



*Присвячується пам'яті академіка  
Національної академії наук України,  
доктора технічних наук, професора  
Володимира Івановича Махненка*



**В. І. Махненко  
(1931–2013)**

## ЗМІСТ

|  |            |
|--|------------|
| Вступ .....  | 7          |
| <b>Розділ 1. Загальні положення теорії зварювальних деформацій і напружень .....</b>                           | <b>10</b>  |
| 1.1. Основні поняття теорій пружності й пластичності .....   | 10         |
| 1.2. Основні поняття та визначення теорії зварювальних напружень і деформацій .....                            | 16         |
| 1.3. Механізм утворення деформацій при нагріванні .....  | 19         |
| 1.4. Усадкова сила й об'єм поздовжнього укорочення та основні причини їх утворення .....                       | 23         |
| 1.5. Основні спрощення та гіпотези інженерної теорії зварювальних деформацій .....                             | 26         |
| 1.6. Основні принципи й залежності методу скінченних елементів ...   | 28         |
| 1.7. Сучасні програмні комплекси для моделювання напружено-деформованого стану .....                           | 34         |
| 1.8. Контрольні запитання .....  | 41         |
| <b>Розділ 2. Деформації поздовжнього укорочення .....</b>  | <b>44</b>  |
| 2.1. Термомеханічна задача .....   | 44         |
| 2.2. Зона пружно-пластичних деформацій .....   | 48         |
| 2.3. Деформаційна задача .....   | 50         |
| 2.4. Напруження, створювані поздовжнім укороченням .....   | 54         |
| 2.5. Вплив вихідного напруженого стану .....   | 60         |
| 2.6. Вплив багатошарового (багатопрхідного) зварювання .....   | 64         |
| 2.7. Деформації при зварюванні кількох з'єднань .....  | 67         |
| 2.8. Контрольні запитання .....  | 69         |
| 2.9. Приклад задачі для поздовжнього укорочення .....  | 71         |
| 2.10. Завдання для самостійної роботи .....  | 75         |
| <b>Розділ 3. Деформації поперечного укорочення .....</b>   | <b>86</b>  |
| 3.1. Термомеханічна задача .....   | 86         |
| 3.2. Вплив конструктивних чинників на поперечне укорочення .....   | 90         |
| 3.3. Деформаційна задача .....   | 93         |
| 3.4. Напруження, спричинені поперечним укороченням, при зварюванні незакріплених та закріплених з'єднань ..... | 96         |
| 3.5. Контрольні запитання .....  | 105        |
| 3.6. Приклад задачі для поперечного укорочення .....   | 106        |
| 3.7. Завдання для самостійної роботи .....   | 109        |
| <b>Розділ 4. Куткові деформації .....</b>  | <b>112</b> |
| 4.1. Механізм, основні причини та особливості кутових деформацій ...   | 112        |
| 4.2. Визначення величини кутового зламу при наплавленні валика ...   | 113        |
| 4.3. Визначення величини кутового зламу при зварюванні стикових з'єднань .....                                 | 116        |
| 4.4. Визначення величини кутового зламу при зварюванні таврових з'єднань .....                                 | 117        |
| 4.5. Ребристість і коробуватість конструкцій унаслідок кутових деформацій .....                                | 118        |
| 4.6. Напруження при кутовому зламі пластини .....  | 119        |

|  |            |
|--|------------|
| 4.7. Заходи зі зменшення кутових зламів .....  | 120        |
| 4.8. Контрольні запитання .....  | 122        |
| 4.9. Приклад задачі для кутових деформацій .....   | 122        |
| 4.10. Завдання для самостійної роботи .....  | 124        |
| <b>Розділ 5. Специфічні види зварювальних деформацій .....</b>   | <b>128</b> |
| 5.1. Деформації втрати стійкості тонколистових конструкцій .....   | 128        |
| 5.2. Деформації закручування балок .....   | 130        |
| 5.3. Особливості деформацій оболонкових конструкцій .....  | 133        |
| 5.4. Деформації при тепловому різанні .....  | 138        |
| 5.5. Контрольні запитання .....  | 139        |
| 5.6. Приклад задачі .....  | 140        |
| 5.7. Завдання для самостійної роботи .....   | 143        |
| <b>Розділ 6. Зварювальні деформації секцій корпусу судна .....</b>   | <b>148</b> |
| 6.1. Загальні положення .....  | 148        |
| 6.2. Плоскі полотна .....  | 150        |
| 6.3. Плоскі секції з набором одного напрямку .....   | 151        |
| 6.4. Плоскі секції з набором двох напрямків .....  | 153        |
| 6.5. Місцеві деформації площинних секцій .....   | 156        |
| 6.6. Площинні секції з криволінійними обводами .....   | 157        |
| 6.7. Допуски на зварювальні деформації секцій .....  | 159        |
| 6.8. Контрольні запитання .....  | 161        |
| 6.9. Приклад задачі .....  | 162        |
| 6.10. Завдання для самостійної роботи .....  | 172        |
| <b>Розділ 7. Напруження і деформації при паянні та дифузійному зварюванні .....</b>                                  | <b>175</b> |
| 7.1. Механізм та основні причини утворення власних напружень і деформацій при дифузійному зварюванні та паянні ..... | 175        |
| 7.2. Інженерні методи розрахунку, засновані на гіпотезі плоских перерізів .....                                      | 179        |
| 7.3. Деякі результати комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану .....                                  | 183        |
| 7.4. Методи регулювання власних напружень і деформацій при дифузійному зварюванні та паянні .....                    | 208        |
| 7.5. Приклад розрахунку залишкових напружень і деформацій у паяному (дифузійному) з'єднанні .....                    | 208        |
| 7.6. Контрольні запитання .....  | 211        |
| 7.7. Завдання для самостійної роботи .....   | 212        |
| <b>Розділ 8. Регулювання зварювальних напружень і деформацій .....</b>   | <b>214</b> |
| 8.1. Вплив власних напружень і деформацій на зварні конструкції .....  | 214        |
| 8.2. Загальні принципи боротьби з власними напруженнями та деформаціями .....  | 217        |
| 8.3. Методи зменшення зварювальних напружень .....   | 217        |
| 8.4. Методи зменшення зварювальних деформацій .....  | 223        |
| 8.5. Контрольні запитання .....  | 228        |
| 8.6. Приклад задачі .....  | 229        |
| 8.7. Завдання для самостійної роботи .....   | 230        |
| Рекомендована література .....   | 234        |
| Додаток .....  | 235        |

## ВСТУП

Широке застосування зварювання у всіх галузях сучасної промисловості, у тому числі й суднобудуванні, обумовлене цілою низкою його переваг у порівнянні з іншими технологічними процесами отримання нерознімних з'єднань. До таких переваг відносять простоту з'єднання, зменшення маси конструкції, великі можливості для механізації та автоматизації процесу, зменшення трудомісткості, скорочення термінів виготовлення складних конструкцій тощо. Однак зварювання має і деякі недоліки, які часто знижують його ефективність. До них належать зміна фізико-механічних властивостей у зоні термічного впливу та утворення власних напружень і деформацій унаслідок нерівномірного нагрівання конструкції при зварюванні.

Залишкові деформації, що з'являються після зварювання, ускладнюють збирання великогабаритних конструкцій з окремих зварних блоків, вузлів і секцій. Наприклад, розбіжність форми обводів і розмірів сусідніх секцій або блоків корпусу судна, що досягає іноді декількох десятків міліметрів, вимагає великих витрат праці при стикуванні секцій між собою. Часто трудомісткість операцій усунення зварювальних деформацій сумірна з трудомісткістю зварювальних робіт. Залишкові зварювальні деформації погіршують зовнішній вигляд та експлуатаційні характеристики конструкції. Зміна розмірів корпусу судна неминуче спричиняє зміну тоннажності, остійності та інших мореплавних якостей. Ребристість обшивки в підводній частині підвищує опір руху судна.

У деяких випадках, особливо у поєднанні з іншими несприятливими чинниками, такими, як низька температура, невдала форма вузла або з'єднання, знижені пластичні властивості матеріалу, наявність дефектів тощо, залишкові напруження знижують міцність та працездатність конструкцій, можуть викликати їх руйнування за відсутності робочих навантажень. Напруження, що утворюються в процесі зварювання, впливають на технологічну міцність металу та формування з'єднань.

Ці та інші шкідливі прояви власних деформацій і напружень становлять одну з найбільш важливих проблем – усунути шкідливий їх вплив. Для цього необхідно знати причини і механізм їх утворення та засоби попередження, а також уміти правильно розраховувати очікувану величину і характер розподілу напружень. Теорія зварювальних напружень і деформацій як

частина зварювальної науки займається розробкою принципів та методів розрахунку і боротьби зі зварювальними деформаціями й напруженнями в конструкціях і окремих їх складових.

Проблемою зварювальних напружень та деформацій займалися ще засновники зварювання, але особливо гостро вона постала в 30-х роках ХХ сторіччя. Впровадження зварювання в промисловість вимагало ретельного вивчення міцності й працездатності зварних конструкцій. У ті роки найбільший розвиток теорія напружень і деформацій отримала в роботах Є.О. Патона, Г.О. Ніколаєва, М.О. Окерблома, В.П. Вологдіна, І.П. Трочуна та ін. Дослідження в основному були спрямовані на розкриття механізму утворення деформацій і напружень при зварюванні низьковуглецевих сталей.

У подальші роки коло наукових установ і фахівців, яке займалося проблемами міцності зварних конструкцій, зварювальних напружень та деформацій, безперервно розширювалося. Розвиток науки йшов шляхом дослідження зварювальних напружень у різних типах з'єднань і з'єднаннях великих товщин, впливу напружень на міцність, стійкість проти крихкого руйнування, особливо при низьких температурах. Досліджувалися деформації в оболонкових конструкціях, втрати стійкості у тонколистових конструкціях, напруження і деформації в аустенітних сталях, титанових, алюмінієво-магнієвих сплавах, при паянні різнорідних матеріалів, особливо металів з неметалами (графітом, керамікою тощо), розроблялися методи боротьби зі зварювальними напруженнями і деформаціями. Останні роки відзначені широким застосуванням методів теорії пружності й пластичності, комп'ютерної техніки, різних програмних комплексів для дослідження зварювальних напружень і деформацій та вирішення конкретних важливих проблем.

Сучасна теорія зварювальних напружень і деформацій отримала найбільш широкий розвиток у працях В.І. Махненка (ІЕЗ ім. Є.О. Патона), В.О. Винокурова і В.М. Сагалевича (МВТУ ім. Баумана), І.П. Трочуна (КПІ), С.А. Кузьміна (ЦНДІТС) та їх наукових школах. Велика увага вивченню цих питань приділяється також ученими і фахівцями інших країн.

"Напруження і деформації при зварюванні" є частиною циклу дисциплін підготовки фахівців зварювального виробництва "Механіка зварних з'єднань і конструкцій", до якого входять також дисципліни "Міцність зварних з'єднань" та "Проектування зварних конструкцій".

**Мета вивчення** дисципліни "Напруження і деформації при зварюванні" – пізнання термомеханічних процесів, які проходять при зварюванні й викликають появу залишкових напружень і деформацій, а також шляхів підвищення точності та якості зварних конструкцій.

Завдання дисципліни – ознайомити студентів з фізичними основами і змістом інженерних методів розрахунку й оцінки напружень і деформацій при зварюванні, методами їх регулювання на всіх стадіях виготовлення зварних конструкцій.

---

У результаті вивчення дисципліни студент повинен **знати** основні причини й механізм утворення зварювальних напружень і деформацій, основні чинники, що впливають на їх величину, інженерні методи розрахункового визначення залишкових напружень і деформацій, методи їх регулювання, а також **уміти** правильно вибрати розрахунковий метод та виконувати всі необхідні розрахунки і довести їх до кінцевого результату.

Цей підручник написано відповідно до робочої програми дисципліни "Напруження і деформації при зварюванні". Він складається з восьми розділів, в яких розглядаються загальні положення теорії зварювальних деформацій і напружень, деформації поздовжнього укорочення при зварюванні, деформації поперечного укорочення, кутові деформації, специфічні види зварювальних деформацій, особливості розрахунку загальних зварювальних деформацій суднокорпусних секцій (плоских панелей), особливості напружень та деформацій при паянні й дифузійному зварюванні, методи регулювання зварювальних напружень і деформацій.

Розділи підручника написали: Л.М. Лобанов – розділ 8; Г.В. Єрмолаєв – розділи 1–3; В.В. Квасницький – розділ 7; О.В. Махненко – розділ 5; Г.В. Єгоров – розділ 6; А.В. Лабарткава – розділ 4.

Підручник видано частково за кошти авторів.

---

---

## Розділ 1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕОРІЇ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ДЕФОРМАЦІЙ І НАПРУЖЕНЬ

### 1.1. Основні поняття теорій пружності й пластичності

**Предмет і задачі теорії пружності.** Теорія пружності, як і опір матеріалів, досліджує напруження та деформації у твердому тілі під час розв'язування технічних задач міцності. Однак теорія пружності дає більш точні розв'язання. Крім того, вона дозволяє розв'язувати більш складні задачі щодо напружень і деформацій при заданих зовнішніх навантаженнях у пружному тілі будь-якої форми, недоступні для опору матеріалів, при цьому застосовується набагато більш складний математичний апарат, ніж в опорі матеріалів, в якому розглядається в основному брус, тобто тіло подовженої форми.

Унаслідок складності методів теорії пружності вони рідко використовуються в інженерних розрахунках звичайних конструкцій. Разом з тим, теорія пружності дозволяє оцінити правильність і практичну придатність інженерних методів, установити границі й умови застосування цих спрощених методів і покладених у їхню основу гіпотез, що прийняті в теорії опору матеріалів. Однак з ускладненням конструкцій і умов їхньої роботи (літальні апарати, хімічне машинобудування, ядерна фізика, кораблебудування тощо), а також у зв'язку з усе більш широким застосуванням ЕОМ і числових методів розв'язання (методу скінченних елементів (МСЕ)) з'являється потреба та можливість використання методів теорії пружності й для розв'язування інженерних задач.

**Основні передумови теорії пружності** склалися як результат ідеалізації реальних властивостей пружного тіла ще в працях основоположників цієї науки в першій половині XIX століття: Навьє, Коші, Пуассона, Сен-Венана. Нижче наведено передумови, що стосуються насамперед властивостей матеріалу, досліджуваного в теорії пружності.

1. Пружність матеріалу передбачається досконалою (ідеальною).
2. Матеріал вважається однорідним, тобто він у всіх точках тіла однаковий.
3. Матеріал передбачається ізотропним: його фізичні властивості однакові у всіх напрямках.
4. Матеріал пружного тіла суцільний, тобто заповнює зайнятий ним простір без розривів.
5. У пружному тілі відсутні початкові напруження (тіло без навантаження вважається ненапруженим).
6. Матеріал працює в межах закону Гука щодо пропорційності напружень і деформацій.

7. Матеріал приймається настільки жорстким, що відносні переміщення його точок, нерозривно зв'язаних з деформаціями, можуть вважатися дуже малими в порівнянні з лінійними розмірами тіла. Це дає можливість вважати, що сили прикладені в точках, визначених координатами до деформації тіла.

Передумови щодо однорідності, ізотропності й суцільності дозволяють застосовувати диференціальний метод як загальний і основний у теорії пружності. Передумови стосовно законів Гука і малих відносних переміщень дозволяють використовувати принцип накладання (принцип незалежності дії сил), використаний і в опорі матеріалів.

Матеріали, що застосовуються в машино- й суднобудуванні, будівництві та інших галузях техніки, не мають у повній мірі зазначених властивостей. Однак багато з матеріалів, зокрема сталь, має практично високу пружність до певного рівня напружень і деформацій, так званої границі пружності. У реальних конструкціях опір навантаженням звичайно не виходить за границю пружності, у цьому випадку сталь і багато інших матеріалів, що застосовуються в техніці, практично відповідають закону Гука.

Багато матеріалів, у тому числі й сталь, більш-менш задовольняють передумови щодо однорідності, суцільності та ізотропності пружного тіла. Точно кажучи, сталь не є аморфним матеріалом, має кристалічну структуру, досить складну і "безладну". Але розміри кристалів дуже малі в порівнянні з розмірами тіла. Тому на практиці до сталі так само, як і до інших конструкційних матеріалів, можуть бути застосовані згадані вище гіпотези.

Припущення про відносну малість деформацій досить добре узгоджуються з реальними властивостями багатьох конструкційних матеріалів, а особливо сталі. У межах пружності відносна деформація подовження сталі звичайно не перевищує величину  $\sigma_T/E$  ( $\sigma_T$  – границя плинності;  $E$  – модуль пружності), тобто величину, близьку до 0,001 (0,1 %).

Основними поняттями теорії пружності є напруження і деформації.

**Напруження** є мірою інтенсивності внутрішніх сил пружності, або сил контактної взаємодії окремих частин тіла. Воно має деяку величину (кількісну характеристику, вимірювану в МПа, Н/мм<sup>2</sup> або інших аналогічних одиницях) і визначений напрямок як вектор.

Положення нескінченно малої площадки  $dF$ , в якій воно виникає, визначається просторовими координатами точки  $(x, y, z)$  і напрямком нормалі до площадки  $v$  (рис. 1.1).

Вектор повного напруження  $p$  (спрямований у загальному випадку довільно відносно площадки) можна подавати розкладеним у трьох

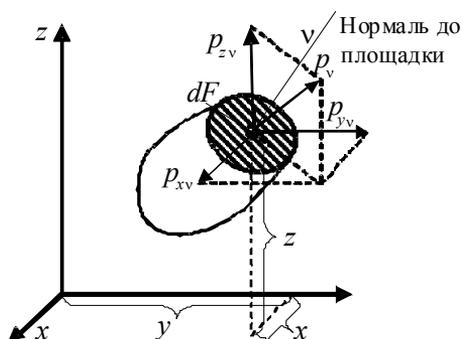


Рис. 1.1. Елементарна площадка в тілі та напруження в ній

напрямок, паралельних координатним осям  $x$ ,  $y$  і  $z$ . Величини складових позначимо буквами  $p_{xv}$ ,  $p_{yv}$  і  $p_{zv}$ . Індеси вказують напрямок проекції та напрямок нормалі до площадки, в якій виникає дане напруження.

Найчастіше орієнтуються на три взаємно перпендикулярні площадки ( $x$ ,  $y$  і  $z$ ), проведені через дану точку паралельно координатним площинам, тобто перпендикулярні до координатних осей (рис. 1.2). Складові повних напружень у цих площадках позначаються:

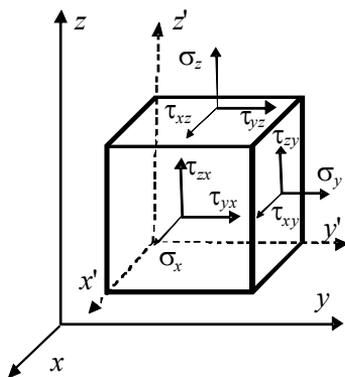


Рис. 1.2. Розрахункова схема елемента тіла

- у площадці, перпендикулярній до осі  $x$ , через  $\sigma_x, \tau_{yx}, \tau_{zx}$ ;
- у площадці, перпендикулярній до осі  $y$ , через  $\sigma_y, \tau_{xy}, \tau_{zy}$ ;
- у площадці, перпендикулярній до осі  $z$ , через  $\sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ .

Цю сукупність напружень прийнято представляти у вигляді матриці (тензора)

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

Діагональні компоненти називаються нормальними компонентами тензора напружень, а інші – дотичними.

У прийнятих позначеннях нормальних і дотичних складових напруження індекси вказують, у напрямку якої осі береться складова напруження і паралельно якій осі спрямована нормаль площадки, в якій діє дане напруження. Для нормальних складових ці індекси збігаються, тому їх прийнято позначати одним індексом. Наприклад,  $\sigma_{xx} = \sigma_x$  – нормальне напруження, паралельне осі  $x$ , що діє на площадці, нормаль до якої також паралельна осі  $x$ .

Матриця напружень симетрична по відношенню до головної діагоналі (закон парності дотичних напружень), тобто  $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ,  $\tau_{yz} = \tau_{zy}$  і т. д. Нормальні напруження, що розтягують матеріал, вважаються позитивними, а стискаючі – негативними. Дотичні напруження вважаються позитивними, якщо вони прагнуть зменшити прямиий двограний кут у координатній системі біля початку координат. На рис. 1.2 показані позитивні напрямки напружень.

Тензор напружень цілком визначає напружений стан матеріалу в області даної точки. Він має інваріанти, що не залежать від обраної системи координат. Одним з таких інваріантів є *еквівалентне напруження, або інтенсивність напружень*:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)}$$

Об'єктивною характеристикою напруженого стану в даній точці є поняття *головних напружень*, що відповідають таким напрямкам системи координат, в яких відмінні від нуля тільки діагональні компоненти тензора напружень:

$$T_{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{vmatrix}.$$

При цьому  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ .

*Деформації* – це відносна зміна довжини нескінченно малого лінійного елемента, виділеного в даній точці в даному напрямку. Аналогічно напруженням для деформацій існує поняття тензора деформацій

$$T_{\varepsilon} = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{vmatrix}.$$

Він має аналогічні властивості, що і тензор напружень, тобто він симетричний відносно головної діагоналі та має ряд інваріантів, зокрема інтенсивність деформацій:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + 6(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{xz}^2 + \varepsilon_{yz}^2)}.$$

Компоненти тензора деформацій зв'язані з компонентами вектора переміщень диференціальними співвідношеннями типу

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U_x}{\partial x}; \quad \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x} \right);$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial U_y}{\partial y}; \quad \varepsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_z}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial z} \right);$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial U_z}{\partial z}; \quad \varepsilon_{xz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_x}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial x} \right),$$

де  $U_x, U_y, U_z$  – складові переміщень точок тіла в напрямку осей  $x, y, z$ ;  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  – відносні подовження вздовж відповідних осей;  $\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{xz}$  – відносні зсуви (зміни початково прямих кутів між напрямками  $x$ - $y, y$ - $z, x$ - $z$  відповідно).

Відносні зсуви також позначаються як  $\gamma_{xy}$ ,  $\gamma_{xz}$  і  $\gamma_{yz}$ .

**Основні рівняння теорії пружності.** Компоненти деформацій повинні задовольняти шість рівнянь суцільності (або нерозривності) Сен-Венана:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y}; \quad \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial z \partial y};$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xz}}{\partial x \partial z}; \quad \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y \partial z} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} - \frac{\partial \gamma_{zy}}{\partial x} \right);$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x \partial z} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial \gamma_{zy}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} - \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} \right); \quad \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x \partial y} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right).$$

Компоненти напруження мають задовольняти диференціальні рівняння рівноваги

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X = 0; \quad \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y = 0;$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + Z = 0,$$

де  $X, Y, Z$  – компоненти об'ємної сили.

**Залежність між напруженнями і деформаціями в межах пружності.** Пружністю називається властивість матеріалу відновлювати після зняття навантаження початкові розміри і форму тіла, виробленого з даного матеріалу.

Задачею теорії пружності є точний кількісний опис напружено-деформованого стану пружного тіла, що піддається зовнішньому впливу. В області малих деформацій пружного тіла діє закон Гука, що для ізотропного тіла має такий вигляд:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)]; \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)]; \quad \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_y + \sigma_x)];$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}; \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}; \quad \gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G},$$

де  $E$  – модуль пружності;  $G = E/[2(1 + \mu)]$  – модуль зсуву;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона.

**Плоска задача теорії пружності.** До неї відносять задачу про *плоский напружений стан* і задачу про *плоску деформацію*.

Для тонкостінних елементів типу пластин і оболонки, коли поверхні вільні від зовнішнього навантаження, тензор напружень спрощується за рахунок того, що можна знехтувати компонентами  $\sigma_z, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ . Це так званий *плоский напружений стан*.

Для довгого прямого циліндра за умови, коли поздовжня складова переміщення відсутня (дорівнює нулю), складові деформації у напрямку осі  $z$ :  $\varepsilon_z; \gamma_{xz}; \gamma_{xy}; \tau_{xz} = 0; \tau_{yz} = 0; \sigma_z = \mu(\sigma_x + \sigma_y)$ . Такий стан називається *плоским деформованим*.

Для балкових і стрижневих конструкцій дуже часто компоненти тензора напружень, що діють уздовж поздовжньої осі, набагато перевершують усі інші. Це лінійний (одновісний) напружений стан.

**Елементи теорії пластичності.** У теорії пружності розглядається тіло з абсолютно пружного матеріалу. У реальних матеріалах під час навантаження можуть утворюватися як пружні, так і непружні деформації. Пружні деформації ( $\varepsilon_{ij}^e$ ) – оборотні, тобто вони зникають, якщо зникає причина, що їх утворила. Непружні деформації поділяються на пластичні ( $\varepsilon_{ij}^p$ ) миттєвої (короткочасної) пластичності й повзучості ( $\varepsilon_{ij}^c$ ), або дифузійної пластичності. Тензор деформацій представляється сумою:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^c.$$

Пружні деформації зв'язані з напруженнями законом Гука. Зв'язок непружних деформацій з напруженнями визначається відповідними теоріями, що узагальнюють експериментальні результати, отримані під час простих випробувань (розтяг, стиск, крутіння). Поява пластичних деформацій пов'язана з рівнем напруженого стану, що визначається інваріантом  $\sigma_i$  (еквівалентним напруженням, або інтенсивністю напружень). При  $\sigma_i < \sigma_T$ , де  $\sigma_T$  – границя плинності матеріалу, миттєві пластичні деформації не утворюються.

Пластичні деформації з'являються миттєво при відповідному рівні напружень, а деформації повзучості розвиваються в часі. Їхній розвиток обумовлений дифузійними процесами в матеріалі, тому вони суттєво залежать від температури.

Точне розв'язування задач теорії пружності й, тим більше, пластичності пов'язане зі значними математичними труднощами і розроблене для невеликого числа порівняно простих випадків. Тому звичайно використовують наближені методи розв'язання. Зокрема, у зв'язку з використанням ЕОМ широке застосування знайшов МСЕ.

## 1.2. Основні поняття та визначення теорії зварювальних напружень і деформацій

Теорія зварювальних напружень і деформацій оперує основними поняттями механіки твердого тіла, відомими з курсів опору матеріалів і теорії пружності: напруження, деформації та переміщення.

**Напруженнями** ( $\sigma$ ) називається міра інтенсивності внутрішніх сил пружності, тобто контактної взаємодії окремих частин тіла, на які воно може бути розділене перерізами. Стандарт ДСТУ 2825–94 визначає, що це є вектор внутрішніх сил, діючих на одиницю площі даного елементарного об'єму при стягуванні його у точку.

Зварювальні напруження належать до **власних**, оскільки існують у тілі за відсутності зовнішніх сил. Особливістю всіх власних напружень є їх взаємна зрівноваженість у будь-якому перерізі тіла. При цьому головний вектор  $P$  і головний момент  $M$  усіх внутрішніх сил відносно будь-якої точки перерізу дорівнюють нулю. За наявності зовнішніх закріплень внутрішні сили зрівноважуються реакціями закріплень.

Напруження в прилеглий до шва зоні, викликані фізико-механічними процесами, що відбуваються при зварюванні, зокрема пластичними деформаціями і структурними перетвореннями, називаються **активними**. Вони і є причиною деформації всієї конструкції. Напруження, що діють далеко від з'єднання і в закріпленнях, зрівноважують активні й називаються **реактивними**.

Залежно від часу існування напруження можуть бути тимчасовими і залишковими. **Тимчасові** існують тільки під час зварювання і змінюються разом зі зміною температури. **Залишкові** напруження обумовлені незворотними процесами, що відбуваються при зварюванні, й залишаються після закінчення зварювання і повного охолодження конструкції.

Залежно від об'єму зрівноваження розрізняють напруження першого, другого і третього роду.

Напруження **першого роду** зрівноважуються в об'ємах, сумірних з об'ємом усієї конструкції. Вони мають певну орієнтацію відносно осей зварного з'єднання. Надалі розглядатимуться лише ці напруження.

Напруження **другого роду** зрівноважуються в мікроскопічних об'ємах, сумірних з окремими зернами металу. Напруження **третього роду** зрівноважуються в субмікроскопічних об'ємах, сумірних з параметром кристалічної ґратки. Напруження другого і третього роду не мають певної орієнтації відносно осей конструкції, вона змінюється при переході від одного зерна до іншого. Дослідження цих напружень належить до галузі металофізики, в механіці вони не розглядаються.

Напруження першого роду залежно від орієнтації щодо осей шва прийнято розділяти на **поздовжні** ( $\sigma_x$ ), що направлені вздовж осі шва, **поперечні** ( $\sigma_y$ ), направлені поперек осі шва в площині елемента, і напруження в напрямку **товщини** ( $\sigma_z$ ), які направлені поперек осі шва перпендикулярно

до поверхні елемента. При цьому необов'язково, щоб напрям осі шва збігався з напрямом осі зварного елемента (рис. 1.3).

Залежно від характеру поля напружень розрізняють лінійний, плоский і об'ємний напружені стани.

За умови  $\sigma_x \gg \sigma_y \cong \sigma_z$  напруженнями  $\sigma_y$  і  $\sigma_z$  можна нехтувати та розглядати напружений стан як **лінійний**. У літературі зустрічається також термін "одновісний напружений стан". У реальних зварних конструкціях такий стан зустрічається рідко. Близький до лінійного напружений стан створюється в балкових конструкціях, в яких один з розмірів істотно більший від двох інших. При  $\sigma_x \cong \sigma_y \gg \sigma_z$  напруженнями  $\sigma_z$  можна нехтувати. У цьому випадку маємо плоский напружений стан. Стан, близький до плоского, виникає при зварюванні листових конструкцій. При  $\sigma_x \cong \sigma_y \cong \sigma_z$  напружений стан – **об'ємний**, який має місце при зварюванні з'єднань великої товщини.

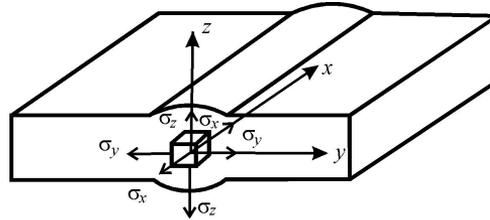


Рис. 1.3. Орієнтація осей у зварному з'єднанні

**Деформацією** ( $\varepsilon$ ) у теорії пружності називається відносна зміна довжини нескінченно малого лінійного елемента тіла, виділеного в даній точці за даним напрямом. У ДСТУ 2825–94 деформації визначаються як відносна величина взаємного переміщення точок об'єкта в результаті його деформації. Історично склалося так, що в теорії зварювальних напружень і деформацій під цим терміном розуміють не тільки відносну зміну розміру або відносну величину переміщень у даній точці, але й прогини, кути повороту, зміну лінійних розмірів конструкції і т. под., тобто абсолютні значення переміщень точок і кутів повороту перерізів конструкції. Як правило, коли мова йде про деформації металу, використовують відносну величину, для характеристики деформацій конструкції або окремих її частин (вузлів) – абсолютні величини переміщень.

За тими ж ознаками, що і зварювальні напруження, деформації при зварюванні розділяють на **тимчасові й залишкові, поздовжні та поперечні**. Крім того, за причинами утворення деформації поділяють на температурні, структурні й силові (механічні).

Під **температурними деформаціями** розуміють вільне теплове розширення при нагріванні й скорочення при охолодженні. Позначатимемо ці деформації  $\varepsilon_q$ . **Структурні деформації** викликані зміною питомого об'єму металу внаслідок структурних перетворень, їх позначатимемо  $\varepsilon_s$ .

Температурні й структурні деформації не викликають появу напружень, якщо вони розвиваються вільно. На відміну від них, **силові (механічні) деформації** ( $\varepsilon$ ) завжди пов'язані із силовою дією на метал. Силкові деформації утворюються при дії зовнішніх сил (навантажень), зокрема реакцій закріплень

конструкції, якщо зміна температури і структурні перетворення відбуваються в закріпленому стані. Основною ознакою наявності силових деформацій є відмінність розміру у вільному (ненавантаженому) стані й дійсного розміру (при дії навантаження).

Силові деформації в загальному випадку складаються з *пружних та пластичних*, тобто  $\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p$ .

Співвідношення між цими складовими деформацій залежить від величини діючих сил та властивостей матеріалу. При навантаженні невеликою силою  $P$  за нормальної температури в металі будуть виникати тільки пружні деформації  $\varepsilon_e$ ; зі збільшенням навантаження пружні деформації зростають і досягають граничного значення  $\varepsilon_p$ , відповідного границі плинності  $\sigma_1$ . Подальше збільшення сили  $P$  призводить до появи і збільшення пластичної складової деформацій  $\varepsilon_p$ . При високій температурі метали і сплави втрачають свої пружні властивості. Наприклад, у низьковуглецевій сталі при температурі  $T = 600$  °С границя плинності наближається до нуля, тому навіть невелика сила викликає пластичні деформації, пружна складова при цьому практично відсутня.

Пружна складова силової деформації залежить тільки від навантаження в даний момент і пов'язана з напруженнями законом Гука  $\varepsilon_e = \sigma/E$ , де  $\sigma$  – напруження;  $E$  – модуль пружності матеріалу. Пластичні деформації визначаються всією історією навантаження, тому між ними і напруженнями такої залежності немає. Так, напруження після розтягування стрижня до пластичного стану і зняття навантаження дорівнюють нулю, тоді як пластичні деформації  $\varepsilon_p > 0$ . Більш того, якщо такий стрижень тепер завантажити силою стиску в межах пружних деформацій, напруження стиску в стрижні поєднуюватимуться з пластичними деформаціями подовження.

Для того щоб уникнути плутанини, надалі дотримуватимемося наступної термінології.

Напруження **розтягу** чи **стиску** називатимемо відповідно до характеру сили, що викликає ці напруження; силові деформації, або просто деформації, – деформаціями **подовження** або **укорочення** відповідно до характеру зміни лінійного розміру; температурні та структурні деформації – деформаціями **розширення** і **скорочення**. Особливо слід звертати увагу на різницю між подовженням та розширенням, укороченням і скороченням, оскільки температурні деформації розширення часто з'єднуються із силовими деформаціями укорочення та напруженнями стиску і навпаки.

**Зварювальні переміщення**, які зазвичай називаються деформаціями конструкцій, поділяють на загальні й місцеві. Під **загальними деформаціями** (переміщеннями) розуміють такі, які призводять до зміни форми і розмірів усієї конструкції. Це – зміни габаритних розмірів (укорочення  $\Delta$ ) і форми (вигин осі  $f$ ) (рис. 1.4).

**Місцеві деформації** (переміщення), на відміну від загальних, змінюють форму і розміри окремих елементів конструкції. До них належать кутові деформації ("грибоподібність" полиць, ребристість полотна) та деформації втрати стійкості (бухтинуватість полотен, хвилястість крайок тощо) (рис. 1.5).

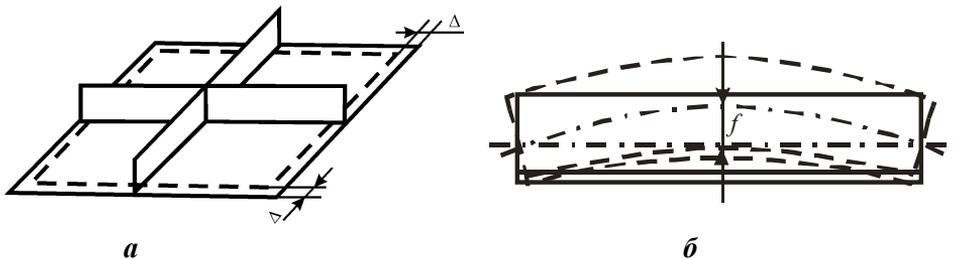


Рис. 1.4. Загальні деформації конструкцій:  
а – укорочення; б – вигин

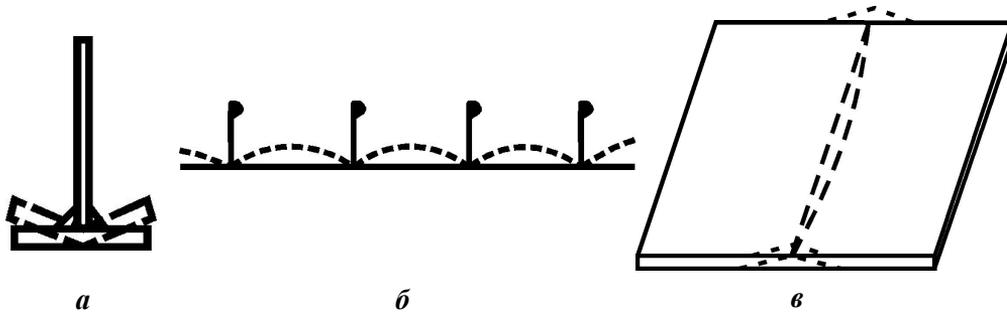


Рис. 1.5. Місцеві деформації конструкцій:  
а – "грибоподібність" полиці; б – ребристість полотна; в – "будиночки" по кінцях стику

### 1.3. Механізм утворення деформацій при нагріванні

При зварюванні метал, що нагрівається, в зоні з'єднання розширяється (температурні деформації). Але зона нагрівання оточена відносно мало нагрітим та достатньо жорстким металом, який перешкоджає розширенню нагрітого. У результаті з'являються реактивні сили, які викликають силові (механічні) деформації. Для зварювання характерні високий ступінь нерівномірності нагрівання (великі температурні й механічні деформації) та знижена жорсткість (малий запас пружності) нагрітого металу. Тому деформації, що виникають у зоні з'єднання, в основному пластичні, тобто незворотні. При охолодженні пластично деформований метал прагне скорочуватися порівняно з вихідним станом, унаслідок чого з боку недеформованого металу з'являються реактивні сили, які розтягують зону з'єднання. Решта конструкції цими ж силами стискається.

Механізм та основні причини утворення зварювальних напружень і деформацій зручно розглянути на простому прикладі нагрівання стрижня в різних умовах закріплення.

1. Стрижень, який має один кінець, закріплений, а другий може вільно переміщатися при нагріванні й охолодженні (рис. 1.6).

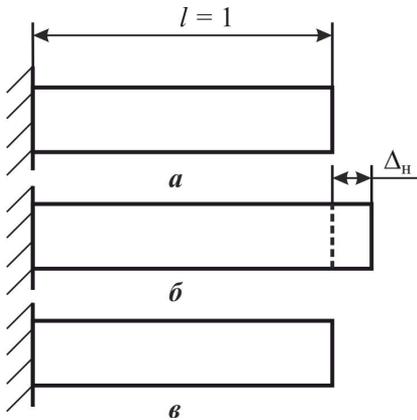


Рис. 1.6. Схема деформації вільного стрижня:  
а – вихідний стан; б – після нагрівання; в – після охолодження

Переміщення кінця стрижня позначимо  $\Delta$ . При нагріванні до температури  $T$  (початкову температуру візьмемо такою, що дорівнює 0) стрижень унаслідок теплового розширення подовжиться на величину температурної деформації  $\alpha T$ , де  $\alpha$  – температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР). Таким чином, переміщення при нагріванні  $\Delta_n = \alpha T$  (тут і надалі розглядатимемо тільки зміну поздовжнього розміру стрижня довжиною  $l = 1$ ). Це переміщення є температурною деформацією. Оскільки переміщення відбувається абсолютно вільно, то механічні деформації та пов'язані з ними напруження відсутні, тобто  $\varepsilon_n = 0$  і  $\sigma_n = 0$  (тут і надалі індекс "н" показує стан після нагрівання, "о" – після охолодження).

Після охолодження стрижня до вихідної температури він, очевидно, повернеться в початковий стан, залишкові переміщення, деформації та напруження відсутні, тобто  $\Delta_o = 0$ ;  $\varepsilon_o = 0$ ;  $\sigma_o = 0$ .

Таким чином, **саме по собі нагрівання, якщо воно відбувається за відсутності перешкод тепловому розширенню, залишкових деформацій і напружень не викликає**. Тут і надалі припускати будемо, що нагрівання та охолодження не супроводжуються структурними перетвореннями, які можуть призвести до зміни питомого об'єму і появи структурних деформацій.

2. Стрижень, який має один кінець, закріплений, а другий упирається в жорстка стінку, але не закріплений у ній (рис. 1.7).

У таких умовах стрижень не може подовжуватися, але скорочується вільно. При нагріванні до температури  $T$  унаслідок теплового розширення виникають температурні деформації  $\varepsilon_\alpha = \alpha T$ , але розширенню зрештою перешкоджає жорстка стінка. Тиск стінки на стрижень (реактивна сила) викликає в ньому силові деформації  $\varepsilon_n$ , однакові за величиною, але протилежні за знаком температурним деформаціям  $\varepsilon_\alpha$ , тобто

$$\varepsilon_n = -\varepsilon_\alpha = -\alpha T. \quad (1.1)$$

Переміщення кінця стрижня, що дорівнює сумі силових і температурних деформацій, відсутнє, тобто  $\Delta_n = \varepsilon_n + \varepsilon_\alpha = 0$ .

Силові деформації, що виникли в стрижні, залежно від ступеня нагрівання можуть бути пружними, пружно-пластичними і пластичними, тобто  $\varepsilon_n = \varepsilon_{en} + \varepsilon_{pn}$ . Температуру нагрівання  $T$ , при якій крім пружних деформацій

з'являються пластичні, можна визначити з формули (1.1). Якщо замість  $|\varepsilon_H|$  підставити  $\varepsilon_T$ , тобто відносну деформацію, що відповідає границі плинності, отримаємо  $\varepsilon_T = \alpha T$ , або після підстановки  $\varepsilon_T = \sigma_T / E$  і перетворень

$$T = \frac{\sigma_T}{E\alpha}.$$

Підрахуємо значення цієї температури для низьковуглецевої сталі, в якій  $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ;  $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ ;  $\sigma_T = 240 \text{ МПа}$ :

$$T = \frac{240}{2 \cdot 10^5 \cdot 12 \cdot 10^{-6}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Таким чином, при нагріванні стрижня з низьковуглецевої сталі в жорсткому закріпленні до температури вище  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  пружні деформації досягають своєї межі та з'являються пластичні деформації. Величина пластичної складової тим вища, чим вища температура нагрівання. Пружна складова також може дещо збільшуватися за рахунок зміцнення металу при деформуванні, але для спрощення розрахунків цим зміцненням можна нехтувати:  $\varepsilon_T = \sigma_T / E$ .

При нагріванні у низьковуглецевих і низьколегованих сталях помітно зменшується границя плинності й при  $T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$  вони майже втрачають свою пружність ( $\varepsilon_T \cong 0$ ), тобто силові деформації повністю складаються з пластичної складової.

У загальному випадку можна записати силову деформацію як суму пружної та пластичної складових:  $\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p$ .

Напруження, що виникли в стрижні, можна знайти через пружну деформацію, скориставшись законом Гука  $\sigma = E \varepsilon_e$ .

При охолодженні стрижня до початкової температури температурні деформації зникають. При цьому знімається тиск стінки на стрижень, а отже, зникає і пружна складова силових деформацій. Пластична складова силових деформацій залишається після зняття зусилля, що їх викликає. Тому стрижень стане коротшим на величину  $\varepsilon_{pn}$ . Це і є залишкові деформації.

**Таким чином, залишкові деформації є наслідком пластичних деформацій при нагріванні, які з'являються в результаті теплового розширення в закріпленому стані.**

3. Стрижень, який має жорстко закріплені обидва кінці, не може ні збільшувати, ні зменшувати свою довжину (рис. 1.8).

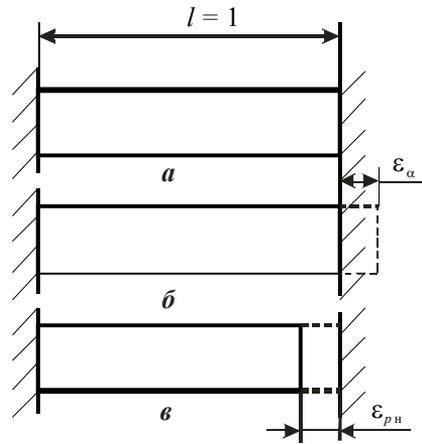


Рис.1.7. Схема деформації стрижня, що упирається в жорстку стінку: *a* – вихідний стан; *б* – після нагрівання; *в* – після охолодження

При нагріванні у такому стрижні відбуваються такі ж процеси, як і у попередньому, тобто  $\varepsilon_n = -\varepsilon_{\text{ох}} = -\alpha T_n$ ;  $\varepsilon_n = \varepsilon_{\text{ен}} + \varepsilon_{\text{рн}}$ .

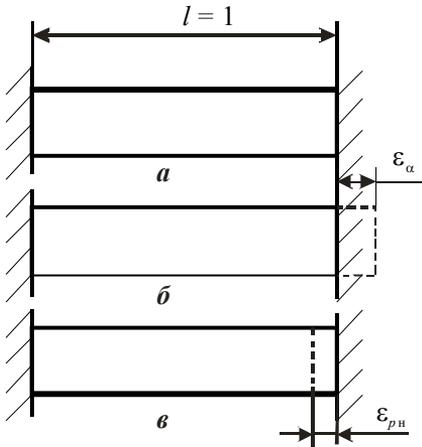


Рис. 1.8. Схема деформації стрижня, жорстко закріпленого обома кінцями: *a* – вихідний стан; *б* – після нагрівання; *в* – після охолодження

Якщо стрижень охолоджувати до початкової температури, він прагнучиме зменшити свій розмір на величину пластичних деформацій, що виникли при нагріванні  $\varepsilon_{\text{рн}}$ . Оскільки це зменшення розміру неможливе, то в стрижні з'являються силові деформації подовження (як наслідок дії реакцій закріплення). Очевидно, величина цих деформацій протилежна за знаком пластичним деформаціям при нагріванні, тобто

$$\varepsilon_o = -\varepsilon_{\text{рн}} \quad (1.2)$$

Залежно від величини  $\varepsilon_{\text{рн}}$  силові деформації при охолодженні можуть бути або пружними ( $|\varepsilon_{\text{рн}}| \leq \varepsilon_T$ ), або пружно-пластичними ( $|\varepsilon_{\text{рн}}| > \varepsilon_T$ ). У загальному випадку можна записати

$$\varepsilon_o = \varepsilon_{\text{ео}} + \varepsilon_{\text{ро}} \quad (1.3)$$

За характером це деформації подовження. З формул (1.2) і (1.3) отримуємо

$$-\varepsilon_{\text{рн}} = \varepsilon_{\text{ео}} + \varepsilon_{\text{ро}}, \quad (1.4a)$$

або

$$\varepsilon_{\text{ео}} = -(\varepsilon_{\text{рн}} + \varepsilon_{\text{ро}}), \quad (1.4б)$$

тобто пружні деформації при охолодженні стрижня в закріпленому стані дорівнюють алгебраїчній сумі пластичних деформацій при нагріванні та охолодженні й протилежні їм за знаком. Якщо  $\varepsilon_{\text{ео}} \neq 0$ , то з виразу (1.4a)  $|\varepsilon_{\text{рн}}| > |\varepsilon_{\text{ро}}|$ , тобто, якщо метали мають пружні властивості, то пластичні деформації при охолодженні за модулем менші від пластичних деформацій при нагріванні. Різниця цих величин і обумовлює наявність залишкових деформацій у стрижні після нагрівання й охолодження. Залишкові пластичні деформації – це деформації укорочення (знак їх відповідає знаку пластичних деформацій при нагріванні).

