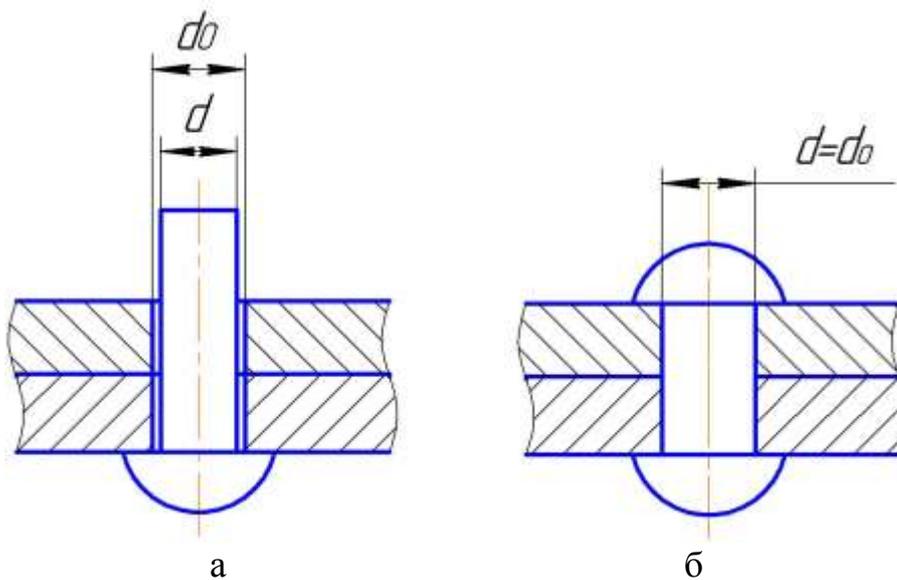
$r = \frac{\tau_{min}}{\tau_{max}}$  – коефіцієнт асиметрії циклу;

Верхні знаки  $\pm$  або  $\mp$  беруть коли середнє напруження в циклі  $\sigma_m > 0, \tau_m > 0$ , а нижні знаки, коли  $\sigma_m < 0, \tau_m < 0$ .

## 22 ЗАКЛЕПКОВІ З'ЄДНАННЯ

### 22.1 Загальні положення, типи заклепок і матеріали

Заклепковим називається нероз'ємне з'єднання деталей за допомогою заклепки – суцільного чи порожнистого циліндричного стрижня із закладною головкою на одному кінці. З'єднання формується шляхом установки заклепок в попередньо підготовлені в деталях отвори (рис. 22.1,а) і подальшої осадки стрижня (клепання) для формування другої (замикальної) головки (рис. 22.1,б). В процесі клепання деталі стискаються, а стрижень заклепки осаджується і щільно заповнює отвір.



*а – закладання заклепки; б – після клепання*

*Рисунок 22.1 – Формування заклепкового з'єднання:*

Отвори в деталях продавлюють або просвердлюють. У разі продавлювання листи деформуються, на краях отворів виникають тріщини, а на вихідній стороні утворюються гострі кромки, які можуть спричинити підрізання стрижня заклепки. Свердління менш продуктивне, але забезпечує підвищену міцність. Іноді продавлювання суміщають з наступним розсвердлюванням.

Клепання виконується вручну або машинами. Якість з'єднання машинного клепання вища, оскільки при цьому забезпечується однорідність зусилля клепання і більша сила стиску деталей.

Стальні заклепки малого діаметра (до 10...12 мм) і заклепки із кольорових металів клепаються без нагрівання (холодне клепання), стальні заклепки з більшим діаметром перед установленням нагрівають (гаряче кле-

пання). Нагрівання заклепок полегшує процес клепаання і підвищує якість з'єднання.

Заклепки використовують для з'єднання листів, смуг, прокатних профілів тощо, де зовнішні навантаження діють паралельно до площини стику. Заклепкові з'єднання значно витіснені зварними з причини більшої витрати матеріалу, значної трудомісткості їх виготовлення і високої вартості. Однак заклепкові з'єднання добре працюють у конструкціях, що сприймають різко виражені вібраційні навантаження (корпуси літаків, кораблів, металоконструкції, автомобільні і тракторні рами тощо); вони мають переваги під час з'єднання деталей, що не допускають нагрівання у разі зварювання, внаслідок можливого відпускання чи короблення; з'єднання деталей із матеріалів, що погано зварюються, а також з'єднання деталей із шкіри та її замінників.