**Таким чином, після нагрівання й охолодження стрижня в стані жорсткого закріплення його кінців у ньому з'являються залишкові пластичні деформації укорочення. Вони дорівнюють алгебраїчній сумі пластичних деформацій, що виникають при нагріванні та охолодженні.**

У стрижні існують також пружні залишкові деформації, але це – деформації подовження. У нашому випадку залишкові пластичні й залишкові пружні деформації рівні за модулем. Ця рівність дотримується тільки при абсолютній жорсткості закріплення. Якщо закріплення має кінцеву жорсткість, як у більшості реальних конструкцій, то залишкові пластичні деформації за модулем будуть більші від пружних  $|\varepsilon_{p\text{ зал}}| > |\varepsilon_{e\text{ зал}}|$ .

#### 1.4. Усадкова сила й об'єм поздовжнього укорочення та основні причини їх утворення

У наявності залишкових деформацій укорочення в закріпленому стрижні легко переконатися, якщо зняти закріплення на одному з кінців (рис. 1.9).

За рахунок пружних деформацій, які утворилися в стрижні після охолодження, він зменшить свою довжину на величину цих деформацій, тобто  $\Delta_{\text{зал}} = -\varepsilon_{e0} = \varepsilon_{pn} + \varepsilon_{po}$  (тут знак мінус відповідає укороченню).

Залишкові напруження в стрижні після охолодження можна визначити через пружні залишкові деформації:

$\sigma_{\text{зал}} = E\varepsilon_{e0}$ . Оскільки в стрижні одиничної довжини  $\varepsilon_{e0} = -\Delta_{\text{зал}}$ , то  $\sigma_{\text{зал}} = -E\Delta_{\text{зал}}$ .

Аналогічний напружений стан стрижня можна отримати, приклавши до нього силу розтягу  $P$ . Сила, що створює в стрижні напруження  $\sigma_{\text{зал}}$ ,  $P = \sigma_{\text{зал}} F_{\text{ст}}$ , або, підставивши  $\sigma_{\text{зал}} = -E\Delta_{\text{зал}}$ , отримаємо  $P = -E\Delta_{\text{зал}} F_{\text{ст}}$ .

Силу  $P$  називають **усадковою**, оскільки вона є наслідком "усадки" стрижня (термін з'явився за аналогією з ливарною усадкою). Також її називають фіктивною, або еквівалентною силою.

Добуток  $\Delta_{\text{зал}} F_{\text{ст}}$  має фізичний сенс **об'єму поздовжнього укорочення** стрижня (див. рис. 1.9). Позначимо цей об'єм через  $v$ . Тоді  $P = -Ev$ . Іноді замість об'єму використовується термін "сума залишкових пластичних деформацій укорочення" (роботи школи Н.О. Окерблома).

Таким чином, при закріпленні кінців стрижня його залишкові напружений і деформований стани після нагрівання та охолодження в рівній мірі характеризуються усадковою силою  $P$ , що розтягує стрижень, і об'ємом поздовжнього укорочення стрижня  $v$ .

У даному випадку мається на увазі відносний (погонний) об'єм, тобто такий, що припадає на одиницю довжини стрижня. При  $l \neq 1$  повний об'єм визначатиметься як  $V = vl$ .

Знаходячись у закріпленому (розтягнутому) стані під дією усадкової сили  $P$ , стрижень з такою ж силою діє на закріплення, яке перешкоджає його скороченню. Якщо стрижень, що нагрівається, є частиною якої-небудь

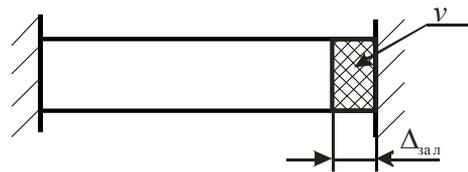


Рис. 1.9. Переміщення кінця стрижня після зняття закріплення

конструкції, то після охолодження цього стрижня вся конструкція знаходиться в напруженому і деформованому стані. Наприклад, у системі стрижнів (рис. 1.10,а), які жорстко скріплені між собою, результатом нагрівання та охолодження стрижня 1 (б) будуть зміни довжин та вигини стрижнів 2 і 3 (в). Напруження і деформації цих стрижнів обумовлені утворенням усадкової сили  $P$  (див. рис. 1.10,б) та визначаються її величиною і положенням.

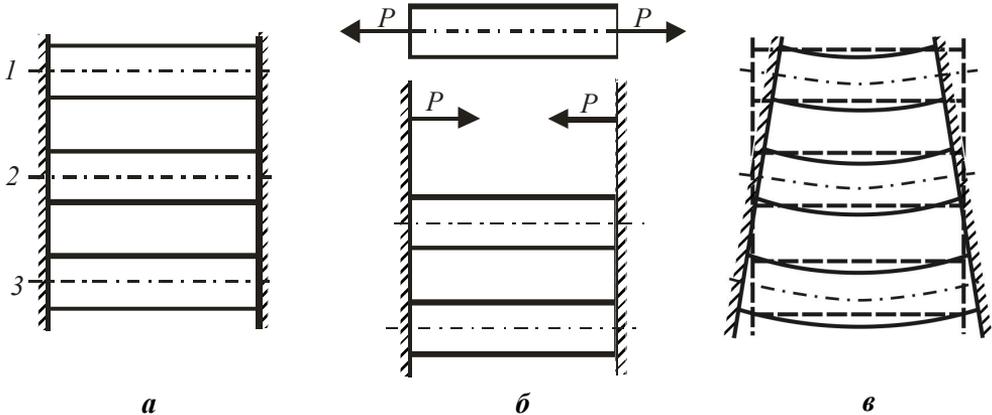


Рис. 1.10. Схема деформації системи стрижнів після нагрівання та охолодження верхнього стрижня

У системі може нагріватися не один, а декілька стрижнів. Якщо при цьому основна маса стрижнів залишиться холодною, то кожен зі стрижнів, що нагрівався, отримає деякий об'єм залишкового укорочення  $V_i$  та утворить деяку силу  $P_i$ . При цьому деформація системи визначиться рівнодіючою всіх усадкових сил або сумою всіх об'ємів.

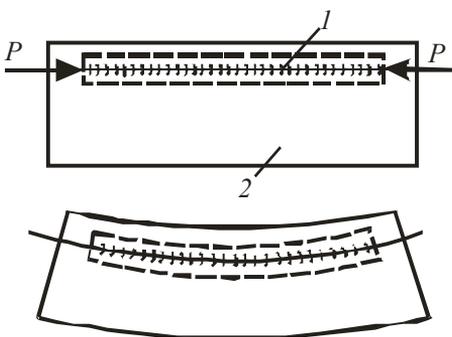


Рис. 1.11. Схема деформації пластини при наплавленні валика (зварюванні шва):

1 – зона нагрівання до високих температур; 2 – частина зварного елемента, температура якої мало змінюється при зварюванні

Зварний шов і прилеглі до нього ділянки основного металу, що нагріваються при зварюванні до високої температури, можна умовно розглядати як систему стрижнів, які нагріваються та охолоджуються в умовах закріплення. Це закріплення створюється прилеглими шарами основного металу, температура якого мало змінюється в процесі зварювання. Такий шов-стрижень отримує залишкові пластичні деформації укорочення, внаслідок чого деформується весь зварний вузол (рис. 1.11). Величина деформацій елемента (зміна його довжини і стрілки прогину) визначається величиною усадкової сили  $P$  (або об'єму  $V$ ) та її розташуванням.

Такий метод визначення зварювальних деформацій і напружень у конструкції, при якому дія шва на конструкцію замінюється дією усадкової сили, запропонований уперше Г.О. Ніколаєвим, отримав назву методу усадкових (фіктивних) сил. Він дуже зручний для якісного аналізу очікуваних зварювальних деформацій, оскільки дає наочне уявлення про механіку дії зварного з'єднання на конструкцію. Для кількісних розрахунків зручніше як параметр такої дії використовувати об'єм укорочення, оскільки розрахункові формули при цьому, як буде показано далі, – простіші.

На підставі розглянутого можна сформулювати наступні **основні причини** утворення залишкових напружень і деформацій при зварюванні та основні чинники, що впливають на їх величину.

1. **Нерівномірне нагрівання конструкції** обумовлює поведінку з'єднання в конструкції як деякого стрижня, який нагрівається в умовах жорсткого закріплення.

Основним чинником, що визначає ступінь нагрівання при зварюванні, є погонна енергія, величина якої залежить від параметрів режиму: зварювального струму, напруги на дузі, ефективного ККД процесу нагрівання і швидкості зварювання. Приблизно її можна визначити також через площу наплавленого металу  $F_n$ . У галузевій суднобудівній методиці (за даними С.А. Кузьміна) використовується залежність  $q_n = \theta F_n$ , де  $\theta$  – коефіцієнт пропорційності, який дорівнює  $64500 \text{ Дж/см}^3$  для ручного дугового і зварювання під флюсом та  $37500 \text{ Дж/см}^3$  – для зварювання у вуглекислому газі. Площа наплавленого металу розраховується за геометричними параметрами швів.

Для кутових швів таврових з'єднань без скосу крайок з катетом  $k$  ця площа може бути визначена як  $F_n = k_o \cdot \frac{k^2}{2}$ , де  $k_o$  – коефіцієнт, що враховує опуклість шва. Для ручного дугового і зварювання в захисних газах його можна прийняти  $k_o = 1,3 \dots 1,4$ , для зварювання під флюсом  $k_o = 1,1 \dots 1,2$ .

У стикових з'єднаннях площа наплавленого металу знаходиться підсумовуванням площі обробки крайок та площі опуклої частини шва. Їх можна розрахувати за геометричними параметрами швів, які наведені у відповідних стандартах на конструктивні елементи – ГОСТ 8713–79, ГОСТ 5264–80 і ГОСТ 14771–76, залежно від типу з'єднання та товщини основного металу. Площа опуклої частини є  $F_o = 3/4 eg$ , де  $e$  і  $g$  – ширина шва та висота опуклості відповідно.

2. **Розширення металу при нагріванні** – саме з цією властивістю пов'язана поява температурних і силових деформацій при нерівномірному нагріванні. Тут основні чинники – властивість усіх металів розширюватися при нагріванні, яка визначається ТКЛР  $\alpha(1/^\circ\text{C})$ , і об'ємна теплоємність  $c_p (\text{Дж}/(\text{см}^3 \cdot ^\circ\text{C}))$ , що визначає ступінь підвищення температури металу в результаті введення тепла при зварюванні. Середні значення характеристик теплофізичних властивостей в інтервалі температур  $20 \dots 600 \text{ }^\circ\text{C}$  для деяких матеріалів наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1. Основні теплофізичні властивості деяких металів і сплавів

| Матеріал                                   | $\alpha \cdot 10^6, 1/^\circ\text{C}$ | $c_p, \text{Дж}/(\text{см}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ | $\alpha/c_p, \text{см}^3/\text{Дж}$ |
|--|---------------------------------------|---|-------------------------------------|
| Низьковуглецева та<br>низьколегована сталь | 13,25                                 | 4,10  | 3,20                                |
| X18H10T                                    | 17,50                                 | 4,10  | 4,30                                |
| AMг6                                       | 26,00                                 | 2,54  | 10,20                               |

**3. Пластичні деформації металу в зоні нагрівання до високої температури** незворотні й не зникають самі по собі після зварювання та охолодження конструкції.

Оскільки всі основні причини майже завжди присутні при зварюванні реальних конструкцій, принаймні дуговими методами, можна сказати, що поява зварювальних деформацій і напружень властива самій природі процесу й завдання регулювання їх величини є одним з основних завдань у діяльності фахівця зварювального виробництва.

### 1.5. Основні спрощення та гіпотези інженерної теорії зварювальних деформацій

Для зручності дослідження й спрощення інженерних розрахунків задачу визначення зварювальних деформацій і напружень прийнято ділити на дві складові: термомеханічну, в якій розглядаються деформації металу в зварному з'єднанні, й деформаційну, в якій розглядаються деформації та напруження в конструкції.

У першій частині, *термомеханічній*, визначаються деформації та напруження, які виникають у металі шва і прилеглих ділянках основного металу, що нагріваються до високої температури, тобто в активній зоні. Основними вихідними даними тут є температурне поле при зварюванні й теплофізичні властивості металу. Методи розв'язання цієї задачі – суто зварювальні. У результаті знаходять параметри механічної (силової) дії зварного з'єднання на конструкцію: усадкові сили  $P$  або об'єми укорочення  $V$  (іноді кут зламу, подовжній зсув крайок тощо). Розв'язання цієї частини складають основний зміст теорії зварювальних деформацій і напружень.

У другій частині, *деформаційній*, визначаються переміщення (деформації) всієї конструкції, що викликані зварюванням даного з'єднання. Основні вихідні дані – параметри, які визначені в термомеханічній задачі ( $P$ ,  $V$  та деякі інші), й геометричні розміри і форма конструкції. Методи розв'язання – це методи механіки (опір матеріалів, будівельна механіка, прикладна теорія пружності). У результаті знаходять деформації (переміщення точок) конструкції – укорочення, стрілки прогину, кути повороту перерізів, зсув окремих точок конструкції в просторі тощо.

При такому поділі відпадає необхідність вирішення складних завдань термомпружності й термопластичності для безлічі типів і розмірів зварних з'єднань

та конструктивних елементів. Це спрощує розрахунок зварювальних деформацій різних конструкцій і стає доступним для інженера.

Іноді розв'язання ускладнюється взаємним впливом і взаємозв'язком двох зазначених задач, що в необхідних випадках ураховується введенням додаткових поправкових коефіцієнтів.

Існуючі інженерні методи розв'язань завдань теорії зварювальних деформацій і напружень ґрунтуються на деяких основних гіпотезах, застосування яких значно спрощує розрахунки при збереженні достатньої для інженерної практики точності.

1. *Гіпотеза плоских перерізів*, відповідно до якої будь-який поперечний переріз, плоский до зварювання, залишається плоским у процесі та після закінчення зварювання. Ця гіпотеза добре виконується в конструкціях балкового типу, до яких зводиться більшість зварних конструкцій.

2. *Незмінність теплофізичних властивостей матеріалу* зі зміною температури. Основними характеристиками, які визначають ступінь нагрівання і розширення металу при заданій кількості тепла, що вводиться при зварюванні, є коефіцієнт лінійного температурного розширення та об'ємна теплоємність.

Суттєвим для спрощення розрахунків є те, що, незважаючи на істотну зміну ТКЛР та об'ємної теплоємності (іноді в два рази при зміні температури від нормальної до температури плавлення), узагальнена характеристика теплофізичних властивостей  $\alpha/c_p$  низьковуглецевих низьколегованих сталей у широкому діапазоні температур залишається майже без зміни (рис. 1.12,а). Як буде показано нижче, саме ця узагальнена характеристика визначає величину зварювальних деформацій.

3. *Умовна діаграма залежності границі плинності від температури*. Поява і розвиток пластичних деформацій металу, що супроводжують нагрівання при зварюванні, визначаються границею плинності зварюваного матеріалу  $\sigma_T$ , величина якої в широкому діапазоні температур помітно змінюється (див. рис. 1.12,б). Урахування дійсних значень цієї характеристики при різних температурах значно ускладнює математичний опис процесу утворення зварювальних деформацій. Тому в більшості випадків доводиться обмежуватися умовними залежностями, які показані на рис. 1.12,б пунктирними лініями. Зокрема, для низьковуглецевих та низьколегованих сталей границя плинності приймається незмінною в діапазоні 0...500 °С і лінійно зменшується до 0 в інтервалі 500...600 °С.

4. *Умовна діаграма розтягнення-стиснення*. Згідно із цією гіпотезою напруження приймаються лінійно залежними від деформацій у пружній стадії роботи ( $\sigma = E\varepsilon$ ) і незалежними від деформацій ( $\sigma = \sigma_T$ ) при пластичній деформації (рис. 1.13). Така умовна залежність не враховує зміцнення (наклеп) металу за границею плинності. При малих деформаціях похибка незначна і майже не впливає на точність розрахунків.

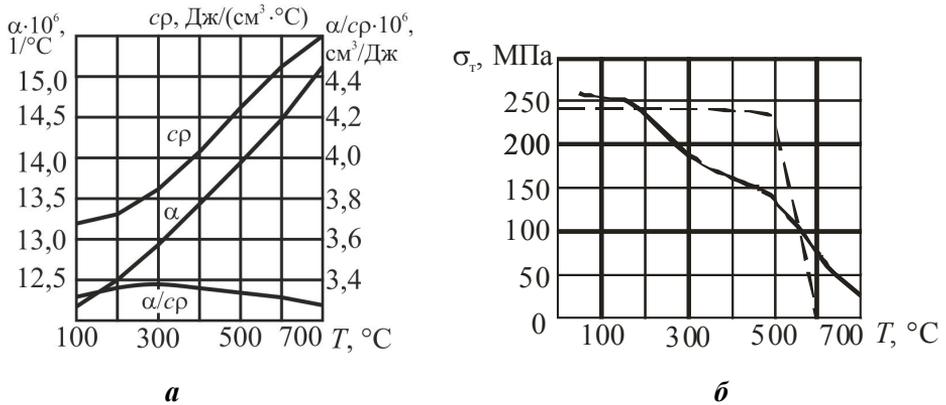


Рис. 1.12. Залежності температурного коефіцієнта лінійного розширення, об'ємної теплоємності (а) та границі плинності (б) низьковуглецевих низьколегованих сталей від температури

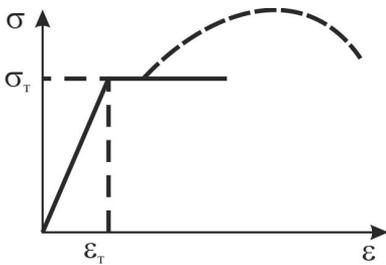


Рис. 1.13. Умовна діаграма розтягнення металу

**5. Гіпотеза лінійного напруженого стану** (одновісності напружень). Відповідно до неї поздовжні й поперечні деформації та напруження вважаються незалежними: при розгляді поздовжніх деформацій і напружень ( $\sigma_x$  і  $\epsilon_x$ ) не враховують поперечних ( $\sigma_y$  і  $\epsilon_y$ ) та навпаки. Тобто розв'язання однієї плоскої задачі замінюється розв'язаннями двох лінійних. При цьому розрахунків спрощується, але похибка в деяких випадках досягає 20 %.

**6. Гіпотеза одночасності нагрівання та охолодження** по всій довжині шва. Згідно з нею напружено-деформований стан не залежить від послідовності й напрямку заварювання шва по довжині, а також довжини ділянок при ручному зварюванні. Це вносить деяку похибку, особливо в поля напружень. Величина похибки залежить від загальної протяжності шва та швидкості зварювання і, як правило, зменшується зі зменшенням довжини та збільшенням швидкості.

## 1.6. Основні принципи й залежності методу скінченних елементів

Методи розрахунку, що засновані на гіпотезі плоских перерізів, унаслідок своєї простоти знайшли широке застосування в інженерній практиці. Вони використовуються при розрахунках як міцності зварних з'єднань та конструкцій,

так і власних деформацій та напружень. На жаль, вони дають досить точні результати тільки для конструкцій і елементів конструкцій, у яких довжина (один з розмірів) у кілька разів (6–10) більше від двох інших розмірів (висоти й ширини), тобто для стрижнів, балок, стояків тощо. Здебільшого це задовольняє інженера. Але на практиці також застосовуються плоскі й об'ємні елементи і конструкції. Крім того, в машинобудуванні широко використовуються вузли з різномірних матеріалів, які отримані дифузійним зварюванням та паянням. Для таких конструкцій більш точну і повну картину дають методи теорії пружності й пластичності. Однак вони відрізняються не тільки більшою складністю, але й, головне, розв'язання в загальному вигляді задач теорії пружності (інтегруванням диференціального рівняння) можуть бути отримані для обмеженого числа порівняно простих задач. Разом з тим, в останні роки в зв'язку з поширенням і удосконаленням електронно-обчислювальної техніки усе більш широке застосування одержали числові методи, зокрема МСЕ.

Фізична сутність МСЕ ґрунтується на уявленні конструкції у вигляді сукупності окремих (геометрично визначених) скінченних елементів, з'єднаних між собою у вузлових точках. У цих точках прикладаються деякі фіктивні зусилля взаємодії, які характеризують дію розподілених внутрішніх зусиль (напружень) уздовж реальних границь суміжних елементів. Задача зводиться до розрахунку пружної системи з певним скінченним числом степенів вільності.

Заміна вихідної конструкції сукупністю дискретних скінченних елементів припускає рівність енергії конструкції та її дискретної моделі. Для деяких конструкцій отримання енергетичного балансу приводить до одержання дискретної моделі, яка точно описує поведінку вихідної конструкції. До таких конструкцій належать уже складені з дискретних елементів конструкції: ферми, рами, перекриття тощо.

У випадку, якщо елементи реальної конструкції мають уздовж своєї границі безперервні зв'язки із суміжними елементами, дискретна модель буде тільки приблизно відображати поведінку вихідної конструкції. Характер взаємодії повинен бути обраний таким, щоб зменшення розмірів скінченних елементів призводило до одержання рішення, яке наближається до точного.

Після ідеалізації конструкції у вигляді сукупності дискретних скінченних елементів визначається зв'язок між вузловими переміщеннями і зусиллями кожного скінченного елемента, тобто його пружні властивості. Це робиться в матричній формі, кінцевою метою є визначення матриці жорсткості спочатку для кожного окремого скінченного елемента, а потім для всієї конструкції.

Теоретично основа методу базується на відомому принципі можливих переміщень Лагранжа, що формулюється так: "Якщо система матеріальних точок перебуває в рівновазі, то робота всіх прикладених до неї сил на будь-яких

можливих нескінченно малих відхиленнях від положення рівноваги дорівнює нулю". Це відповідає мінімуму функціонала потенціальної енергії деформації системи.

У результаті мінімізації функціонала потенціальної енергії деформації отримується диференціальне рівняння Ейлера–Лагранжа. Точне розв'язання цього рівняння в реальній постановці задачі через складність навантаження конструкції та граничних умов звичайно неможливе. Тому йде пошук наближеного розв'язання за відомими методами Релея, Рітца, Бубнова–Гальоркіна. У методі Бубнова–Гальоркіна розв'язання знаходиться у вигляді ортогональних функцій, що призводить до системи лінійних алгебраїчних рівнянь для шуканих коефіцієнтів розкладання. Отримана матриця розв'язання цієї системи і є наближеним розв'язанням для переміщень у вузлах.

Система рівнянь трактується як матричне рівняння рівноваги, в якому головне місце займає так звана *матриця жорсткості системи*. Іноді зручно одержати матрицю жорсткості системи не з мінімізації функціонала, а з принципу можливих переміщень стрижневих систем.

У МСЕ, як ні в якому іншому методі числового аналізу, гармонійно проявляється синтез методів теорії пружності, пластичності й будівельної механіки, що поєднує суміжні розділи наук про жорстке деформоване тіло в єдину галузь – будівельну механіку конструкції різноманітних об'єктів: літака, ракети, корабля, нафтопроводу тощо.

Універсальність МСЕ проявляється в його використанні для розв'язування різноманітних задач теплопровідності, дифузії, геофізики, фільтрації в пористих середовищах, розрахунку складних магнітних полів тощо як завдань механіки суцільного середовища.

Мета МСЕ – одержати для скінченного елемента рівняння у вигляді  $\{P\} = [k]\{\delta\}$ , що зв'язує сили  $\{P\}$  та переміщення  $\{\delta\}$  у вузлах за допомогою матриці жорсткості  $[k]$ .

**Вибір типу скінченних елементів.** Як відомо з основної концепції МСЕ, вся модель конструкції (або окремої її частини) поділяється на велику кількість скінченних елементів, з'єднаних між собою у вершинах (вузлах). Сили діють у вузлах. Скінченний елемент не є абсолютно жорстким тілом. Скінчена елементна модель припускає, що напруження й деформації є і поза даним скінченним елементом.

Існує декілька найбільш уживаних типів скінченних елементів: брус, стрижень, тонка пластина або оболонка, двовимірне або тривимірне тіло. Природно, що при побудові моделі можуть бути використані не один, а кілька типів елементів.

Точність розрахунків МСЕ залежить від багатьох факторів, у тому числі й від кількості скінченних елементів. Однак, якщо напруження значно не змінюються в межах моделі, то кількість скінченних елементів несуттєво впливає на точність обчислення напружень.

Скінченні елементи можуть бути лінійними (елементи першого порядку) або параболічними (елементи другого порядку). Лінійні елементи мають прямі сторони й вузли тільки в кутах. Таким чином, мінімальне число вузлів тривимірного елемента дорівнює чотирьом. Параболічні елементи можуть мати проміжний вузол уздовж кожної зі сторін. Саме завдяки цьому сторони елемента можуть бути криволінійними (параболічними). При однаковій кількості елементів параболічні елементи дають більшу точність обчислень, тому що вони більш точно відтворюють криволінійну геометрію моделі й мають більш точні функції форми (апроксимуючі функції). Однак розрахунок із застосуванням скінченних елементів високих порядків вимагає більших комп'ютерних ресурсів і машинного часу.

Необхідно пам'ятати, що МСЕ – наближений метод, точність якого залежить від правильного вибору типів і розмірів скінченних елементів. Так, наприклад, більш часта сітка потрібна там, де очікується великий градієнт деформацій або напружень. У той же час більш рідка сітка може застосовуватися в зонах з більш-менш постійними деформаціями або напруженнями, а також в областях, що не викликають особливого інтересу. У зв'язку із цим потрібно вміти передбачати області концентрації напружень. Точність результатів аналізу зменшується, якщо розміри сусідніх елементів поблизу концентратора напружень істотно різні.

Форма скінченних елементів також впливає на точність обчислень. З урахуванням цього варто уникати занадто вузьких і витягнутих елементів, тому що елементи з приблизно однаковими сторонами дають меншу похибку. Одночасно в сітці можуть бути присутні три- й чотирикутні елементи, однак між ними не повинно бути розривів.

Завдання граничних умов – один з відповідальних етапів скінченноелементного аналізу. Граничні умови (переміщення або сили) прикладаються тільки до вузлів. Максимальне число граничних умов, прикладених у вузлі, дорівнює числу його степенів вільності: три сили або три переміщення.

Схема розміщення граничних умов залежить від виду навантаження (розтяг, чистий вигин, зсув). Якщо конструкція має осі або площини симетрії, то при визначенні граничних умов необхідно враховувати симетричність. Це дає можливість значно скоротити витрати машинного часу та пам'яті.

Вибір розмірів елементів і граничних умов при побудові сітки можна істотно спростити, якщо взяти до уваги принцип Сен-Венана: дві статично еквівалентні системи сил створюють те саме поле напружень на відстані від їхніх точок прикладення, більшій, ніж характерний лінійний розмір поперечного перерізу.

**Основні співвідношення теорії пружності, що використовуються в МСЕ.** У результаті впливу на тіло зовнішніх навантажень і температури його точки можуть переміститися відносно одна одної в нові положення. У цьому випадку вектор переміщення для тривимірного завдання можна записати таким чином:

$$\{u\} = (u_x, u_y, u_z),$$

де  $u_x, u_y, u_z$  (або  $u, v, w$ ) – проєкції вектора переміщень на координатні осі  $x, y, z$  відповідно.

Для двовимірного завдання вектор переміщень має два компоненти

$$\{u\} = \{u_x, u_y\}.$$

Тут і далі фігурними дужками  $\{\dots\}$  позначається вектор-стовпець (для економії місця він буде іноді записуватися в рядок). Квадратними дужками  $[\dots]$  позначаються квадратні й прямокутні матриці.

Різниця переміщень двох сусідніх точок викликає деформації в матеріалі та напруження, які пов'язані з ними. У загальному випадку деформації та напруження в матеріалі конструкції складаються із шести компонентів:  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}$  – для напружень та  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx}$  – для деформацій.

Для пружних ізотропних матеріалів

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & 0 \\ -\nu/E & 1/E & 0 \\ 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \varepsilon_{xy0} \end{Bmatrix}, \text{ або } \{\varepsilon\} = [E]^{-1} \cdot \{\sigma\} + \{\varepsilon_0\}, \quad (1.5)$$

де  $E$  – модуль пружності;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;  $G$  – модуль зсуву;  $\varepsilon_0$  – початкові деформації.

Відомо, що

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}. \quad (1.6)$$

Аналіз формули (1.6) показує, що для однорідних ізотропних матеріалів існують дві незалежні константи, що описують механічний стан матеріалу.

З виразу (1.5) залежність напружень від деформацій

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1 - \nu^2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1 - \nu)/2 \end{bmatrix} \left[ \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \gamma_{xy0} \end{Bmatrix} \right], \text{ або } \{\sigma\} = [E]\{\varepsilon\} + \{\sigma_0\},$$

де  $\{\sigma_0\} = -[E]\{\varepsilon_0\}$  – початкові напруження.

Наведені вище формули справедливі для випадку плоского напруженого стану. При плоскій деформації вирази для постійних матеріалу у формулах необхідно замінити на наступні:

$$E \rightarrow \frac{E}{1 - \nu^2}; \quad \nu \rightarrow \frac{\nu}{1 - \nu}; \quad G \rightarrow G.$$

Наприклад, зв'язок між напруженнями і деформаціями для випадку плоскої деформації

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \gamma_{xy0} \end{Bmatrix}.$$

Початкові напруження внаслідок зміни температури визначаються за формулою

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \gamma_{xy0} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \alpha \Delta T \\ \alpha \Delta T \\ 0 \end{Bmatrix},$$

де  $\Delta T$  – зміна температури.

Для малих деформацій і зсувів мають місце наступні залежності:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial y \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix}, \text{ або } \{\varepsilon\} = [D]\{u\}.$$

Відповідно до теорії пружності, напруження в елементі об'єму повинні задовольняти наступні рівняння рівноваги:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + f_x = 0; \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + f_y = 0,$$

де  $f_x, f_y$  – об'ємна сила (наприклад, сила ваги) на одиницю об'єму.

Похибка у результаті розрахунку при використанні МСЕ складається головним чином з похибки дискретизації, обумовленої зміною тіла, яке має нескінченне число степенів вільності, моделлю зі скінченним числом степенів вільності, похибки закруглення чисел при виконанні обчислювальних операцій на ЕОМ і похибки, обумовленої неточністю визначення вихідних даних: ТКЛР, модуля пружності тощо.

Похибка дискретизації залежить від декількох факторів: вибору передбачуваного закону зміни переміщень або напружень у границях скінченних елементів; точності приведення зовнішнього навантаження до вузлових зусиль, розміру скінченного елемента.

Похибки закруглення при розв'язанні системи лінійних алгебраїчних рівнянь виникають через округлювання вихідних даних, а також унаслідок

округлювань у ході процесу обчислень. Роль похибки закруглення в утворенні похибки тим вища, чим повільніша збіжність процесу. Здебільшого комп'ютерне моделювання дає достатньо точні результати, якщо при побудові моделі враховані всі фактори впливу.

### 1.7. Сучасні програмні комплекси для моделювання напружено-деформованого стану

Аналітичні методи оцінки реакцій конструкцій на зовнішні впливи різної фізичної природи без натурного моделювання виникли досить давно. Поява та розвиток обчислювальної техніки дали новий поштовх до вдосконалення числових методів аналізу, які сьогодні є основним інструментом розрахувача. Засоби автоматизації інженерного аналізу, які засновані на числових методах, стали невід'ємною частиною процесу проектування виробу. Для успішного застосування кожен розрахунковий пакет повинен відповідати двом вимогам: використовувати найефективніші числові алгоритми та надавати користувачеві широкий набір сервісних функцій з підготовки вихідних даних й обробки результатів розрахунку.

Необхідність скорочення термінів розробки та підвищення вимог щодо якості виробництва зварних конструкцій сприяло створенню цілого ряду комп'ютерних програм, які полегшують і прискорюють роботу інженера-зварника або інженера-технолога з розробки нових зварних конструкцій і технологій зварювання. Ці програмні продукти можна умовно розділити на дві основні групи: системи автоматичного проектування технологічних процесів (САПР ТП), які, як правило, інтегровані із системами 3D-моделювання для вирішення конструкторських задач, і системи інженерного аналізу або спеціалізоване програмне забезпечення (ПЗ) для моделювання технологічних процесів зварювання.

В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України розроблено пакет спеціалізованого ПЗ "**WELD PREDICTION**", в якому використовується накопичений українськими фахівцями за останні 50 років досвід математичного моделювання фізико-хімічних процесів при зварюванні, наплавленні, термообробці і споріднених технологіях, а також сучасні досягнення числових методів, механіки деформованого тіла та механіки руйнування.

Пакет "**WELD PREDICTION**" орієнтований для інженерного та наукового застосування і дозволяє для типових випадків зварних вузлів і конструкцій розрахунковим шляхом отримувати інформацію щодо залишкових технологічних напружень та деформацій, визначати перерозподіл напружено-деформованого стану в результаті термічної обробки, експлуатаційних і випробувальних навантажень, радіаційного випромінювання, прогнозувати працездатність і ресурс відповідальних зварних конструкцій з дефектами несутцільності, уявними або виявленими в результаті неруйнівного контролю.

До складу спеціалізованого програмного забезпечення "WELD PREDICTION" входить цілий ряд програмних модулів:

- Вибір зварювальних матеріалів для дугового зварювання конструкційних сталей;
- Зварювання багатопрохідного кільцевого з'єднання;
- Наплавлення внутрішньої поверхні антикорозійним шаром;
- Післязварювальна термічна обробка;
- Зварювання трубної дошки теплообмінників;
- Зварювання балкових конструкцій;
- Наплавлення пластин зносостійким сплавом та ін.

Наприклад, програмний модуль "Зварювання багатопрохідного кільцевого з'єднання" дозволяє прогнозувати залишкові напруження і деформації в зоні кільцевого зварного з'єднання товстостінної оболонки при багатопрохідному зварюванні з урахуванням фазових перетворень, різних параметрів оброблення крайок, режимів зварювання та умов закріплення, моделювати технологічну операцію термообробки зварного з'єднання по режиму високого відпуску, а також прогнозувати цілісність і довговічність конструкційних елементів з типовими дефектами несучільності в зоні зварних з'єднань (тріщинами, порами, утоненням). За допомогою цього програмного модуля можливо отримувати вказану вище інформацію для таких відповідальних зварних конструкцій, як трубопроводи, посудини та інших елементів обладнання, проводити оцінки працездатності і ресурсу таких конструкцій з урахуванням дефектів несучільності матеріалу, виявлених у результаті контролю.

Пакет "WELD PREDICTION" володіє наступними перевагами при вирішенні задач зварювальних напружень і деформацій:

- висока точність прогнозних результатів при обмежених вимогах до комп'ютерних і часових ресурсів (нетривалий час розрахунку) за рахунок застосування сучасних підходів моделювання фізико-хімічних процесів при зварюванні, економічних моделей в 2D-постановці та алгоритмів розв'язання нелінійних задач і систем диференціальних рівнянь високого порядку;
- зниження трудомісткості за рахунок простого інтерфейсу введення даних і повної автоматизації процесів створення математичної моделі, розбиття області на скінченноелементну сітку, пошуку рішення і візуалізації результатів;
- легкість навчання персоналу, оскільки працювати з програмою може інженер-зварник або технолог, а не фахівець із числових методів вирішення математичних задач.

Найбільш потужною спеціалізованою системою моделювання технологічних процесів зварювання і термічної обробки є набір програмних продуктів, об'єднаних у лінійку **WELDING SIMULATION SUITE**. Розробник – французька фірма ESI Group, яка є одним з лідерів зі створення САПР і моделювання технологічних процесів. У зазначений набір ПЗ входять:

- SYSWELD / VISUAL-WELD для моделювання локальних ділянок зварних конструкцій;

– WELD PLANNER для моделювання процесу зварювання тонколистових конструкцій;

– PAM-ASSEMBLY для моделювання процесів складання-зварювання геометрично складних великогабаритних конструкцій.

Програма SYSWELD / VISUAL-WELD дозволяє моделювати процеси зварювання і термічної обробки, тимчасові і залишкові напруження та деформації зварного вузла або конструкції, механічні характеристики і міцність матеріалів, підданих зазначеним технологічним обробкам. Моделювання зварювальних процесів включає в себе всі типи технологій зварювання з урахуванням механічних, теплових і металургійних властивостей матеріалу. Моделі і бази даних, які включені в ПЗ SYSWELD / VISUAL-WELD, дозволяють проводити аналіз теплометалургійних процесів для сталей і алюмінієвих сплавів. Програма працює з термокінетичними діаграмами, які описують процес фазових переходів.

Програмне забезпечення має можливість отримання геометричної моделі зварного вузла або конструкції, створеної в середовищі будь-якої САПР. Результати розрахунків, у тому числі напруження і деформації, можуть бути експортовані для подальших розрахунків в інші додаткові розрахункові модулі, розроблені фірмою ESI Group:

– SYSTUS – вивчення зародження і поширення утомних тріщин;

– PAM-STAMP – аналіз процесів штампування зварних листових деталей;

– PAMCRASH – аналіз руйнувань зварних конструкцій.

Програмний набір WELDING SIMULATION SUITE володіє в багатьох випадках надлишковими можливостями і складністю для інженера-зварника на виробництві, вимагає спеціальних знань із застосування розрахункових методів і тривалого періоду навчання користувача, має високу вартість.

Також спеціалізованою системою моделювання технологічних процесів зварювання є модуль **SIMUFACT.WELDING**, що входить до системи загального інженерного аналізу різних технологічних процесів SIMUFACT (Simufact Engineering GmbH, Germany). Зазначений модуль у першу чергу призначений для прогнозування зварювальних деформацій, але також дозволяє оцінювати властивості металу шва і зони термічного впливу (ЗТВ). Проблемно-орієнтований користувальницький інтерфейс допомагає інженеру-зварнику проводити досить складне моделювання фізико-металургійних процесів при зварюванні. ПЗ засноване на поєднанні аналітичних підходів і нелінійного числового моделювання. За описом розробника ПЗ володіє наступною функціональністю:

– синхронізований за часом контроль роботи декількох зварювальних роботів;

– швидкий розрахунок різних варіантів, що відрізняються параметрами зварювання;

- швидка зміна параметрів процесу зварювання (послідовності і швидкості зварювання, параметрів зварювального нагріву і умов закріплення);
- оптимізація розмірів і властивостей металу шва, ЗТВ, а також рівня зварювальних напружень і деформацій.

До переваг ПЗ SIMUFACT.WELDING можна віднести досить широкі можливості моделювання процесу зварювання з метою прогнозування якості формування зварного з'єднання, в тому числі багатопрхідного, визначення властивостей металу шва та ЗТВ з урахуванням структурних перетворень, тимчасових і залишкових зварювальних напружень і деформацій. Незважаючи на використання досить складних математичних моделей, ПЗ орієнтоване на інженерне застосування на виробництві. Відмінною здатністю ПЗ є можливість проведення оптимізації роботизованого зварювання і здійснення контролю синхронізованої роботи зварювальних роботів на виробництві.

Близькими до спеціалізованих систем за функціональними можливостями моделювання технологічних процесів зварювання і термічної обробки є комерційні пакети скінченноелементного аналізу загального призначення, такі, як ABAQUS, ANSYS, LS-Dyna, MARC, ADAMS, CATIA та ін. В останніх версіях деяких із цих пакетів з'явилися спеціалізовані розрахункові модулі для моделювання процесів зварювання.

Наприклад, **ABAQUS** не є спеціалізованим зварювальним ПЗ, але може застосовуватися для моделювання рухомих джерел тепла та проведення аналізу теплових і механічних процесів при зварюванні. Аналіз теплових процесів проводиться за допомогою користувальницьких підпрограм:

- **DFIUX** – використовується для визначення теплоперенесення при зварюванні в разі концентрованого теплового потоку, який рухається уздовж лінії зварювання, імітуючи рух зварювального джерела нагрівання;

- **GAPCON** – використовується для активації теплопровідності між основним і присадним матеріалом, коли зварювальне джерело проходить певний елемент;

- **FILM** – використовується з метою активації теплопровідності для імітації процесу охолодження, коли зварювальне джерело проходить певний елемент.

Результати теплового аналізу використовуються як вхідні дані для вирішення механічної задачі, в результаті якої визначаються зварювальні напруження і деформації. Для проведення моделювання теплометалургійних процесів при зварюванні необхідна розробка своїми силами або покупка у стороннього розробника додаткових програмних модулів, які враховують мікроструктурні перетворення в сталях при зварювальних температурних циклах. Так само до недоліків можна віднести високу складність програми, необхідність тривалого навчання роботі з нею, високу вартість.

Багатоцільова програма **LS-DYNA** (Livermore Software Technologies Corp.), яка використовує явне формулювання MCE і призначена для аналізу нелінійного

динамічного відклику тривимірних пружних структур, була задумана як частина оборонної програми США й дотепер використовується як така.

Високоєфективний алгоритм розв'язання нелінійних процесів, автоматизований процес розв'язання контактних задач, а також безліч функцій з перевірки одержуваного розв'язку дозволяють інженерам у всьому світі успішно вирішувати дуже складні завдання удару, руйнування й формоутворення.

Наведемо лише деякі можливості LS-DYNA: оцінка опірності удару (краш-тест) автомобілів, літальних апаратів, поїздів, суден; аналіз динамічної міцності автомобільних комплектуючих (кузовів, бамперів, колісних дисків тощо) при русі по нерівній поверхні; оцінка безпеки пасажирів: взаємодія повітряної подушки й віртуальної моделі людини з моделюванням ременів безпеки, прорив подушки безпеки тощо; формування металу, скла, пластиків: прокат, видавлювання, штампування, волочіння, надпластичне формування, різання, прокат профілів, лиття, глибока витяжка, гідроформування і багатоступінчасті процеси; відрив лопатки турбінних двигунів; взаємодія потоків рідини й газу з конструкцією; вибухове навантаження на вироби; проникання (пробивання броньової пластини і под.); розрахунок зварних, заклепочних і болтових з'єднань; моделювання землетрусів.

Програма **ADAMS** (Mechanical Dynamics Inc.) на сьогодні знаходить застосування в автомобіле- й авіабудуванні, космонавтиці, залізничному транспорті, загальному машинобудуванні, суднобудуванні, робототехніці, приладобудуванні, біомеханіці та навіть в індустрії відпочинку й розваг.

Ця програма надає користувачам наступні можливості: створювати комп'ютерну модель системи з жорстких деформованих елементів, з'єднаних між собою різними зв'язками й шарнірами; створювати параметризовану модель на базі ядра жорсткотільного моделювання Parasolid, а також обмінюватися геометричними моделями у форматах IGES, STEP, DXF, DWG, STL; візуалізувати модель конструкції потужними засобами графіки; задавати примусові переміщення й рухи елементів системи та прикладати активні зовнішні сили й моменти; проводити статичний, динамічний і кінематичний аналізи системи; візуалізувати рух системи й фіксувати задані події; аналізувати вплив варіацій параметрів конструктивних елементів на поведінку системи; оптимізувати виріб за заданим критерієм; одержувати результати аналізу в зручному для оцінки й інтерпретації вигляді: графіки, таблиці, анімація; робити двосторонній обмін інформацією з програмними комплексами автоматизованого проектування скінченно-елементного аналізу, анімації; використовувати спеціалізовані модулі, орієнтовані на конкретні галузі техніки (автомобільна, залізнична); визначати всі параметри руху системи як з абсолютно жорстких, так і з пружних ланок; визначати взаємне переміщення складових частин, переміщення й кути повороту в шарнірах; проводити статичний і модальний аналізи та багато іншого.

Програма **ProCAST** (UES, CALCOM) відповідно до досліджень, які провели експерти NASA, визнана найбільш потужною та коректною для розрахунку ливарних процесів. Вона дозволяє інженеру-проектувальнику розраховувати та візуалізувати у тривимірній постановці процес руху й тверднення металу у формі, передбачати мікроструктуру, виникнення раковин, пористості, мінімізувати залишкові напруження, контролювати тепловий баланс системи "вилівок–форма" тощо. За результатами розрахунку можуть бути отримані оптимальні розташування газовідводу, холодильника, ливарних каналів.

Дана програма побудована за модульною схемою: тепловий аналіз, аналіз потоків, сітковий генератор, радіаційний аналіз, аналіз на міцність, моделювання мікроструктур, модуль інверсійного моделювання, електромагнітний аналіз.

Модуль **MechCAST** робить автоматизовану генерацію тривимірних скінченноелементних сіток на базі імпортованих з CAD-систем моделей. Він працює з такими графічними форматами, як IGES, STL, Unigraphics Parasolids, а також має прямий інтерфейс двостороннього обміну даними з Pro/Engineering, Unigraphics і скінченноелементними пакетами ANSYS, I-DEAS, Patran, Hypermesh, Ifem, Gfem, Aries, Fam.

Уже більше 25 років **ANSYS** (ANSYS Inc.) належить до важких скінченноелементних розрахункових програмних комплексів. Він починався як система для внутрішнього використання фірми "Westinghouse Electric", згодом проникнув зі своєї "материнської" галузі, ядерної енергетики, в усі галузі промисловості. Такий успіх досягнутий завдяки наступним найважливішим відмінним рисам:

1) ANSYS – скінченноелементна система з широким охопленням явищ різної фізичної природи: міцність, теплофізика, гідро- і газодинаміка й електромагнетизм із можливістю розв'язання пов'язаних завдань, що поєднують всі перераховані види;

2) широка інтеграція та двосторонній обмін даними з усіма CAD / CAE / CAM-системами;

3) відкритість (тобто модифікованість і доповненість);

4) високий показник "ефективність/вартість";

5) серед безлічі скінченноелементних програмних комплексів ANSYS – перший та єдиний з розроблених і сертифікованих відповідно до міжнародних стандартів ISO 9000 й ISO 9001;

6) ANSYS надає унікальну за повнотою і найбільшу за змістом сучасну систему *help* на основі гіпертекстового подання, доступ до якої здійснюється в інтерактивному режимі *online*.

Препроцесор ANSYS дозволяє не тільки створювати геометричні моделі власними засобами, але імпортувати вже готовими, створеними засобами CAD-систем. Геометрична модель надалі може бути модифікована будь-яким

чином, оскільки при імпорті здійснюється перетрансляція даних у геометричний формат ANSYS і деталь не підмінюється "недоторканою" скінченно-елементною сіткою. Користувач може видаляти несуттєві дрібниці, добудувати певні деталі, проводити згущення сітки та інші найважливіші операції, без яких подальше розв'язання може бути зовсім некоректним або взагалі виявиться недосяжним.

У результаті багаторічного співробітництва фірм "ANSYS Inc." і "LSTC" у програму включений модуль ANSYS/LS-DYNA – повністю інтегрована в середовище ANSYS всевітньо відома програма для високонелінійних розрахунків LS-DYNA. Це поєднує у собі переваги обох методів і дозволяє здійснювати числове моделювання процесів формування матеріалів, аварійних зіткнень (наприклад, автомобілів) і ударів при скінченних деформаціях, нелінійній поведінці матеріалу й контактній взаємодії великої кількості тіл.

Вирішення завдань за допомогою програми ANSYS складається із трьох етапів: препроцесорна (попередня) підготовка (*Preprocessing*), одержання рішення (*Solving the Equations*) і постпроцесорна обробка результатів (*Postprocessing*).

На стадії препроцесорної підготовки виконується вибір типу розрахунку, побудова моделі й додаток навантажень (який включає й граничні умови). Тут задаються необхідні для розв'язання вихідні дані. Вибираються координатні системи й типи скінченних елементів, указуються пружні, постійні й фізико-механічні властивості матеріалу, будується жорсткотільна модель і сітка скінченних елементів, виконуються необхідні дії з вузлами й елементами сітки, задаються рівняння зв'язку й обмеження.

Користувач має можливість ввести будь-яку інформацію, що відноситься до даної розрахункової моделі, але програма буде використовувати тільки ту її частину з бази даних, що необхідна для певного виду розрахунку. Вид розрахунку задається при вході в програму.

У програмі ANSYS існують три різних способи побудови геометричної моделі: імпорт моделі, попередньо побудованої іншою програмою; жорсткотільне моделювання й безпосереднє створення моделі в інтерактивному режимі роботи з програмою. Можна вибрати кожний із цих методів або використати їхню комбінацію для побудови розрахункової моделі. Після того як побудована жорсткотільна модель, будується її скінченноелементний аналог (тобто сітка вузлів й елементів). Бібліотека скінченних елементів програми ANSYS містить велику кількість типів, кожний з яких визначає застосовність елемента до тієї або іншої області розрахунків, а також двовимірність (2D) або тривимірність (3D) елемента.

Після вибору типу елементів необхідно задати їхні константи. Константи елемента – це властивості, специфічні для даного типу елемента.

Властивості можуть бути лінійними, нелінійними або анізотропними. Лінійні властивості можуть залежати або не залежати від температури, бути

ізотропними або ортотропними. Залежність властивостей від температури має форму полінома (аж до четвертого ступеня) або задається у вигляді таблиці. Нелінійні співвідношення, такі, як криві деформування матеріалу для різних видів зміцнення, криві повзучості, залежності для радіаційного розбухання, опис гіперпружних властивостей, задаються у вигляді таблиці.

Після того як при препроцесорній підготовці побудована розрахункова модель, можна переходити до стадії розв'язання задачі. Цей етап містить у собі завдання виду аналізу і його опцій, навантажень, етапу рішення й закінчується запуском на рахунок скінченноелементного завдання.

По команді *SOLVE* програма звертається за інформацією про модель і навантаження до бази даних і виконує обчислення. Результати записуються в спеціальний файл і у базу даних. Програмою виконується рішення визначальних рівнянь й одержання результатів для обраного виду аналізу. В обчислювальному відношенні це найінтенсивніша частина аналізу, яка не потребує втручання користувача.

У програмі ANSYS стадія постпроцесорної обробки йде за стадіями препроцесорної підготовки й одержання рішення. За допомогою постпроцесорних засобів програми є можливість звернутися до результатів рішення й інтерпретувати їх потрібним чином.

Результати рішення включають у себе значення переміщень, температур, напружень і т. д.

Підсумком роботи програми на постпроцесорній стадії є графічне або табличне подання результатів. Графічне зображення може бути виведене на монітор в інтерактивному режимі під час постпроцесорної обробки або перетворене у жорстку копію.

## 1.8. Контрольні запитання

1. На яких передумовах ґрунтується теорія пружності? Що вона вивчає?
2. Поясніть поняття "напруження" та "деформація", що використовуються в теорії пружності.
3. Що таке тензор напружень та тензор деформацій?
4. Про що говорить закон парності напружень?
5. Яке правило знаків прийняте в теорії пружності для нормальних та дотичних напружень?
6. Які напруження називаються нормальними, дотичними, еквівалентними?
7. Чому дорівнює інтенсивність напружень?
8. Які деформації називаються еквівалентними?
9. Які напруження називаються головними?
10. Які елементарні площадки в тілі називаються головними?
11. Поясніть поняття "головні напруження", "головні деформації".
12. Поясніть поняття "головна площадка".

13. Що встановлює закон Гука?
14. Який стан у теорії пружності відносять до плоского напруженого або до плоского деформованого?
15. Чим відрізняється плоский напружений стан від плоского деформованого?
16. Які деформації називають пружними?
17. Які деформації називають пластичними?
18. Чим відрізняються деформації миттєвої пластичності від деформацій дифузійної пластичності?
19. Укажіть основні причини утворення зварювальних напружень і деформацій при зварюванні.
20. Як називають напруження, які існують у конструкції за відсутності зовнішніх сил?
21. Як називаються напруження в зоні пружно-пластичних деформацій після зварювання?
22. Як називають напруження, які виникають у конструкції в процесі зварювання?
23. Як називають напруження, які існують у конструкції після закінчення зварювання?
24. Як називають власні напруження, які зрівноважені в об'ємах:
  - сумірних з розмірами всієї конструкції;
  - у мікроскопічних, сумірних з розмірами окремих зерен;
  - у субмікроскопічних, сумірних з параметром кристалічної ґратки?
25. Як називають напружений стан, при якому одна зі складових напружень набагато більша від двох інших; дві зі складових напружень набагато більші від третьої; всі три складові напружень приблизно однакові (одного порядку)?
26. Як називають міру інтенсивності внутрішніх сил пружності?
27. Як називають відносну зміну розміру лінійного елемента, виділеного в даній точці тіла в даному напрямі?
28. Як називають деформації, які утворюються при навантаженні зовнішніми силами; внаслідок теплового розширення металу; внаслідок структурних перетворень у металі?
29. Як називають деформації металу, які зникають після зняття зовнішнього навантаження; які залишаються після зняття зовнішнього навантаження?
30. Якими можуть бути зварювальні деформації (переміщення)?
31. Які види деформацій виникають у металі в процесі зварювання?
32. Які основні параметри визначають деформації поздовжнього укорочення в інженерних розрахунках?

33. Якими параметрами визначається дія зварного з'єднання на конструкцію в інженерній теорії зварювальних деформацій?

34. Укажіть залежність між усадковою силою  $P$  та об'ємом поздовжнього укорочення  $v$ .

35. Що таке усадкова сила, об'єм поздовжнього укорочення? Від чого вони залежать?



## Розділ 2. ДЕФОРМАЦІЇ ПОЗДОВЖНЬОГО УКОРОЧЕННЯ

### 2.1. Термомеханічна задача

Основна складність розв'язання цієї задачі обумовлена тим, що при нагріванні та охолодженні механічні деформації (пружні й пластичні) в загальному випадку залежать не тільки від температурних деформацій у даний момент часу (які легко можуть бути знайдені за температурним полем), але і від переміщень перерізів конструкції під дією "усадкових" зусиль.

На сьогодні є декілька методів розв'язань термомеханічної задачі для поздовжнього укорочення.

У розв'язку Г.О. Ніколаєва напружено-деформований стан розглядається в перерізі з максимальною шириною ізотерми  $600^\circ\text{C}$ . З урахуванням температурних деформацій, переміщень точок перерізу й пружних властивостей матеріалу визначаються ширина зони, де зосереджені пружно-пластичні деформації, та усадкова сила.

У графоаналітичному методі М.О. Окерблома послідовно розв'язується задача для декількох поперечних перерізів (рис. 2.1–2.3), починаючи з перерізу  $x = 0$  (переріз із максимальною температурою нагрівання, див. рис. 2.2, *а*) і закінчуючи перерізом  $x \rightarrow \infty$  (після вирівнювання температури, див. рис. 2.2, *б*). Пружні та пластичні деформації в кожному перерізі (див. рис. 2.2, *б*) визначаються з урахуванням розподілу температури, теплофізичних властивостей у даний момент, температурних деформацій  $\epsilon^\alpha$  (у даному перерізі), переміщень перерізу (див. рис. 2.3) і пластичних деформацій, що утворилися на всіх попередніх етапах нагрівання (у попередніх перерізах). Зрівноважене

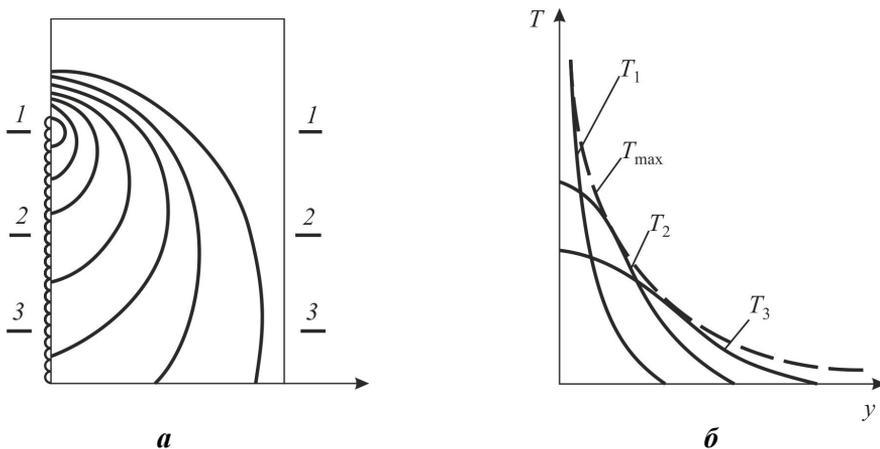


Рис. 2.1. Криві розподілу температури в площині (*а*) і поперечних перерізах 1–1 ( $T_1$ ), 2–2 ( $T_2$ ), 3–3 ( $T_3$ ) (*б*) пластини при наплавленні валика на її крайку

положення перерізів на кожному етапі (взаємне переміщення точок у центрі ваги (ЦВ) перерізу  $\Delta_{ЦВ}$  і кривизна осі  $C$ ) доводиться знаходити графічно, оскільки розподіл пластичних деформацій, на відміну від температурних, важко описати аналітично (звідси і назва методу). Точність результату розв'язання при цьому суттєво залежить від кількості розглянутих проміжних перерізів.

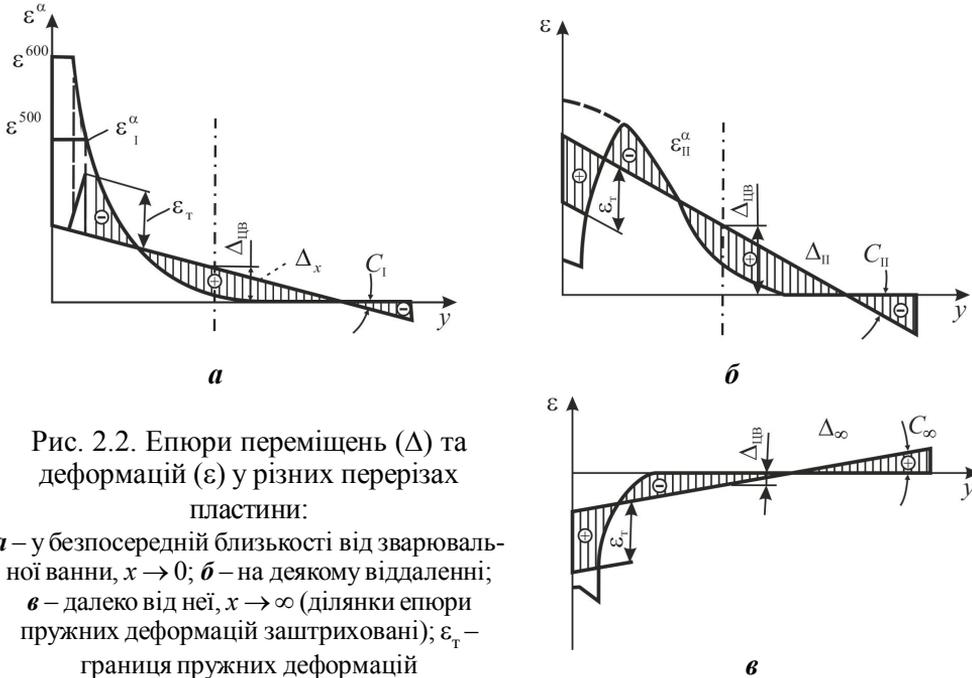


Рис. 2.2. Епюри переміщень ( $\Delta$ ) та деформацій ( $\epsilon$ ) у різних перерізах пластини:

**a** – у безпосередній близькості від зварювальної ванни,  $x \rightarrow 0$ ; **б** – на деякому віддаленні; **в** – далеко від неї,  $x \rightarrow \infty$  (ділянки епюри пружних деформацій заштриховані);  $\epsilon_T$  – границя пружних деформацій

Недоліком цих методів є їх складність і трудомісткість, відсутність готових розв'язань у вигляді математичних формул, що обмежує можливість їх широкого застосування в інженерній практиці.

Ці недоліки відсутні в **інженерному методі М.О. Окерблома**, в якому розглядається окремий випадок наплавлення валика (зварювання стику) на нескінченній пластині лінійним швидкорухомим джерелом тепла (рис. 2.4). Нескінченні розміри пластини у поєднанні з гіпотезою плоских перерізів забезпечує нерухомість будь-яких точок пластини в процесі нагрівання та охолодження і наближає умови деформації до нагрівання стрижня в абсолютно жорсткому закріпленні. У цьому випадку пластичні деформації кожного волокна не залежать від зміни температури в часі й визначаються тільки максимальною температурою нагрівання в процесі зварювання.

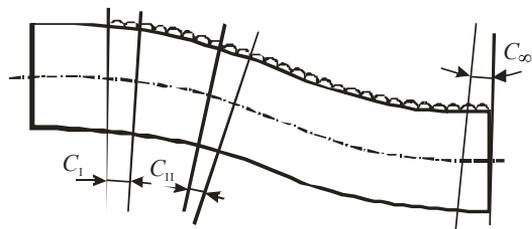


Рис. 2.3. Схема деформації пластини при наплавленні валика на краю

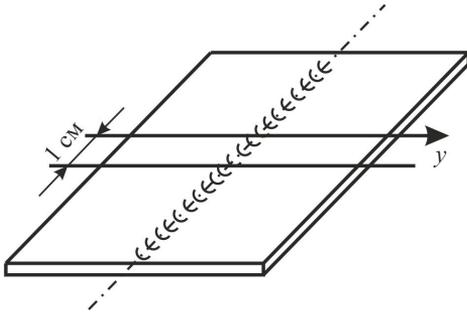


Рис. 2.4. Нескінченна тонка пластина при наплавленні валика (зварюванні стику)

Крива розподілу максимальних температур  $T_{\max}$  у поперечному перерізі пластини може бути побудована на основі теорії М.М. Рикаліна. Для випадку лінійного швидкорухомого джерела тепла та за відсутності тепловіддачі в зовнішнє середовище форма цієї кривої виражається виразом

$$T_{\max} = 0,242 \frac{q_{\text{п}}}{c_{\text{р}} s y},$$

де  $q_{\text{п}}$  – погонна енергія зварювання;  $c_{\text{р}}$  – об'ємна теплоємність матеріалу пластини;  $s$  – товщина пластини;  $y$  – відстань від осі шва до даної точки.

Відповідно до розподілу максимальних температур розподіляються і максимальні температурні деформації:

$$\varepsilon_{\max}^{\alpha} = \alpha T_{\max} = 0,242 \frac{\alpha q_{\text{п}}}{c_{\text{р}} s y}. \quad (2.1)$$

Виріжемо з нескінченної пластини штабку шириною, що дорівнює 1 см, і розглянемо її деформації (див. рис. 2.4). Розподіл максимальних температурних деформацій волокон цієї штабки показано на рис. 2.5, *a*.

Оскільки переміщення кінців волокон неможливі (внаслідок нескінченної жорсткості пластини її перерізи в процесі зварювання залишаються плоскими й не переміщуються), то в результаті нагрівання максимальні силові деформації будуть рівні за величиною і зворотні за знаком температурним.

Деформації в деяких волокнах складатимуться з пружних і пластичних, а в деяких – тільки з пружних або тільки з пластичних. Розділити зони пружних і пластичних деформацій на епюрі можна знаючи залежність границі пружних деформацій  $\varepsilon_{\text{т}}$  від температури (заштрихована частина на рис. 2.5, *a*).

При охолодженні після зварювання волокна, що отримали пластичні деформації укорочення, повинні були б коротшати відповідно до величини цих деформацій  $\varepsilon_{\text{рн}}$  (див. рис. 2.5, *б*). Але оскільки переріз пластини і в цьому випадку залишається плоским та не переміщується, у волокнах виникнуть силові деформації розтягу, що також складаються з пружної та пластичної складових, тобто  $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\text{рo}} + \varepsilon_{\text{eo}}$ .

Сума пластичних деформацій укорочення, що залишилися після повного охолодження (об'єм поздовжнього укорочення), визначатиметься площею  $F = 2F_{\text{АБВГ}}$ , помноженою на товщину листа  $s$ :  $v = -2F_{\text{АБВГ}} s$ .

Знак мінус (–) свідчить, що залишкові пластичні деформації негативні й відповідають укороченню волокон.

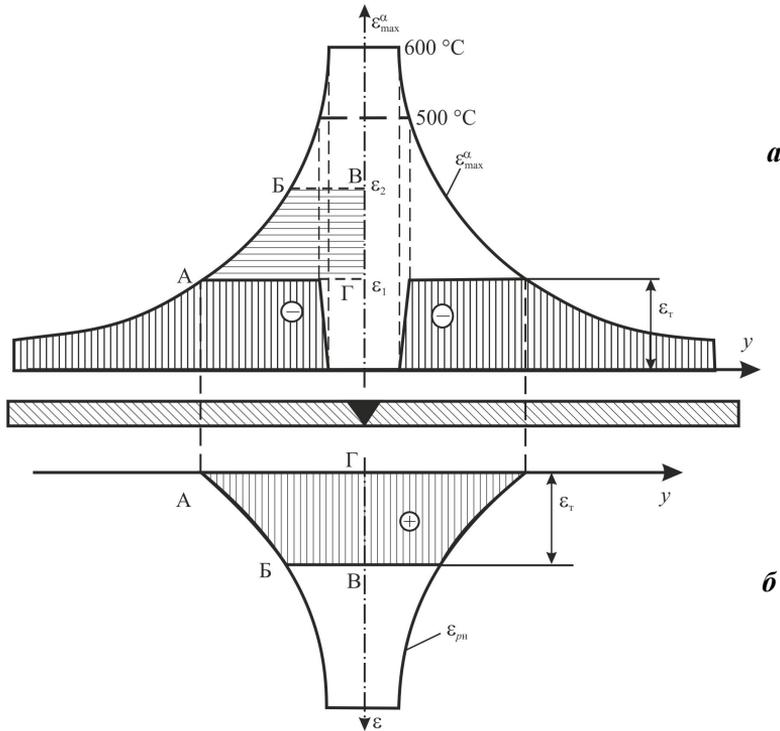


Рис. 2.5. Схема визначення зварювальних деформацій в інженерному методі М.О. Окерблома:  
**a** – етап нагрівання; **б** – етап охолодження

Для зручності обчислення та більшої наочності фігуру АБВГ з площею  $F_{\text{АБВГ}}$  перенесемо на рис. 2.5, **a**. Із нього видно, що  $F_{\text{АБВГ}}$  можна знайти як інтеграл кривої  $\varepsilon_{\text{max}}^{\alpha}$  уздовж вертикальної осі в інтервалі від  $\varepsilon_1$  до  $\varepsilon_2$ , тобто

$$F_{\text{АБВГ}} = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} y d\varepsilon^{\alpha}. \text{ Крім того, } \varepsilon_1 = \varepsilon_T; \quad \varepsilon_2 = 2\varepsilon_T. \text{ Підставимо значення } y \text{ через}$$

$\varepsilon_{\text{max}}^{\alpha}$  з рівняння (2.1):

$$y = \frac{0,242\alpha q_{\text{п}}}{c\rho s\varepsilon^{\alpha}};$$

$$F_{\text{АБВГ}} = \int_{\varepsilon_T}^{2\varepsilon_T} \frac{0,242\alpha q_{\text{п}}}{c\rho s\varepsilon^{\alpha}} d\varepsilon^{\alpha} = 0,242 \frac{\alpha}{c\rho} q_{\text{п}} \frac{1}{s} \int_{\varepsilon_T}^{2\varepsilon_T} \frac{1}{\varepsilon^{\alpha}} d\varepsilon^{\alpha} = 0,242 \frac{\alpha}{c\rho} q_{\text{п}} \frac{1}{s} \ln \varepsilon^{\alpha} \Big|_{\varepsilon_T}^{2\varepsilon_T};$$

$$\ln \varepsilon_T \Big|_{\varepsilon_T}^{2\varepsilon_T} = \ln 2\varepsilon_T - \ln \varepsilon_T = \ln \frac{2\varepsilon_T}{\varepsilon_T} = \ln 2 = 0,693;$$

$$v = -2F_{\text{АБВГ}}s = -2 \cdot 0,242 \frac{\alpha}{c\rho} q_{\text{п}} \frac{1}{s} 0,693s = -0,335 \frac{\alpha}{c\rho} q_{\text{п}} \text{ см}^2.$$

Таким чином, у загальному вигляді відносний об'єм поздовжнього укорочення можна записати як

$$v = -0,335 \frac{\alpha}{c\rho} q_{\text{п}} \text{ см}^2. \quad (2.2a)$$

Якщо підставити значення характеристик теплофізичних властивостей для низьковуглецевих та низьколегованих сталей (середні в діапазоні температур 20...600 °C)  $\alpha = 13,25 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{°C}}$  та  $c\rho = 4,1 \text{ Дж}/(\text{см}^3 \cdot \text{°C})$ , отримаємо

$$v = -1,08 \cdot 10^{-6} q_{\text{п}} \text{ см}^2. \quad (2.2б)$$

Відповідно для усадкової сили можна одержати вираз, прийнявши модуль пружності  $E = 2 \cdot 10^7 \text{ Н}/\text{см}^2$ :

$$P_{\text{yc}} = v E = -1,08 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^7 q_{\text{п}} = -21,6 q_{\text{п}} \text{ Н}, \quad (2.3)$$

тобто в таких сталях усадкова сила в ньютонах приблизно в 20 разів більша від погонної енергії в джоулях на сантиметр.

Як показали численні експерименти, отримані для зварювання шва на пластині нескінченної жорсткості вирази можуть з достатньою точністю застосовуватися і для елементів кінцевої жорсткості, якщо виконується умова  $q_{\text{п}}/F \leq 600 \text{ Дж}/\text{см}^3$ , де  $F$  – площа перерізу зварного елемента,  $\text{см}^2$ . Інакше одержимо завищені значення об'ємів та усадкових сил.

Експериментальні вимірювання деформацій на різних матеріалах показали, що інженерний метод М.О. Окерблома дає достатньо точні результати тільки для низьковуглецевих і низьколегованих сталей. Для аустенітних та мартенситних сталей, титанових і алюмінієво-магнієвих сплавів результати розрахунків можуть помітно розходитися з дійсними деформаціями та напруженнями, що пояснюється невиконанням прийнятих гіпотез (плоских перерізів, умовної діаграми розтягнення) в цих матеріалах.

## 2.2. Зона пружно-пластичних деформацій

У деяких випадках при розрахунках зварювальних деформацій необхідно знати площу зони, в якій діють усадкові (активні) напруження та в межах якої зосереджені залишкові пластичні деформації. Як було встановлено при розгляді термомеханічної задачі (підрозд. 2.1), пластичні деформації розподілені

нерівномірно:  $\epsilon$  ділянки, на яких деформації поступово збільшуються від 0 до границі пружних деформацій  $\epsilon_T$  (рис. 2.6). В інженерних розрахунках епюру спрощують, замінюють її рівновеликою, пластичні деформації приймають рівномірно розподіленими в межах деякої зони протяжністю  $b_T$  в усі сторони від осі шва. Цю зону площею  $F_T$  називають зоною пружно-пластичних деформацій (ППД), урахувуючи те, що в ній виникають не тільки пружні, але й пластичні деформації.

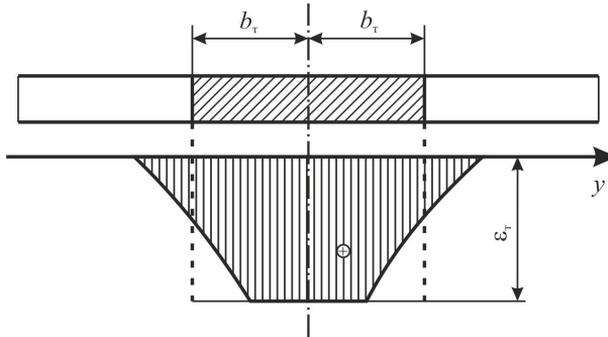


Рис. 2.6. Схема визначення площі зони пружно-пластичних деформацій

Якщо прийняти, що усадкові напруження досягають  $\sigma_T$  та рівномірно розподіляються по зоні ППД, то її площу можна визначити за формулою, яка справедлива для елементів дуже великої жорсткості:

$$F_T = \frac{-P_{yc}}{\sigma_T} = \frac{-v}{\epsilon_T}. \quad (2.4)$$

М.О. Окерблом запропонував більш точну формулу, що враховує кінцеву жорсткість зварного елемента:

$$F_T = \frac{1}{\left(1/F + y^2/I_z - \epsilon_T/v\right)} = \frac{1}{\left(1/F + y^2/I_z - \sigma_T/P_{yc}\right)}, \quad (2.5a)$$

де  $I_z$  – момент інерції перерізу відносно власної осі, перпендикулярної до площини вигину,  $\text{см}^4$ ;  $y$  – відстань від осі шва до нейтральної осі зварної балки,  $\text{см}$ .

Якщо для низьковуглецевої сталі прийняти  $\epsilon_T = 1,2 \cdot 10^{-3}$ ;  $v = -1 \cdot 10^{-6} q_{II}$ , то

$$F_T = \frac{1}{\left(1/F + y^2/I_z + 1200/q_{II}\right)}. \quad (2.56)$$

Якщо наплавлення проводиться по осі пластини ( $y = 0$ ), то

$$F_T = 1 / \left( \frac{1}{F} - \frac{\varepsilon_T}{\nu} \right) = 1 / \left( \frac{1}{F} - \frac{\sigma_T}{P_{yc}} \right).$$

Знаючи площу  $F_T$ , можна знайти протяжність зони ППД  $b_T$  на всі сторони від осі шва. Якщо врахувати, що площа  $F_T$  розподіляється на всі сторони пропорційно товщині зварюваних деталей подібно до тепла при зварюванні, то при з'єднанні різних товщин  $b_T = F_T / (s_1 + s_2)$  (рис. 2.7, *a*), однакових товщин  $b_T = F_T / 2s$  (*б*) і в тавровому з'єднанні  $b_T = F_T / (2s_1 + s_2)$  (*в*), тобто

$$b_T = \frac{F_T}{\Sigma s},$$

де  $\Sigma s = s_1 + s_2$  – сума товщин, в які розповсюджується тепло при зварюванні ( $s_1, s_2$  – товщини з'єднуваних елементів).

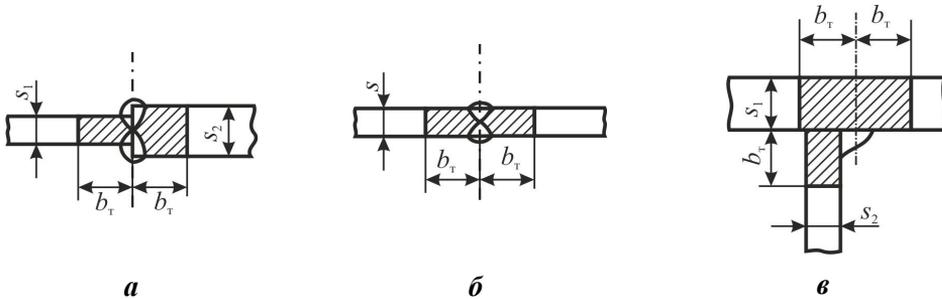


Рис. 2.7. Схема визначення протяжності зони пружно-пластичних деформацій

### 2.3. Деформаційна задача

Переміщення, які спостерігаються в балці під дією поздовжньої усадкової сили  $P$ , можуть бути знайдені за формулами опору матеріалів. Наприклад, розглянемо балку прямокутного перерізу, зображену на рис. 2.8. Після наплавлення валика на її верхню крайку внаслідок нагрівання і пластичних деформацій укорочення на балку по осі зони пружно-пластичних деформацій (здебільшого з достатньою точністю за вісь зони ППД можна приймати вісь шва) буде діяти поздовжня усадкова сила  $P$ , що стискає її.

Під дією сили  $P$  довжина балки по її осі зменшиться на величину

$$\Delta l = \frac{Pl}{EF} = \frac{\nu l}{F} = \frac{V}{F}, \tag{2.6}$$

де  $l$  – довжина балки;  $E$  – модуль пружності;  $F$  – площа поперечного перерізу балки;  $V$  – абсолютний об'єм поздовжнього укорочення шва (величина від'ємна).

Якщо вісь шва не збігається з віссю балки, усадкова сила створює момент вигину

$$M = Py,$$

де  $y$  – відстань від осі балки до осі шва.

Для характеристики напрямку вигину умовимося у вважати позитивним, якщо вісь шва розташована нижче від осі балки, і негативним – якщо вище. За таким правилом знаків позитивний прогин буде направлений опуклістю вниз.

Під дією моменту вигину  $M$  вісь балки отримає вигин, який можна охарактеризувати кривизною  $C$  (величиною, що зворотна радіусу кривизни й дорівнює куту повороту поперечних перерізів на одиничній довжині балки), куту повороту кінцевих перерізів  $\varphi$  або стрілкою прогину осі балки  $f$  (рис. 2.9).

Характеристики вигину залежать від величини моменту та жорсткості балки при вигині й визначаються за формулами опору матеріалів

$$\begin{aligned} C &= \frac{M}{EI} = \frac{Py}{EI} = \frac{vy}{I}, \\ \varphi &= Cl = \frac{vyl}{I} = \frac{Vy}{I}, \\ f &= \frac{Ml^2}{8EI} = \frac{Pyl^2}{8EI} = \frac{vyl^2}{8I} = \frac{Vyl}{8I} = \frac{\varphi l}{8}, \end{aligned} \quad (2.7)$$

де  $I$  – власний момент інерції поперечного перерізу балки відносно осі, перпендикулярної до площини вигину.

Наведені формули справедливі для балок з будь-яким постійним за довжиною перерізом, якщо заварюється безперервний шов.

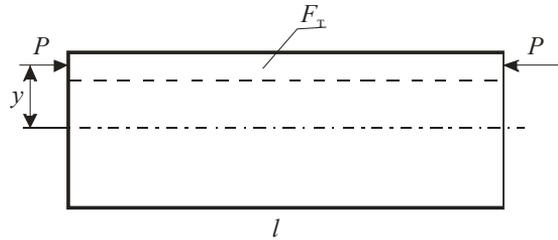


Рис. 2.8. Балка з безперервним швом на верхній країці по всій її довжині

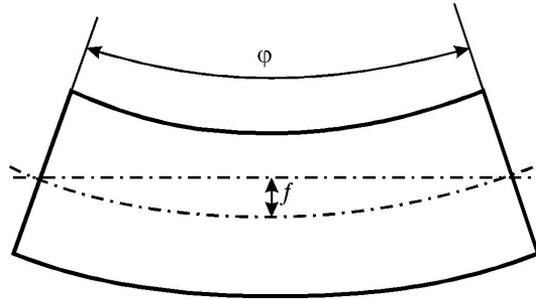


Рис. 2.9. Параметри вигину балки

**Заварювання короткого шва.** При заварюванні короткого шва пластичні деформації укорочення та усадкова сила вздовж шва розподілені нерівномірно (рис. 2.10,*а*).

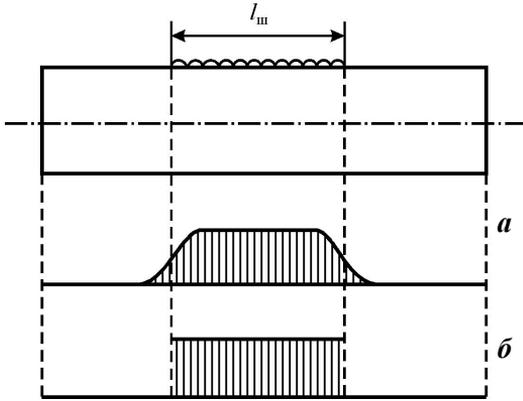


Рис. 2.10. Дійсний (*а*) та умовний (*б*) розподіли пластичних деформацій по довжині короткого шва  $l_{ш}$

В інженерних розрахунках цей розподіл спрощено приймається рівномірним та зосередженим тільки на довжині шва (див. рис. 2.10,*б*). Виходячи із цих припущень, укорочення і вигин балки обчислюються за рівняннями

$$\Delta l = \frac{Pl_{ш}}{EF} = \frac{vl_{ш}}{F} = \frac{V}{F};$$

$$C_{ш} = \frac{M}{EI} = \frac{Py}{EI} = \frac{vy}{I};$$

$$\varphi = C_{ш}l_{ш} = \frac{vy l_{ш}}{I} = \frac{Vy}{I},$$

де  $C_{ш}$  – кривизна балки на ділянці зварювання шва.

Для визначення стрілки прогину можна скористатися методом фіктивної балки, запропонованим М.О. Окербломом. Фіктивна балка – це однопрогонова шарнірно оперта кінцями балка довжиною  $l$ , яка має рівномірно розподілене на ділянці зварного шва навантаження  $q_{\phi}$ , що чисельно дорівнює кривизні  $C_{ш}$  (рис. 2.11,*а*).

Якщо довжина шва  $l_{ш}$  набагато менша від довжини балки  $l$  (у чотири і більше разів), то з достатньою точністю фіктивну балку можна завантажити зосередженою силою  $P_{\phi}$ , що чисельно дорівнює куту повороту кінцевих перерізів  $\varphi$  (див. рис. 2.11,*б*). Ординати епюри моментів вигину фіктивної балки  $M_{\phi}$  (див. рис. 2.11,*в*) будуть чисельно дорівнювати прогинам у відповідних

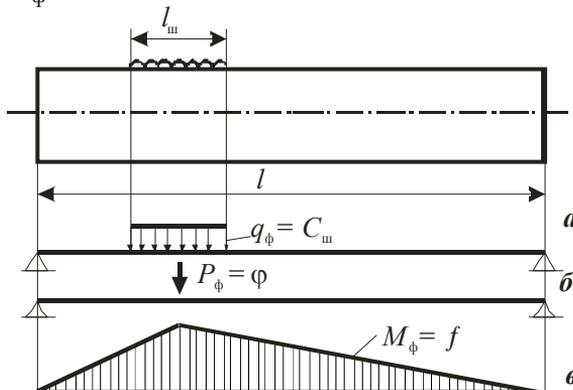


Рис. 2.11. Фіктивна балка для визначення стрілки прогину: *а* – еюра кривизни; *б* – фіктивне навантаження; *в* – еюра згинальних моментів

перерізах дійсної балки, відповідно, максимальний момент вигину – максимальний стрілки прогину:

$$M_{\phi \max} = f_{\max} \cdot$$

Зокрема, якщо короткий шов розташований посередині довжини балки, то  $M_{\max} = Pl/4$  і  $f_{\max} = \phi l/4$ .

**Зварювання переривчастого шва.** Переривчастий шов (рис. 2.12) – це система коротких швів, які регулярно повторюються. Загальні деформації від таких швів знаходять як суму деформацій від кожної ділянки шва.

Поздовжнє укорочення осі балки

$$\Delta l = \frac{Pl_{\text{ш}}}{EF} n = \frac{vl_{\text{ш}}}{F} n,$$

де  $n$  – кількість ділянок у переривчастому шві.

Якщо довжина всього переривчастого шва  $l$ , його крок –  $t$ , то кількість ділянок  $n = l/t$ , а загальне укорочення

$$\Delta l = \frac{vl_{\text{ш}}}{F} \frac{l}{t} = \frac{V}{F},$$

де  $V = vl_{\text{ш}}l/t$  – об'єм поздовжнього укорочення переривчастого шва.

Вигин балки (кривизна її осі) при зварюванні переривчастого шва зосереджений на ділянках зварювання, як видно з рис. 2.13,а.

Ураховуючи малі розміри  $l_{\text{ш}}$  і  $t$  у порівнянні з довжиною балки  $l$ , можна з достатньою точністю вважати кривизну при зварюванні переривчастого шва рівномірно розподіленою, як показано на рис. 2.13,б:

$$C_{\text{пер}} = C_{\text{ш}} \frac{l_{\text{ш}}}{t} = \frac{\nu y l_{\text{ш}}}{I t}.$$

Кут повороту кінцевих перерізів балки після зварювання переривчастого шва

$$\phi = C_{\text{пер}} l = \frac{\nu y l_{\text{ш}}}{I t} l = \frac{Vy}{I},$$

а стрілка прогину знаходиться як при безперервному шві:

$$f = \frac{\phi l}{8}.$$

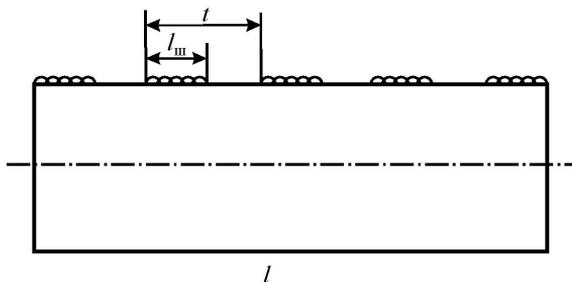


Рис. 2.12. Переривчастий шов

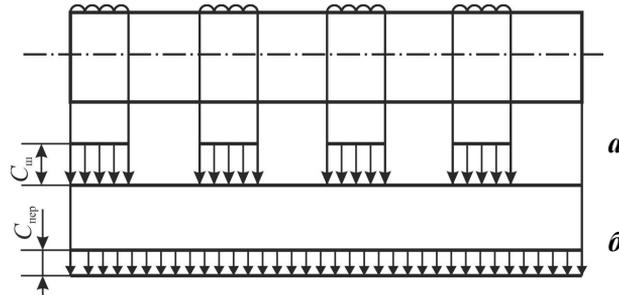


Рис. 2.13. Дійсний (а) та умовний (б) розподіли кривизни в балці з переривчастим швом

Порівняння отриманих для різних видів швів формул показує, що вирази для обчислення укорочення осі балки  $\Delta l$  та кута повороту кінцевих перерізів при вигині універсальні. Відмінність деформацій, що виникають при зварюванні безперервних або переривчастих, довгих чи коротких швів, ураховується при визначенні об'єму поздовжнього укорочення  $V$ .

Формулою  $f = \phi l / 8$  можна користуватися для знаходження стрілки прогину тільки при зварюванні безперервних та переривчастих швів по всій довжині балки. З деякою похибкою вона може бути застосована в разі зварювання декількох коротких швів, розташованих на всій довжині балки.

#### 2.4. Напруження, створювані поздовжнім укороченням

Поздовжня усадка швів викликає як поздовжні  $\sigma_x$ , так і поперечні  $\sigma_y$  напруження.

**Поздовжні напруження  $\sigma_x$ .** Величина і характер розподілу цих напружень залежать від роду матеріалу, режиму зварювання та ступеня закріплення зварюваного елемента. Матеріал та режим зварювання визначають активні напруження, які утворюються в зоні пружно-пластичних деформацій. Відповідно до механізму утворення залишкових деформацій, пов'язаного з пластичною деформацією металу при нагріванні й охолодженні, напруження розтягу в пружно-пластичній (активній) зоні досягають границі плинності. Проте це стосується тільки низьковуглецевих та низьколегованих сталей. Високолеговані сталі та сплави алюмінію і титану мають деякі особливості, про які буде сказано нижче.

У низьковуглецевих сталях режим зварювання впливає тільки на ширину зони ППД. Чим більша погонна енергія, тим ширша ця зона. Величина напружень залишається на рівні границі плинності (деяким підвищенням напружень за рахунок зміцнення металу можна нехтувати).

За межами активної зони діють зрівноважувальні напруження, тому їх величина і характер розподілу визначаються умовами рівноваги. За відсутності зовнішніх закріплень напруження повністю зрівноважуються в межах перерізу елемента. При визначенні реактивних напружень у більшості

реальних випадків можна користуватися гіпотезою плоских перерізів. Виняток становлять плоскі листові елементи великої ширини, в яких напруження по мірі віддалення від шва помітно зменшуються. Епюри залишкових напружень у незакріплених елементах з низьковуглецевої сталі мають вигляд, показаний на рис. 2.14 і 2.15. На цих та всіх подальших рисунках для простоти наводиться умовний вигляд епюр. Дійсні епюри відрізняються плавними переходами від однієї зони до іншої (пунктирна крива на рис. 2.14).

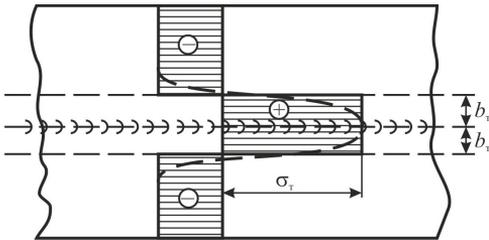


Рис. 2.14. Епюра поздовжніх напружень при зварюванні шва по осі вузької штаби

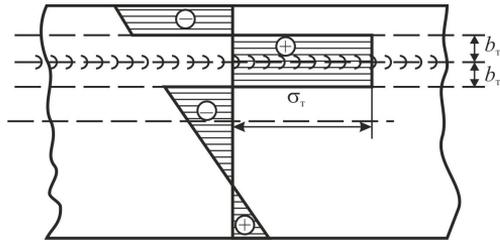


Рис. 2.15. Епюра поздовжніх напружень при зварюванні шва на деякій відстані від осі вузької штаби

Величина залишкових реактивних напружень приблизно може бути знайдена за формулою опору матеріалів

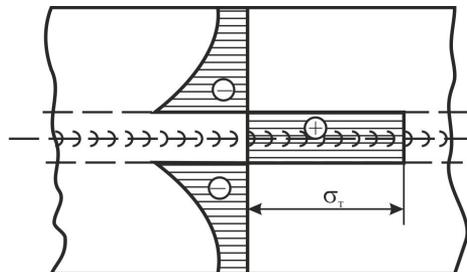
$$\sigma = \frac{P_{yc}}{F} + \frac{M_{yc}y}{I}, \quad (2.8)$$

де  $F$  – площа поперечного перерізу зварюваного елемента;  $I$  – момент інерції перерізу відносно осі, перпендикулярної до площини вигину;  $y$  – відстань від ЦВ перерізу до точки, в якій визначається напруження;  $M_{yc} = P_{yc} y_{ш}$  – момент усадкової сили ( $y_{ш}$  – відстань від ЦВ перерізу до осі шва, що викликає напруження).

При підстановці  $P_{yc}$  і  $y_{ш}$  у формулу (2.8) необхідно враховувати їх знаки.

При великій ширині листів, сумірних з довжиною, гіпотеза плоских перерізів не виконується, перерізи після зварювання помітно викривляються, рівномірність розподілу напружень порушується, відповідно помітно викривлюється епюра реактивних напружень (рис. 2.16).

Рис. 2.16. Епюра поздовжніх напружень при зварюванні шва на осі широкого листа



При зварюванні в закріпленому стані активні напруження частково або повністю (залежно від жорсткості зовнішнього закріплення) зрівноважуються реактивними зусиллями в закріпленнях, тому реактивні напруження в пластині зменшуються або повністю відсутні (при абсолютно жорсткому закріпленні) (рис. 2.17). Самі ж активні напруження, як і раніше, дорівнюють  $\sigma_T$ .

Після зняття зовнішніх закріплень реактивні зусилля в зварному елементі перерозподіляються. При цьому змінюються напруження і в активній зоні (див. рис. 2.17, в, г).

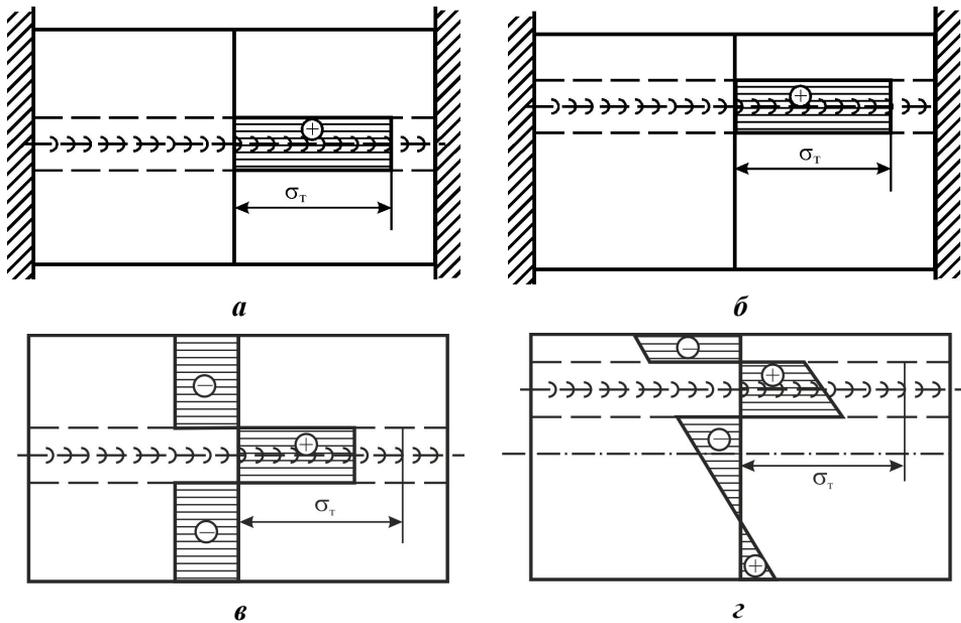


Рис. 2.17. Епюри поздовжніх напружень при зварюванні шва в закріпленій пластині до зняття (**а, б**) та після зняття (**в, г**) закріплення

На зменшенні активних напружень після зняття закріплень ґрунтується поширена думка про можливість значного зменшення залишкових деформацій при зварюванні в закріпленому стані. Зовнішні закріплення дійсно дещо знижують залишкові активні напруження, але якщо врахувати, що зі збільшенням жорсткості конструкції при зварюванні площа активної зони також збільшується, то зменшення реактивних напружень буде малим (у межах 10...15 %).

Аустенітні сталі відрізняються від низьковуглецевих вищим ТКЛР та відсутністю ділянки плинності на діаграмі розтягнення. При зварюванні таких сталей величина пластичних деформацій більша. Помітно проявляється ефект зміцнення (наклепу) металу, тому напруження в активній зоні вищі за умовну границю плинності на 10...15 %. У решті характер розподілу напружень залишається таким же, як і для низьковуглецевих сталей.

Структурні перетворення, які відбуваються при нагріванні та охолодженні в сталях, можуть докорінно змінити характер розподілу і величину залишкових напружень. Скорочення металу при охолодженні змінюється його різким розширенням при температурі  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення (рис. 2.18).