Заклепкові з'єднання використовують також під час виготовлення деталей машин загального призначення, наприклад, для кріплення вінців зубчастих коліс до маточини, лопаток в турбінах, гальмівних накладок тощо.

За призначенням заклепкові з'єднання ділять на міцні (металоконструкції); щільні (резервуари з невеликим внутрішнім тиском) і міцнощільні (резервуари з високим тиском).

Існує багато типів заклепок, форма і розміри більшості із них стандартизовані: заклепки з суцільним стрижнем: з напівкруглою головкою, використовують в міцних і щільних з'єднаннях; з плоскою головкою, призначені для роботи в корозійних середовищах; з потайною або напівпотайною головкою, використовуються за необхідності уникнення виступаючих частин (наприклад, в літакобудуванні) або у разі з'єднання тонких листів; заклепки напівпорожнисті і порожнисті, використовуються для з'єднання тонких листів і неметалічних деталей.

Матеріал заклепок повинен бути досить пластичним для забезпечення можливості формування голівок і однорідним з матеріалом деталей, що з'єднуються, щоб уникнути електрохімічної корозії. Сталеві заклепки звичайно виготовляють зі сталей Ст2, Ст3, 09Г2 і ін. Для з'єднання елементів зі сталей підвищеної якості доцільно застосовувати заклепки з тих же сталей, якщо можливо за умовами їхнього пластичного деформування. З легких сплавів для заклепок застосовують В65, Д15 і ін.

При конструюванні рекомендується дотримуватися наступних правил:

а) в елементах, що працюють на розтяг або стиск для зменшення їхнього згину, заклепки варто розташовувати можливо ближче до осі, що проходить через центр маси перерізів, або симетрично щодо цієї осі;

б) у кожному з'єднанні для усунення можливості відносного повороту деталей, що з'єднуються, бажано використовувати не менш двох заклепок;

в) заклепки за можливістю варто розміщати таким чином, щоб елементи, що з'єднуються, послаблялися менше і їхній матеріал використову-

вався більш повно, тобто варто віддавати перевагу шаховому розташуванню рядному.

## 22.2 Розрахунок заклепкових з'єднань

Відповідно до звичайних умов роботи заклепкових з'єднань основними навантаженнями для них є поздовжні сили  $F$ , що прагнуть зрушити деталі, що з'єднуються, одну щодо іншої (рис. 22.2). При навантаженні заклепкового з'єднання поздовжніми силами (у межах сил тертя на поверхнях контакту) навантаження передається силами тертя, які в з'єднаннях гарячою клепкою без карбування відповідають умовному напруженню заклепки на зріз  $80\text{...}90$  МПа. Потім у роботі починає брати участь тіло заклепки, піддаючись згину, зминанню й зсуву.

В щільному й точному з'єднаннях необхідно, щоб все зовнішнє навантаження сприймалося силами тертя, щоб уникнути місцевих зсувів.

Розрахунок заклепок у з'єднанні, що перебуває під дією поздовжнього навантаження, зводиться за формою до розрахунку їх на зріз. Тертя в стику враховують при виборі допустимих напружень зрізу. При центральній дії навантаження передбачається рівномірний розподіл сил між заклепками.