В інтервалі температур  $T_1 - T_2$  структурного перетворення ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) напруження розтягу в зоні ППД зменшуються і переходять у стиск. При подальшому охолодженні знову можуть з'явитися напруження розтягу. Кінцева величина залишкових напружень залежатиме від величини структурної деформації  $\varepsilon_s$  і температури закінчення структурних перетворень  $T_2$ . При швидкостях охолодження, які призводять до мартенситного перетворення, зазвичай виникають залишкові напруження стиску. Епюру залишкових напружень  $\sigma_x$  при зварюванні сталі, здатної до загартування, показано на рис. 2.19.

Поблизу шва виділяються дві характерні зони: перша – внутрішня, загартована зона, ширина якої відповідає ізотермі біля  $800^\circ\text{C}$ , з напруженнями стиску; друга – зона пружно-пластичних деформацій, ширина якої зазвичай відповідає ізотермі  $200 \dots 300^\circ\text{C}$ , з напруженнями розтягу. Обидві зони складають активну зону.

Напруження за межами активної зони – реактивні, вони зрівноважують активні, тому знак та величина їх залежать від рівнодіючої всіх активних напружень. Здебільшого в активній зоні переважають напруження розтягу, а тому реактивні будуть напруженнями стиску, хоча і меншої величини, ніж за відсутності загартованої зони.

Ще складніший вигляд має епюра залишкових напружень при зварюванні сталі, здатної до загартування, аустенітними електродами. У цьому випадку всередині загартованої зони з'являється нова зона – зона аустенітного наплавленого металу з напруженнями розтягу (рис. 2.20).

Залишкові напруження  $\sigma_x$  у титанових та алюмінієвих сплавах розподілені так само, як у низьковуглецевих та аустенітних сталях, проте напруження в активній зоні на  $30 \dots 40\%$  нижчі від

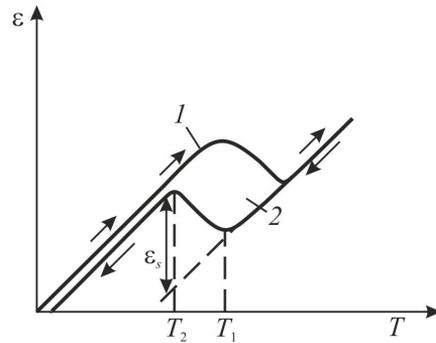


Рис. 2.18. Вигляд дилатограми низьколегованої сталі при нагріванні (1) та охолодженні (2)

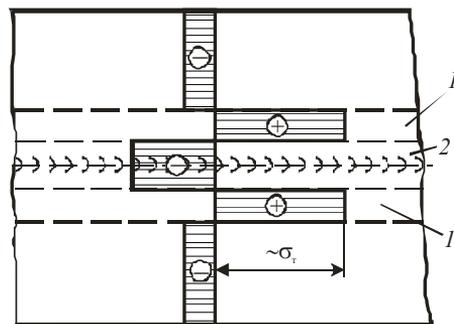


Рис. 2.19. Епюра поздовжніх напружень при зварюванні сталі, здатної до загартування:  
1 – зона ППД; 2 – загартована зона

границі плинності. Така мала величина напружень не відповідає розрахунковим методам, заснованим на гіпотезі плоских перерізів. Основною причиною цього є значна округлість ізотерм при зварюванні титанових (мала швидкість зварювання) та алюмінієвих (висока теплопровідність) сплавів. При зварюванні цих сплавів перерізи не зберігають площинності, унаслідок чого нагрівання металу відбувається в менш жорстких умовах. Відповідно, зменшуються пластичні деформації при нагріванні, тому після охолодження напруження не досягають границі плинності (рис. 2.21).

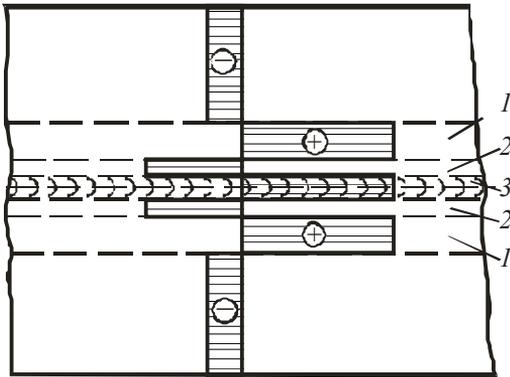


Рис. 2.20. Епюра поздовжніх напружень при зварюванні сталі, здатної до загартування, аустенітними електродами:

- 1 – зона ППД; 2 – зона гартування;
- 3 – зона наплавленого аустенітного металу

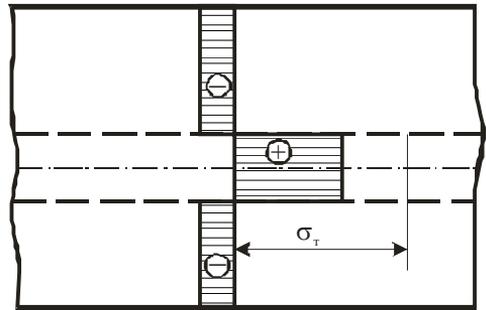


Рис. 2.21. Епюра поздовжніх напружень при зварюванні алюмінієво-магнієвих і титанових сплавів

**Поперечні напруження  $\sigma_y$**  є наслідком вигину частин з'єднання в їх площині. На рис. 2.22 показано вигляд частин стикового з'єднання після зварювання, який вони мали б за відсутності зв'язку між ними. Оскільки після зварювання незалежний вигин частин з'єднання неможливий, то в металі шва на його кінцях діють поперечні напруження стиску  $\sigma_y$ , які за відсутності зовнішніх закріплень зрівноважуються напруженнями розтягу на решті довжини шва, як показано на рис. 2.23. Найяскравіше виражена епюра  $\sigma_y$  в перерізі по осі шва. У міру віддалення від осі напруження  $\sigma_y$  швидко зменшуються.

Напруження стиску на кінцевих ділянках можуть бути причиною утворення "будиночків" унаслідок втрати стійкості крайок листових зварних елементів. Величина напружень  $\sigma_y$  залежить від величини усадкової сили і геометричних розмірів конструкції та знаходиться методами теорії пружності.

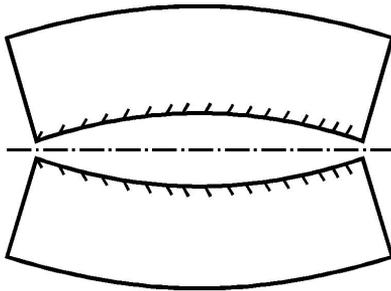


Рис. 2.22. Вигин частин пластини внаслідок поздовжнього укорочення (механізм утворення поперечних напружень унаслідок поздовжнього укорочення з'єднання)

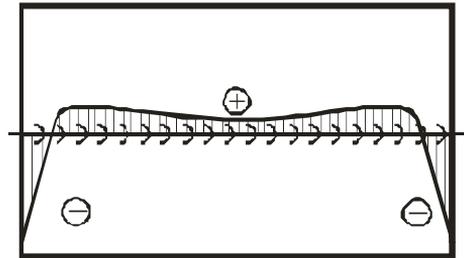


Рис. 2.23. Епюра поперечних напружень, що утворюються внаслідок поздовжнього укорочення після зварювання пластин

Розглянуті закономірності розподілу напружень отримані з використанням відповідних спрощувальних гіпотез (див. підрозд. 1.4). Сучасні методи комп'ютерного моделювання, зокрема МСЕ, дозволяють отримати точнішу картину (рис. 2.24–2.26). Як видно з рис. 2.24 і 2.25, при зварюванні з великою швидкістю (без урахування неодночасного охолодження по довжині шва) розподіл напружень на більшій частині довжини шва відповідає інженерній теорії та лише на невеликих ділянках поблизу кінців з'єднання картина ускладнюється: різко зменшуються поздовжні й з'являються значні поперечні напруження. При зварюванні ділянками (із зупинками) (див. рис. 2.26) розподіл напружень ще більше ускладнюється, на стиках ділянок поздовжні напруження зменшуються, а поперечні помітно збільшуються. Рівень максимальних поздовжніх напружень при цьому практично не змінюється.

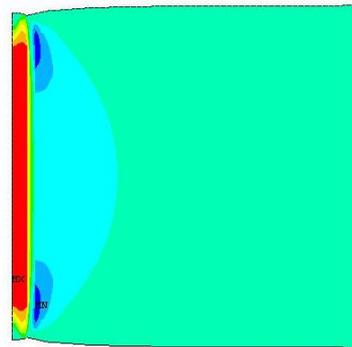


Рис. 2.24. Поле поздовжніх напружень після зварювання пластин з великою швидкістю (вправо від осі шва)

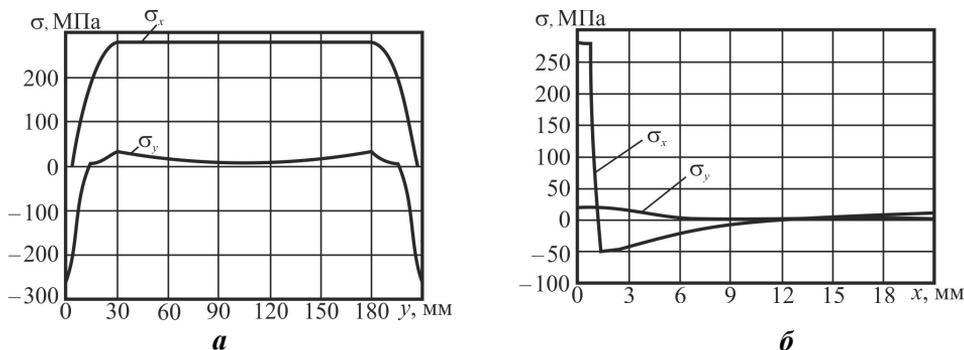


Рис. 2.25. Епюри поздовжніх і поперечних напружень уздовж (а) та поперек (б) осі стику при зварюванні з великою швидкістю

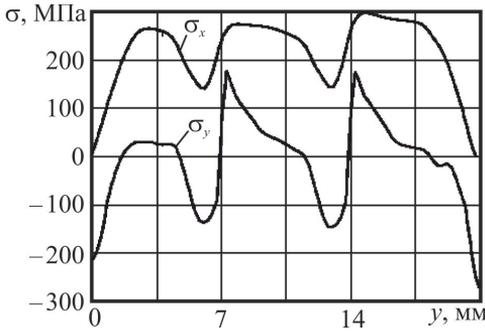


Рис. 2.26. Епюри напружень уздовж осі з'єднання при зварюванні ділянками

## 2.5. Вплив вихідного напруженого стану

Раніше при визначенні усадкової сили  $P_{yc}$  або об'єму поздовжнього укорочення  $v$  передбачалося, що зварювання проводиться на ненапруженому металі. У більшості практичних випадків доводиться виконувати зварювання на металі, в якому вже є вихідні напруження. Останні можуть створюватися зовнішнім навантаженням, власною вагою конструкції, складальними зусиллями, раніше завареними з'єднаннями тощо.

Наявність вихідних напружень змінює зварювальні деформації. Не завжди цей вплив суттєвий, але іноді деформації збільшуються або зменшуються у декілька разів. Необхідно вміти правильно оцінювати характер та ступінь цього впливу, інакше заходи щодо боротьби з деформаціями не дадуть можливості їх зменшення.

Вплив вихідних напружень на залишкові зварювальні деформації пояснюється зміною величини залишкових пластичних деформацій укорочення. При цьому вихідні напруження стиску збільшують ці деформації, а розтягу — зменшують їх.

Наприклад, розглянемо вплив вихідних напружень при зварюванні по осі пластини, жорстко закріпленої в напруженому стані до початку зварювання, як показано на рис. 2.27. Жорстке закріплення пластини дозволяє вважати поперечні перерізи такими, що не переміщуються в процесі зварювання.

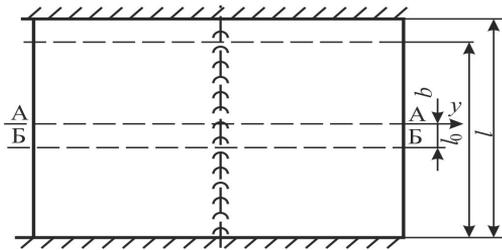


Рис. 2.27. Зварювання заздалегідь напруженої пластини в жорстко закріпленому стані

Двома паралельними перерізами А-А і Б-Б виділимо в пластині штабку, що має у вільному стані ширину  $b = 1$ , а в напруженому  $b = 1 + \Delta_{вих}$ , де  $\Delta_{вих} = (l - l_0)/l_0$  — вихідна деформація пластини ( $l, l_0$  — довжина відповідно навантаженої та ненавантаженої пластин).

Розглянемо напружено-деформований стан штабки в процесі зварювання та після охолодження.

Оскільки перерізи пластини в процесі нагрівання та охолодження не переміщуються, деформації, які утворюються у волокнах пластини, визначаються тільки максимальною температурою їх нагрівання, тобто  $\varepsilon_{\max}^{\alpha} = \alpha T_{\max}$ .

За відомим законом розподілу  $T_{\max}$  (див. підрозд. 2.2) побудуємо криву  $\varepsilon_{\max}^{\alpha}$  (рис. 2.28, *a*).

Оскільки крива вільного розташування кінців волокон при нагріванні (крива  $\varepsilon_{\max}^{\alpha}$ ) не збігається з дійсним їх розташуванням ( $\Delta_{\text{вих}}$ ), у волокнах виникають силові деформації  $\varepsilon_{\text{н}}$ , величина яких є різницею ординат, тобто  $\varepsilon_{\text{н}} = \Delta_{\text{вих}} - \varepsilon_{\max}^{\alpha}$ .

Залежно від величини і температури силові деформації можуть бути пружними  $\varepsilon_e$ , пружно-пластичними  $\varepsilon_e + \varepsilon_p$  або пластичними  $\varepsilon_p$ . Виділимо на рис. 2.28, *a* епюри пружних (заштрихована частина) та пластичних деформацій. Після охолодження пластини волокна, що отримали пластичні деформації, прагнуть коротшати на величину  $\varepsilon_{\text{рн}}$ . Проте внаслідок жорсткого закріплення волокна залишаються нерухомими і кінці їх розташовуються по прямій  $\Delta_{\text{вих}}$ . Різниця ординат прямої  $\Delta_{\text{вих}}$  і епюри  $\varepsilon_{\text{рн}}$  дасть силові деформації волокон при охолодженні

$$\varepsilon_0 = \Delta_{\text{вих}} - \varepsilon_{\text{рн}}$$

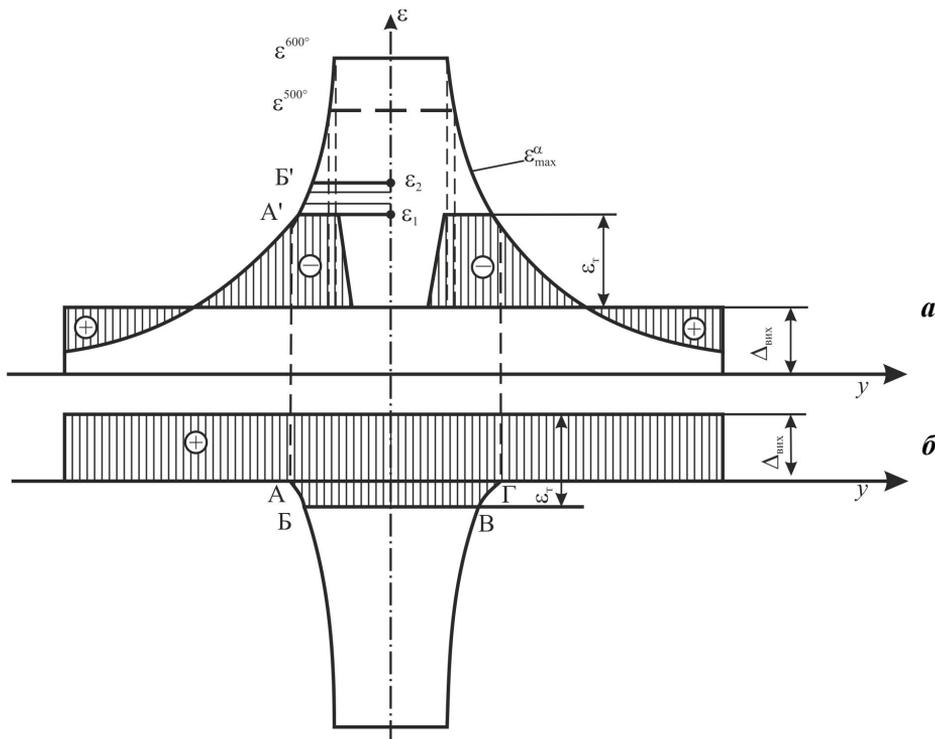


Рис. 2.28. Розв'язок термомеханічної задачі для заздалегідь напруженої пластини

У нашому випадку  $\varepsilon_{pн} < 0$  (при нагріванні волокна отримали пластичні деформації укорочення), отже,  $\varepsilon_o = \Delta_{вих} + |\varepsilon_{pн}|$ .

Епюру деформацій  $\varepsilon_o$  показано на рис. 2.28, б, з якого видно, що частина волокон пластини поблизу осі шва при охолодженні отримує пластичні деформації подовження.

Залишкові деформації в пластині після зварювання (нагрівання) та охолодження будуть дорівнювати алгебраїчній сумі пластичних деформацій  $\varepsilon_{pн}$  і  $\varepsilon_{pо}$ . На рис. 2.28, б ця сума визначається епюрою АБВГ.

Знайдемо об'єм подовжнього укорочення при зварюванні в напруженому стані:  $v' = -F_{АБВГ} \cdot s$ . Для обчислення площі  $F_{АБВГ}$  скористаємося прийомом, описаним у підрозд. 2.1. Сумістимо епюру АБВГ з верхнім рисунком і знайдемо її площу інтегруванням кривої  $\varepsilon_{max}^\alpha$  уздовж вертикальної осі:

$$v' = F_{АБВГ} \cdot s = -2s \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} y d\varepsilon_{max}^\alpha.$$

Межі інтегрування в даному випадку будуть  $\varepsilon_1 = \Delta_{вих} + \varepsilon_T$  і  $\varepsilon_2 = 2\varepsilon_T$ . Підставивши значення  $y$  з виразу (2.3), отримаємо

$$v' = -0,484 \frac{\alpha}{c\rho} q_{п} \int_{\varepsilon_T + \Delta_{вих}}^{2\varepsilon_T} \frac{d\varepsilon^\alpha}{\varepsilon_{max}^\alpha},$$

або після інтегрування

$$v' = -0,484 \frac{\alpha}{c\rho} q_{п} \ln \frac{2\varepsilon_T}{\varepsilon_T + \Delta_{вих}} = -0,484 \frac{\alpha}{c\rho} q_{п} \ln \frac{2}{1 + \Delta_{вих}/\varepsilon_T}. \quad (2.9a)$$

Для зручності аналізу введемо коефіцієнти  $\beta = \Delta_{вих}/\varepsilon_T = \sigma_{вих}/\sigma_T$ , який характеризує початковий напружений стан, і  $m_\sigma = v'/v = P'/P$ , що характеризує зміни об'єму  $v$ , усадкової сили  $P$  та зварювальних деформацій при зварюванні в напруженому стані порівняно зі зварюванням у вільному стані. Використавши коефіцієнти  $\beta$  та  $m_\sigma$  і підставивши значення з рівняння (2.2), отримаємо

$$v' = -0,484 \frac{\alpha}{c\rho} q_{п} \ln \frac{2}{1 + \beta}; \quad (2.9б)$$

$$m_\sigma = \frac{v'}{v} = \frac{\ln 2/(1 + \beta)}{\ln 2} = \frac{\ln 2 - \ln(1 + \beta)}{\ln 2} = 1 - \frac{\ln(1 + \beta)}{\ln 2}. \quad (2.10)$$

Залежність  $m_\sigma = f(\beta)$ , визначену за виразом (2.10), показано на рис. 2.29.

Отримана залежність в інженерних розрахунках може бути замінена на окремих ділянках прямими (показані на рисунку пунктиром):

$$\begin{aligned} \text{при } 0 \leq \beta \leq 1 & \quad m_\sigma = 1 - \beta; \\ \text{при } -0,5 \leq \beta \leq 0 & \quad m_\sigma = 1 - 2\beta; \\ \text{при } -0,8 \leq \beta \leq -0,5 & \quad m_\sigma = -4\beta. \end{aligned}$$

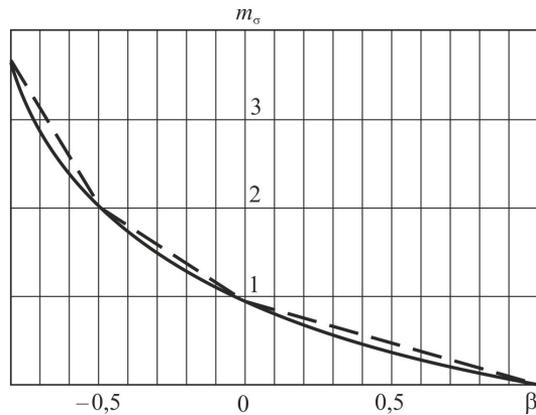


Рис. 2.29. Залежність коефіцієнта  $m_\sigma$  від вихідного напруженого стану

З аналізу отриманих залежностей видно, що вихідні напруження розтягу ( $0 \leq \beta \leq 1$ ) зменшують зварювальні деформації, а стиску ( $-0,8 \leq \beta \leq 0$ ) – збільшують їх. При вихідних напруженнях розтягу, що дорівнюють  $0,5\sigma_T$  ( $\beta = 0,5$ ), зварювальні деформації зменшуються в два рази, а при  $\sigma_{\text{вих}} = \sigma_T$  ( $\beta = 1$ ) – знижуються до нуля. Вихідні ж напруження стиску  $\sigma_{\text{вих}} = -0,5\sigma_T$  ( $\beta = -0,5$ ) збільшують залишкові деформації в два рази.

Усе це слід враховувати при розробці технології зварювання. Необхідно прагнути до збільшення вихідних (наприклад, складальних) напружень розтягу та зниження стиску. Саме таким чином борються з деформаціями при зварюванні площинних секцій корпусу судна.

*Вплив напружень, створених попередніми швами.* Будь-який зварний шов після охолодження створює в зварному елементі залишкові напруження  $\sigma_x$ . Тому при зварюванні на одному елементі кількох швів кожний наступний, починаючи з другого, зварюватиметься по напруженому металу навіть за відсутності зовнішніх сил.

Наприклад, розглянемо пластину з двома швами (рис. 2.30).

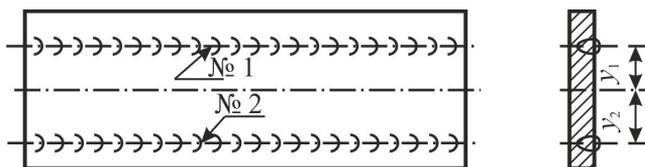


Рис. 2.30. Послідовне зварювання двох швів на пластині

Після зварювання шва № 1 у пластині створюються напруження відповідно до виразу (2.8). Зокрема шов № 2 зварюватиметься по металу, в якому будуть діяти напруження

$$\sigma_{\text{вих}2} = \frac{P_{\text{yc1}}}{F} + \frac{P_{\text{yc1}}y_1y_2}{I},$$

а вихідні деформації

$$\Delta_{\text{вих}2} = \frac{v_1}{F} + \frac{v_1y_1y_2}{I}.$$

Коефіцієнт, що характеризує вихідний напружений стан перед зварюванням шва № 2, визначається за рівнянням

$$\beta_2 = \frac{v_1}{F\varepsilon_T} + \frac{v_1y_1y_2}{I\varepsilon_T}.$$

Знаючи коефіцієнт  $\beta_2$ , знайдемо  $m_{\sigma 2}$ , а потім і усадкову силу від шва № 2 з урахуванням вихідних напружень від зварювання шва № 1:

$$P_{\text{yc}2}^1 = m_{\sigma 2}P_{\text{yc}2}.$$

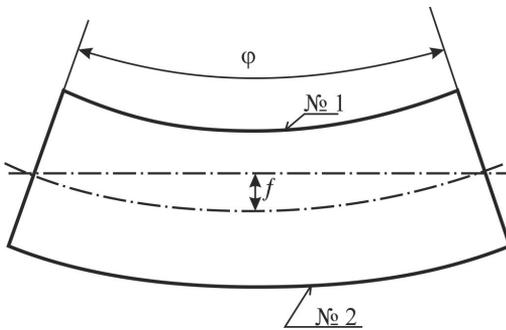


Рис. 2.31. Залишковий вигин балки після послідовного зварювання двох швів

Якщо шви № 1 і № 2 зварюються з однаковою погонною енергією, усадкові сили  $P_{\text{yc}1}$  і  $P_{\text{yc}2}$  у загальному випадку не будуть однакові. Якщо шов № 2 зварюється по розтягнутому металу, то  $P_{\text{yc}2} < P_{\text{yc}1}$ ; якщо по стиснутому, то  $P_{\text{yc}1} < P_{\text{yc}2}$ . Цим пояснюється наявність залишкового вигину зварних елементів з однаковими симетрично розташованими швами (рис. 2.31), але неодноразомно звареними.

## 2.6. Вплив багатопрохідного (багатопродірного) зварювання

Деформації, які викликані поздовжньою усадкою двосторонніх швів, залежать не тільки від режиму зварювання і теплофізичних властивостей, але й від відстані між осями швів кожного проходу і послідовності їх зварювання: одночасно з двох сторін або послідовно з однієї та іншої сторін. У багатьох випадках деформації від двостороннього шва не дорівнюють подвоєній деформації одностороннього, як цього можна було б чекати.

Послідовне виконання двостороннього шва. Розглянемо заварювання двостороннього стикового з'єднання, як показано на рис. 2.32. Можливі три варіанти поєднання погонних енергій зварювання першого (1) і другого (2) швів: з однаковими погонними енергіями  $q_{п1} = q_{п2}$  і різними погонними енергіями  $q_{п1} > q_{п2}$  і  $q_{п1} < q_{п2}$ .

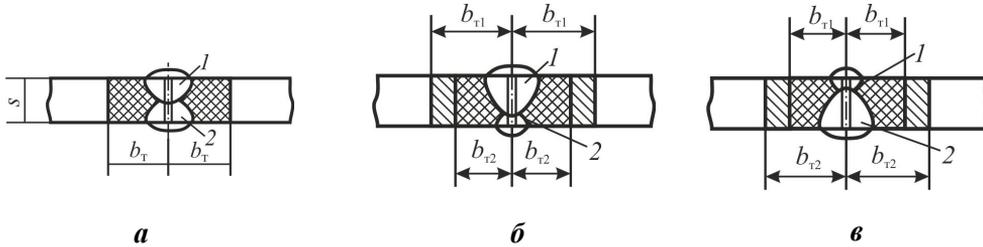


Рис. 2.32. Протяжність зони пружно-пластичних деформацій двостороннього стикового з'єднання при  $q_{п1} = q_{п2}$  (а),  $q_{п1} > q_{п2}$  (б) і  $q_{п1} < q_{п2}$  (в)

Після виконання першого шва і повного його охолодження в з'єднанні будуть залишкові деформації, величина яких визначається відносним об'ємом поздовжнього укорочення  $v_1$ . При першому варіанті зварювання пластичні деформації зосереджені в межах зони ППД на площі  $F_{т1} = 2b_{т1} \cdot s$  (див. рис. 2.32, а). Після зварювання другого шва з тією ж погонною енергією ( $q_{п1} = q_{п2}$ ) зона пружно-пластичних деформацій  $F_{т2}$  повністю збігатиметься із зоною  $F_{т1}$ . Очевидно загальна площа зони ППД від двох швів дорівнює площі ППД одного першого шва ( $F_{т1,2} = F_{т1}$ ). Відповідно усадкові сили й об'єми поздовжнього укорочення будуть однакові, тобто  $P_{yc1,2} = P_{yc1}$  і  $v_{1,2} = v_1$ .

При заварюванні другого шва з меншою погонною енергією ( $q_{п1} > q_{п2}$ ) площа його зони буде менша, тому площа загальної зони після зварювання двох швів буде дорівнювати площі зони від одного першого шва (див. рис. 2.32, б). Відповідно усадкові сили й об'єми поздовжнього укорочення визначатимуться одним першим швом, тобто  $P_{yc1,2} = P_{yc1}$  і  $v_{1,2} = v_1$ .

При заварюванні другого шва з більшою погонною енергією ( $q_{п1} < q_{п2}$ ) площа його зони буде більша, тому площа загальної зони після зварювання двох швів буде дорівнювати площі зони від одного другого шва (див. рис. 2.32, в). Відповідно, усадкові сили та об'єми поздовжнього укорочення визначатимуться одним другим швом, тобто  $P_{yc1,2} = P_{yc2}$  і  $v_{1,2} = v_2$ .

Аналогічно можна сказати про стикові з'єднання, які заварюються більше ніж за два проходи, тобто про багатошарові шви. Таким чином, при заварюванні стикових з'єднань двосторонніми і багатошаровими швами деформації поздовжнього укорочення визначаються одним проходом (шаром), завареним з максимальною погонною енергією.

Розглянемо таврове з'єднання з двостороннім швом катетом  $k$ . Кожен шов заварюється з погонною енергією  $q_{п}$  (рис. 2.33).

Після виконання першого шва (1) і повного його охолодження в з'єднанні будуть залишкові деформації, величина яких визначається відносним об'ємом поздовжнього укорочення  $v_1$ . Пластичні деформації зосереджені в межах зони ППД на площі  $F_{T1}$  (рис. 2.33). Після зварювання другого шва (2) з тією ж погонною енергією зона пружно-пластичних деформацій  $F_{T2}$  частково перекриє зону  $F_{T1}$ . Сумарна зона ППД від двостороннього шва визначатиметься, очевидно, пружно-пластичною зоною другого шва і частиною зони першого, тобто  $F_{T1,2} = F_{T2} + d s_1$ , де  $d = s_2 + k$  – відстань між осями швів. Отже,  $F_{T1,2} = F_{T2} + (s_2 + k)s_1$ .

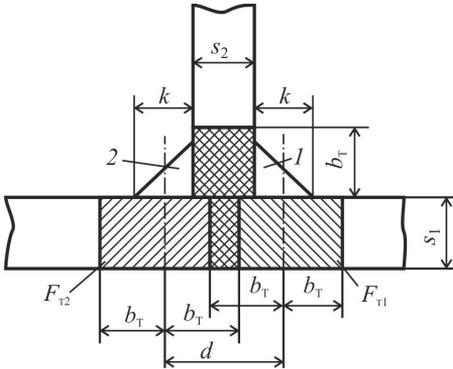


Рис. 2.33. Зони пружно-пластичних деформацій двостороннього таврового з'єднання при  $q_{п1} = q_{п2}$

Введемо поправковий коефіцієнт  $m_{1,2} = F_{T1,2} / F_{T1}$ , який показує, в скільки разів площа пружно-пластичної зони двостороннього шва більша від площі зони одностороннього:

$$m_{1,2} = \frac{F_{T2}}{F_{T1}} + \frac{(s_2 + k)s_1}{F_{T1}}$$

Оскільки за умови однакових погонних енергій повинні бути однакові й площі зон ППД, тобто  $F_{T1} = F_{T2}$ , то

$$m_{1,2} = 1 + \frac{(s_2 + k)s_1}{F_{T1}} \tag{2.11}$$

Отримана формула дозволяє визначити поправковий коефіцієнт  $m_{1,2}$  за відомими розмірами з'єднання та площі зони ППД одностороннього шва.

З достатньою точністю можна прийняти, що збільшення деформацій пропорційне збільшенню площі зони ППД, тобто  $v_{1,2} = m_{1,2}v_1$  і  $P_{ycl,2} = m_{1,2}P_{ycl,1}$ . Це пояснюється тим, що величина залишкових пластичних деформацій кожного волокна з'єднання в пружно-пластичній зоні при повторних нагріваннях не змінюється. У цьому можна перекопати на прикладі нагрівання та охолодження стрижня в умовах жорсткого закріплення.

Значення поправкового коефіцієнта  $m_{1,2}$  за фізичним значенням може змінюватися від 1 до 2. Мінімальне значення  $m_{1,2} = 1$  відповідає випадку, коли зони  $F_{T1}$  та  $F_{T2}$  повністю збігаються, наприклад, при зварюванні стикового з'єднання з однаковою погонною енергією з двох сторін, коли  $q_{п1} = q_{п2}$ , і  $F_{T1} = F_{T2}$  (див. рис. 2.32,а). Максимальне значення поправкового коефіцієнта  $m_{1,2} = 2$  показує, що зони  $F_{T1}$  і  $F_{T2}$  не перекриваються внаслідок великої відстані між осями швів (рис. 2.34). Такий двосторонній шов можна розглядати як два односторонніх, і у формулі (2.11) необхідно прийняти  $m_{1,2} = 2$ .

У більшості реальних таврових з'єднань  $m_{1,2} = 1,1 \dots 1,3$ , приблизно в розрахунках можна приймати  $m_{1,2} = 1,25$ . У суднобудуванні за нормами  $m_{1,2} = 1,15$ .

*Однчасне заварювання двостороннього шва.* При зварюванні "дуга в дугу", коли відстань між осями швів  $d = 0$ , погонна енергія нагрівання

підсумовується, тобто  $q_{п1+2} = q_{п1} + q_{п2}$ . У цьому випадку деформації при  $q_{п1} = q_{п2}$  подвоюються, тобто поправковий коефіцієнт  $m_{1+2} = 2$ . Деформації елемента від двостороннього шва визначаються через деформації від одностороннього:  $V_{1+2} = m_{1+2} V_1$ ;  $P_{yc1+2} = m_{1+2} P_{yc1}$ . З розглянутого видно, що деформації при одночасному заварюванні двостороннього шва значно більші, ніж при послідовному заварюванні швів. Це слід урахувати при застосуванні дводугових (багатодугових) автоматів.

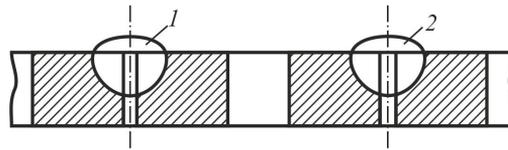


Рис. 2.34. Загальна зона пружно-пластичних деформацій двох швів, віддалених один від одного

## 2.7. Деформації при заварюванні кількох з'єднань

При заварюванні декількох односторонніх або двосторонніх швів на одній конструкції зварювальні деформації визначаються алгебраїчною сумою деформацій від кожного шва окремо:

$$\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2 + \dots = \frac{V_1}{F} + \frac{V_2}{F} + \dots = \frac{\sum V_i}{F}; \quad (2.12)$$

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots = \frac{V_1 y_1}{I} + \frac{V_2 y_2}{I} + \dots = \frac{\sum V_i y_i}{I}. \quad (2.13)$$

Стрілка прогину обчислюється за сумарним кутом повороту:

$$f = \frac{\varphi l}{8}.$$

Формули (2.12) і (2.13) отримані в припущенні, що поперечний переріз конструкції (його розміри та форма) не змінюється в процесі зварювання всіх швів. Це близько до дійсності, якщо зварювання всіх швів здійснюється після остаточного складання конструкції на жорстких електроприхватках. Залишкові деформації конструкції можна вважати незалежними від послідовності зварювання швів (якщо не враховувати вихідний напружений стан, що змінюється зі зварюванням нових швів).

У деяких технологічних процесах зварювання чергується зі складанням, що змінює переріз зварної конструкції після виконання зварювання окремих

швів (рис. 2.35). Тоді деформації від кожного шва визначаються з урахуванням форми та розмірів перерізу в момент зварювання даного шва:

$$\Delta l_i = \frac{V_i}{F_i}; \quad \varphi_i = \frac{V_i y_i}{I_i},$$

де  $y_i$ ,  $F_i$ ,  $I_i$  – геометричні характеристики перерізу на відповідному етапі виготовлення.

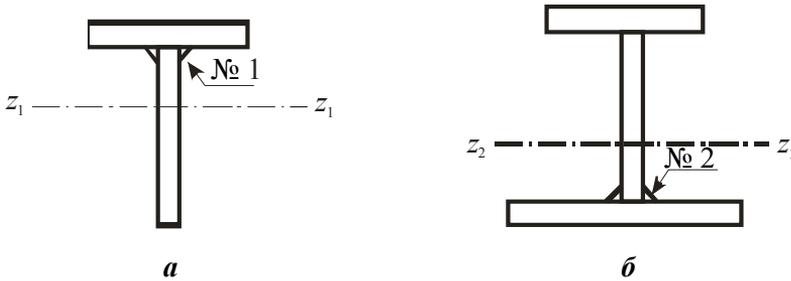


Рис. 2.35. Чергування складальних і зварювальних операцій при виготовленні двотаврової балки:

*a*, *б* – перший та другий етапи виготовлення відповідно

Отримані укорочення  $\Delta l_i$  не можна підсумовувати, оскільки вони знайдені для різних волокон балки. Укорочення завжди визначається по нейтральній осі, яка проходить через центр ваги перерізу. Оскільки переріз у процесі зварювання не залишається постійним, то змінюються положення його центру ваги та осі, по якій знаходиться укорочення.

Для підсумовування знайдені укорочення необхідно привести до однієї і тієї ж осі. Зазвичай – це вісь, що проходить через ЦВ перерізу після закінчення всіх операцій складання та зварювання, іноді – по нижній крайці перерізу.

Приведене укорочення визначається за формулою  $\Delta l'_i = \Delta l_i + \varphi_i y$ , де  $\Delta l_i$  – укорочення, викликане  $i$ -м швом по осі  $z$ , яка проходить через ЦВ перерізу в момент зварювання цього шва (вісь  $z_1$  на рис. 2.35, *a*);  $\varphi_i$  – кут повороту кінцевих перерізів балки від зварювання  $i$ -го шва;  $y$  – відстань між віссю  $z$  та віссю, до якої приводиться укорочення (вісь  $z_2$  на рис. 2.35, *б*). Ця відстань приймається додатною, якщо вісь приведення зміщена вниз від осі  $z_1$ , і від'ємною – якщо вгору.

Укорочення від усіх швів

$$\Delta l = \Delta l'_1 + \Delta l'_2 + \dots = \Sigma \Delta l'_i.$$

Кут повороту кінцевих перерізів балки від зварювання всіх швів знаходиться алгебраїчним підсумовуванням кутів від кожного шва окремо:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots = \sum \varphi_i .$$

Стрілка прогину знаходиться за величиною сумарного кута:  $f = (\sum \varphi_i)l/8$ .

## 2.8. Контрольні запитання

1. Чому дорівнює усадкова сила після зварювання?
2. Чому дорівнює об'єм поздовжнього укорочення після зварювання?
3. Як зв'язані між собою усадкова сила та об'єм поздовжнього укорочення?
4. Які властивості основного металу визначають величину усадкової сили в інженерних розрахунках?
5. Які властивості основного металу визначають величину об'єму поздовжнього укорочення в інженерних розрахунках?
6. Які параметри режиму визначають усадкову силу та об'єм поздовжнього укорочення в інженерних розрахунках?
7. Як називається зона, в межах якої зосереджені всі пластичні деформації, що утворюються в процесі зварювання?
8. Як розподіляється зона ППД навколо осі шва?
9. Чому дорівнюють напруження в зоні ППД?
10. Від яких чинників залежить величина напруження в зоні ППД?
11. Який знак мають напруження в зоні ППД?
12. Від чого залежить площа зони ППД?
13. На верхню крайку штаби зі сталі наплавлений валик.
  - Укажіть напрям вигину штаби після наплавлення.
  - Які напруження будуть діяти на нижній крайці?
  - Які напруження будуть діяти на осі пластини?
  - Які напруження діють у наплавленому металі?
14. На верхню крайку штаби з мартенситної сталі наплавлено валик. Які напруження діють у зоні нагрівання?
15. На верхню крайку штаби з низьковуглецевої сталі наплавлено валик.
  - Як зміняться напруження на нижній крайці при збільшенні погонної енергії?
  - Як зміняться напруження на нижній крайці при збільшенні ширини пластини?
  - Як зміняться напруження на нижній крайці при збільшенні товщини пластини?
16. На верхню крайку і на осі штаби з низьковуглецевої сталі наплавлені два валики з однаковою погонною енергією. Який з них викличе:
  - найбільшу стрілку прогину штаби в її площині;
  - найбільше укорочення на осі пластини;

- напруження стиску на осі пластини;
- напруження стиску на нижній крайці пластини;
- напруження розтягу на осі пластини;
- напруження розтягу на нижній крайці пластини.

17. На верхню крайку (1) і на осі (2) штаби з низьковуглецевої сталі наплавлені два валики з однаковою погонною енергією.

- Як зміниться вигин штаби при зміні послідовності наплавлення валиків (з 1–2 на 2–1)?
- Як зміниться укорочення штаби після наплавлення другого валика?
- У якого з валиків зона пружно-пластичних деформацій більша?
- Як зміняться напруження в першому валику після наплавлення другого?

18. На верхню крайку штаби з низьковуглецевої сталі наплавлено короткий валик.

- Як зміниться укорочення штаби при збільшенні довжини валика в 2 рази?
- Як зміниться стрілка прогину штаби при збільшенні довжини валика в 2 рази?
- Як зміниться кут повороту кінцевих перерізів штаби при збільшенні довжини валика в 2 рази?
- Як зміняться напруження на осі штаби при збільшенні довжини валика в 2 рази?
- Як зміняться напруження на нижній крайці штаби при збільшенні довжини валика в 2 рази?

19. На верхню (1) і нижню (2) крайки штаби з низьковуглецевої сталі наплавлені два валики з однаковою погонною енергією.

- Як зміниться стрілка прогину штаби при зміні послідовності наплавлення валиків (з 1–2 на 2–1)?
- Як зміниться укорочення осі штаби при зміні послідовності наплавлення валиків (з 1–2 на 2–1)?
- Як зміниться вигин штаби після наплавлення другого валика?
- Як зміниться укорочення штаби після наплавлення другого валика?
- Як зміняться напруження на осі штаби після наплавлення другого валика?
- Яке напруження буде на осі штаби після наплавлення другого валика?
- Яке напруження буде в першому валику після наплавлення другого?

20. На верхню крайку штаби зі сталі наплавлено валик.

- Як зміниться вигин штаби, якщо перед зварюванням до неї прикласти силу розтягу?
- Як зміниться вигин штаби, якщо перед зварюванням до неї прикласти стискну силу?

## 2.9. Приклад задачі для поздовжнього укорочення

Таврова балка зварена з двох штаб (рис. 2.36). Матеріал – сталь Ст3. Розміри балки наступні: довжина балки  $l = 6$  м; висота стінки  $h = 200$  мм; ширина полиці  $b = 100$  мм; товщина стінки  $t_1 = 8$  мм; товщина полиці  $t_2 = 12$  мм; тип з'єднання ТЗ (ГОСТ 8713–79); катет 5 мм.

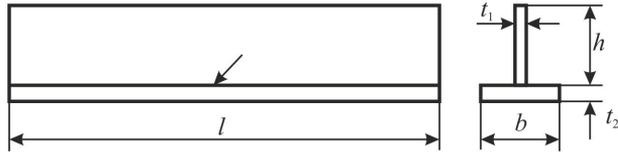


Рис. 2.36. Зварна таврова балка

1. Назвіть можливі загальні деформації балки після зварювання і поясніть механізм та причини їх утворення.

2. Розрахуйте величину загальних зварювальних деформацій балки при послідовному виконанні поясних швів.

3. Покажіть та обґрунтуйте характер розподілу залишкових напружень у полиці й стінці балки, визначте їх величину.

4. Запропонуйте заходи щодо зменшення напружень та деформацій.

### Розв'язання

1. Загальні деформації балки після зварювання – укорочення нейтральної осі та вигин опуклістю вгору. Причиною цього є нерівномірне нагрівання по поперечному перерізу, внаслідок чого виникають пластичні деформації укорочення металу в зоні нагрівання до високої температури. Кількісно ці деформації вимірюються об'ємом поздовжнього укорочення, а їх дія на балку – поздовжньою усадковою силою. Остання і спричиняє укорочення по нейтральній осі. Оскільки лінія дії цієї сили не збігається з нейтральною віссю (не проходить через центр ваги перерізу балки), виникають момент і деформація вигину.

2. Для визначення величини загальних деформацій розрахуємо об'єм поздовжнього укорочення одного шва. Для будь-якої сталі він визначається

за формулою  $V = -0,335 \frac{\alpha}{c_p} q_{\text{п}} l$ , після підстановки значень теплофізичних

властивостей для низьковуглецевої сталі – температурного коефіцієнта лінійного розширення  $\alpha = 13,25 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$  і об'ємної теплоємності  $c_p = 4,1 \text{ Дж/(см}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$  – отримаємо  $V = -1,08 \cdot 10^{-6} q_{\text{п}} l$ , де  $q_{\text{п}}$  – погонна енергія зварювання, Дж/см;  $l = 600$  см – довжина шва.

Погонна енергія зварювання може бути визначена залежно від площі поперечного перерізу наплавленого металу за формулою  $q_{\text{п}} = A F_{\text{п}}$ . У даному випадку коефіцієнт пропорційності  $A$  для зварювання під флюсом (ГОСТ 8713–79) складає  $64500 \text{ Дж/см}^3$ , площа поперечного перерізу шва

$F_{\text{п}} = k_0 (k^2/2)$ , де  $k_0 = 1,1$  – коефіцієнт, що враховує опуклість шва;  $k = 5$  мм –

катет шва. Тоді  $F_{\text{ш}} = 1,1 \cdot 5^2 / 2 = 13,75 \text{ мм}^2 = 0,14 \text{ см}^2$ ; погонна енергія  $q_{\text{ш}} = 64500 \cdot 0,14 = 9030 \text{ Дж/см}$ . Об'єм поздовжнього укорочення від одного шва  $V = -1,08 \cdot 10^{-6} \cdot 9030 \cdot 600 = -5,85 \text{ см}^3$ .

Другий шов при послідовному зварюванні за рахунок часткового перекриття зон ППД збільшує об'єм поздовжнього укорочення менше ніж в два рази. Коefіцієнт збільшення можна приблизно прийняти  $m_{1,2} = 1,3$ . Тоді об'єм поздовжнього укорочення від двох швів буде  $V_{1,2} = m_{1,2} \cdot V = -1,3 \cdot 5,85 = -7,6 \text{ см}^3$ .

Усадкова сила для двостороннього шва  $P = 21,6 q_{\text{ш}} m_{1,2} = 21,6 \cdot 9030 \cdot 1,3 = 254000 \text{ Н} = 254 \text{ кН}$ .

Поздовжнє укорочення нейтральної осі  $\Delta l = V_{1,2} / F$ , де  $F = 100 \cdot 12 + 200 \cdot 8 = 2800 \text{ мм}^2 = 28 \text{ см}^2$  – площа поперечного перерізу балки. Тоді  $\Delta l = -7,6 / 28 = -0,27 \text{ см} = -2,7 \text{ мм}$ .

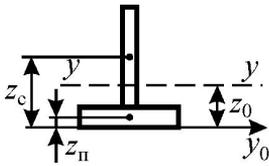


Рис. 2.37. Поперечний переріз балки:  $z_c$  і  $z_{\text{ш}}$  – положення центрів ваги відповідно стінки та полиці відносно осі порівняння  $y_0$

Кут повороту кінцевих перерізів балки при її вигині  $\varphi = V_{1,2} \cdot z / I_y$ , де  $I_y$  – момент інерції перерізу балки відносно осі  $y$ , перпендикулярної до площини вигину;  $z$  – відстань від осі шва до осі балки (рис. 2.37).

Визначимо геометричні характеристики перерізу – положення центру ваги і власний момент інерції відносно осі  $y$ .

Проведемо вісь порівняння  $y_0$  через нижню крайку полиці. Розрахунок виконаємо в табличній формі (табл. 2.1).

Таблиця 2.1. Розрахунок геометричних характеристик перерізу

| Елемент перерізу балки | Положення центру ваги перерізу елемента $z_i$ , см | Площа перерізу елемента $F_i$ , см <sup>2</sup> | Статичний момент перерізу елемента $S_i$ , см <sup>3</sup> | Переносний момент інерції перерізу елемента $I_{yi}$ , см <sup>4</sup> | Власний момент інерції перерізу елемента $I_{0i}$ , см <sup>4</sup> |
|------------------------|--|---|--|--|---|
| Стінка                 | 11,2   | 16  | 179,2  | 2007   | 533   |
| Полиця                 | 0,6  | 12  | 7,2  | 4  | 1   |
| Сума                   | –  | $F = 28$  | $\Sigma S = 186,4$   | $\Sigma I_{yi} = 2011$   | $\Sigma I_{0i} = 534$   |

Знаходимо положення центру ваги перерізу балки відносно осі порівняння:

$$z_0 = \frac{\Sigma S}{F} = \frac{186,4}{28} = 6,66 \text{ см};$$

власний момент інерції перерізу балки

$$I_y = \sum I_{yi} + \sum I_{0i} - F \cdot z_0^2 = 2011 + 534 - 28 \cdot 6,66^2 = 1303 \text{ см}^4;$$

відстань між осями шва та перерізу балки

$$z = z_0 - t_2 = 6,66 - 1,2 = 5,46 \text{ см};$$

кут повороту кінцевих перерізів балки

$$\varphi = \frac{V \cdot z}{I_y} = \frac{-7,6 \cdot 5,46}{1303} = -0,032;$$

стрілка прогину балки

$$f = \frac{\varphi \cdot l}{8} = \frac{-0,032 \cdot 600}{8} = -2,4 \text{ см.}$$

Схему деформації балки показано на рис. 2.38.

Визначимо розміри зони пружно-пластичних деформацій. За формулою (2.5б) її площа складає

$$F_T = \frac{1}{1/F + z^2/I_z + 1200/q_n} = \frac{1}{1/28 + 5,4^2/1303 + 1200/9030} = 5,2 \text{ см}^2;$$

протяжність від осі шва на всі напрямки елементів поперечного перерізу балки

$$b_T = \frac{F}{t_1 + 2t_2} = \frac{5,2}{0,8 + 2 \cdot 1,2} = 1,6 \text{ см.}$$

З урахуванням знайдених розмірів зони можна уточнити коефіцієнт впливу перекриття зон ППД у двосторонньому шві за формулою (2.11):

$$m_{1,2} = 1 + \frac{(t_1 + k)t_2}{F_{T1}} = 1 + (0,8 + 0,5) \cdot 1,2 / 5,2 = 1,39,$$

тобто деформації від двостороннього шва будуть дещо більші від розрахованих (приблизно на 7%).

3. У стінці балки напруження підсумовуються внаслідок дії стиску усадковою силою  $P$  і вигину моментом  $M = P(z_0 - t_2)$ . Напруження від дії сили стиску розподілені рівномірно по всьому перерізу балки, від вигину вище від нейтральної осі балки – напруження розтягу, а нижче від неї – стиску. Визначимо їх величину за формулою (2.8):

$$\sigma = \frac{P_{yc}}{F} + \frac{M_{yc}y}{I}.$$



Рис. 2.38. Схема деформування балки після зварювання

На нейтральній осі балки  $y_0 = 0$ , тому

$$\sigma_0 = \frac{P_{yc}}{F} = \frac{-254}{28} = -9,07 \text{ кН/см}^2 = -91 \text{ МПа.}$$

На верхній крайці стінки  $y_1 = h + t_2 - z_0 = 20 + 1,2 - 6,7 = 14,5$  см. Тоді напруження складатимуть  $\sigma_1 = -254/28 + (-254(6,7 - 1,2)(-14,5))/1303 = 6,45 \text{ кН/см}^2 = 64,5 \text{ МПа}$ . У зоні ППД на нижній крайці стінки ці напруження розтягу досягають границі плинності матеріалу балки, тобто 240 МПа.

У полиці балки діють напруження стиску, оскільки вона розташована нижче від нейтральної осі балки на відстані  $y_2 = z_0 - t_2/2 = 6,7 - 1,2/2 = 6,1$  см. Величина цих напружень  $\sigma_2 = -254/28 + (-254(6,7 - 1,2)(6,1))/1303 = -15,6 \text{ кН/см}^2 = -156 \text{ МПа}$ . У зоні ППД напруження розтягу досягають границі плинності матеріалу балки, тобто 240 МПа.

Епюри напружень наведені на рис. 2.39.

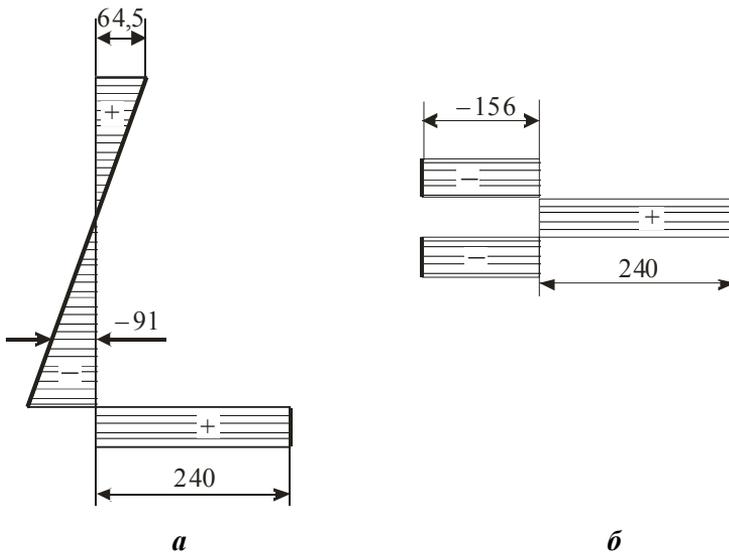


Рис. 2.39. Епюри напружень у стінці (а) та полиці (б) балки

4. Усі можливі заходи щодо зменшення зварювальних деформацій балки можна розділити на три групи: до, в процесі й після зварювання. Перевагу слід надавати заходам до зварювання, оскільки вони, як правило, найменш трудомісткі й енергоємні. Найбільш трудомісткі та енергоємні – методи після зварювання.

*До зварювання.* При виборі способу зварювання слід призначати ті способи, які дають менше нагрівання на одиницю об'єму наплавленого металу, і типи з'єднань, що передбачають менший об'єм наплавленого металу. В даному випадку можна замінити зварювання під флюсом на зварювання

в захисному газі. За рахунок більшого коефіцієнта наплавлення при цьому способі погонна енергія зменшиться, відповідно зменшаться і загальні деформації. Для зменшення залишкового вигину балки можна створити пружний або пластичний вигин перед зварюванням, протилежний зварювальному, тобто опуклістю вниз.

У процесі зварювання пропонується використання економних режимів, створення напружень розтягу в зоні зварювання.

Після зварювання. У разі необхідності використовуються механічна правка, наприклад під пресом, правка місцевим нагріванням стінки, прокатка або проковка зони пружно-пластичних деформацій.

## 2.10. Завдання для самостійної роботи

Виконати завдання згідно з вихідними даними, наведеними в табл. 2.2.

Таблиця 2.2. Варіанти вихідних даних до завдань

| Номер<br>варіанта | $L$  | $B$ | $l$  | $h$ | $H$ | $s$ | $a$ | $q_{пз}$ , Дж/см |
|-------------------|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|------------------|
|                   | м    |     |      |     |     |     |     |                  |
| 1                 | 300  | 70  | 50   | 20  | 100 | 5   | 5   | 500              |
| 2                 | 400  | 80  | 60   | 20  | 100 | 6   | 10  | 500              |
| 3                 | 500  | 90  | 70   | 25  | 100 | 7   | 15  | 1000             |
| 4                 | 600  | 100 | 80   | 25  | 120 | 8   | 20  | 1000             |
| 5                 | 700  | 100 | 90   | 28  | 120 | 9   | 20  | 1500             |
| 6                 | 800  | 110 | 100  | 28  | 120 | 10  | 25  | 2000             |
| 7                 | 900  | 110 | 150  | 32  | 140 | 10  | 25  | 2500             |
| 8                 | 1000 | 120 | 200  | 32  | 140 | 12  | 30  | 2500             |
| 9                 | 1100 | 130 | 250  | 36  | 160 | 12  | 30  | 3000             |
| 10                | 1200 | 140 | 300  | 36  | 160 | 14  | 35  | 3000             |
| 11                | 1300 | 150 | 350  | 40  | 160 | 16  | 35  | 3500             |
| 12                | 1400 | 160 | 400  | 40  | 180 | 10  | 40  | 3000             |
| 13                | 1500 | 170 | 450  | 45  | 180 | 12  | 40  | 3000             |
| 14                | 1600 | 180 | 500  | 45  | 180 | 14  | 45  | 3500             |
| 15                | 1700 | 190 | 550  | 50  | 200 | 16  | 45  | 4000             |
| 16                | 1800 | 200 | 600  | 50  | 200 | 10  | 50  | 4000             |
| 17                | 1900 | 210 | 650  | 56  | 200 | 12  | 50  | 4000             |
| 18                | 2000 | 220 | 700  | 56  | 220 | 14  | 55  | 4500             |
| 19                | 2100 | 230 | 750  | 63  | 220 | 16  | 55  | 5000             |
| 20                | 2200 | 240 | 800  | 63  | 220 | 10  | 60  | 4000             |
| 21                | 2300 | 250 | 850  | 70  | 240 | 12  | 60  | 4500             |
| 22                | 2400 | 260 | 900  | 70  | 240 | 14  | 60  | 5000             |
| 23                | 2500 | 270 | 950  | 75  | 240 | 16  | 70  | 6000             |
| 24                | 2600 | 280 | 1000 | 75  | 270 | 10  | 70  | 5000             |
| 25                | 2700 | 290 | 1050 | 80  | 270 | 12  | 80  | 5000             |
| 26                | 2800 | 300 | 1100 | 80  | 270 | 14  | 80  | 6000             |
| 27                | 2900 | 310 | 1150 | 90  | 300 | 16  | 80  | 7000             |

**Задача 2.1.** На поздовжню крайку пластини з низьковуглецевої сталі ручним дуговим зварюванням наплавлено поздовжній валик (рис. 2.40).

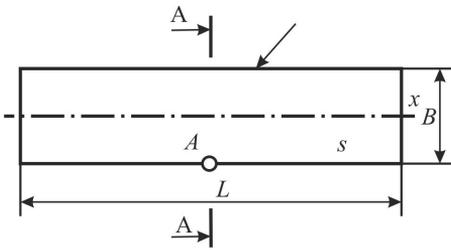


Рис. 2.40. Пластина з наплавленням довгого валика

1. Навести форму вигину осі пластини після наплавлення. Пояснити механізм деформації.

2. Навести епюру поздовжніх напружень після зварювання в перерізі А–А.

3. Як зміняться напруження в точці А?

- при збільшенні довжини пластини;
- при збільшенні ширини пластини;
- при збільшенні погонної енергії зварювання.

рювання.

4. Визначити загальні зварювальні деформації пластини.

5. Розрахувати ширину зони пружно-пластичних деформацій.

6. Знайти величину напружень на осі пластини і в точці А.

**Задача 2.2.** На поздовжню крайку пластини з низьковуглецевої сталі наплавлено ручним дуговим зварюванням короткий поздовжній валик (рис. 2.41).

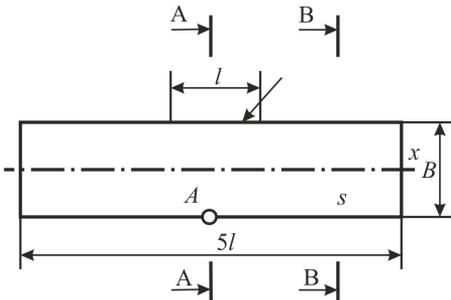


Рис. 2.41. Пластина з наплавленим коротким валиком

1. Навести форму вигину осі пластини після наплавлення. Пояснити механізм деформації.

2. Навести епюру поздовжніх напружень після зварювання в перерізах А–А і В–В.

3. Як зміняться напруження в точці А?

- при збільшенні довжини валика;
- при збільшенні ширини пластини;
- при збільшенні погонної енергії зварювання.

4. Визначити загальні зварювальні

деформації пластини.

5. Розрахувати ширину зони пружно-пластичних деформацій.

6. Знайти величину напружень під валиком на осі пластини і в точці А.

**Задача 2.3.** На пластину з низьковуглецевої сталі наплавлені валики з однаковою погонною енергією (рис. 2.42).

1. Навести форму вигину пластини в її площині.

2. Який з валиків викличе найбільшу стрілку прогину пластини в її площині; найбільше укорочення осі пластини?

3. Як змінюється вигин пластини при послідовному зварюванні швів 1, 2 і 3?

4. Навести епюри напружень у перерізі А–А після зварювання валиків 1, 2 і 3.

5. Який з валиків викличе найбільші напруження?

- розтягу на нижній крайці пластини;
- стиску на нижній крайці пластини;
- розтягу на осі пластини.

6. Визначити укорочення осі пластини після зварювання.

7. Визначити стрілку прогину пластини від зварювання валика 1, 2, 3, валиків 1 і 2; 1, 2 і 3.

8. Знайти ширину зони пружно-пластичних деформацій для кожного валика.

9. Обчислити напруження на осі пластини після зварювання валика 1, валиків 1 і 2.

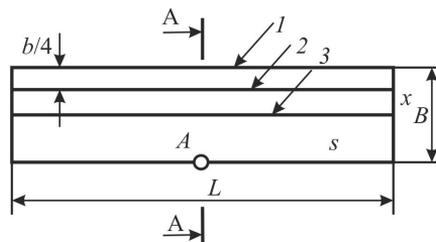


Рис. 2.42. Пластина з наплавленими довгими валиками (1–3)

**Задача 2.4.** На крайку пластини з низьковуглецевої сталі наплавлені три короткі валики з однаковою погонною енергією (рис. 2.43).

1. Навести форму вигину пластини в її площині після зварювання.

2. Як змінюється довжина пластини при послідовному наплавленні валиків 1, 2 і 3?

3. Навести епюри поздовжніх напружень у перерізах А–А і В–В.

4. Обчислити величину укорочення осі пластини.

5. Визначити кривизну пластини в межах валиків та між ними.

6. Знайти кут повороту кінцевих перерізів після зварювання.

7. Визначити стрілку прогину пластини в її площині після зварювання валика 1, валиків 1 і 2, валика 2, валиків 1, 2 і 3.

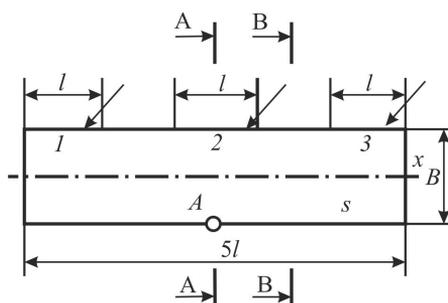


Рис. 2.43. Пластина з наплавленими трьома короткими валиками (1–3) на крайку

**Задача 2.5.** На поздовжні крайки пластини з низьковуглецевої сталі наплавлені короткі валики з однаковою погонною енергією (рис. 2.44).

1. Навести форму вигину пластини в її площині після зварювання валиків 1, 2 і 3, тільки валиків 4 і 5, усіх валиків.

2. Як змінюється довжина пластини при послідовному наплавленні валиків 1, 2, 3, 4 і 5?

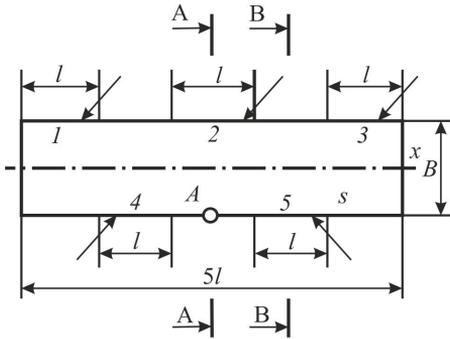


Рис. 2.44. Пластина з наплавленими короткими валиками (1–5) на краяхах

3. Навести епюри поздовжніх напружень у перерізах А–А і В–В.

4. Як зміниться форма вигину пластини після її механічного розрізання вздовж осі  $x$ ?

5. Як зміниться форма пластини після високого відпуску?

6. Визначити довжину пластини після зварювання всіх валиків.

7. Визначити стрілку прогину пластини в її площині після зварювання валиків 1, 2 і 3, тільки валиків 4 і 5.

8. Визначити залишкові напруження в точці А.

**Задача 2.6.** На крайку і по осі пластини з низьковуглецевої сталі наплавлені короткі шви з однаковою погонною енергією (рис. 2.45).

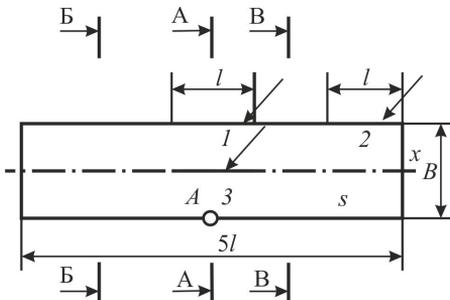


Рис. 2.45. Пластина з наплавленими трьома короткими швами (1–3)

1. Який зі швів (1, 2 або 3) викличе найбільшу стрілку прогину штаби в її площині?

2. Який зі швів викличе найбільше укорочення осі пластини?

3. Навести епюри напружень в перерізах А–А, В–В і Б–Б.

4. Як зміняться напруження?

– у шві 1 після зварювання шва 3;

– у шві 2 після зварювання шва 3;

– у шві 1 після зварювання шва 2.

5. Визначити укорочення пластини після зварювання всіх швів.

6. Визначити стрілку прогину пластини в її площині після зварювання шва 1, швів 1 і 3, тільки шва 2, усіх швів.

**Задача 2.7.** На верхню поздовжню крайку пластини з низьковуглецевої сталі наплавлені три валики з однаковою погонною енергією (рис. 2.46). Зміною площі поперечного перерізу пластини в процесі наплавлення нехтувати.

1. Як змінюється стрілка прогину пластини при послідовному наплавленні валиків 1, 2 і 3?

2. Як змінюється довжина пластини при послідовному наплавленні валиків 1, 2 і 3?

3. Як зміниться величина і форма прогину пластини в її площині після механічного видалення зони наплавлення по лінії  $c$ ?

4. Як зміниться довжина пластини після механічного видалення зони наплавлення по лінії  $c$ ?

5. Як зміниться форма пластини після наплавлення і механічного розрізання пластини вздовж осі  $x$ ?

6. Як зміниться величина і форма прогину пластини в її площині після механічного видалення частини пластини по лінії  $d$ ?

7. Як зміниться довжина пластини після механічного видалення частини пластини по лінії  $d$ ?

8. Обчислити довжину штаби після наплавлення.

9. Визначити стрілку прогину штаби в її площині після наплавлення.

10. Визначити ширину зони пружно-пластичних деформацій після наплавлення. Як вона змінюється при послідовному наплавленні валиків 1, 2 і 3?

11. Розрахувати напруження на осі пластини після наплавлення.

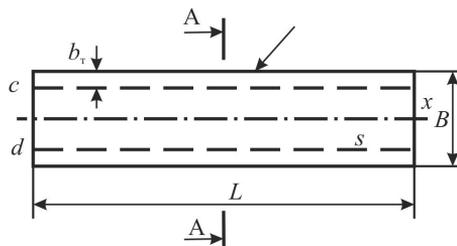


Рис. 2.46. Пластина з наплавленими багат шаровими валиками

**Задача 2.8.** На крайку і по осі  $c$  пластини з низьковуглецевої сталі наплавлені валики з однаковою погонною енергією (рис. 2.47).

1. Визначити укорочення пластини при  $c = 0,5B$ , урахувавши послідовність зварювання (зварювання проводиться послідовно 1–2, 2–1, одночасно).

2. Як зміниться укорочення пластини при збільшенні відстані  $c$  від  $0,5B$  до  $B$  (зварювання проводиться послідовно 1–2, 2–1, одночасно)?

3. Як зміниться укорочення пластини при зменшенні відстані  $c$  від  $0,5B$  до  $0$  (зварювання проводиться послідовно 1–2, 2–1, одночасно)?

4. Визначити стрілку прогину пластини в її площині при  $c = 0,5B$ , урахувавши послідовність зварювання (зварювання проводиться послідовно 1–2, 2–1, одночасно).

5. Як зміниться стрілка прогину пластини при збільшенні відстані  $c$  від  $0,5B$  до  $B$  (зварювання проводиться послідовно 1–2, 2–1, одночасно)?

6. Як зміниться стрілка прогину пластини при зменшенні відстані  $c$  від  $0,5B$  до  $0$  (зварювання проводиться послідовно 1–2, 2–1, одночасно)?

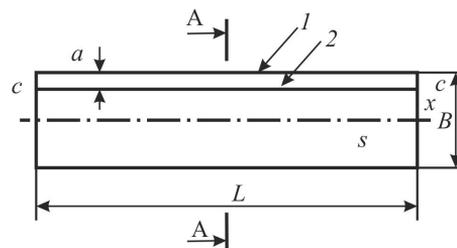


Рис. 2.47. Пластина з наплавленими поздовжніми валиками (1, 2)

7. Навести епюру напружень у перерізі А–А з урахуванням послідовності зварювання (попередньо 1–2, 2–1, одночасно).

8. Визначити укорочення пластини при  $c = 0$ ;  $c = 0,25B$ ;  $c = 0,5B$ ;  $c = 0,75B$ ;  $c = B$  (зварювання проводиться попередньо 1–2, 2–1, одночасно).

9. Визначити стрілку прогину пластини в її площині при  $c = 0$ ;  $c = 0,25B$ ;  $c = 0,5B$ ;  $c = 0,75B$ ;  $c = B$  (зварювання проводиться попередньо 1–2, 2–1, одночасно).

**Задача 2.9.** На поздовжні крайки пластини з низьковуглецевої сталі наплавлені валики з однаковою погонною енергією (рис. 2.48).

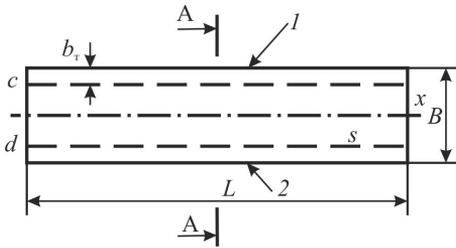


Рис. 2.48. Пластина з наплавленням валиків (1, 2) на верхню і нижню крайки

1. Навести епюру напружень у перерізі А–А з урахуванням послідовності зварювання (попередньо 1–2, 2–1, одночасно).

2. Як зміниться форма і довжина частин пластини після механічного розрізання її вздовж ліній  $c$ ,  $d$  та осі  $x$ ?

3. Як залежать форма і величина вигину частин пластини після розрізання вздовж осі  $x$  від послідовності наплавлення валиків?

4. Навести епюру напружень у перерізі А–А після розрізання пластини вздовж ліній  $c$ ,  $d$  та осі  $x$ .

5. Визначити укорочення пластини після наплавлення валиків (наплавлення проводиться попередньо 1–2, 2–1, одночасно).

6. Визначити стрілку прогину пластини в її площині після наплавлення валиків (наплавлення проводиться попередньо 1–2, 2–1, одночасно).

**Задача 2.10.** По осі пластини наплавлено валик (рис. 2.49).

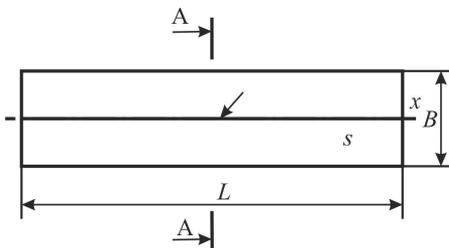


Рис. 2.49. Пластина з наплавленим поздовжнім валиком по осі

1. Навести характер епюри напружень у перерізі А–А пластини:

- з низьковуглецевої сталі Ст3;
- з мартенситної сталі 20Х13;
- з аустенітної сталі Х18Н10Т;
- з мартенситної сталі при зварюванні аустенітними електродами;
- з алюмінієво-магнієвого сплаву АМг6;
- з титанового сплаву ВТ.

2. Навести характер епюри поперечних напружень, викликаних поздовжнім укороченням, у перерізі по осі  $x$  пластини з низьковуглецевої сталі Ст3.

3. Як зміняться епюри напружень, якщо перед зварюванням пластину жорстко закріпити по торцях? Навести епюри після зварювання до і після зняття закріплень.

**Задача 2.11.** На крайку пластини з низьковуглецевої сталі наплавлено валик (рис. 2.50).

1. Як зміняться напруження в точці  $A$ ?

- при збільшенні довжини валика  $l$ ;
- при збільшенні погонної енергії зварювання;
- при збільшенні довжини штаби  $L$ ;
- при збільшенні ширини штаби  $B$ ;
- при переміщенні валика до нижньої крайки штаби;

– після повторного наплавлення валика з тією ж погонною енергією на тій же довжині.

2. Як зміняться напруження в точці  $A$  під час її наближення до верхньої крайки; при переміщенні її вздовж нижньої крайки?

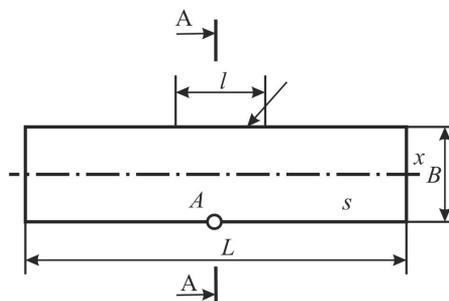


Рис. 2.50. Пластина з наплавленим коротким валиком

**Задача 2.12.** Пластина з низьковуглецевої сталі перед наплавленням валика на крайку розтягнута силою  $P$ . Після наплавлення й охолодження навантаження знімається (рис. 2.51).

1. Як залежить укорочення пластини після зварювання від величини сили  $P$ ?

2. Як залежить стрілка прогину пластини в її площині після зварювання від величини сили  $P$ ?

3. Навести епюру напружень у перерізі А–А після наплавлення валика і зняття навантаження.

4. Як зміниться величина укорочення та стрілки прогину після зварювання, якщо поміняти напрям дії сили (стиск замість розтягу)?

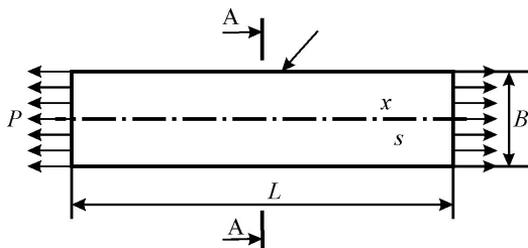


Рис. 2.51. Пластина в стані розтягу до зварювання

**Задача 2.13.** Пластина з низьковуглецевої сталі перед наплавленням валика на крайку завантажена згинальним моментом. Після наплавлення й охолодження навантаження знімається (рис. 2.52).

1. Як зміниться величина укорочення після наплавлення валика  $l$  при збільшенні моменту; при зміні напрямку моменту на протилежний?

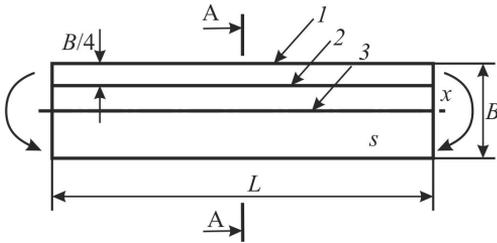


Рис. 2.52. Пластина, зігнута до наплавлення трьох валиків (1–3)

при збільшенні моменту; при зміні напрямку моменту на протилежний?

5. Як зміниться величина стрілки прогину після наплавлення валика 2 при збільшенні моменту; при зміні напрямку моменту на протилежний?

6. Як зміниться величина стрілки прогину після наплавлення валика 3 при збільшенні моменту; при зміні напрямку моменту на протилежний?

2. Як зміниться величина укорочення після наплавлення валика 2 при зміні напрямку моменту на протилежний?

3. Як зміниться величина укорочення після наплавлення валика 3 при збільшенні моменту; при зміні напрямку моменту на протилежний?

4. Як зміниться величина стрілки прогину після наплавлення валика 1

**Задача 2.14.** Пластина з низьковуглецевої сталі перед наплавленням валика на крайку навантажена згинальним моментом. Після наплавлення й охолодження навантаження знімається (рис. 2.53).

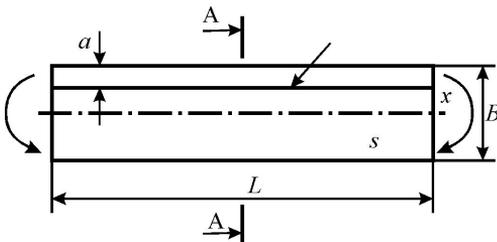


Рис. 2.53. Пластина, зігнута до наплавлення

1. Як змінюється величина укорочення пластини від наплавлення при зміні відстані  $a$  від 0 до  $B/2$  та від  $B/2$  до  $B$ ?

2. Навести епюру напружень у перерізі А–А при  $a = 0$ ;  $a = 0,25B$ ;  $a = 0,5B$ ;  $a = 0,75B$ ;  $a = B$ .

3. Навести форму вигину частин пластини після механічного розрізання її по осі  $x$  при  $a = 0$ ;  $a = 0,25B$ ;  $a = 0,5B$ ;  $a = 0,75B$ ;  $a = B$ .

**Задача 2.15.** На поздовжні крайки пластини з низьковуглецевої сталі поспідовно наплавляються однакові валики (рис. 2.54).

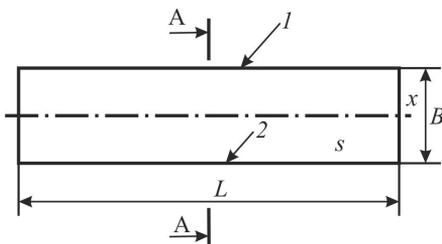


Рис. 2.54. Пластина з наплавленими поздовжніми валиками на крайках

1. Навести форму вигину пластини в її площині після наплавлення валиків у послідовності 1–2 і 2–1.

2. Визначити стрілку прогину пластини в її площині після наплавлення одного валика, двох валиків поспідовно, двох валиків одночасно.

3. Навести епюру напружень у перерізі А–А при заварюванні валиків у послідовності 1–2, одночасно 1 і 2.

4. Навести форму прогину частин пластини після механічного розрізання її по осі  $x$  при послідовному та одночасному наплавленні валиків.

5. Навести форму вигину пластини після механічного видалення валика 1 та його зони пружно-пластичних деформацій, валика 2, обох валиків.

**Задача 2.16.** На поздовжню крайку і по осі пластини з низьковуглецевої сталі послідовно наплавляються однакові валики (рис. 2.55).

1. Як зміняться укорочення пластини та стрілка прогину пластини в її площині при зміні послідовності заварювання валиків (1–2, 2–1)?

2. Навести епюри напружень у перерізі А–А після зварювання валиків у послідовності 1–2, 2–1, при одночасному заварюванні.

4. Навести форму вигину частин пластини після механічного розрізання її по осі  $x$ .

5. Навести форму вигину пластини після механічного видалення зони пружно-пластичних деформацій по лінії  $s$ .

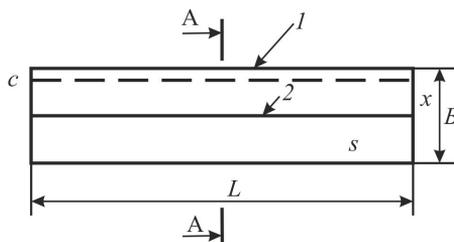


Рис. 2.55. Пластина з двома наплавленими поздовжніми валиками

**Задача 2.17.** На верхню крайку пластини з низьковуглецевої сталі наплавлено валик (рис. 2.56).

1. Навести форму вигину пластини в її площині.

2. Навести епюру напружень у перерізі А–А.

3. Визначити ширину зони пружно-пластичних деформацій  $b_T$ .

4. Знайти напруження на осі  $x$  пластини.

5. Знайти напруження в точці А.

6. Обчислити величину зміни укорочення і стрілки прогину пластини після механічного видалення шару металу шириною  $a$ .

7. Знайти напруження на осі  $x$  пластини після зварювання і послідовного зняття трьох шарів металу шириною по 10 мм.

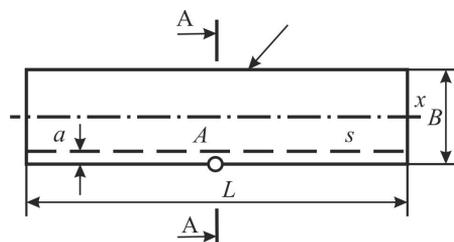


Рис. 2.56. Пластина з наплавленим валиком на верхню крайку

**Задача 2.18.** Полиця таврової балки з низьковуглецевої сталі приварюється до стінки двостороннім безперервним швом ТЗ (рис. 2.57) з катетом  $k$ .

1. Призначити послідовність зварювання швів 1 і 2, що забезпечує мінімальні залишкові деформації (вигин й укорочення) балки.

2. Як зміниться стрілка прогину таврової балки після зварювання шва 2?

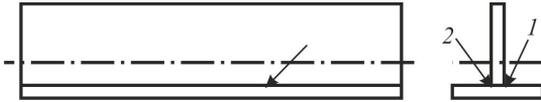


Рис. 2.57. Зварна таврова балка

3. Який з видів переривчастих швів (односторонній, шаховий, ланцюговий) забезпечує отримання мінімальних і максимальних загальних деформацій балки?

4. Визначити укорочення і стрілку прогину балки після зварювання швів 1 і 2 послідовно, одночасно.

5. Побудувати епюри поздовжніх напружень у полиці й стінці балки.

6. Як зміняться укорочення і стрілка прогину балки після зварювання, якщо зменшити висоту стінки, ширину полиці, товщину стінки, товщину полиці?

**Задача 2.19.** Полиці двотаврової балки з низьковуглецевої сталі приварюються до стінки двосторонніми безперервними швами (з'єднання ТЗ) катетом  $k$  (рис. 2.58).

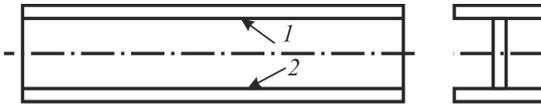


Рис. 2.58. Зварна двотаврова балка

1. Визначити загальні зварювальні деформації балки (укорочення та стрілку прогину) при різних варіантах технологічного процесу складання й зварювання.

2. Побудувати епюри поздовжніх напружень у полицях і стінці балки. В якій з полиць напруження будуть більші та який вони мають знак?

3. Як зміняться укорочення балки та стрілка прогину балки при зміні послідовності зварювання швів (1-2, 2-1, одночасно 1 і 2)?

**Задача 2.20.** Зварна балка з катаних профілів і плоского листа (розміри див. табл. 2.2) з низьковуглецевої сталі довжиною  $L$  має перерізи, показані на рис. 2.59.

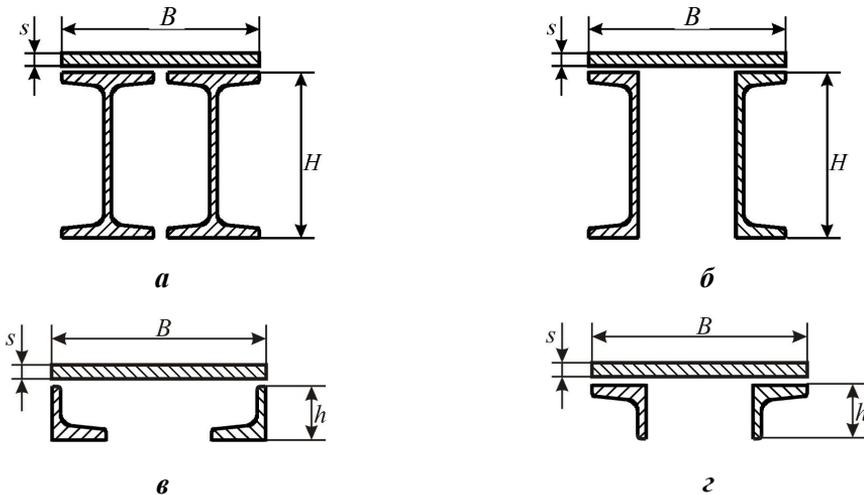


Рис. 2.59. Зварна балка з катаних профілів (а-г)

1. Визначити укорочення балки по нейтральній осі та листу.
2. Визначити стрілку прогину балки після зварювання.

**Задача 2.21.** У консольній двотавровій балці зварюється верхній поясний шов (рис. 2.60).

1. Як зміняться загальні зварювальні деформації балки, якщо зварювання виконувати під навантаженням силою  $P$  у порівнянні зі зварюванням у ненавантаженому стані?

2. Як зміняться загальні зварювальні деформації, якщо поміняти напрям сили  $P$  на протилежний?

3. Поясніть механізм впливу навантаження на загальні зварювальні деформації балки.

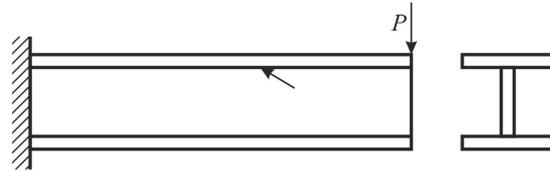


Рис. 2.60. Консольна двотаврова балка



## Розділ 3. ДЕФОРМАЦІЇ ПОПЕРЕЧНОГО УКОРОЧЕННЯ

### 3.1. Термомеханічна задача

При зварюванні шва відбуваються розширення і деформації металу не тільки в поздовжньому, але й поперечному напрямках. При цьому механізм утворення деформацій у поперечному напрямі дещо відрізняється від механізму утворення поздовжніх деформацій. Тому величина поперечних деформацій та методика їх визначення відрізняються від поздовжніх.

Наприклад, розглянемо механізм утворення поперечного укорочення при наплавленні валика поперек вузької штаби (рис. 3.1). За рахунок малої ширини штаби можна вважати, що нагрівання, розплавлення та охолодження шва відбуваються одночасно по всій його довжині  $b$ . Розподіл температури за товщиною  $s$  вважатимемо рівномірним.

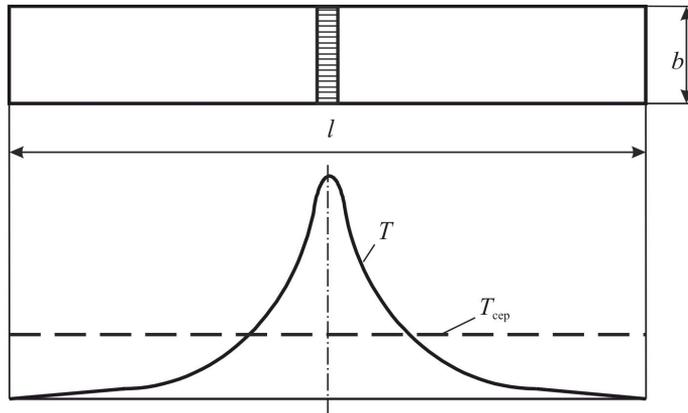


Рис. 3.1. Наплавлення валика поперек вузької пластини

Розглянемо розподіл температури вздовж пластини в деякий момент при зварюванні (крива  $T$ ) і замінимо його середнім рівномірним ( $T_{\text{сеп}}$ ). Величину середньої температури можна визначити з умови теплового балансу (без урахування тепловіддачі в навколишнє середовище):

$$q_{\text{п}} b = l b s c p T_{\text{сеп}},$$

тоді середня температура нагрівання

$$T_{\text{сеп}} = \frac{q_{\text{п}}}{l s c p}.$$

Унаслідок нагрівання пластина отримує температурну деформацію, яка у напрямі довжини  $l$  складає

$$\alpha T_{\text{ср}} l = \frac{\alpha q_{\text{п}}}{c\rho s}.$$

Ця температурна деформація може реалізуватися або за рахунок подовження пластини (віддалення її зовнішніх крайок  $1-1$ ), або за рахунок зближення внутрішніх крайок ( $2-2$ ) у районі шва без збільшення розміру  $l$  (рис. 3.2).

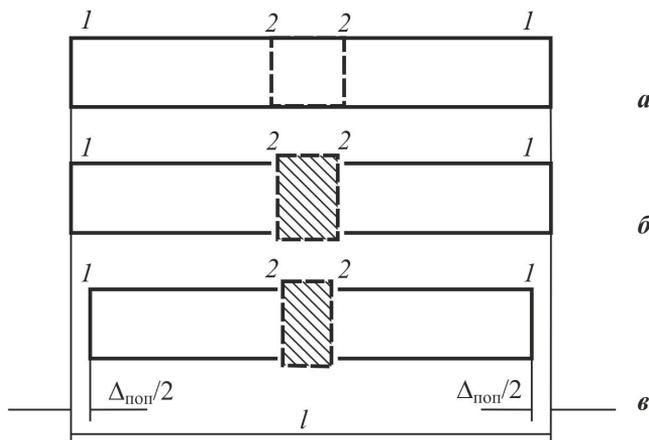


Рис. 3.2. Схема утворення поперечного укорочення при зварюванні:  
**а** – вихідний стан; **б** – після нагрівання; **в** – після охолодження

Якщо врахувати, що переміщенню зовнішніх крайок практично завжди щось чинить опір, наприклад відносно холодні частини конструкції навколо шва або зовнішні закріплення, а зближенню внутрішніх крайок розплавлений метал не перешкоджає, другий процес більш імовірний. Таким чином, при нагріванні відбувається зближення внутрішніх крайок на величину  $\alpha q_{\text{п}}/c\rho s$ .

При охолодженні метал шва твердне, міцно скріплює крайки і робить неможливим їх зворотне переміщення. Тому скорочення металу при охолодженні призводить до підтягування зовнішніх крайок на величину зближення внутрішніх у процесі нагрівання, тобто –  $\alpha q_{\text{п}}/c\rho s$ . Тут знак мінус означає, що проходить укорочення.

Це укорочення часто називають поперечною усадкою, надалі будемо позначати його  $\Delta_{\text{поп}}$ . Таким чином,

$$\Delta_{\text{поп}} = - \frac{\alpha q_{\text{п}}}{c\rho s}.$$

За аналогією з подовжнім укороченням введемо поняття об'єму поперечного укорочення. Погонний об'єм поперечного укорочення (на одиницю

довжини шва)

$$w = \Delta_{\text{поп}} s = -\frac{\alpha}{c\rho} q_{\text{п}};$$

абсолютний об'єм поперечного укорочення

$$W = w l_{\text{ш}} = -\frac{\alpha}{c\rho} q_{\text{п}} l_{\text{ш}}, \quad (3.1)$$

де  $l_{\text{ш}}$  – довжина шва (у нашому випадку  $l_{\text{ш}} = b$ ).

З порівняння об'ємів поздовжнього укорочення  $V = -0,335 \frac{\alpha}{c\rho} q_{\text{п}} l_{\text{ш}}$  і поперечного укорочення  $W = -\frac{\alpha}{c\rho} q_{\text{п}} l_{\text{ш}}$  видно, що останній у декілька разів

більший. У реальних умовах зварювання множник у формулі (3.1) може бути більший за 1,0. Це пов'язано з плоским характером поля напружень і деформацій, наприклад при зварюванні стику двох широких пластин.

При нагріванні широких пластин за рахунок теплового розширення крайки змінюють свою прямолінійну форму, при цьому вони зближуються, зменшуючи зазор (рис. 3.3).

Величина переміщення крайок може бути отримана методами теорії пружності. Зокрема, для максимального переміщення В.О. Винокуровим отримано наступний вираз:

$$\Delta_{\text{max}} = \frac{\alpha q_{\text{п}}}{c\rho s}.$$

Загальна величина взаємного зближення крайок буде складати  $2\Delta_{\text{max}}$ . У такому стані зближені крайки фіксуються затверділим металом, унаслідок чого зворотне віддалення їх стає неможливим. Укорочення металу при охолодженні реалізується у вигляді зближення зовнішніх крайок. Ширина зварюваних пластин зменшується на величину  $\Delta_{\text{поп}}$ . Максимально

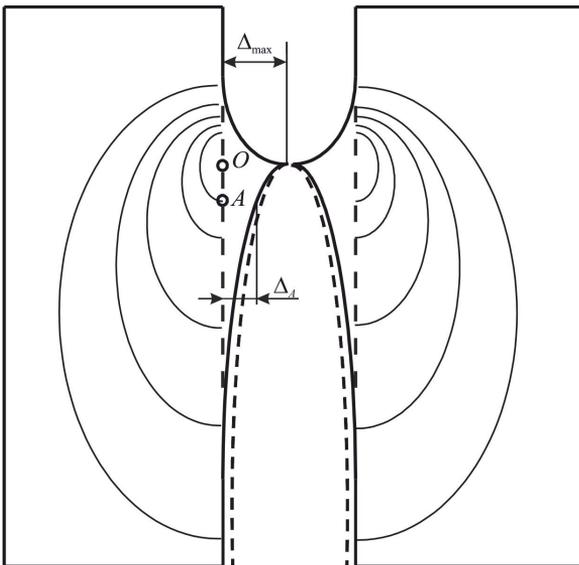


Рис. 3.3. Переміщення внутрішніх крайок при нагріванні широких пластин

можлива величина поперечної усадки складає  $-2\Delta_{\max}$ , тобто

$$\Delta_{\text{поп}} = -2\Delta_{\max} = -2 \frac{\alpha q_{\text{п}}}{c\rho s}$$

Метал після кристалізації протягом деякого часу залишається високопластичним, має невеликий опір пластичній деформації та практично не перешкоджає переміщенню крайок. На ділянці  $AO$  (див. рис. 3.3) крайки віддаляються одна від одної за рахунок пластичної деформації подовження металу шва. З урахуванням цього дійсна поперечна усадка після повного охолодження складає  $\Delta_{\text{поп}} = -2\Delta_A < -2\Delta_{\max}$ .

Величина пластичних деформацій подовження металу шва при охолодженні, тобто різниця  $2(\Delta_{\max} - \Delta_A)$ , залежить головним чином від механічних властивостей металу та інтенсивності тепловіддачі в оточуюче середовище. Чим вища тепловіддача, тим швидше розходяться крайки (крутіше йде крива на ділянці  $AO$ ) позаду джерела тепла, більша величина пластичних деформацій розтягу і менша поперечна усадка  $\Delta_{\text{поп}}$ . При плавному зниженні кривої  $\Delta$  (пунктирна крива на рис. 3.3) пластичні деформації навпаки менші, а поперечна усадка більша. Цим можна пояснити меншу величину поперечної усадки при зварюванні в захисних газах у порівнянні зі зварюванням під флюсом. При зварюванні в захисних газах тепловіддача в районі горіння дуги вища за рахунок відсутності шлаку та охолоджувальної дії захисного газу.