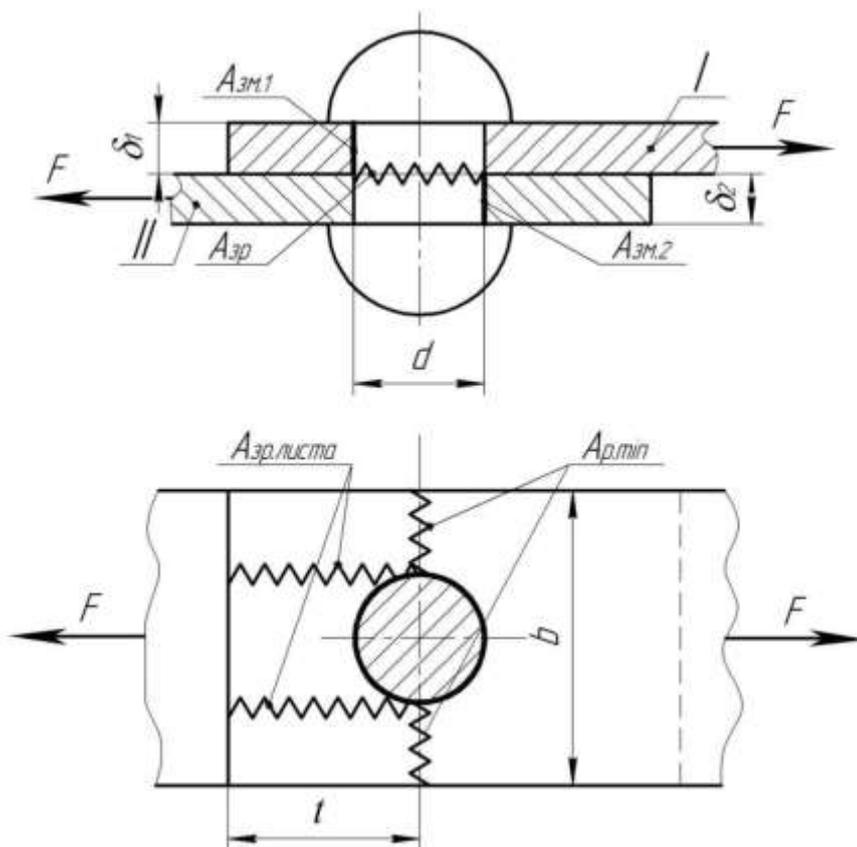


Рисунок 22.2 – Розрахункова схема

1 Перевірка міцності заклепок на зріз.

$$\tau_{зр} = \frac{F}{A \cdot z} = \frac{F}{(\pi \cdot d^2 / 4) \cdot z} \leq [\tau]_{зр}, \quad (22.1)$$

де  $d$  – діаметр стрижня заклепки;

$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$  – площа зрізу;

$z$  – кількість заклепок;

2 Перевірка міцності заклепок та з'єднувальних листів на зминання.

Для визначеності припустимо, що  $\delta_1 > \delta_2$ , де  $\delta$  – товщина листів.

$$\sigma_{зм} = \frac{F}{A \cdot z} = \frac{F}{(d \cdot \delta_2) \cdot z} \leq [\sigma]_{зм}. \quad (22.2)$$

3 Перевірка міцності листа на розтяг в ослабленому перерізі з площею  $A_{pmin}$

$$\sigma_p = \frac{F}{A_{pmin}} = \frac{F}{(b-d) \cdot \delta_2} \leq [\sigma]_p, \quad (22.3)$$

де  $b$  – ширина листа.

4 Перевірка міцності на зріз (виколювання) листа одночасно в двох площинах  $A_{зрлиста}$  за умови, що зріз відбувається на довжині  $(t - 0,5 \cdot d)$

$$\tau_{зр} = \frac{F}{A} = \frac{F}{(t - 0,5 \cdot d) \cdot 2 \cdot \delta_2} \leq [\tau]_{зр}. \quad (22.4)$$

### 22.3 Допустимі напруження в розрахунках заклепкових з'єднань

Допустимі напруження для деталей заклепкового з'єднання залежать від їхніх матеріалів, способу виконання отворів у деталях та характеру дії на з'єднання зовнішнього навантаження (постійне чи змінне).

Допустимі напруження для з'єднань сталевих деталей заклепками зі сталей Ст2 і Ст3 при розрахунку за основні напруженнями: на зріз заклепок  $[\tau]_{зр}$  Па й на зминання  $[\sigma]_{зм}$  Па, на розтягання елементів, що з'єднуються, зі сталі Ст3  $[\sigma]_p$  Па.

При холодній клепці допустимі напруження у заклепках знижують на 30 %.

Для елементів з'єднань із пробитими й не розсвердленими отворами допустимі напруження знижують на 30 %.

Якщо з'єднання працює при рідких знакозмінних навантаженнях, допустимі напруження знижують множенням на коефіцієнт

$$\gamma = \frac{1}{a - b \cdot F_{min}/F_{max}} \leq 1, \quad (22.5)$$

де  $F_{min}$ ,  $F_{max}$  – найменша й найбільша по абсолютній величині сили, узяті зі своїми знаками. Для з'єднання елементів з низьковуглецевих сталей  $a = 1; b = 0,3$ , а для з'єднань зі середньовуглецевих сталей  $a = 1,2; b = 0,3$ .