При зварюванні стику без зазору (при наплавленні валика) крайки попередю джерела тепла не можуть переміщатися вільно. Їх зближення можливе тільки в зоні металу, нагрітого до високопластичного і рідкого станів. Тому величина  $2\Delta_{\max}$  виявляється меншою, відповідно зменшується і  $\Delta_{\text{поп}}$ . Поперечна усадка в цьому випадку на 15...20% менша, ніж при зварюванні із зазором. Таким чином, при ідеально пружному протіканні процесу деформування під час нагрівання пластини при зварюванні стику максимально можлива величина поперечної усадки визначається величиною  $2\Delta_{\max}$ . Фактична величина поперечної усадки, що утворюється в момент зварювання і залишається після повного охолодження пластин, менша від визначеної за розрахунком.

При електрошлаковому зварюванні пластини із зазором, коли тепловіддача мала:

$$\Delta_{\text{поп}} = -1,6 \frac{\alpha q_{\text{п}}}{c\rho s}$$

При однопрохідному електродуговому зварюванні пластин встик під флюсом або покритими електродами

$$\Delta_{\text{поп}} = -(1,0 \dots 1,2) \frac{\alpha q_{\text{п}}}{c\rho s};$$

у вуглекислому газі

$$\Delta_{\text{поп}} = -(0,8 \dots 1,0) \frac{\alpha q_{\text{п}}}{c r s}$$

У загальному вигляді можна записати

$$\Delta_{\text{поп}} = -A \frac{\alpha q_{\text{п}}}{c r s}, \quad (3.2)$$

де  $A = 0,8 \dots 1,6$  – коефіцієнт, який враховує відхилення реальних умов зварювання від ідеальної схеми (вплив швидкості зварювання, наявність закріплення тощо). Цей коефіцієнт визначається як відношення дійсної усадки до теоретичної максимально можливої її величини  $A = \Delta_{\text{поп}} / -2\Delta_{\text{max}}$ .

### 3.2. Вплив конструктивних чинників на поперечне укорочення

Як було показано вище, поздовжня усадка, що визначається для нескінченно жорсткого елемента, залежить від режиму зварювання і властивостей матеріалу та мало змінюється при зміні його жорсткості в широкому діапазоні. На відміну від поздовжньої, поперечна усадка при зміні жорсткості закріплення може змінюватися у декілька разів.

При утворенні поздовжньої усадки розширенню металу при нагріванні та скороченню при охолодженні завжди перешкоджають прилеглі шари холодного металу. Конструктивне оформлення зварного елемента практично не впливає на жорсткість у районі зварювання. Поперечна усадка відбувається в інших умовах. У розглянутих нами простих з'єднаннях у вигляді вузької штаби та широких пластин переміщення внутрішніх крайок при нагріванні й зовнішніх при охолодженні відбуваються майже вільно (без обмежень). Тому поперечна усадка має максимальну величину, достатньо близьку до теоретичної максимально можливої.

У більшості реальних конструкцій переміщення обмежуються. Наприклад, при наплавленні валика на пластину великої товщини нижні ділянки металу (рис. 3.4) мало прогриваються, мають велику жорсткість і ускладнюють зближення крайок при нагріванні, внаслідок цього поперечна усадка помітно зменшується.

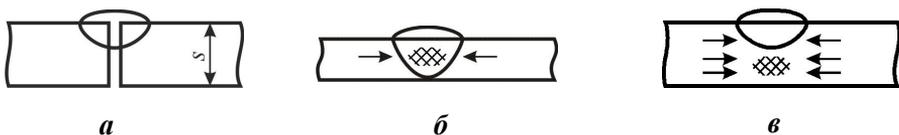


Рис. 3.4. Зварювання стику (а) і наплавлення валика на пластини малої (б) та середньої (в) товщин

Іноді поперечна усадка зменшується за рахунок жорсткості, яка створюється конструктивними елементами. Наприклад, при підварюванні стику обшивки секції з набором, що йде поперек зварного з'єднання (рис. 3.5), зближенню крайок при нагріванні та охолодженні перешкоджають ребра жорсткості.

У галузевій методиці, яку прийнято в суднобудуванні, всі перераховані чинники, включаючи теплофізичні властивості, враховуються емпіричним коефіцієнтом  $\xi$ . Цей коефіцієнт замінює величину  $A(\alpha/c\rho)$  у формулі (3.2) і знаходиться як

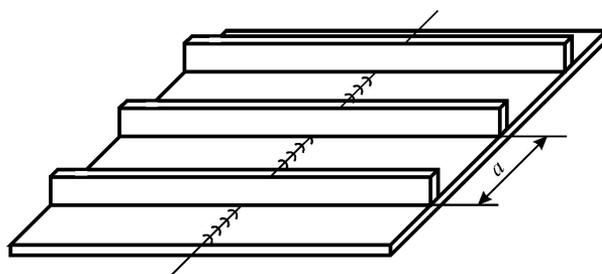


Рис. 3.5. Заварювання стику або наплавлення валика поперек ребер жорсткості

$$\xi = \frac{\alpha}{c\rho} [0,25 + 0,75k_s(0,1 + 0,9k_{ж})], \quad (3.3)$$

де  $k_s$  – коефіцієнт, який враховує ступінь прогрівання по товщині, знаходиться залежно від питомої погонної енергії  $q_{п.п}/s_i^2$  за графіком на рис. 3.6 ( $q_{п.п}$  – частина погонної енергії, яка йде на нагрівання елемента, що деформується;  $s_i$  – товщина металу під швом у момент зварювання (рис. 3.7));  $k_{ж}$  – коефіцієнт жорсткості, який знаходиться залежно від відношення  $a/2s$  за графіком (рис. 3.8) та враховує наявність ребер, що перетинають зварний шов ( $a$  – відстань між ребрами жорсткості, що перетинають зварний шов (див. рис. 3.5);  $s$  – товщина полотна).

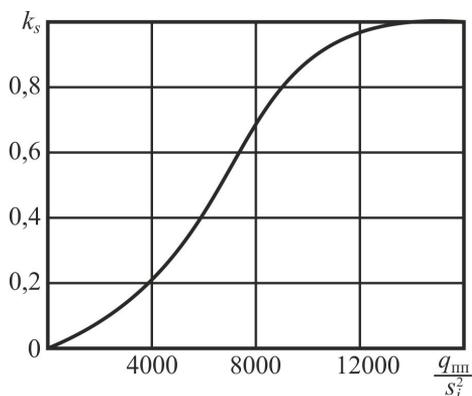


Рис. 3.6. Залежність коефіцієнта впливу ступеня прогрівання по товщині від питомої погонної енергії

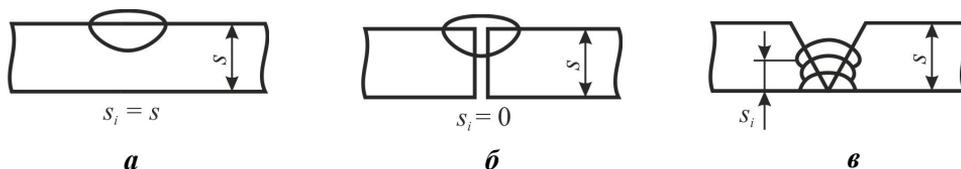


Рис. 3.7. Визначення розрахункової товщини під швом  $s_i$ :

**а** – наплавлення валика; **б, в** – заварювання відповідно першого й наступних проходів стику

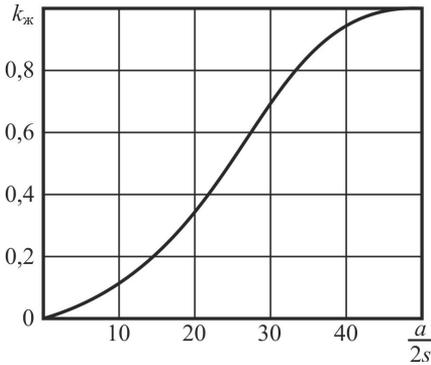


Рис. 3.8. Залежність коефіцієнта жорсткості від відносної відстані між ребрами

При визначенні коефіцієнта жорсткості для шва, який зварюється поперек полиці шириною  $b_{\text{п}}$  і товщиною  $s_{\text{п}}$  таврової або двотаврової балки, замість відношення  $a/2s$  необхідно брати  $b_{\text{п}}/2s_{\text{п}}$ .

При зварюванні не завжди вся погонна енергія  $q_{\text{п}}$  бере участь в утворенні поперечної усадки. Наприклад, при приварюванні ребра або зварюванні хрестоподібного з'єднання (рис. 3.9) частина погонної енергії  $q_{\text{п.п}}$  йде на нагрівання нерозрізного елемента перерізу і викликає поперечну усадку в його площині, а інша частина  $q_{\text{п.р}}$  йде в розрізний елемент та викликає поперечну усадку в іншій площині. Таким чином, усю погонну енергію поділяють на дві складові:  $q_{\text{п}} = q_{\text{п.п}} + q_{\text{п.р}}$ .

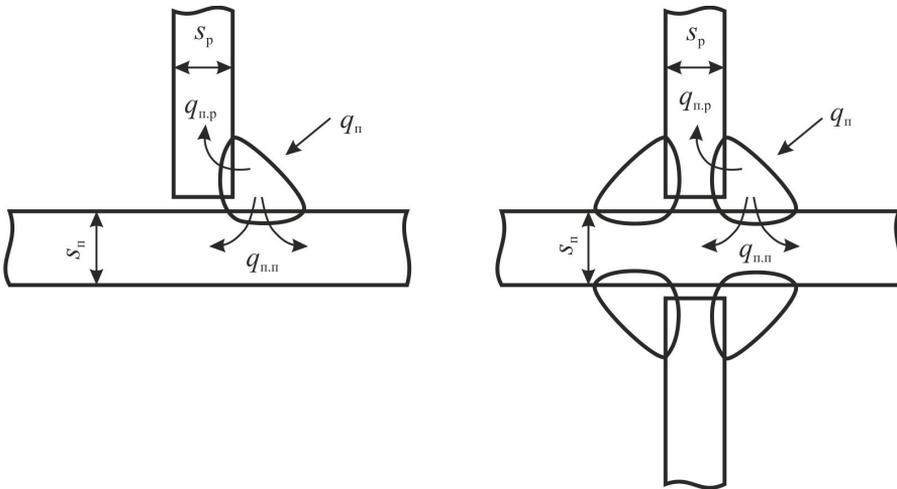


Рис. 3.9. Розподіл тепла при зварюванні таврових з'єднань

Величина цих складових може бути знайдена за емпіричними формулами

$$q_{\text{п.п}} = k_{\text{п}} q_{\text{п}}; \quad q_{\text{п.р}} = k_{\text{р}} q_{\text{п}}$$

де  $k_{\text{п}} = 0,82 - 0,2s_{\text{р}}/s_{\text{п}}$ ;  $k_{\text{р}} = 0,18 + 0,2s_{\text{р}}/s_{\text{п}}$  ( $s_{\text{р}}$  і  $s_{\text{п}}$  – товщина розрізного та нерозрізного елементів відповідно).

Можна користуватися також формулами, запропонованими М.О. Окербломом:  $k_{\text{р}} = s_{\text{р}}/(2s_{\text{п}} + s_{\text{р}})$ ;  $k_{\text{п}} = 2s_{\text{п}}/(2s_{\text{п}} + s_{\text{р}})$ .

З урахуванням усіх перерахованих основних чинників величина об'єму поперечного укорочення може бути знайдена за формулою

$$W = -\xi q_{п.п} l_{ш}. \quad (3.4)$$

З аналізу формули (3.3) видно, що залежно від товщини та наявності ребер жорсткості коефіцієнт  $\xi$  може змінюватися в межах від  $0,25 \frac{\alpha}{ср}$

(при  $k_s = k_{ж} = 0$ ) до  $\frac{\alpha}{ср}$  (при  $k_s = k_{ж} = 1$ ). Для низьковуглецевих та низьколегованої сталей  $\frac{\alpha}{ср} = (3 \dots 3,5) \cdot 10^{-6}$  см<sup>3</sup>/Дж, а  $\xi$  змінюється від  $0,85 \cdot 10^{-6}$  до  $3,5 \cdot 10^{-6}$ .

### 3.3. Деформаційна задача

Якщо валик (зварний шов) наплавляється на всю ширину зварюваного елемента (рис. 3.10), то в результаті поперечної усадки довжина елемента зменшується на величину  $\Delta_{\text{поп}}$ .

У більшості реальних конструкцій шви займають тільки частину перерізу (рис. 3.11), тому в них укорочення зварного елемента відрізняється від  $\Delta_{\text{поп}}$ . Такі шви крім укорочення викликають вигин осі елемента. Величина укорочення та форма осі після зварювання можуть бути визначені при незначній похибці з використанням гіпотези плоских перерізів. Насправді перерізи поблизу шва не залишаються плоскими (рис. 3.12), але порушення площинності зосереджені в безпосередній близькості до осі шва. Вони знаходяться на відстані, меншій від ширини пластини. Решта перерізів залишається плоскими. Величини укорочення та кутів вигину, віддалених від шва, збігаються з розрахунковими за балковою теорією.

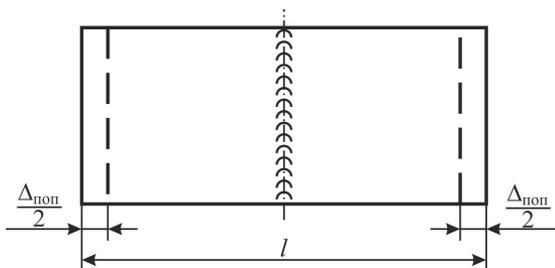


Рис. 3.10. Поперечне укорочення пластини після зварювання

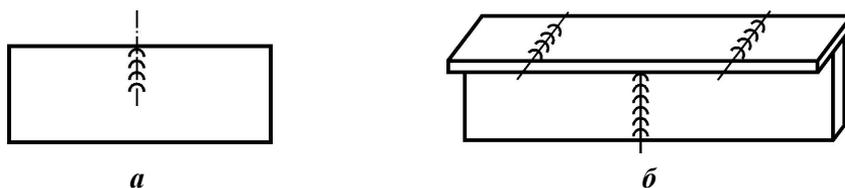


Рис. 3.11. Поперечні шви на частині перерізу пластини (а) і таврової балки (б)

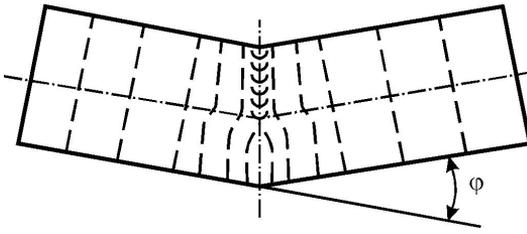


Рис. 3.12. Вигин у площині пластини внаслідок поперечного укорочення

Визначимо укорочення  $\Delta l$  і кут зламу осі  $\phi$ , що спричинені поперечною усадкою при наплавленні валика поперек полиці таврової балки.

У районі валика уявно виріжемо ділянку полиці довжиною  $l$  (рис. 3.13,а). Під дією поперечної усадки після наплавлення валика ця ділянка коротшатиме на величину  $\Delta_{\text{поп}}$ . Для того щоб можна було "вклеїти" цю ділянку в балку, її необхідно розтягнути на величину  $\Delta_{\text{поп}}$ . Цей розтяг можна створити деякою силою  $P = \Delta_{\text{поп}}/l(EF_{\text{п}})$ , де  $F_{\text{п}}$  – площа перерізу полиці.

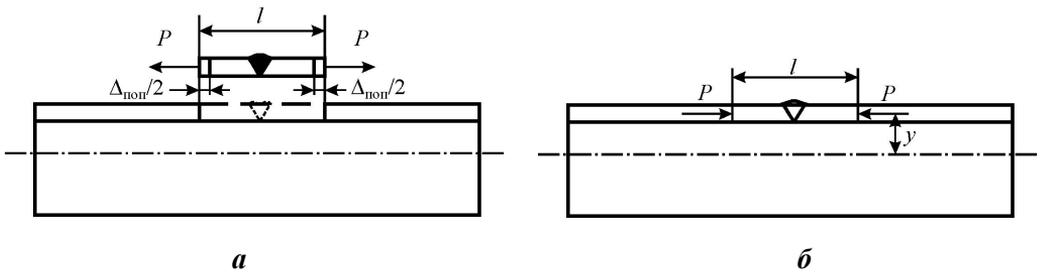


Рис. 3.13. Схема деформаційної задачі для поперечного укорочення шва на полиці таврової балки

Після "вклеювання" ділянки полиці зніmemo сили  $P$ , приклавши рівні їм за величиною, але зворотні за знаком сили до балки (див. рис. 3.13,б). Під дією цих сил балка отримає укорочення і вигин. Величини укорочення і кута вигину знайдемо за формулами опору матеріалів

$$\Delta l = \frac{Pl}{EF} = \frac{\Delta_{\text{поп}} EF_{\text{п}} l}{lEF} = \frac{\Delta_{\text{поп}} F_{\text{п}}}{F} = \frac{\Delta_{\text{поп}} l_{\text{ш}} S_{\text{п}}}{F} = \frac{W}{F}; \quad (3.5)$$

$$\phi = \frac{Ml}{EI} = \frac{Pyl}{EI} = \frac{\Delta_{\text{поп}} EF_{\text{п}} yl}{lEI} = \frac{\Delta_{\text{поп}} F_{\text{п}} y}{I} = \frac{\Delta_{\text{поп}} S_{\text{п}} y l_{\text{ш}}}{I} = \frac{Wy}{I}, \quad (3.6)$$

де  $y$  – відстань від ЦВ перерізу балки до ЦВ шва;  $W$  – абсолютний об'єм поперечного укорочення.

Формули (3.5) і (3.6), отримані для таврової балки, можуть бути використані й для інших перерізів з будь-яким розташуванням шва (рис. 3.14).

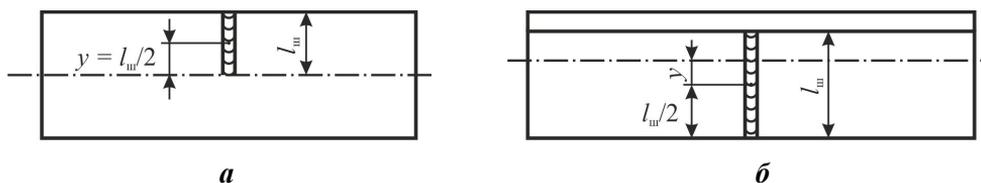


Рис. 3.14. Можливі розташування швів при розв'язанні деформаційної задачі для поперечних швів на частині ширини пластини (а) і стінці таврової балки (б)

Стрілка прогину балки від поперечної усадки шва може бути знайдена за допомогою фіктивної балки (див. підрозділ 2.3). Для цього її завантажують зосередженою силою, яка чисельно дорівнює куту вигину  $\varphi$ . Епюра згинальних моментів покаже форму зігнутої осі балки, а максимальний момент – стрілку прогину (рис. 3.15). Якщо шов розташований посередині довжини балки, то  $f = \varphi l/4$ . У загальному випадку  $f = \varphi l/n$ , де  $n \leq 4$ .

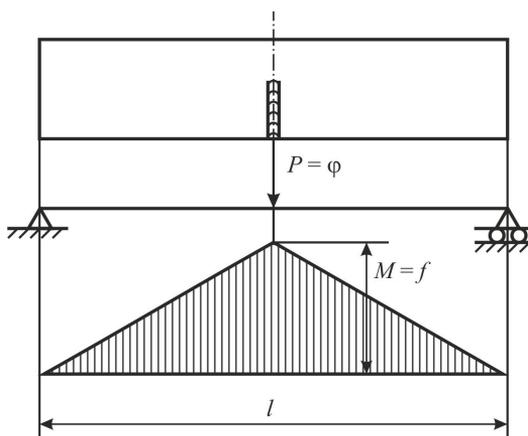


Рис. 3.15. Фіктивна балка для визначення прогину від поперечного шва

Переміщення від кількох поперечних швів на одній балці знаходяться як алгебраїчна сума переміщень від кожного шва окремо.

Якщо переріз балки в процесі зварювання не змінюється, то

$$\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2 + \dots = \frac{W_1}{F} + \frac{W_2}{F} + \dots = \frac{\sum W_i}{F}; \quad (3.7)$$

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots = \frac{W_1 y_1}{I} + \frac{W_2 y_2}{I} + \dots = \frac{\sum W_i y_i}{I}.$$

При обчисленні  $\varphi_i$  необхідно дотримуватися правила знаків,  $y_i$  можуть бути додатними або від'ємними залежно від того, по яку сторону від ЦВ перерізу балки донаходиться ЦВ шва.

Стрілка прогину від кількох швів може бути знайдена за сумарним кутом повороту  $\varphi$ . При розташуванні швів по всій довжині балки

$$f = \frac{\varphi l}{8}. \quad (3.8)$$

Якщо всі шви зосереджені поблизу одного перерізу, формула (3.8) дає велику похибку і для визначення стрілки прогину необхідно використовувати фіктивну балку.

Поперечна усадка двостороннього (багатопрхідного) шва визначається як сума усадок (укорочень) від кожного проходу окремо.

### 3.4. Напруження, спричинені поперечним укороченням, при зварюванні незакріплених та закріплених з'єднань

Якщо поперечна усадка не може розвиватися вільно, в металі шва виникають поперечні напруження  $\sigma_y$ . Перешкоди поперечній усадці створюють як зовнішні закріплення з'єднання, так і раніше заварені ділянки з'єднання, що вже охолонули, а також ще не заварені ділянки, але закріплені на жорстких прихватках. Таким чином, навіть у незакріпленому з'єднанні розвиток поперечної усадки не може відбуватися вільно внаслідок неодночасності зварювання шва по всій його довжині. Величина і характер розподілу напружень будуть залежати від жорсткості зовнішнього закріплення та послідовності заварювання з'єднання по довжині.

**Напруження  $\sigma_y$  у незакріплених з'єднаннях.** За відсутності зовнішніх закріплень напруження  $\sigma_y$  обумовлені тільки неодночасністю нагрівання та охолодження, тому їх величина і характер залежать від послідовності виконання зварювання по довжині шва.

Розглянемо характер розподілу напружень при трьох, найбільш часто вживаних послідовностях зварювання (метод кількісного визначення цих напружень в інженерній теорії до сьогодні відсутній).

**1. Зварювання стику напрохід від початку до кінця (рис. 3.16).** Для розуміння характеру епюри залишкових напружень прослідкуємо, як з'являються і змінюються тимчасові напруження під час зварювання окремих ділянок (1, 2, 3, 4). До моменту закінчення зварювання ділянки 1 епюра напружень  $\sigma_y$  матиме вигляд, показаний на рис. 3.16,а. При охолодженні метал шва на ділянці 1 скорочується, прагнучи зменшити розмір  $B$  пластини.

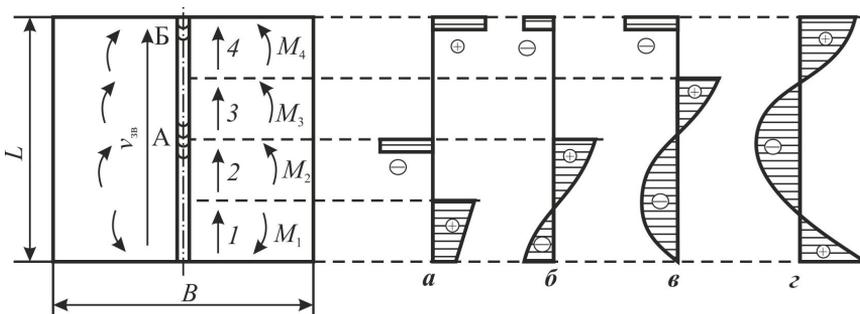


Рис. 3.16. Формування епюр поперечних напружень при зварюванні напрохід стику незакріплених пластин

Цьому зменшенню протидіють прихватки А і Б. Унаслідок укорочення в металі шва з'являються напруження розтягу, а в прихватках А і Б – напруження стиску й розтягу відповідно. Напруження в металі шва мають більшу величину в кінці ділянки, оскільки метал, що охолоне пізніше, дещо розвантажує попередні заварені ділянки.

Після зварювання ділянки 2 у ній також утворюються напруження розтягу, оскільки тепер зменшенню розміру  $B$  протидіють не тільки прихватки, але і раніше заварена ділянка 1. Напруження розтягу на ділянці 1 зменшуються і переходять у напруження стиску (див. рис. 3.16,б). Після зварювання ділянки 3 напруження стиску на початку ділянки 1 знову зменшуються (див. рис. 3.16,в) за рахунок повороту пластин в їх площині в процесі охолодження металу ділянки 3 (напрямок повороту пластини після заварювання кожної ділянки показаний на рис. 3.16 стрілками  $M_1, M_2, M_3$  і  $M_4$ ). Із цієї ж причини після закінчення зварювання ділянки 4 в ділянці 1 з'являються напруження розтягу (див. рис. 3.16,г).

Аналіз епюри залишкових напружень  $\sigma_y$  після закінчення зварювання всього з'єднання показує, що при зварюванні напрохід у середній частині з'єднання велика область пластини піддається стиску. При великих розмірах пластини і малій її товщині залишкові напруження  $\sigma_y$  можуть перевищити критичні – й пластина втратить стійкість: утворюється бухтина в середній частині пластини.

Крутість епюри та величина напружень  $\sigma_y$  залежать від ступеня неодноразності нагрівання й охолодження, тобто від швидкості зварювання. Чим більша швидкість зварювання, тим більш плавна епюра та менша величина напружень  $\sigma_y$ . За умови, коли  $v_{зв} \rightarrow \infty$ , нагрівання й охолодження відбуваються по всій довжині шва одночасно і напруження  $\sigma_y = 0$ . При зменшенні швидкості зварювання величина напружень зростає, ймовірність появи бухтин збільшується. Із цієї причини при ручному дуговому зварюванні, яке виконується з найменшою швидкістю (малий струм і зупинки для зміни електродів), зварювання напрохід застосовувати не рекомендується.

**2. Заварювання стиків від середини до країв (рис. 3.17).** Прослідкуємо зміну епюри напружень  $\sigma_y$  в цьому випадку. Вважатимемо, що зварювання ведеться одночасно двома зварниками. При зварюванні ділянок 1 епюра  $\sigma_y$  матиме характер, показаний на рис. 3.17,а. Охолоджуваний метал не може скорочуватися вільно, тому в ньому утворюються напруження розтягу. Величина цих напружень тим більша, чим пізніше заварена ділянка шва, оскільки усадці протидіють не тільки прихватки, але і раніше заварена частина шва. У прихватках при цьому діють напруження стиску. Після закінчення зварювання з'єднання (заварювання ділянок 2) епюра матиме характер, показаний на рис. 3.17,б. У ділянках 1 з'єднання напруження розтягу в міру зварювання ділянок 2 зменшуються і переходять у напруження стиску. В ділянках, заварених в останню чергу, діють напруження розтягу.

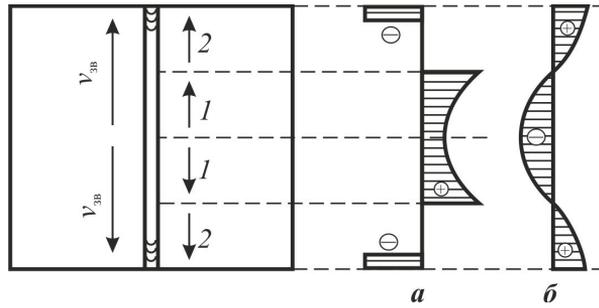


Рис. 3.17. Формування епюри поперечних напружень при зварюванні стику незакріплених листів від середини до країв

Як видно з порівняння рис. 3.16 і 3.17, характер епюри зберігається, а отже, і при цій послідовності зварювання небезпека втрати стійкості листів не усувається. Проте абсолютна величина напружень при зварюванні від середини до країв менша, ніж при зварюванні напрохід. У цьому проявляється менший вплив неодночасності зварювання. Тому при другій послідовності зварювання ймовірність втрати стійкості за інших рівних умов зменшується. Послідовність від середини до країв широко застосовується при зварюванні під флюсом.

У реальних з'єднаннях поздовжня і поперечна усадки існують одночасно, тому поперечні напруження  $\sigma_y$  складаються з напружень від поздовжньої усадки (див. рис. 2.23) та напружень від поперечної усадки (див. рис. 3.16,г і 3.17,б). Оскільки епюри напружень  $\sigma_y$  протилежні за знаком, то величина і знак сумарних напружень залежать від того, які з напружень переважають. Останнє визначається багатьма чинниками, основними з яких є швидкість зварювання та співвідношення розмірів  $L$  і  $B$ . Здебільшого випадків при автоматичному зварюванні стиків довгих листів переважають напруження від поздовжнього укорочення і, як правило, втрата стійкості виражається у вигляді "будиночків" на кінцях з'єднання. При ручному дуговому зварюванні частіше виникає бухтина в середній частині, оскільки переважають напруження від поперечної усадки.

**3. Заварювання стику зворотно-ступінчастою послідовністю (рис. 3.18).** При цій послідовності все з'єднання поділяється на ділянки (1–5) і кожна з них заварюється протилежно загальному напрямку переміщення зварника. Епюра напружень  $\sigma_y$  при цьому має ступінчастий характер, невеликі ділянки стиску чергуються з розтягом (див. рис. 3.18,в). Після зварювання кожної ділянки в ній утворюються напруження розтягу, що збільшуються на її кінці (див. рис. 3.18,а). Одночасно стискається попередня ділянка (див. рис. 3.18,б). При такому характері ймовірність втрати стійкості практично повністю відсутня. Проте застосування такої послідовності доцільне лише при ручному дуговому зварюванні.

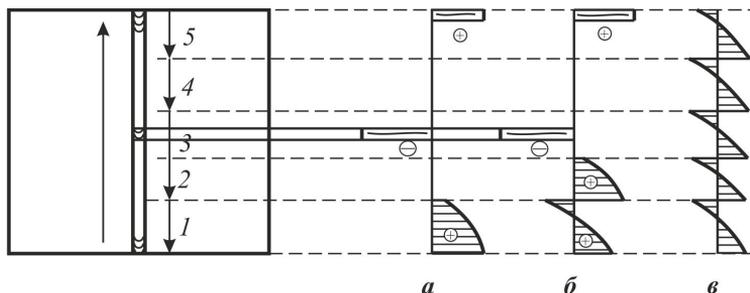


Рис. 3.18. Формування епюри поперечних напружень при зворотно-ступінчастій послідовності заварювання стику незакріплених листів

Таким чином, при заварюванні навіть незакріплених з'єднань поперечна усадка спричиняє напруження  $\sigma_y$  внаслідок неодночасності заварювання з'єднання по довжині. Абсолютна величина цих напружень мала, у всякому разі значно менша від напружень  $\sigma_x$ , що досягають границі плинності. Крім того, напруження  $\sigma_y$  взаємно зрівноважені в межах поперечного перерізу зварного шва. Тому для міцності ці напруження небезпеки не створюють. Основним небажаним наслідком цих напружень є можливість втрати стійкості, особливо при зварюванні тонколистових конструкцій.

Інакше формуються напруження при зварюванні закріплених з'єднань.

**Напруження  $\sigma_y$  у закріплених з'єднаннях.** Розглянемо напруження  $\sigma_y$  при зварюванні двох пластин, закріплених на зовнішніх крайках (рис. 3.19).

Зовнішні закріплення перешкоджають зменшенню розміру  $l$  на величину поперечної усадки  $\Delta_{\text{поп}}$ . Після охолодження внаслідок закріплення крайок утворюються деформації подовження

$$\varepsilon = \frac{\Delta_{\text{поп}}}{l}$$

та напруження розтягу

$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{\Delta_{\text{поп}}}{l}. \quad (3.9)$$

Епюру цих напружень наведено на рис. 3.19,а. Вона побудована в припущенні постійної усадки  $\Delta_{\text{поп}}$  по всій довжині шва.

Неодночасність виконання шва по його довжині дещо змінює характер цієї епюри. Поперечній усадці металу кожної наступної ділянки шва протидіють не тільки зовнішні закріплення, але і раніше заварена частина шва. Тому кожна наступна ділянка шва охолоджується в жорсткіших умовах, у ній утворюються значні напруження, при цьому частково розвантажуються попередні ділянки шва. Епюра має вигляд, показаний на рис. 3.19,б.

З аналізу формули (3.9) та епюр поперечних напружень (див. рис. 3.19) впливають два важливих для практики висновки.

1. Напруження  $\sigma_y$  при зварюванні в закріпленні тим більші, чим менша база закріплення  $l$  (тобто більша його жорсткість).

2. Напруження  $\sigma_y$  на ділянках шва, зварених в останню чергу, вищі за напруження на початку шва.

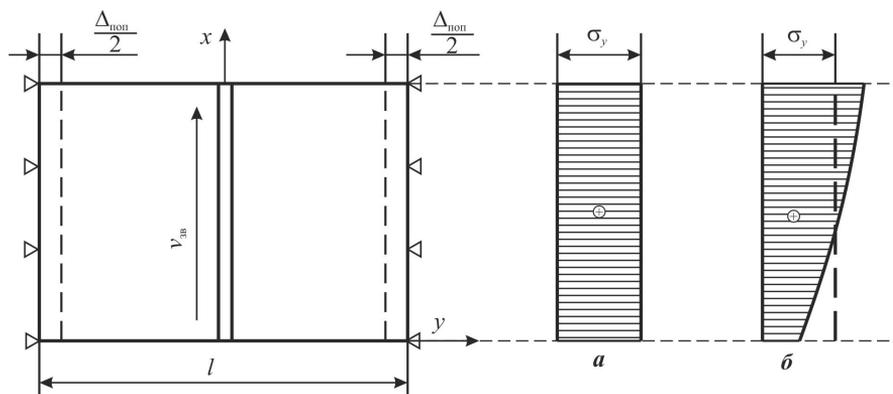


Рис. 3.19. Формування епюри поперечних напружень при зварюванні стику закріплених пластин

При великій жорсткості закріплення напруження розтягу  $\sigma_y$  можуть досягати значної величини. Оскільки ці напруження не зрівноважені в межах перерізу та охоплюють весь поздовжній переріз шва, вони можуть бути небезпечними для міцності конструкції або самі по собі, або у поєднанні з напруженнями від зовнішнього навантаження. Тому при розробці технології виготовлення зварної конструкції, зокрема вибору послідовності її складання і зварювання, необхідно прагнути зменшити напруження  $\sigma_y$ , а для цього, по можливості, зменшувати ступінь жорсткості з'єднання і в першу чергу зварювати найбільш відповідальні, найбільш завантажені ділянки з'єднань при роботі конструкції.

Розглянемо декілька прикладів призначення раціональної послідовності зварювання з'єднань у жорсткому закріпленні з метою отримання мінімальних залишкових напружень  $\sigma_y$ .

**Приклад 1. Зварювання монтажного стику двотаврової балки (рис. 3.20).** Монтажний стик двотаврової балки включає у себе декілька швів: стики полиць, стик стінки, недоварені ділянки поясних швів. Поперечна усадка при зварюванні цих з'єднань не може розвиватися абсолютно вільно, тому утворюються напруження розтягу, які можуть знизити працездатність балки. Оскільки в найменш жорстких умовах зварюється перший шов, у першу чергу необхідно зварити найбільш відповідальні частини з'єднання, що завантажені найбільшими напруженнями при роботі конструкції. Саме у них

залишкові напруження розтягу будуть мінімальними. Такими частинами в даному випадку є стики полиць 1. В останню чергу заварюються ділянки поясних швів 3. Наявність незаварених ділянок збільшує базу закріплення поясів і стінки та зменшує жорсткість при заварюванні швів 1 і 2.

З таких же міркувань вибирається послідовність зварювання монтажних стиків секцій і блоків корпусу судна. У першу чергу зварюються стики зовнішньої обшивки на днищі та палубі (рис. 3.21). Необхідно лівий та правий борта зварювати одночасно, щоб уникнути зламу осі корпусу за рахунок неодноразової усадки.

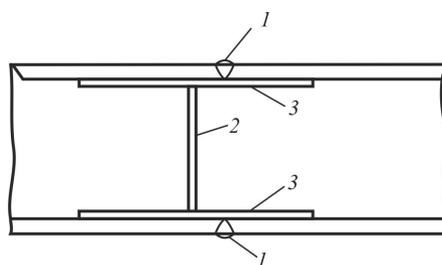


Рис. 3.20. Послідовність зварювання стику двотаврової балки

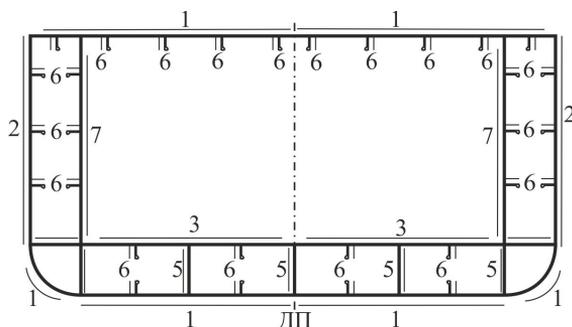


Рис. 3.21. Послідовність зварювання монтажних стиків блока корпусу судна

Після цього зварюються стики обшивки на бортах, потім стики другого дна та набору. В останню чергу зварюються недозаварені ділянки поясних швів, які приєднують набір до обшивки в районі монтажних стиків.

**Приклад 2. Заварювання тріщини (рис. 3.22).** При заварюванні тріщини створюється один з найбільш несприятливих напружених станів, який характеризується всебічним розтягом металу. Такий напружений стан небезпечний крихким руйнуванням навіть достатньо пластичних в умовах одновісного розтягу металів. Всебічний розтяг у районі тріщини створюється поздовжньою ( $\sigma_x$ ) і поперечною ( $\sigma_y$ ) усадками. Епюри та поля напружень показані на рис. 3.22 і 3.23.

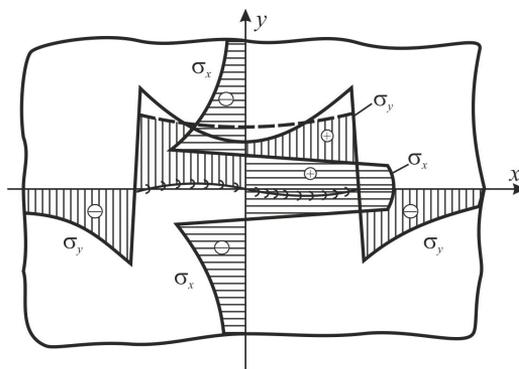


Рис. 3.22. Напружений стан після заварювання тріщини

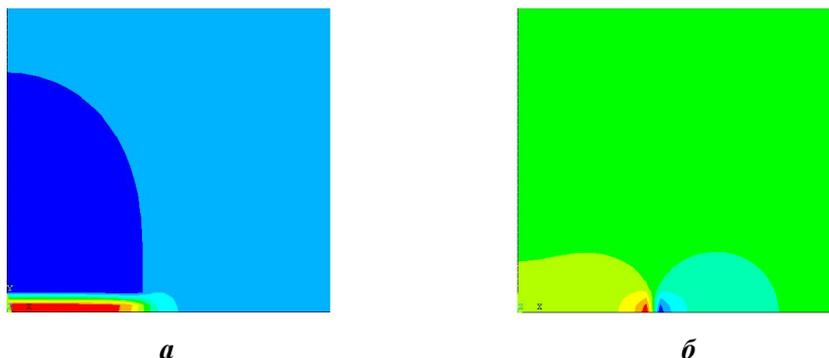


Рис. 3.23. Поля поздовжніх (а) і поперечних (б) напружень після заварювання тріщини

Для запобігання повторному утворенню тріщини після заварювання необхідно застосовувати певні технологічні заходи. Перший з них – засвердлювання країв тріщини (рис. 3.24) для ліквідації небезпечного концентратора напружень – джерела зародження нової тріщини.

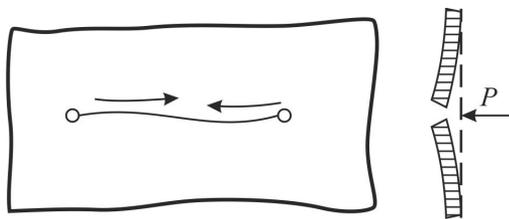


Рис. 3.24. Рекомендована послідовність заварювання тріщини

Заварювання тріщини слід вести від кінців до її середини. При такій послідовності найбільш небезпечні частини (кінці тріщини) заварюються в першу чергу, що знижує напруження  $\sigma_y$  в цих місцях. У результаті епюра напружень  $\sigma_y$  згладжується (пунктирна крива на рис. 3.22).

Проте вказані заходи, знижуючи ймовірність повторного утворення тріщини, повністю її не усувають. Найбільш ефективним засобом є створення попереднього пружного розкриття тріщини за допомогою домкрата (див. рис. 3.24). Після зняття зусилля крайки тріщини прагнуть зближуватися, що компенсує поперечну усадку. Підбираючи величину пружного розкриття тріщини, можна не тільки зменшити напруження розтягу, але і створити стиск, що значно покращує умови роботи металу та робить напружений стан "м'якшим".

**Приклад 3. Вварювання заглушок (рис. 3.25).** При вварюванні заглушки в цілий лист також створюється дуже "жорсткий" напружений стан за рахунок всебічного розтягу (поперечна усадка створює напруження розтягу на всіх напрямках). При заварюванні такого кругового з'єднання напрохід після охолодження, як правило, утворюється тріщина по осі шва або в зоні сплавлення. Для зменшення жорсткості напруженого стану заварювання необхідно виконувати окремими ділянками. Кількість ділянок залежить від діаметра заглушки.

При діаметрі заглушок до 150 мм усе з'єднання розбивається на дві (див. рис. 3.25,а), від 150 до 250 мм на три (див. рис. 3.25,б) і вище 250 мм

на чотири (див. рис. 3.25,в) ділянки. Зварювання кожної наступної ділянки можна починати тільки після охолодження попередньої. За рахунок послідовного зварювання поперечні усадки кожної з ділянок не підсумовуються при створенні напруженого стану. Усадка перших ділянок розвивається майже вільно, без утворення значних напружень. Тільки остання ділянка зварюється в жорсткому закріпленні, але величина напружень при цьому значно менша, а напружений стан "м'якший", ніж при зварюванні напрохід.

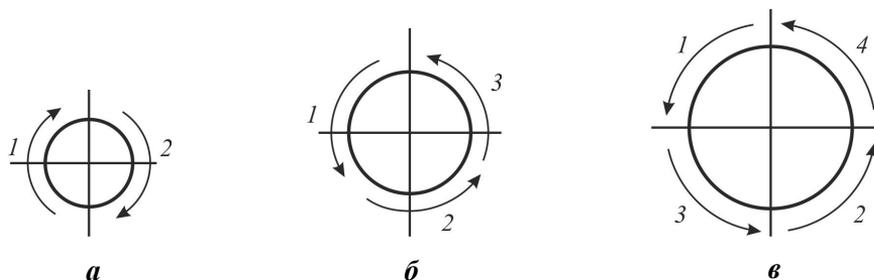


Рис. 3.25. Послідовність зварювання заглушок при різних діаметрах

**Приклад 4. Вварювання секцій у жорсткий контур.** При вварюванні секцій можливі два варіанти форми контуру: з округлими (рис. 3.26,а) та прямими (див. рис. 3.26,б) кутами. У другому випадку шви 3 і 4 повинні переходити через шви 1 і 2 на 40 товщин, щоб уникнути початку та закінчення швів у точці їх перетину. На перетині швів створюється "жорсткий" напружений стан (всєбічний розтяг), який у поєднанні зі зниженою якістю швів на початку та в кінці ділянки може призвести до крихкого руйнування.

У першу чергу необхідно заварити найбільш відповідальні (найбільш завантажені при роботі) шви. Такими швами в даному випадку є стики (поперечні шви). Стики 1 і 2 не можна варити одночасно, щоб уникнути підсумовування поперечної усадки при утворенні напружень  $\sigma_y$ . Після закінчення зварювання стиків і пазів обшивки заварюються стики набору. В останню чергу заварюються недоварені ділянки поясних швів, що приварюють набір до обшивки в районі монтажного стику.

Якщо секція встановлюється без набору (набір встановлений і приварений до основного корпусу заздалегідь), у першу чергу заварюються поясні шви, крім ділянок у районі монтажного стику. А потім зварювання виконується в розглянутій раніше послідовності.

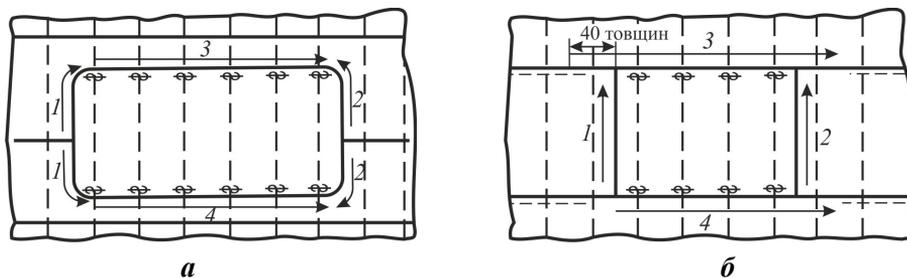


Рис. 3.26. Вварювання секцій у жорсткий контур

**Приклад 5. Зварювання полотна з листів на плоскому стенді.** Прикладом використання напружень, які створюються поперечним укороченням при зварюванні в закріпленому стані, є зварювання стиків і пазів полотна на плоскому стенді (рис. 3.27).

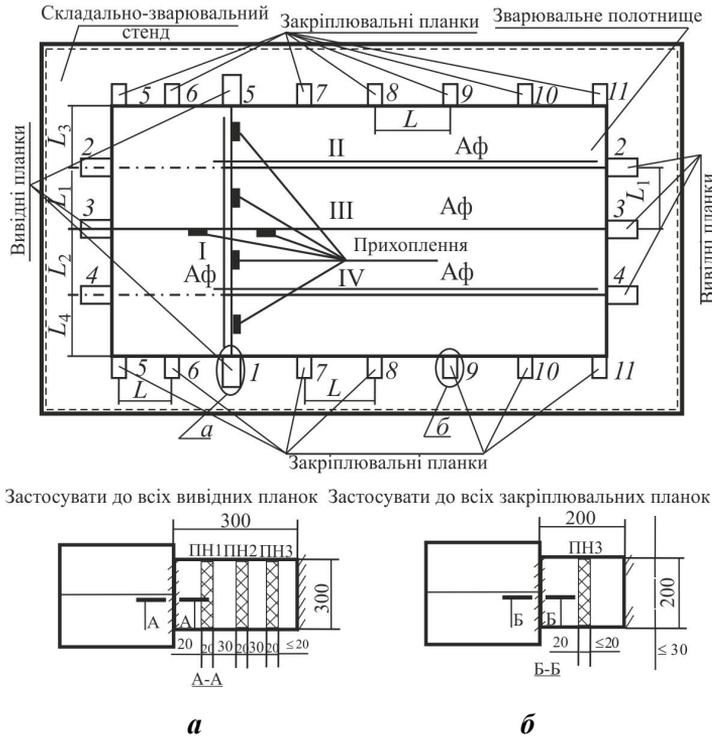


Рис. 3.27. Схема закріплення полотнищ перед зварюванням і підварюванням на стенді за допомогою вивідних (а) та закріплюючих (б) планок

Після складання листів на жорстких прихватках по всьому периметру полотна ставляться закріплюючі й вивідні планки, які приварюються до полотна і жорсткого стенда. Поперек цих планок наплавляються валики, поперечна усадка яких створює початкові напруження розтягу в полотні до зварювання. За рахунок цього зменшуються усадкові сили і напруження стиску в листах після зварювання та, як наслідок, зменшується вірогідність деформацій втрати стійкості – утворення "будиночків" на кінцях стиків і хвилястості листів.

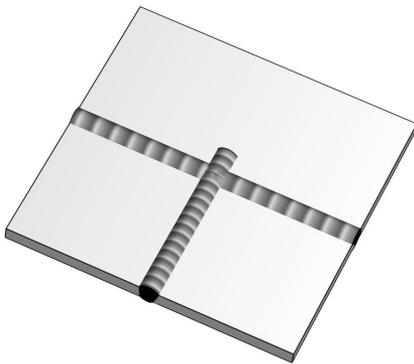


Рис. 3.28. Т-подібний перетин швів

При Т-подібному перетині швів (на рис. 3.27 пази притикаються до стику) зварювання закінчується на основному металі (рис. 3.28) з подальшим видаленням

холостого валика шліфуванням. Такий перетин дозволяє уникнути поєднання в точці перетину двох несприятливих чинників: плоского напруженого стану, який характерний для перетинів швів, і підвищеної вірогідності дефектів у початку і кінці шва.

### 3.5. Контрольні запитання

1. Назвіть основні причини утворення поперечного укорочення при зварюванні.
2. Назвіть основні чинники, які впливають на величину поперечного укорочення при зварюванні.
3. Назвіть властивості основного металу, які визначають величину поперечного укорочення в інженерних розрахунках.
4. Назвіть параметри режиму, які визначають об'єм поперечного укорочення в інженерних розрахунках.
5. Назвіть геометричні параметри конструкції, які впливають на об'єм поперечного укорочення в інженерних розрахунках.
6. Від чого залежить стрілка прогину таврової балки після зварювання поперечного шва на її полиці?
7. Поперек полиці таврової балки наплавлений валик.
  - Покажіть напрям вигину балки.
  - Як зміниться стрілка прогину, якщо збільшити погонну енергію?
  - Як зміниться укорочення балки, якщо збільшити погонну енергію?
8. Поперек стінки таврової балки наплавлений валик.
  - Покажіть напрям вигину балки.
  - Як зміниться стрілка прогину, якщо збільшити погонну енергію?
  - Як зміниться укорочення балки, якщо збільшити погонну енергію?
9. Які напруження утворюються при зварюванні стиків незакріплених листів? Від чого залежить їх величина?
10. Яка причина утворення "будиночків" на кінцях стику тонких полотен?
11. При зварюванні "напрохід" полотнища з довгих листів утворюються "будиночки" на кінцях шва. Що можна запропонувати для їх зменшення?
12. При зварюванні "напрохід" полотнища з довгих листів утворюється "опуклість" у середній частині шва. Що можна запропонувати для її зменшення?
13. Які напруження утворюються при зварюванні стиків закріплених листів? Від чого залежить їх величина?
14. Обґрунтуйте раціональну послідовність заварювання тріщини в листі.
15. При зварюванні фланця в плоский лист після охолодження може утворитися тріщина. Що можна запропонувати для зменшення ймовірності її утворення?
16. При заварюванні монтажного стику двотаврової балки доводиться заварювати стик на стінці, стики на полицях, недоварені ділянки поясних швів. В якій послідовності це необхідно виконати?

### 3.6. Приклад задачі для поперечного укорочення

До таврової балки приварюються косинки (рис. 3.29). Матеріал – сталь Ст3. Розміри балки такі: довжина  $l = 6$  м, висота стінки  $h = 400$  мм, ширина полиці  $b = 200$  мм, відстань між косинками  $a = 0,5$  м, товщина стінки  $s_1 = 6$  мм, полиці  $s_2 = 12$  мм, косинки  $s_3 = 5$  мм, тип з'єднань ТЗ (ГОСТ 5264–80), катет 5 мм.

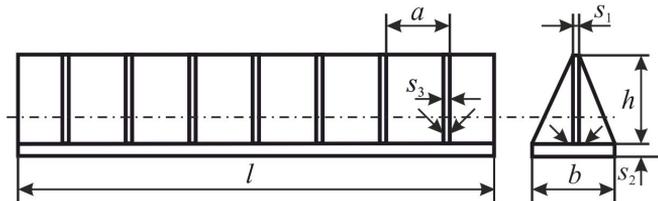


Рис. 3.29. Таврова балка з косинками

1. Назвіть очікувані загальні деформації балки після приварювання косинок до полиці та поясніть причини їх утворення.
2. Визначте величину загальних зварювальних деформацій балки після приварювання косинок до полиці.
3. Як зміняться загальні деформації після приварювання косинок до стінки балки?
4. Запропонуйте заходи зі зменшення зварювальних деформацій цієї балки.

#### Розв'язання

1. Загальні деформації балки від приварювання косинок до полиці – укорочення нейтральної осі та вигин опуклістю вгору. Причиною цього є нерівномірне нагрівання поперечного перерізу, внаслідок чого утворюються пластичні деформації поперечного укорочення металу полиці. Кількісно ці деформації визначаються об'ємом поперечного укорочення. Останній і спричиняє укорочення балки по її нейтральній осі. Оскільки осі швів на полиці не збігаються з нейтральною віссю балки (не проходять через центр ваги поперечного перерізу конструкції), утворюються згинальний момент і деформації вигину.

2. Для визначення загальних деформацій розрахуємо об'єм поперечного укорочення від одного шва. Для будь-якої сталі він визначається за формулою (3.4)  $W = -\xi q_{\text{п.п}} l_{\text{ш}}$ , де  $\xi = \alpha/c\rho[0,25 + 0,75 k_s (0,1 + k_{\text{ж}})]$ . Для сталі Ст3 прийmemo  $\alpha/c\rho = 3 \cdot 10^{-6}$  см<sup>3</sup>/Дж, тоді  $W = -3 \cdot 10^{-6} \cdot [0,25 + 0,75 k_s (0,1 + k_{\text{ж}})] \cdot q_{\text{п.п}} l_{\text{ш}}$ .

Частина погонної енергії, що йде на нагрівання полиці:  $q_{\text{п.п}} = k_{\text{п}} q_{\text{п}}$ , де  $q_{\text{п}}$  – погонна енергія зварювання, яку можна розрахувати через площу поперечного перерізу наплавленого металу  $F_{\text{н}}$  ( $q_{\text{п}} = \theta \cdot F_{\text{н}}$ ); коефіцієнт  $k_{\text{п}} = 0,82 - 0,2 s_{\text{п}}/s_{\text{п}}$ . Для кутового шва катетом  $k$  площа наплавленого металу  $F_{\text{н}} = k_0 \cdot k^2/2$ . Приймавши коефіцієнт, що враховує опуклість шва для ручного дугового зварювання,  $k_0 = 1,4$ , отримаємо  $F_{\text{н}} = 1,4 \cdot 5^2/2 = 17,5$  мм<sup>2</sup> = 0,175 см<sup>2</sup>.

Коефіцієнт пропорційності  $\theta$  для ручного дугового зварювання дорівнює 64500, тоді повна погонна енергія складає  $q_{\text{п}} = 64500 \cdot F_{\text{н}} = 64500 \cdot 0,175 = 11300$  Дж/см<sup>2</sup>.

Оскільки товщина косинки  $s_{\text{п}} = 5$  мм і товщина полиці  $s_{\text{п}} = 12$  мм, то коефіцієнт  $k_{\text{п}} = 0,82 - 0,2s_{\text{п}}/s_{\text{п}} = 0,82 - 0,2 \cdot 5/12 = 0,74$ . Тоді частина погонної енергії, що йде на нагрівання полиці при приварюванні до неї косинки,  $q_{\text{п.п}} = k_{\text{п}} q_{\text{п}} = 0,74 \cdot 11300 = 8400$  Дж/см<sup>2</sup>.

Коефіцієнт впливу ступеня прогрівання по товщині  $k_{\text{с}}$  визначимо залежно від  $q_{\text{п.п}}/s_{\text{п}}^2$  за графіком на рис. 3.6. У нашому випадку  $q_{\text{п.п}}/s_{\text{п}}^2 = 11300/1,22 = 7800$  Дж/см<sup>3</sup>, тоді  $k_{\text{с}} = 0,6$ . З урахуванням того, що ребром жорсткості, яке перетинає шов, є стінка балки, коефіцієнт впливу жорсткості прийемо за рис. 3.7 як для  $a/(2s_{\text{п}}) = 20/(2 \cdot 1,2) = 8,3$  (де  $a = 20$  см – ширина полиці);  $k_{\text{ж}} = 0,1$ .

Тоді об'єм поперечного укорочення одного одностороннього шва, який з'єднує пару косинок до полиці,  $W = -3 \cdot 10^{-6} \cdot [0,25 + 0,75k_{\text{с}}(0,1 + k_{\text{ж}})] \cdot q_{\text{п.п}} l_{\text{ш}} = -3 \cdot 10^{-6} \cdot [0,25 + 0,75 \cdot 0,6(0,1 + 0,1)] \cdot 8400 \cdot 20 = -0,202$  см<sup>3</sup>.

Сумарний об'єм поперечного укорочення з урахуванням 12 пар косинок, які приварюються двостороннім швом (на довжині 6 м через кожних 0,5 м),  $W = -12 \cdot 2 \cdot 0,202 = -4,85$  см<sup>3</sup>.

Визначимо геометричні характеристики перерізу: площу, положення центру ваги та власний момент інерції відносно осі  $y$ . Проведемо вісь порівняння через нижню крайку полиці. Розрахунок здійснимо в табличній формі (табл. 3.1).

Таблиця 3.1. Розрахунок геометричних характеристик балки

| Елемент перерізу балки | Положення центру ваги перерізу елемента $z_i$ , см | Площа перерізу елемента $F_i$ , см <sup>2</sup> | Статичний момент перерізу елемента $S_i$ , см <sup>3</sup> | Переносний момент інерції перерізу елемента $I_{yi}$ , см <sup>4</sup> | Власний момент інерції перерізу елемента $I_{0i}$ , см <sup>4</sup> |
|------------------------|--|---|--|--|---|
| Стінка                 | 21,2   | 24  | 518,4  | 10990  | 3200  |
| Полиця                 | 0,6  | 24  | 14,4   | 9  | 3   |
| Сума                   | –  | 48  | 532,8  | 10999  | 3203  |

Положення центру ваги перерізу відносно осі порівняння

$$z_0 = \frac{\Sigma S}{F} = \frac{532,8}{48} = 11,1 \text{ см.}$$

Власний момент інерції перерізу

$$I_y = \Sigma I_{yi} + \Sigma I_{0i} - F \cdot z_0^2 = 10999 + 3203 - 48 \cdot 11,1^2 = 8290 \text{ см}^4.$$

Відстань між осями шва та балки  $z = z_0 - s_{\text{п}} = 11,1 - 1,2 = 9,9$  см.

Загальне укорочення балки вздовж осі та кут повороту кінцевих перерізів при вигині балки визначимо за формулами (3.5) і (3.6):

$$\Delta l = \frac{\Sigma W}{F} = \frac{-4,85}{48} = -0,1 \text{ см} = -1 \text{ мм};$$

$$\varphi = \frac{\Sigma W \cdot z}{I_y} = \frac{-4,85 \cdot 9,9}{8290} = -5,8 \cdot 10^{-3} \text{ рад.}$$

Вигин спрямований угору, оскільки шви знаходяться нижче від осі балки.

З урахуванням того, що всі поперечні шви розподілені рівномірно вздовж довжини балки, форма вигину осі близька до дуги і стрілку прогину можна визначити за формулою

$$f = \varphi \cdot \frac{l}{8} = -5,8 \cdot 10^{-3} \frac{600}{8} = -0,435 \text{ см} = -4,35 \text{ мм.}$$

3. Після приварювання косинок до стінки укорочення осі балки збільшиться у декілька разів, оскільки довжина і кількість цих швів у два рази більші, крім того більшу величину мають коефіцієнти прогрівання  $k_s$  і жорсткості  $k_{ж}$ .

Вигин зменшиться і змінить знак на протилежний, оскільки при практично тій же величині плеча  $z$  останнє має зворотний знак (ЦВ шва вищий за ЦВ перерізу балки).

4. Усі можливі заходи щодо зменшення зварювальних деформацій балки можна розділити на три групи – до, в процесі та після зварювання. Перевагу слід надавати заходам, які використовуються до зварювання, оскільки вони, як правило, найменш трудомісткі й енергоємні. Навпаки, найбільш трудомісткі та енергоємні – післязварювальні заходи.

*До зварювання* – в разі вибору способу зварювання призначати той, який дає менше нагрівання на одиницю об'єму наплавленого металу, і типи з'єднань, що мають менший об'єм наплавленого металу. В даному випадку можна замінити ручне зварювання на зварювання в захисному газі. За рахунок більшого коефіцієнта наплавлення при зварюванні в захисному газі погонна енергія зменшиться, відповідно будуть зменшуватися і загальні деформації. Для зменшення залишкового вигину балки можна створити перед зварюванням пружний або пластичний вигин, протилежний зварювальному.

*У процесі зварювання* – використання економічних режимів, створення напружень розтягу в зоні зварювання.

*Після зварювання* – механічна правка, наприклад під пресом, правка місцевим нагріванням.

### 3.7. Завдання для самостійної роботи

**Задача 3.1.** На поверхні штаби наплавлено короткий поперечний валик довжиною  $l_{\text{ш}}$  (рис. 3.30).

1. Як змінюється стрілка прогину штаби в її площині при зміні довжини валика  $l_{\text{ш}}$  від  $b$  до 0?

2. Як змінюється укорочення штаби при зміні довжини валика  $l_{\text{ш}}$  від  $b$  до 0?

3. Навести форму вигину штаби в її площині.

4. Навести епюру напружень від поперечної усадки при  $l_{\text{ш}} = b/2$  у перерізах А–А і В–В.

5. Як зміниться форма вигину частин штаби після механічного розрізання її по осі  $x$ – $x$ ?

6. Визначити укорочення та стрілку прогину штаби в її площині при  $l_{\text{ш}} = b/2$ .

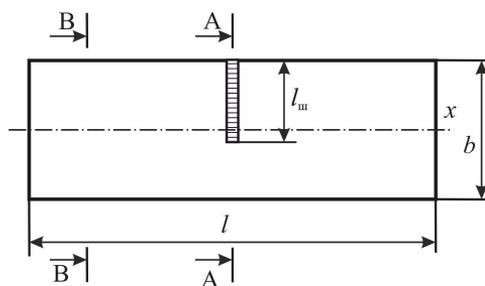


Рис. 3.30. Пластина з поперечним валиком

**Задача 3.2.** На поверхню штаби наплавляються три короткі поперечні шви (рис. 3.31).

1. Навести форму вигину штаби в її площині після наплавлення швів.

2. Який зі швів (1, 2 або 3) спричиняє найбільшу стрілку прогину, найбільше укорочення?

3. Коли вигин буде більшим: при наплавленні швів на суцільну пластину чи зварюванні прорізів (при однаковій погонній енергії)?

4. Як зміниться вигин частин, якщо розрізати штабу по осі  $x$ – $x$ ?

5. Як змінюються напруження в перерізі А–А при послідовному виконанні швів 1, 2 і 3?

6. Знайти стрілку прогину штаби в її площині від шва 1, шва 2, швів 1, 2 і 3.

7. Визначити укорочення штаби від шва 1, швів 1, 2 і 3.

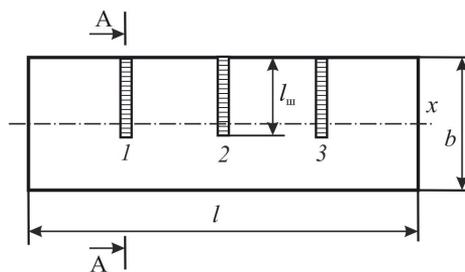


Рис. 3.31. Пластина з короткими поперечними швами

**Задача 3.3.** У середній частині закріпленої на крайках пластини наплавлено два короткі валики 1 і 2 (рис. 3.32).

1. Навести характер епюр напружень  $\sigma_y$  в перерізах А–А та В–В після наплавлення.

2. Як зміняться напруження  $\sigma_y$  у валику 1 після зварювання валика 2?

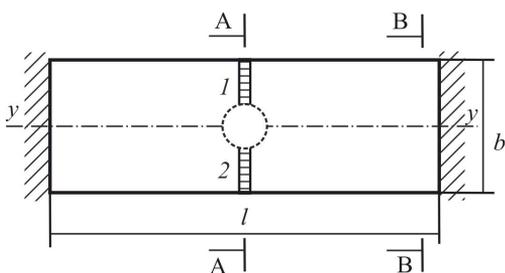


Рис. 3.32. Жорстко закріплена пластина з короткими поперечними валиками

середньої частини пластини (показано пунктиром);

– після рівномірного нагрівання пластини до 600 °С у середній частині та після охолодження.

**Задача 3.4.** Стик незакріпленої пластини зварюється напрохід (рис. 3.33).

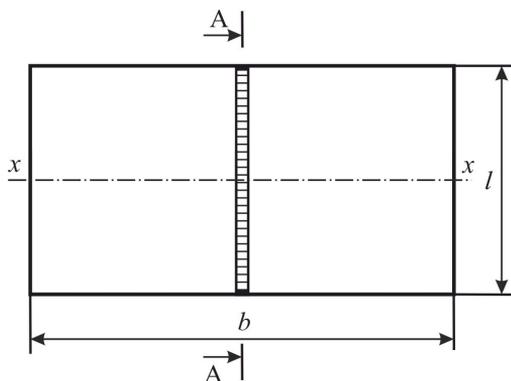


Рис. 3.33. Стик незакріплених листів

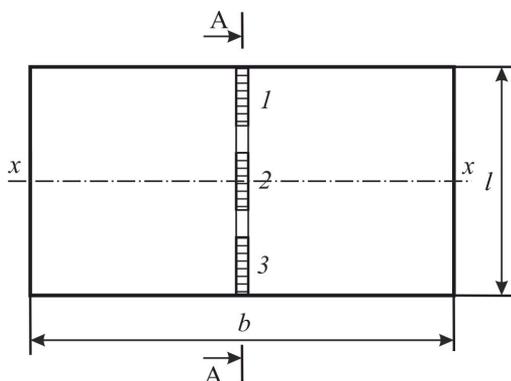


Рис. 3.34. Пластини, складені на прихватках

3. Як зміниться епюра напружень  $\sigma_y$  в перерізі А–А?

– після зняття закріплення на крайках;

– при зміні довжини пластини (бази закріплення).

4. Як зміниться епюра напружень  $\sigma_y$  в перерізі В–В?

– при зміні довжини пластини (бази закріплення);

– після механічного видалення

1. Навести епюру напружень  $\sigma$ , спричинених поперечною усадкою, в перерізі А–А.

2. Як змінюється характер цієї епюри зі збільшенням та зменшенням швидкості зварювання (за умови постійності погонної енергії)?

**Задача 3.5.** Два незакріплені листи з'єднано між собою трьома короткими швами (прихватками) (рис. 3.34).

1. Навести характер епюри поперечних напружень у перерізі А–А при зварюванні швів у такій послідовності: 1–2–3, 1–3–2, 2–1–3, 3–2–1.

2. Як зміниться характер епюри напружень, якщо видалити один зі швів?

3. Як зміниться зазор між пластинами, якщо видалити шов 2?

4. Навести характер епюри поперечних напружень у перерізі А–А,

якщо пластини перед зварюванням жорстко закріпити по зовнішніх краяхах (послідовність зварювання  $1-2-3$ ,  $1-3-2$ ,  $3-2-1$ ).

**Задача 3.6.** На пластину з двома наскрізними канавками наплавлений шов (рис. 3.35).

1. Навести епюру поперечних напружень у перерізі А-А.

2. Як зміняться напруження в шві при збільшенні погонної енергії?

3. Як зміняться напруження в шві при збільшенні довжини прорізів?

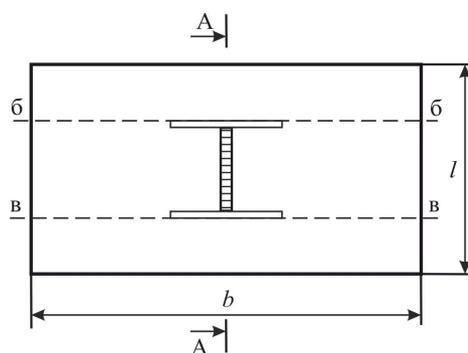


Рис. 3.35. Пластина з прорізами і поперечним швом

**Задача 3.7.** Косинки приварюються до полиці та стінки таврової балки без скосу крайок (з'єднання ТЗ) катетом 5 мм (рис. 3.36).

1. Визначте укорочення балки після приварювання косинок для варіантів 1 і 2.

2. Визначте вигин балки після приварювання косинок для варіантів 1 і 2.

3. Порівняйте результати розрахунків, поясніть відмінність варіантів.

4. Сконструйте з'єднання косинок, що не спричиняє вигину балки.

5. Як змінюється стрілка прогину балки від приварювання косинок при зміні  $z$  від  $a/2$  до  $h - a/2$ ?

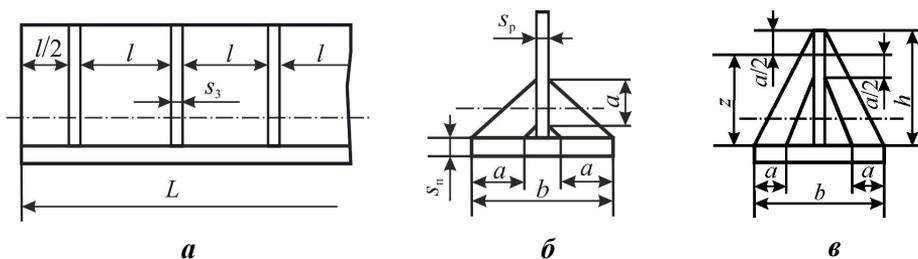


Рис. 3.36. Таврова балка (а) з косинками, варіант 1 (б) і варіант 2 (в)

## Розділ 4. КУТОВІ ДЕФОРМАЦІЇ

### 4.1. Механізм, основні причини та особливості кутових деформацій

У розділі 3 при розгляді деформацій поперечного укорочення передбачався їх рівномірний розподіл по товщині металу, принаймні при обчисленні величини поперечного укорочення визначалося його середнє значення. У реальному з'єднанні поперечне укорочення по товщині розподілене нерівномірно. Верхні шари металу, які розташовані ближче до джерела тепла, нагріваються більше, тому і поперечне укорочення у верхніх шарах більше від середньої розрахункової величини, а в нижніх – менше. Нерівномірність укорочення призводить до появи згинального моменту і утворення зламу з площини з'єднання на кут  $\beta$ . Такі деформації називаються *кутовими* (рис. 4.1). Основною причиною утворення кутових деформацій є нерівномірність нагрівання та поперечного укорочення з'єднання по товщині.

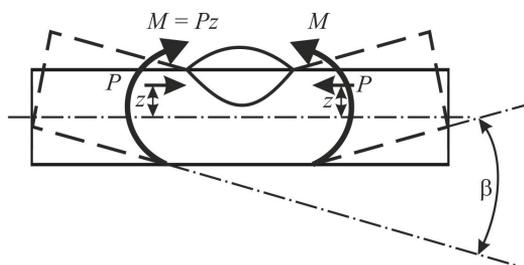


Рис. 4.1. Схема утворення кутової деформації

Величина кутової деформації залежить від характеру розподілу тепла в поперечному перерізі, а це, в свою чергу, – від способу зварювання та багатьох інших чинників. Тому кутові деформації мають деякі особливості порівняно з деформаціями поздовжнього та поперечного укорочення.

Перша особливість – залежність не тільки від погонної енергії, але й від усіх параметрів режиму зварювання: зварювального струму, напруги на дузі, швидкості зварювання, діаметра і траєкторії руху електрода та деяких інших чинників. При одній і тій же кількості тепла (погонній енергії) форма прогрівання може суттєво відрізнитися, відповідно змінюється і кут зламання (рис. 4.2). Найбільшим він буде при малій глибині прогрівання (максимальний згинальний момент за рахунок максимального плеча поперечної сили усадки), найменшим – при повному прогріванні (мінімальний момент за рахунок мінімального плеча).

Друга особливість – неоднозначна залежність від погонної енергії, а точніше від співвідношення погонної енергії та квадрата товщини  $q_{\text{п}}/s_2$ . Зі збільшенням погонної енергії при незмінній товщині кутові деформації можуть як збільшуватися (за рахунок збільшення сили усадки при кінцевій

величині плеча), так і зменшуватися (за рахунок зменшення плеча при кінцевій силі усадки) (рис. 4.3).

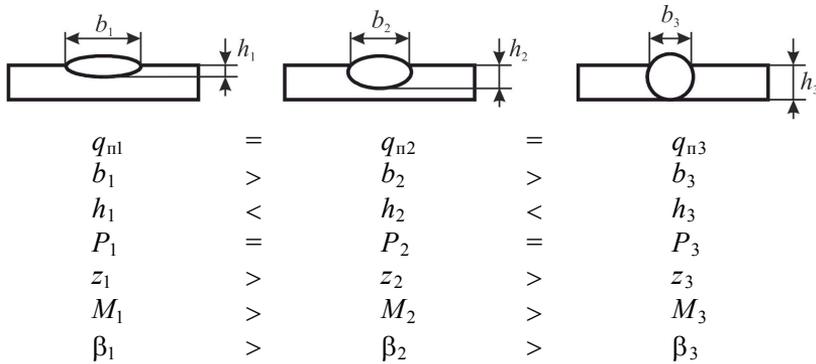


Рис. 4.2. Залежність кутової деформації від форми прогрівання при зварюванні

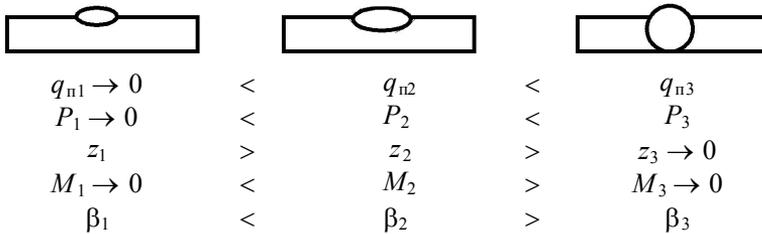


Рис. 4.3. Залежність кутової деформації від погонної енергії

## 4.2. Визначення величини кутового зламу при наплавленні валика

Теоретична залежність кута зламу від відносної глибини прогрівання  $h/s$  при наплавленні валика на пластину товщиною  $s$  отримана В.О. Винокуровим для схематизованої форми прогрівання у вигляді прямокутника висотою  $h$  і шириною  $b$ . Залежність має форму симетричної параболи (рис. 4.4), тобто при збільшенні відносної глибини прогрівання кутова деформація спочатку зростає, а потім зменшується. Оскільки реальна форма прогрівання має складніші контури (близькі до еліпса), то реальні залежності, які отримують експериментально, відрізняються від ідеальної: дещо зміщується вправо точка максимуму, порушується симетрія, при наближенні відносної глибини прогрівання до одиниці кут не досягає нуля (див. рис. 4.4).

Для практичних розрахунків зазвичай користуються емпіричними залежностями, в яких для зручності відносна глибина прогрівання замінюється однозначно зв'язаним з нею відношенням погонної енергії до квадрата товщини, тобто  $q_{п}/s^2$ .

Останні дослідження методом комп'ютерного моделювання дозволили встановити, що величина кутового зламу при наплавленні валика на плоску

пластину залежить від двох основних параметрів – відносної глибини  $h/s$  та відносної ширини  $b/s$  прогрівання. Як розрахункову можна брати зону прогрівання до температури майже повної втрати пружних властивостей, яка для низьковуглецевих і низьколегованих сталей становить  $600 \dots 700 \text{ }^\circ\text{C}$ .

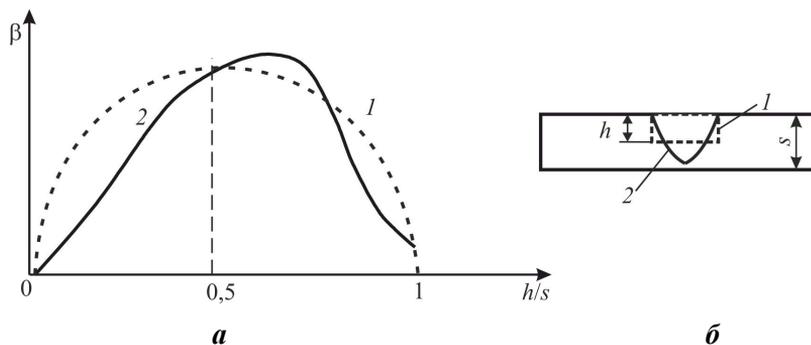


Рис. 4.4. Схематизована (1) і реальна (2) залежності (а) та схеми прогрівання (б) для визначення кутових деформацій при наплавленні валика з різним ступенем прогрівання по товщині пластини

Аналіз результатів моделювання показав, що при малій відносній глибині зони прогрівання кутова деформація зростає, досягаючи максимуму при  $h/s = 0,6$ , а потім зменшується при будь-яких значеннях відносних ширини та товщини (рис. 4.5). Характерно, що при повному прогріванні ( $h/s = 1$ ) кутова деформація не зменшується до нуля, а зберігає значення на рівні  $0,005 \dots 0,017$  рад залежно від відносної ширини прогрівання.

При однаковій відносній глибині прогрівання чим більша відносна ширина  $b/s$ , тим більші кутові деформації (див. рис. 4.5). Графіки цієї ж залежності в інших координатах показані на рис. 4.6, з якого видно, що кутова деформація зростає лінійно, прямо пропорційно відносній ширині прогрівання при будь-яких значеннях відносних глибини і ширини.

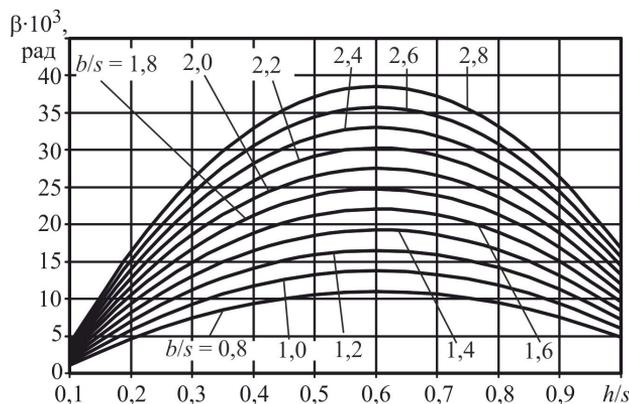


Рис. 4.5. Залежність кутових деформацій від відносної глибини прогрівання  $h/s$  при різних значеннях відносної ширини зони прогрівання  $b/s$

Величина кутового зламу за результатами моделювання з достовірністю не менше 0,95 описується рівнянням регресії:

$$\beta = \left( -0,049 \left( \frac{h}{s} \right)^2 + 0,059 \frac{h}{s} - 0,004 \right) \frac{b}{s}. \quad (4.1)$$

Для зручності практичного використання відносну глибину прогрівання часто виражають через питому погонну енергію, оскільки вони пов'язані залежностями  $q_{\text{п}}/s^2 = 35 \cdot 10^3 \cdot (h/s)^2$  або  $h/s = 5,34 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{q_{\text{п}}/s^2}$ . З урахуванням цього на рис. 4.7 наведено графіки для визначення кута зламу в зручнішому для практичного використання вигляді.

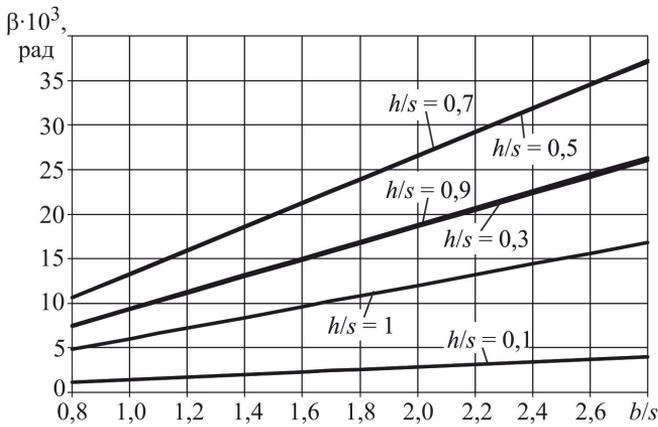


Рис. 4.6. Залежність кутових деформацій від відносної ширини прогрівання  $b/s$  при різних значеннях відносних глибин прогрівання  $h/s$

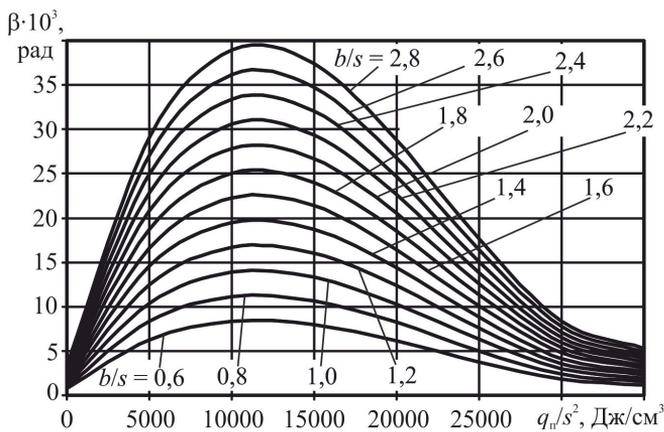


Рис. 4.7. Залежність кутових деформацій від питомої погонної енергії

Наведені графічні залежності з достатньою для практики точністю (з достовірністю близько 0,9) описуються рівнянням регресії:

$$\beta = \left( 2,11 \cdot 10^{-15} \left( \frac{q_{\text{п}}}{s^2} \right)^3 - 1,45 \cdot 10^{-10} \left( \frac{q_{\text{п}}}{s^2} \right)^2 + 2,51 \cdot 10^{-6} \left( \frac{q_{\text{п}}}{s^2} \right) + 0,0012 \right) \frac{b}{s}.$$

Ширину зони прогрівання приблизно можна визначити через коефіцієнт форми проплавлення  $\psi = h/b$ , який, за даними С.А. Кузьміна, зв'язаний з параметрами режиму зварювання співвідношеннями  $\psi = 0,0083I/d + 0,2$  – для ручного дугового та механізованого зварювання і  $\psi = 0,0037I/d - 0,19$  – для автоматичного зварювання.

При відомій ширині наплавленого валика (для кутового шва вона дорівнює катету) ширину зони прогрівання можна приблизно визначити помноживши ширину валика на 1,7.

Таким чином, основний вплив на величину кутових деформацій при зварюванні мають відносні глибина та ширина прогрівання. Зі збільшенням відносної ширини величина кутового зламу збільшується при будь-якій відносній глибині й товщині. Зі збільшенням відносної глибини кутовий злам спочатку збільшується, досягає максимального значення при  $h/s = 0,5 \dots 0,7$ , а потім знову зменшується.

### 4.3. Визначення величини кутового зламу при зварюванні стикових з'єднань

При заварюванні стикових з'єднань товщиною  $s$  без скосу крайок кутову деформацію від першого шару  $I$  можна визначити з рис. 4.5, як для схеми наплавлення валика з повним прогріванням (рис. 4.8,а), або за формулою (4.1) для відносної глибини прогрівання  $h/s = 1$ . Величина кута зламу в цьому випадку змінюватиметься від 0,005 до 0,017 рад залежно від ширини прогрівання, яку можна прийняти такою, що дорівнює 1,7 ширини валика.

При заварюванні другого проходу (шару) 2 схема прогрівання практично не відрізняється від наплавлення валика на пластину такої ж товщини (див. рис. 4.8,б), тобто кутова деформація може бути визначена залежно від відносної глибини прогрівання з рис. 4.5 або залежно від співвідношення погонної енергії та квадрата товщини  $q_{\text{п}}/s^2$  з рис. 4.7.

При багатшаровому заварюванні стикових з'єднань з V- і X-подібними обробленнями крайок перший шар викликає кутовий злам, близький до 0,02 рад (див. рис. 4.8,в). Цей злам зв'язаний з конфігурацією скосу та практично не залежить від розмірів зони прогрівання. При заварюванні подальших шарів ( $i$ ) прогрівання металу та механізм утворення кутових деформацій аналогічні схемі наплавлення валика на пластину товщиною  $s_i$ , яка дорівнює товщині всіх наплавлених валиків за попередні проходи. Тому кутовий

злам від заварювання кожного проходу може бути знайдений за кривими для наплавлення з урахуванням змінної величини  $q_{ni}/s_i^2$  (див. рис. 4.7).

Кутові деформації при багат шаровому зварюванні підсумовуються при зварюванні шарів з одного боку V-подібного оброблення (див. рис. 4.8,з) або віднімаються при зварюванні з різних боків X-подібного оброблення (див. рис. 4.8,д).

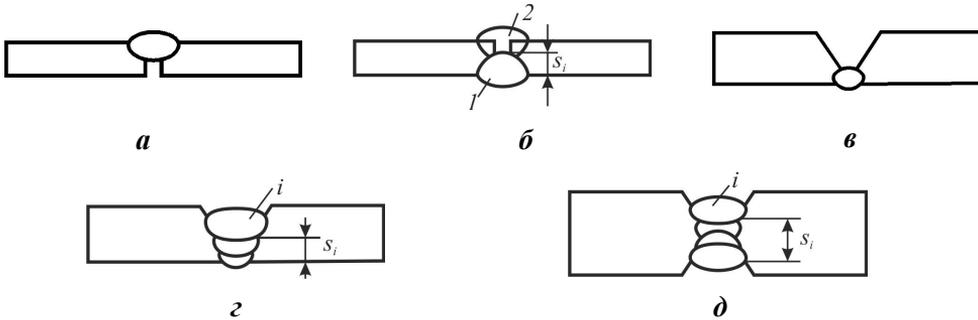


Рис. 4.8. Кутові деформації при зварюванні стикового з'єднання

#### 4.4. Визначення величини кутового зламу при зварюванні таврових з'єднань

При зварюванні таврових з'єднань (рис. 4.9) кутова деформація складається з двох частин, обумовлених різними причинами. Перша – нерівномірне прогрівання полиці – аналогічна наплавленню валика на пластину, з тією лише різницею, що в даному випадку ступінь прогрівання по товщині полиці визначається не всією погонною енергією, а тільки її частиною, яка йде на нагрівання полиці  $q_{п.п}$ . Ця частина  $\beta_1$  може бути визначена з рис. 4.5, 4.6 або 4.7 для наплавлення валика залежно від  $h/s$  або  $q_{п.п}/s_n^2$ .

Друга причина – ливарна усадка наплавленого металу між стінкою і полицею. По зовнішній поверхні шва ця усадка більша, ніж у вершині, тому спочатку прямий кут зменшується. Це зменшення не залежить від площі наплавлення і при однопрохідному зварюванні складає близько 0,02 рад (див. рис. 4.9,а).

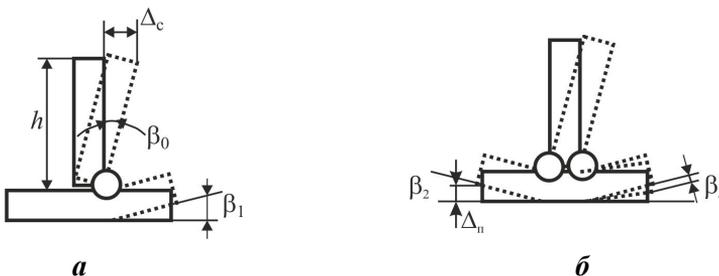


Рис. 4.9. Кутова деформація при зварюванні таврового з'єднання одним (а) та двома (б) швами

При зварюванні такого ж шва зі зворотного боку діють ті ж причини, але друга – усадка наплавленого металу – не повертає стінку у вихідне положення. Кут повороту в цьому випадку зазвичай менший, оскільки стінка та полиця жорстко скріплені між собою першим швом. Його величина може бути знайдена за емпіричними формулами

$$\beta_k = 1,5\varepsilon_T \left( \frac{k}{s_{\text{п}}} \right)^3 \left( \frac{s_{\text{п}}}{k} + 1 \right) \text{ або } \beta_k = 0,02 \left( \frac{k}{s_{\text{п}}} \right)^2.$$

Загальна кутова деформація після зварювання таврового з'єднання з двох сторін складається із залишкового повороту стінки щодо полиці у бік першого шва і зламу полиці на кут  $\beta_{\Sigma} = \beta_1 + \beta_2 + \beta_k$ .

Поворот стінки висотою  $h$  відносно полиці на кут  $\beta_0$  призводить до переміщення її верхньої крайки на величину  $\Delta_c = \beta_0 \cdot h$ .

Злам полиці в балках іноді називають грибоподібністю. Максимальне відхилення крайки полиці від площини при цьому залежить від сумарного кута зламу  $\beta_{\Sigma}$  та ширини полиці  $b$  і може бути визначено за формулою

$$\Delta_{\text{п}} = \beta_{\Sigma} \frac{b}{4}.$$

#### 4.5. Ребристість і коробуватість конструкцій унаслідок кутових деформацій

У плоских конструкціях, типу полотен або плит, підкріплених ребрами жорсткості, кутовий злам листа в місці зварювання таврових з'єднань викликає специфічні види деформацій.

У конструкціях малої та середньої товщини, коли власна жорсткість листа відносно мала, щоб викликати підйом країв листа, виявляється ефект розгинання листа в прольоті між ребрами (рис. 4.10).

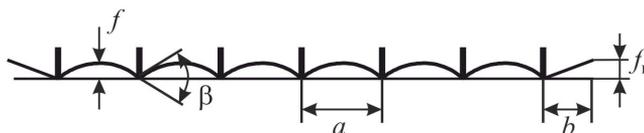


Рис. 4.10. Деформації ребристість панельної конструкції

Такі деформації називаються ребристістю. Величина цих деформацій вимірюється стрілкою прогину  $f$  у прольоті між ребрами (всередині шпації). Оскільки форма зігнутої поверхні пластини близька до циліндричної, то стрілку прогину можна визначити через кут зламу від приварювання ребра  $\beta_{\Sigma}$

та відстань між ребрами  $a$  (див. рис. 4.10):

$$f = \frac{\beta a}{8}.$$

Іноді необхідно розрахувати також величину завалу крайки внаслідок кутової деформації від приварювання крайнього ребра (див. рис. 4.10):

$$f_k = \frac{3}{4} \beta b.$$

У товстолістових конструкціях (декілька десятків міліметрів) власної жорсткості листа може бути достатньо для запобігання розгинанню в прольоті між ребрами, внаслідок цього кінці конструкції піднімаються. Такий вид деформацій називають коробоватістю (рис. 4.11). Стрілка прогину в такій конструкції визначається кутом зламу в районі кожного ребра  $\beta$ , кількістю ребер  $n$  та загальною шириною секції  $B$ . При великій кількості ребер прогин може досягти декількох десятків міліметрів:

$$f = \frac{n\beta B}{8}.$$

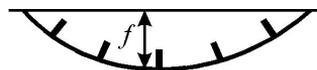


Рис. 4.11. Деформації коробоватості після приварювання ребер жорсткості до плити

#### 4.6. Напруження при кутовому зламі пластини

Нерівномірне укорочення по товщині листа відбувається невільно, внаслідок чого виникають поперечні напруження. На рис. 4.12 і 4.13 показані поля та епюри поперечних напружень при наплавленні валика на пластину, отримані комп'ютерним моделюванням. Як видно, у районі кореня шва при всіх відносних глибинах прогрівання зона розтягу в прогрітому металі змінюється зоною стиску в металі під швом. Рівень цих напружень досягає границі пластичності матеріалу і поступово зменшується при віддаленні від кореня шва.

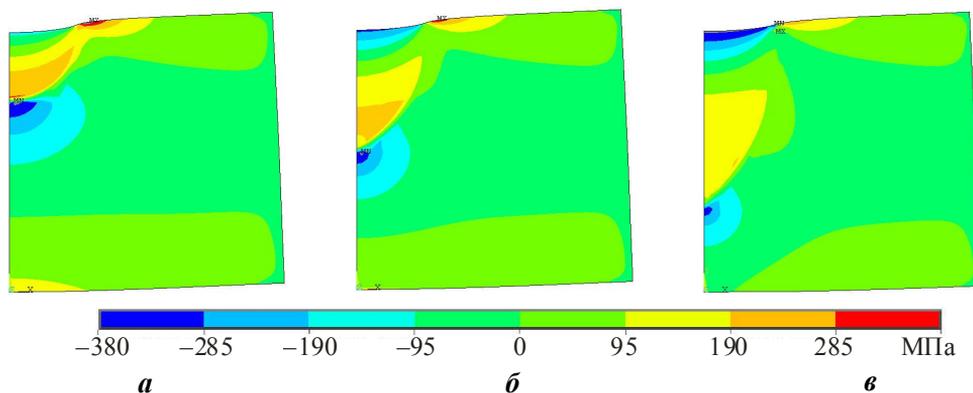


Рис. 4.12. Поля напружень  $\sigma_y$  при відносній глибині прогрівання  $h/s = 0,3$  (а),  $0,5$  (б) і  $0,7$  (в)

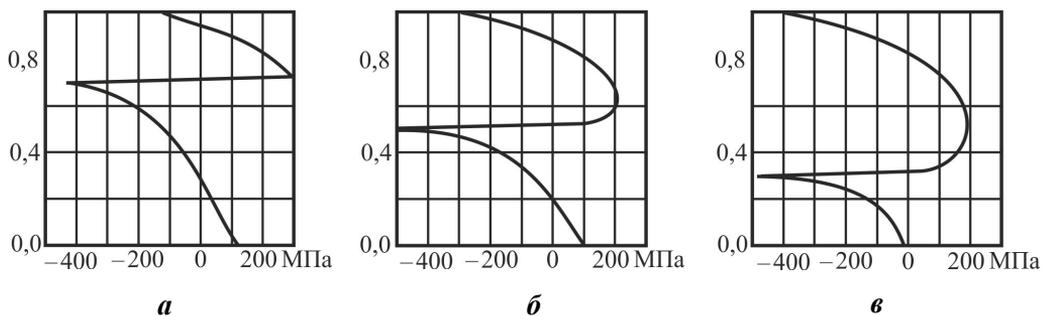


Рис. 4.13. Епюри напружень  $\sigma_y$  на осі валика при відносній глибині прогрівання  $h/s = 0,3$  (а),  $0,5$  (б) і  $0,7$  (в)

На відстані біля  $0,15s$  від верхньої та нижньої поверхонь при середній глибині прогрівання ( $h/s = 0,5$ ) напруження змінюють знак і до верхньої поверхні напруження стиску зростають до рівня границі плинності. Аналогічно до нижньої поверхні зростають напруження розтягу. Такий косиметричний характер епюри пояснюється сумісною дією розтягу-стиску в результаті скорочення (пластичні деформації та зближення крайок) прогрітої зони і згинальним моментом, обумовленим зміщенням прогрітої зони вгору від середини товщини.

При зменшенні глибини прогрівання ( $h/s = 0,3$ ) косиметрія порушується. Напруження стиску на верхній поверхні в результаті зменшення згинального моменту знижуються наближаючись до нуля. Поблизу кореня шва вони залишаються на рівні, близькому до границі плинності матеріалу. В зоні прогрівання діють напруження розтягу, а в металі під швом – напруження стиску.

При збільшенні глибини прогрівання ( $h/s = 0,7$ ) напруження розтягу зменшуються та переходять у напруження стиску на нижній поверхні. Згинальний момент у цьому випадку зменшується за рахунок наближення ЦВ зони прогрівання до середини товщини.

Наявність напружень розтягу в корені шва (прогрітої зони) та на нижній поверхні листа може сприяти утворенню тріщин у цих зонах, що необхідно враховувати при розробці технології зварювання і наплавлення.

#### 4.7. Заходи зі зменшення кутових зламів

Величина кутових деформацій істотно залежить від ширини та глибини зони прогрівання. Тому при виборі параметрів режиму зварювання (погонної енергії) слід вибирати таке поєднання струму, напруги на дузі та швидкості зварювання, яке забезпечує мінімальну ширину зони прогрівання й відносну глибину  $h/s$  поза інтервалом  $0,4 \dots 0,8$ .

Для зменшення місцевих зламів, які обумовлені кутовими деформаціями листів, застосовуються також закріплення та вигини. Закріплення можуть здійснюватися за допомогою технологічного навантаження, талрепів, струбцин,

постановки додаткових елементів жорсткості або прихоплення елемента до плити.

Дослідження методом комп'ютерного моделювання показали, що ступінь зниження кутового зламу залежить не тільки від місця закріплення, але і від відносної глибини та ширини зони прогрівання. При малій відносній глибині ( $h/s = 0,1$ ) відносно зниження кута зламу при зварюванні у закріпленому стані ( $\beta_3$ ) у порівнянні з кутом при зварюванні у вільному стані ( $\beta_B$ ) мале і складає  $0,85 \dots 0,95$ , тобто зниження не перевищує  $5 \dots 15 \%$ . При  $h/s = 0,3$  відношення  $\beta_3/\beta_B$  змінюється до  $0,4 \dots 0,8$  і при  $h/s = 0,5 \dots 1,0$  залишається в межах  $0,5 \dots 0,9$ . Зі збільшенням відносної ширини прогрівання ступінь зниження помітно зростає.

Суттєво впливає місце закріплення. Як видно з рис. 4.14, оптимальне місце закріплення знаходиться на відстані  $3 \dots 5$  товщин. При цьому ступінь зменшення кутових деформацій максимальний і  $\beta_3/\beta_B$  складає  $0,50 \dots 0,65$ . Зі збільшенням відносної відстані до  $10s$  вплив закріплення зменшується,  $\beta_3/\beta_B$  збільшується до  $0,65 \dots 0,90$ . Це пояснюється тим, що зменшення кутового зламу визначається ступенем пластичної деформації металу в шві, яка зменшується при збільшенні бази закріплення.

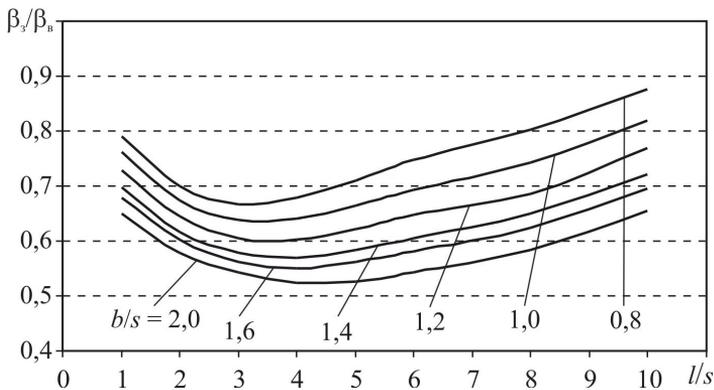


Рис. 4.14. Залежність ступеня зменшення кутових деформацій від відносної відстані до місця закріплення при  $h/s = 0,7$

Таким чином, рекомендована відстань закріплення  $5 \dots 10$  товщин, яка зустрічається в літературі, є завищеною і дає малий ефект. Результати моделювання показали, що зусилля притиснення (закріплення) необхідно розташовувати якомога ближче до шва, а величину зусилля (або навантаження) вибирати так, щоб лист у місці закріплення (навантаження) не відходив від плити. Зусилля повинне діяти на зварне з'єднання до повного охолодження шва. При цьому усувається накопичення кутової деформації в процесі охолодження металу, оскільки під дією моменту, створеного зусиллями (навантаженням), відбувається пластичне подовження волокон наплавленого

металу і затримується поворот листів один відносно одного. Це дозволяє зменшити кутовий злам до значень, які задовольняють технічним вимогам.

Механізм впливу пружного вигину аналогічний впливу початкових напружень. Принцип – початкові напруження розтягу зменшують деформації – діє і тут. Створивши початкові напруження розтягу, близькі до границі пластичності, можна понизити залишкові деформації практично до нуля.

#### 4.8. Контрольні запитання

1. Назвіть основну причину утворення кутових деформацій.
2. Які основні чинники впливають на величину кутових деформацій?
3. Які параметри режиму впливають на величину кутових деформацій?
4. Укажіть параметри режиму зварювання, які визначають величину кутових деформацій при інженерних розрахунках.
5. Укажіть геометричні параметри конструкції, які визначають величину кутових деформацій при інженерних розрахунках.
6. Як змінюється величина кутової деформації?
  - при збільшенні відносної глибини прогрівання;
  - при збільшенні товщини листа;
  - при збільшенні відносної ширини прогрівання;
  - при збільшенні погонної енергії зварювання.
7. Як розподілені напруження по товщині листа після наплавлення?
8. Які заходи можна вжити з метою зменшення кутового зламу при зварюванні стиків; при наплавленні валиків?
9. На якій відстані слід установлювати жорстке закріплення для зменшення кутового зламу при зварюванні?

#### 4.9. Приклад задачі для кутових деформацій

Ребро висотою  $h = 200$  мм і товщиною  $t_p = 6$  мм приварене до пластини шириною  $a = 400$  мм і товщиною  $t_n = 8$  мм зі сталі Ст3 з'єднанням Т1 (рис. 4.15); катет шва 5 мм; погонна енергія зварювання  $q_n = 10000$  Дж/см.

1. Покажіть очікувану форму кутових деформацій після зварювання з'єднання. Поясніть причини їх появи, вкажіть чинники, які впливають на величину деформацій.

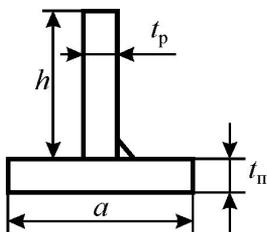


Рис. 4.15. Таврове з'єднання

2. Як зміняться кутові деформації при збільшенні товщини ребра, товщини пластини або одночасному пропорційному збільшенні обох товщин?
3. Як зміняться кутові деформації при збільшенні катета шва?
4. Визначте величину очікуваних кутових деформацій.
5. Запропонуйте заходи зі зменшення кутових деформацій.

**Розв'язання**

1. Після виконання кутового шва виникає поворот ребра відносно пластини на кут  $\beta_0$ , що дорівнює приблизно 0,02 рад, за рахунок поперечного укорочення (усадки) наплавленого металу.

Крім того виникає кутовий злам пластини з утворенням грибоподібності. Причина зламу – нерівномірне нагрівання по товщині пластини. Характер деформації показано на рис. 4.16. Основними чинниками, які впливають на величину кутового зламу, є погонна енергія зварювання  $q_{п.п}$ , товщина пластини  $t_{п}$  і співвідношення товщин ребра  $t_{р}$  та пластини. Останнє визначає частку енергії

$$q_{п.п} = \frac{2t_{п}}{t_{р} + 2t_{п}} q_{п}, \text{ яка йде саме на нагрівання листа.}$$

2. При збільшенні товщини ребра зменшується частка погонної енергії, що йде на нагрівання пластини. Відповідно зменшується глибина прогрівання та змінюється кутовий злам пластини. При збільшенні товщини пластини збільшується частка погонної енергії  $q_{п.п}$ , яка йде на її нагрівання, змінюється відносна глибина прогрівання пластини, а, відповідно, і кут її зламу. При одночасному пропорційному збільшенні товщини ребра і пластини частка погонної енергії  $q_{п.п}$  мало змінюється, але за рахунок збільшення товщини пластини зменшується відносна глибина прогрівання й змінюється кут зламу.

3. Величина кута повороту ребра щодо пластини обумовлена трикутною формою перерізу наплавленого металу і не залежить від катета (при зварюванні за один прохід). Кутовий злам пластини зміниться, оскільки при збільшенні катета збільшується погонна енергія, в тому числі її частина, яка йде на нагрівання пластини, відповідно збільшується глибина її прогрівання.

4. Кут повороту ребра відносно пластини складає 0,02 рад, що призведе до переміщення верхньої крайки ребра на величину  $\Delta_p = \beta_0 \cdot h = 0,02 \cdot 200 = 4$  мм.

За відомою товщиною ребра і пластини визначимо частку погонної енергії, яка йде на її нагрівання:

$$q_{п.п} = \frac{2t_{п}}{t_{р} + 2t_{п}} q_{п} = (2 \cdot 8 / (6 + 2 \cdot 8)) \cdot 10000 = 7270 \text{ Дж/см.}$$

Питома погонна енергія прогрівання пластини  $q_{п.п} / t_{п}^2 = 7270 / 0,8^2 = 11400 \text{ Дж/см}^3$ , ширину прогрівання приймемо  $b = 1,7 \cdot k = 1,7 \cdot 0,5 = 0,85$  см, відносна ширина прогрівання  $b/s = 0,85 / 0,8 = 1,1$ . З рис. 4.7 знаходимо кут зламу  $\beta = 0,017$  рад.

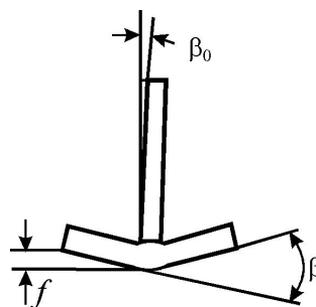


Рис. 4.16. Форма кутових деформацій таврового з'єднання

Максимальне відхилення крайки пояса від площини  $\Delta_{\pi} = \beta \cdot a/4 = 0,017 \cdot 400/4 = 1,7$  мм.

5. Для зменшення відхилення ребра від вертикального положення необхідно використовувати принцип компенсації, тобто встановити ребро під зварювання з нахилом у зворотний бік.

Для зменшення зламу пояса на ньому можна поставити жорстке закріплення на відстані не більше 5 товщин, тобто 40 мм від осі шва. Більший ефект дасть пружний вигин пояса перед зварюванням у зворотний бік.

### 4.10. Завдання для самостійної роботи

Виконати завдання згідно з вихідними даними, наведеними в табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Варіанти вихідних даних до завдань

| Помер варіанта | <i>h</i> | <i>a</i> | <i>s, s<sub>п</sub></i> | <i>s<sub>р</sub></i> | <i>k</i> | <i>q<sub>п</sub></i> , Дж/см |
|----------------|----------|----------|-------------------------|----------------------|----------|------------------------------|
|                | мм       |          |                         |                      |          |                              |
| 1              | 50       | 300      | 8                       | 5                    | 4        | 6000                         |
| 2              | 60       | 350      | 8                       | 5                    | 4        | 6500                         |
| 3              | 70       | 400      | 10                      | 6                    | 4        | 7000                         |
| 4              | 80       | 450      | 10                      | 6                    | 4        | 7500                         |
| 5              | 90       | 500      | 10                      | 7                    | 5        | 8000                         |
| 6              | 100      | 550      | 12                      | 7                    | 5        | 8500                         |
| 7              | 120      | 600      | 12                      | 8                    | 5        | 9000                         |
| 8              | 50       | 300      | 12                      | 8                    | 5        | 9500                         |
| 9              | 60       | 350      | 14                      | 10                   | 5        | 10000                        |
| 10             | 70       | 400      | 14                      | 10                   | 6        | 10500                        |
| 11             | 80       | 450      | 14                      | 10                   | 6        | 11000                        |
| 12             | 90       | 500      | 16                      | 5                    | 6        | 11500                        |
| 13             | 100      | 550      | 16                      | 5                    | 7        | 12000                        |
| 14             | 120      | 600      | 8                       | 6                    | 4        | 7000                         |
| 15             | 50       | 300      | 8                       | 6                    | 4        | 7500                         |
| 16             | 60       | 350      | 10                      | 7                    | 5        | 8000                         |
| 17             | 70       | 400      | 10                      | 7                    | 5        | 8500                         |
| 18             | 80       | 450      | 10                      | 8                    | 5        | 9000                         |
| 19             | 90       | 500      | 12                      | 8                    | 5        | 9500                         |
| 20             | 100      | 550      | 12                      | 10                   | 5        | 10000                        |
| 21             | 120      | 600      | 12                      | 10                   | 6        | 10500                        |

**Задача 4.1.** На поверхню пластини зі сталі Ст3 товщиною *s* наплавлено валик з погонною енергією *q<sub>п</sub>* (рис. 4.17).

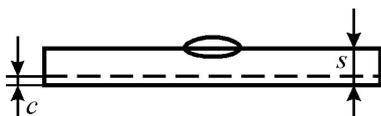


Рис. 4.17. Пластина з наплавленим валиком

1. Показати форму кутового зламу після зварювання.

2. Як зміниться величина кутової деформації?

- при збільшенні товщини пластини;
- при збільшенні глибини прогрівання;

- при збільшенні ширини прогрівання;
- при збільшенні погонної енергії.

3. Показати та пояснити епюру поперечних напружень у перерізі А–А ( $h/s = 0,5$ ).

4. Як зміниться кутова деформація, якщо механічним способом (струганням або фрезеруванням) зняти шар металу завтовшки  $c$  ( $c \ll s/2$ )?

5. Визначити кутову деформацію при наплавленні валика на пластину.

**Задача 4.2.** Дві пластини зі сталі Ст3 зварено між собою швом з неповним проплавленням С2 (С47) з погонною енергією  $q_{\text{п}}$  (рис. 4.18).

1. Покажіть форму кутового зламу після зварювання.

2. Як зміниться величина кутової деформації?

- при збільшенні товщини пластини;
- при збільшенні глибини прогрівання;
- при збільшенні ширини прогрівання;
- при збільшенні погонної енергії зварювання.

3. Як зміниться кутова деформація, якщо механічним способом (струганням або фрезеруванням) зняти шар металу завтовшки  $c$  ( $c \ll s/2$ )?

4. Визначте кутову деформацію при зварюванні стику пластин товщиною  $s$ .

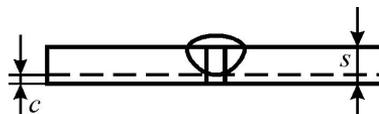


Рис. 4.18. Одностороннє стикове з'єднання без скосу крайок С2 (С47)

**Задача 4.3.** Дві пластини зі сталі Ст3 товщиною  $s$  сполучені між собою двостороннім швом С7 з однаковою погонною енергією  $q_{\text{п}}$  кожного проходу (рис. 4.19).

1. Покажіть очікувану форму кутового зламу після зварювання першого шва, після закінчення зварювання, поясніть механізм його виникнення.

2. Як зміниться величина кутової деформації при збільшенні товщини пластини; при збільшенні ширини прогрівання?

3. Визначте величину очікуваного кутового зламу після зварювання першого шва, після закінчення зварювання пластин.

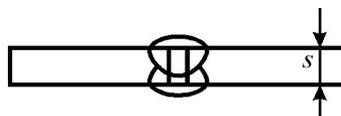


Рис. 4.19. Двостороннє стикове з'єднання без скосу крайок

**Задача 4.4.** Дві пластини зі сталі Ст3 товщиною  $s$  зварені між собою за п'ять проходів з однаковими погонними енергіями (з'єднання зі скосом двох крайок з одного боку С21) (рис. 4.20).

1. Покажіть очікувану форму кутового зламу після зварювання кожного шва, після закінчення зварювання, поясніть механізм його виникнення.



Рис. 4.20. З'єднання зі скосом двох крайок з одного боку

2. Визначте величину очікуваного кутового зламу після зварювання кожного шва, після закінчення зварювання. Який зі швів викличе найбільшу кутову деформацію?

**Задача 4.5.** Дві пластини зі сталі Ст3 товщиною  $s$  зварені між собою за шість проходів на однакових режимах (з'єднання зі скосом двох крайок з двох сторін С25) (рис. 4.21).

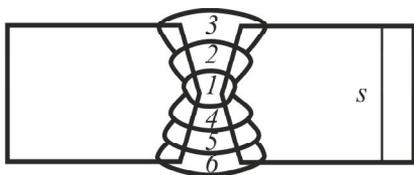


Рис. 4.21. Стикове з'єднання зі скосом двох крайок з двох боків

зварювання швів 1–2–3–4–5–6; 1–4–2–5–3–6).

1. Покажіть очікувану форму кутового зламу після зварювання кожного шва, після закінчення зварювання, поясніть механізм його виникнення (послідовність зварювання швів 1–2–3–4–5–6; 1–4–2–5–3–6).

2. Визначте величину очікуваного кутового зламу після зварювання кожного шва, після закінчення зварювання (послідовність зварювання швів 1–2–3–4–5–6; 1–4–2–5–3–6).

**Задача 4.6.** Ребро висотою  $h$  та товщиною  $s_p$  приварено до горизонтального листа зі сталі Ст3 шириною  $b$  і товщиною  $s_n$  з'єднанням ТЗ (рис. 4.22); катет  $k$ .

1. Покажіть очікувану форму кутових деформацій після зварювання шва, поясніть механізм їх виникнення.

2. Як зміниться кутова деформація при збільшенні товщини ребра, товщини горизонтального листа або одночасному пропорційному збільшенні обох товщин?

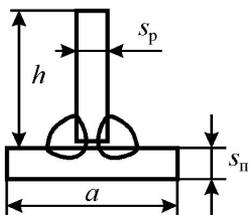


Рис. 4.22. Ребро на горизонтальному листі

3. Як зміниться кутова деформація при збільшенні катета шва?

4. Визначте величину очікуваних кутових деформацій горизонтального листа.

5. Визначте величину переміщення верхньої крайки ребра після зварювання.

**Задача 4.7.** До полотнища шириною  $b$ , довжиною  $l$  і товщиною  $s$  приварені ребра висотою  $h$  та товщиною  $s_p$  на відстані один від одного  $a$  (рис. 4.23); тип з'єднання ТЗ; катет 5 мм.

1. Покажіть очікувану форму кутових деформацій після зварювання шва, поясніть механізм їх виникнення.

2. Як зміниться кутова деформація при збільшенні товщини ребра, товщини полотнища або одночасному пропорційному збільшенні обох товщин?

3. Як зміниться кутова деформація при збільшенні катета шва?

4. Визначте величину очікуваних кутових деформацій (ребристість) полотнища.

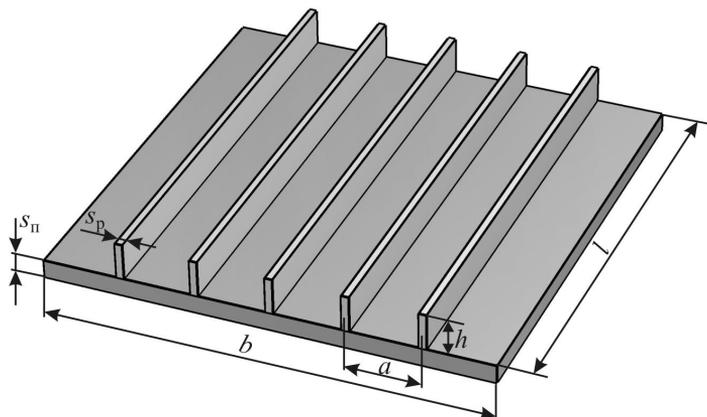


Рис. 4.23. Зварна панель

**Задача 4.8.** До плити шириною  $10a$  і товщиною  $10s$  приварені ребра товщиною  $s_p$  на відстані один від одного  $a$  (рис. 4.24); тип з'єднання ТЗ; катет  $k$ .

1. Покажіть очікувану форму кутових деформацій після зварювання шва, поясніть механізм їх виникнення.

2. Як зміниться кутова деформація при збільшенні товщини ребра або товщини плити?

3. Як зміниться кутова деформація при збільшенні катета шва?

4. Визначте величину очікуваних кутових деформацій (коробуватість) плити.

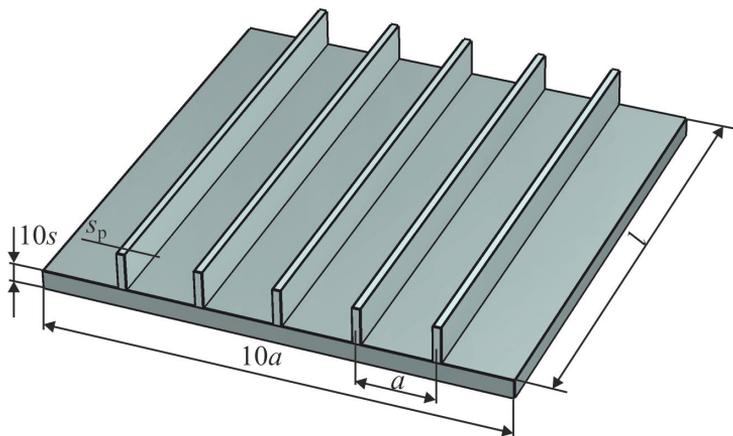


Рис. 4.24. Плита з ребрами жорсткості

## Розділ 5. СПЕЦИФІЧНІ ВИДИ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ДЕФОРМАЦІЙ

### 5.1. Деформації втрати стійкості тонколистових конструкцій

Деформації втрати стійкості у вигляді хвиль часто спостерігаються при зварюванні площинних тонколистових конструкцій. Ці деформації зазвичай перевищують величину, яка допускається технічними вимогами до конструкції. У результаті виключення з роботи покоробленої (хвилястої) частини поперечного перерізу пластина може суттєво знизити здатність зварної конструкції нести навантаження. Викривлення також призводить до зниження експлуатаційних характеристик готових конструкцій та погіршує їх зовнішній вигляд.

Відомо, що будь-яка конструкція або її елемент мають певний рівень так званих критичних напружень, тобто напруження стиску, при яких конструкція (її елемент) втрачає свою плоску або прямолінійну форму. Прямолінійні волокна при цьому розташовуються по кривій (дузі, синусоїді) або гвинтовій лінії, подовжуються, за рахунок чого зменшуються напруження стиску (рис. 5.1).

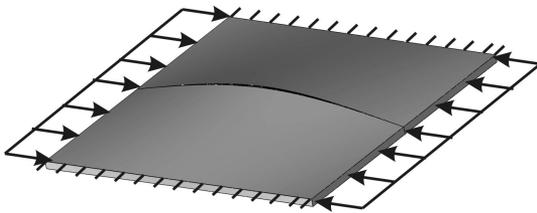


Рис. 5.1. Втрата стійкості пластины при стиску

Величина критичних напружень залежить від умов закріплення крайок конструкції, прямо пропорційна жорсткості матеріалу (модулю нормальної пружності  $E$ ), квадрату товщини  $s$  (для листових конструкцій) і обернено пропорційна квадрату протяжності стислої ділянки  $a$ . Формула для визначення критичних напружень наводиться в довідковій літературі з будівельної механіки і має вигляд

$$\sigma_k = \frac{k\pi^2}{12(1-\mu^2)} E \left( \frac{s}{a} \right)^2,$$

де  $k$  – коефіцієнт, який враховує характер закріплення стисненої пластины на поздовжніх та поперечних крайках;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона.

Основне завдання розрахувача – підібрати розрахункову схему, яка по можливості більш точно відображає реальну конструкцію. Для пластины довжиною  $l$ , товщиною  $s$ , підкріпленої ребрами жорсткості, між якими відстань  $a$  (рис. 5.2), та стиснутої вздовж довгої сторони, критичні напруження

можуть бути приблизно знайдені за формулою

$$\sigma_{кпл} = 3,6E\left(\frac{s}{a}\right)^2.$$

Для полиці балки (рис. 5.3) критичні напруження будуть значно менші:

$$\sigma_{кп} = 0,5E\left(\frac{s}{a}\right)^2.$$

Відповідно відносні критичні деформації

$$\varepsilon_{кпл} = 3,6\left(\frac{s}{a}\right)^2; \quad \varepsilon_{кп} = 0,5\left(\frac{s}{a}\right)^2.$$

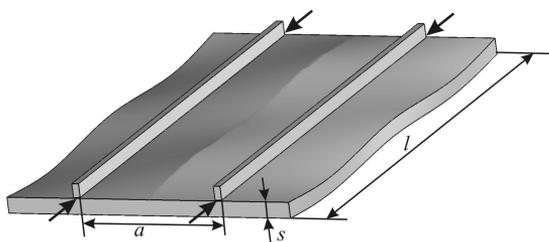


Рис. 5.2. Втрата стійкості панелі з ребрами жорсткості

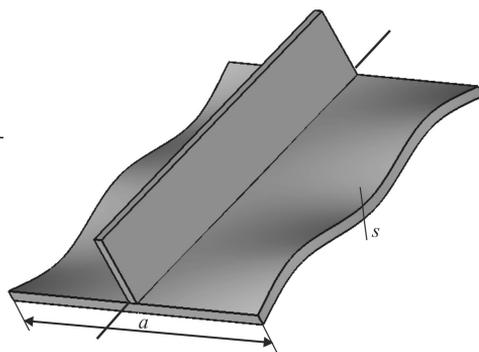


Рис. 5.3. Втрата стійкості полиці балки

Усі наведені вище формули передбачають, що до втрати стійкості пластини має ідеально плоску форму. За наявності в пластині в напрямі стиску початкової зігнутої, викликаній будь-якими причинами, критичні напруження знижуються на декілька порядків, а зварювальні напруження стиску тільки збільшують початковий вигин.

При зварюванні напруження стиску спричиняються поздовжнім укороченням зварного з'єднання (дією сили усадки) й поперечним укороченням при зварюванні незакріплених з'єднань (з урахуванням неодновременності нагрівання та охолодження шва по його довжині). У багатьох випадках величина цих напружень може бути обчислена з урахуванням режиму зварювання (погонної енергії), властивостей матеріалу (коефіцієнта теплового розширення та об'ємної теплоємності), розташування зварного з'єднання і геометричних параметрів конструкції (див. підрозд. 2.4).

Визначення ймовірності втрати стійкості зводиться до порівняння критичних та зварювальних напружень стиску. Якщо критичні напруження менші від зварювальних, то після зварювання конструкцій слід чекати появи втрати стійкості: хвилястості на крайках, опуклостей та западин – так званих "бухтин" на поверхні листів.

Величина стрілки прогину стиснутої пластини у разі втрати стійкості може бути приблизно знайдена за різницею зварювальних та критичних напружень або деформацій укорочення при зварюванні й критичних деформацій за формулами

$$f = 0,6d \sqrt{\frac{\sigma_{\text{ст}} - \sigma_{\text{кр}}}{E}} \quad \text{або} \quad f = 0,6d \sqrt{\varepsilon_{\text{ст}} - \varepsilon_{\text{кр}}},$$

де  $d$  – довжина півхвилі при втраті стійкості;  $\sigma_{\text{ст}}$  і  $\sigma_{\text{кр}}$  – відповідно зварювальні напруження стиску в місці очікуваної втрати стійкості й критичні напруження;  $E$  – модуль пружності матеріалу конструкції;  $\varepsilon_{\text{ст}}$  і  $\varepsilon_{\text{кр}}$  – зварювальні деформації укорочення в місці очікуваної втрати стійкості та критичні деформації відповідно.

Основна трудність при використанні цих формул полягає у визначенні  $d$ . Орієнтовано її можна прийняти такою, що дорівнює найменшому з розмірів пластини – ширині або довжині.

Необхідно також враховувати, що після втрати стійкості частина пластини виключається з робочого перерізу. Тому геометричні характеристики – площу та момент інерції балки (ребро з пояском) – слід визначати з урахуванням так званого редуційного коефіцієнта для пластини  $k_{\text{ред}} = 0,44 + 0,56\varepsilon_{\text{ст}}/\varepsilon_{\text{кр}} = 0,44 + 0,56\sigma_{\text{кр}}/\sigma_{\text{ст}}$ . У першому наближенні розрахунковий переріз пластини приймається таким, що дорівнює фактичному. Якщо за розрахунком  $\varepsilon_{\text{ст}} < \varepsilon_{\text{кр}}$  ( $\sigma_{\text{ст}} < \sigma_{\text{кр}}$ ), то полотнище не втрачатиме стійкість від поздовжнього укорочення швів приварювання набору. Якщо  $\varepsilon_{\text{ст}} > \varepsilon_{\text{кр}}$  ( $\sigma_{\text{ст}} > \sigma_{\text{кр}}$ ), то полотно втрачає стійкість. У цьому випадку площу та момент інерції необхідно визначати методом послідовних наближень з урахуванням  $k_{\text{ред}}$ . Зазвичай при визначенні  $\varepsilon_{\text{ст}}$  ( $\sigma_{\text{ст}}$ ) достатньо одного-двох наближень.

## 5.2. Деформації закручування балок

Деформації закручування полягають у повороті одного кінцевого перерізу відносно іншого на деякий кут. Вони спостерігаються в основному при зварюванні довгих балок, обумовлені різними причинами і виявляються в балках різних типів. Допуски на взаємний поворот перерізів зазвичай достатньо жорсткі, оскільки такий поворот помітно зменшує міцність та жорсткість балки на вигин. Усувати ці деформації після зварювання дуже важко, тому треба прагнути не допускати їх. Найчастіше спостерігаються три види закручування.

**1. Наростання кута повороту стінки відносно полиці** відбувається при зварюванні напрохід першого шва таврового з'єднання за рахунок не-одночасного охолодження по довжині (рис. 5.4). При вивченні кутових деформацій відзначалося (див. розд. 4), що усадка наплавленого металу кутового шва першого проходу викликає поворот стінки відносно полиці (зменшення прямого кута) на  $0,02$  рад. Якщо шов достатньо короткий і його кристалізація та охолодження відбуваються приблизно одночасно по всій довжині, то кут нахилу стінки виявляється однаковим на початку і в кінці з'єднання. Проте в довгих балках кристалізація та охолодження шва вздовж балки відбуваються неодноразом і в різних умовах. У результаті перші ділянки шва викликають поворот стінки практично по всій її довжині, подальші ділянки – тільки на частині, яка ще не скріплена затверділим наплавленим металом. Тому кут нахилу  $\beta_k$  в кінці балки буде помітний більше, ніж на початку  $\beta_n$ . Відбувається зустрічне закручування стінки та пояска. Таке закручування ще називають уявним, оскільки відбувається зустрічний поворот окремих його частин – полиці і стінки, а не поворот перерізу як єдиного цілого.

Оскільки основна причина повороту стінки відносно полиці – неодноразомність зварювання по довжині, то уникнути цього наростання повороту можна змінивши послідовність зварювання, наприклад зварюванням ділянками в шаховому порядку, або одночасно з одного та іншого боків стінки, або від середини до кінців (для автоматичного зварювання). Допомагає також жорстке закріплення стінки і полиці по всій довжині в кондукторі.

**2. Крутильна форма втрати стійкості** характерна для перерізів, які мають велику кількість швів поблизу центру ваги (рис. 5.5). Найбільш здатні до цього виду закручування балки хрестоподібного перерізу, а також таврові балки із широкими поясками. Основна причина такого закручування – напруження стиску в периферійних, віддалених від центру ваги перерізу зонах. При закручуванні балки волокна в цих зонах, розташовуючись по гвинтовій лінії, подовжуються, за рахунок



Рис. 5.4. Закручування стінки щодо полиці таврової балки

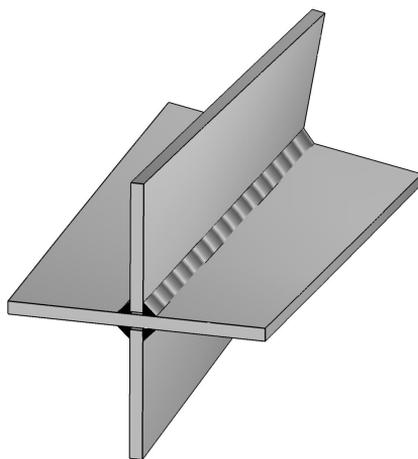


Рис. 5.5. Крутильна форма втрати стійкості балки

чого зменшуються напруження стиску. Можливостей регулювання цього виду закручування дуже мало, тому треба прагнути уникати такого розташування великої кількості швів поблизу центру ваги перерізу на стадії проектування. Слід враховувати, що ні послідовність заварки швів (напрохід або ділянками), ні жорстке закріплення балки в кондукторі в цьому випадку не дадуть ефекту. Закручування виявиться майже повною мірою після зняття закріплень.

**3. Закручування закритих профілів** відбувається за рахунок поздовжнього зсуву крайок при зварюванні (рис. 5.6). Поздовжній зсув крайок при зварюванні пов'язаний з неоднаковим нагрівом, а, отже, і розширенням крайок



Рис. 5.6. Закручування балки замкнутого профілю

при зварюванні. Крайка, що нагрівається більше, за рахунок більшого розширення в процесі зварювання дещо "забігає" вперед. У стикових з'єднаннях різний нагрів є наслідком неправильної орієнтації осі електрода щодо осі шва і в нормальних умовах відсутній. Крім того, в незамкнених перерізах (таврових і двотаврових балках) такий зсув особливих наслідків не викликає.

Труднощі виникають при замкнутих перерізах. Наприклад, у конструкціях типу труби або коробчастого перерізу (див. рис. 5.6), поздовжній зсув зварюваних крайок  $\Delta_{\text{позд}}$  обов'язково призведе до повороту кінцевих перерізів один щодо одного на деякий кут  $\varphi = \Delta_{\text{позд}} / L/2F$ , де  $L$  – довжина балки;

$F$  – площа, обмежена середньою лінією, яка проходить по стінках перерізу. Неоднаковий нагрів зварюваних крайок пов'язаний з формою таврового з'єднання та неоднаковими умовами тепловідведення. Оскільки більше нагрівається і розширюється крайка стінки, то її переміщення вздовж шва при розширенні до півтора разу перевищує переміщення полиці. У цьому випадку жорстке закріплення в кондукторі не дає ефекту. З таким видом закручування легко боротися за наявності парного числа з'єднань у конструкції відповідним підбором напрямку зварювання. Кути закручування від різних швів повинні не підсумовуватися, а відніматися, тобто закручування, що викликається ними, повинне йти в різні боки. Для цього два шви, що приварюють стінки до одного пояса, повинні заварюватися в одному напрямі, а не назустріч.

Іноді із закручуванням плутають **косий вигин**, тобто вигин балки в двох площинах одночасно (рис. 5.7). Такий вигин спричиняють шви, які зміщені відносно горизонтальної та вертикальної осей. Його дуже важко виправляти,

тому необхідно прагнути не допускати його, розташовуючи шви по можливості симетрично хоча б до однієї з осей.

### 5.3. Особливості деформацій оболонкових конструкцій

До оболонок відносять листові конструкції, які мають криволінійну поверхню зазвичай циліндричної або сферичної форми. У таких конструкціях доводиться зварювати поздовжні (тільки у циліндричних конструкціях), кільцеві (поперечні) та кругові з'єднання (рис. 5.8).

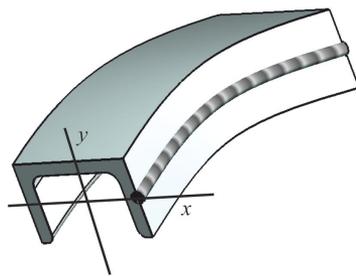


Рис. 5.7. Косий вигин балки

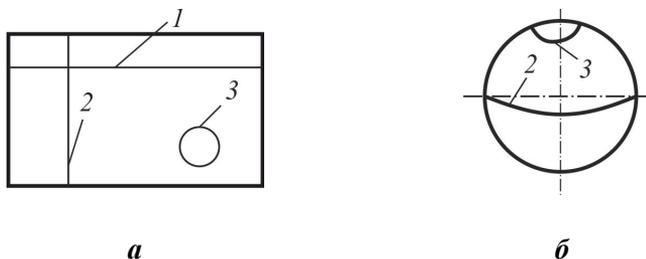


Рис. 5.8. Поздовжні (1), кільцеві (2) та кругові (3) шви в циліндричних (а) і сферичних (б) оболонках

Причини деформації оболонок ті ж самі, що і в плоских та балкових конструкціях, тобто нерівномірний нагрів, теплове розширення та пластичні деформації металу (переміщення зварюваних крайок), які супроводжують зварювальний нагрів. Проте специфічність форми оболонок викликає дещо інші прояви виникаючих зварювальних деформацій.

За характером деформацій при зварюванні розрізняють тонкостінні (зазвичай до 4...5 мм завтовшки) та товстостінні (від 8...10 мм і вище) оболонки. Тонкостінні оболонки зварюються, як правило, за один прохід, кутові деформації в них незначні, але часто виявляються деформації втрати стійкості. У товстостінних конструкціях суттєве значення мають саме кутові деформації.

**5.3.1. Деформації тонкостінних оболонок. Поздовжні шви** в циліндричних оболонках за рахунок поздовжньої усадкової сили можуть спричинити спотворення форми поперечного перерізу, пов'язане з викривленням спочатку прямолінійної твірної в зоні зварювання внаслідок втрати стійкості (рис. 5.9). Найпомітніше це спотворення виявляється в коротких оболонках

великого діаметра ( $L < 2R$ ), які не мають жорстких поперечних зв'язків (шпангоутів). Величина стрілки прогину для такої оболонки вздовж з'єднання може бути розрахована за формулою

$$f = \frac{14\nu R}{sL},$$

де  $\nu$  – відносний об'єм поздовжнього укорочення шва;  $R$  – радіус оболонки;  $s$  – товщина оболонки.

Основним методом боротьби із цим видом деформацій крім загальних методів зменшення поздовжньої усадкової сили (об'єму поздовжнього укорочення) є підкріплення поперечними ребрами жорсткості (шпангоутами) в середній частині та фланцями на торцях.

Кільцеві (поперечні) шви викликають викривлення прямолінійних твірних циліндричної оболонки за рахунок зменшення її периметра в зоні зварювання, пов'язаного з поздовжнім укороченням. Поздовжня усадкова сила в цьому випадку, спрямована по радіусу всередину оболонки, штовхає поверхню біля шва всередину (рис. 5.10). Такий вид деформацій іноді називають "корсетністю". Величину зменшення радіуса оболонки в зоні шва можна розрахувати за формулою

$$\Delta R_p = -0,64 \frac{\nu}{s} \sqrt{\frac{R}{s}}. \quad (5.1)$$

Основний метод боротьби із цим видом деформацій крім зменшення поздовжньої усадкової сили – пружне або пластичне видавлювання зварюваних крайок назовні до початку зварювання. Проте слід мати на увазі, що в тонкостінних оболонках з алюмінієво-магнієвих сплавів на цей вид деформацій можуть накладатися деформації "випинання" внаслідок втрати стійкості

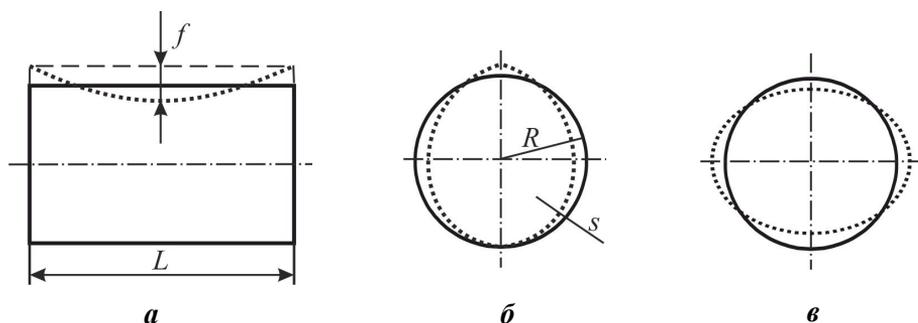


Рис. 5.9. Вигин твірної (а) та спотворення форми торцевого (б) і середнього (в) поперечних перерізів тонкостінної короткої циліндричної оболонки

від напружень стиску в момент нагрівання. За рахунок великої теплопровідності (великі нагріті області) та малої жорсткості таких сплавів (низький модуль пружності) критичні напруження малі, що призводить до помітного переміщення поверхні оболонки назовні – "випинання", яке фіксується за твердим металом шва. Після закінчення зварювання воно дещо зменшується за рахунок дії усадкової сили, але остаточний характер деформацій – злам твірної назовні – залишається (рис. 5.11). Цей вид деформацій легко зменшити застосуванням жорстких знімних накладних кілець, які запобігають втраті стійкості та "випинанню" назовні в процесі зварювання.

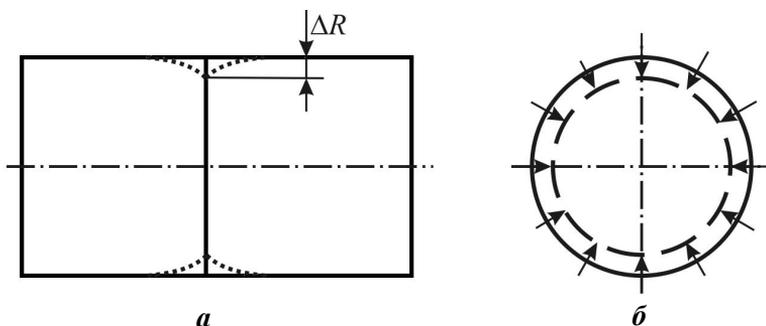


Рис. 5.10. Викривлення твірної (а) за рахунок зменшення периметра кільцевого шва (б)

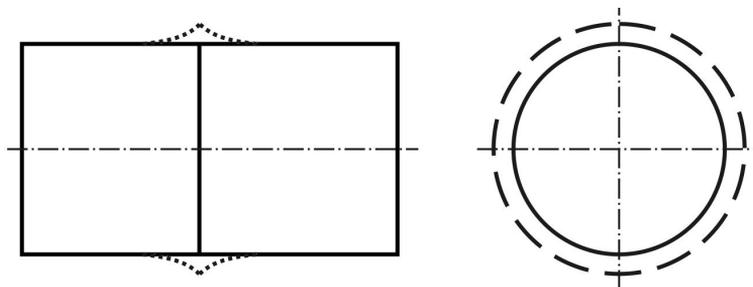


Рис. 5.11. "Випинання" тонкостінної оболонки назовні за рахунок втрати стійкості при нагріванні

Аналогічна деформація спостерігається також при зварюванні кругових швів (вварішів, латок, фланців тощо) як у циліндричних, так і сферичних оболонках. У цьому випадку вдавлювання поверхні всередину оболонки спостерігається в деякій зоні навколо шва, включаючи вварену частину, що обумовлено як поздовжньою, так і поперечною усадками зварного з'єднання (рис. 5.12).

Для сферичних оболонок характерне вдавлювання поверхні поблизу шва всередину сфери за рахунок поперечного та поздовжнього укорочення. Найбільш ефективний спосіб зменшення такого вдавлювання – попередній

(до зварювання) пружний або пластичний вигин зварюваних крайок назовні.

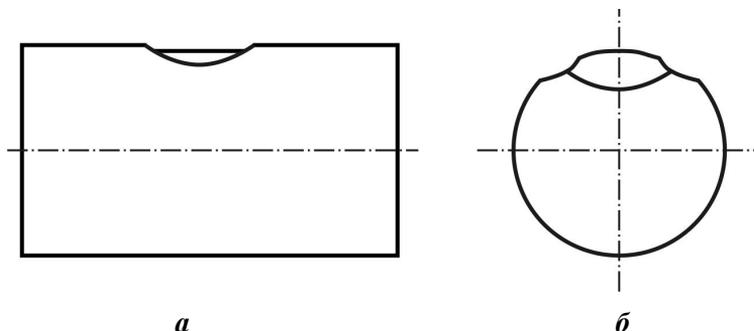


Рис. 5.12. Вдавлювання поверхні тонкостінних циліндричної (а) і сферичної (б) оболонок усередину при заварюванні кругових швів (вварішів, фланців)

**5.3.2. Деформації товстостінних оболонок.** Довгі оболонки (співвідношення довжини до діаметра від 5...6 та вище) поведуться при зварюванні аналогічно балкам кільцевого перерізу, тому виникаючі загальні деформації укорочення й вигину можуть бути визначені за відповідними формулами (див. розд. 3). Разом з тим виникають також специфічні види деформацій.

**Поздовжні з'єднання** в товстостінних оболонках спричиняють спотворення круглого перерізу за рахунок кутових деформацій (рис. 5.13). Величина зміни початкового радіуса  $R_{\Pi}$  може бути розрахована в будь-якій точці. Максимальне зменшення радіуса буде на осі шва і складає

$$\Delta R = -\frac{\beta R_{\Pi}}{\pi},$$

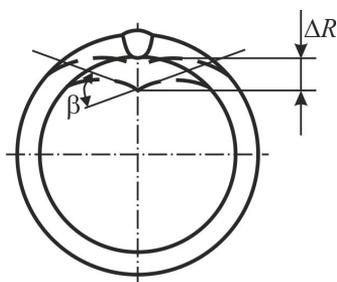


Рис. 5.13. Спотворення перерізу товстостінної оболонки за рахунок кутового зламу

де  $\beta$  – кут зламу поверхні, який визначається як при нагріванні плоских листів (див. розд. 4).

Знак кута зламу приймається додатним при заварюванні шва ззовні та від'ємним – при зварюванні зсередини оболонки. Ці деформації регулюються зменшенням або зміною напрямку кутового зламу, а також при необхідності компенсуються відповідним припуском на механічну обробку.

**Кільцеві (поперечні) з'єднання** призводять до зламу твірної під дією усадкової сили  $P$  аналогічно тонкостінним оболонкам (див. формулу (5.1) та рис. 5.10). Додатковий злам всередину (при зварюванні ззовні) та відповідна зміна радіуса на величину  $\Delta R_{\beta} = -0,2\beta\sqrt{Rs}$  можуть спричинитися також кутовим зломом,

пов'язаним з нерівномірним прогріванням по товщині  $s$  (рис. 5.14). При зварюванні зсередини кутовий злам буде спрямований назовні та зміна радіуса буде додатною. Загальна зміна радіуса складе  $\Delta R = \Delta R_p + \Delta R_b$ . У цьому випадку є можливість регулювати сумарний злам за рахунок напрямку кутової деформації. Необхідно мати на увазі, що при підсумовуванні обох чинників, які викликають вдавлювання всередину оболонки крім деформацій може виникнути проблема з міцністю металу шва в його корені. За наявності непровару та концентрації деформацій у корені шва запасу пластичності наплавленого металу може бути недостатньо для забезпечення стійкості проти тріщин.

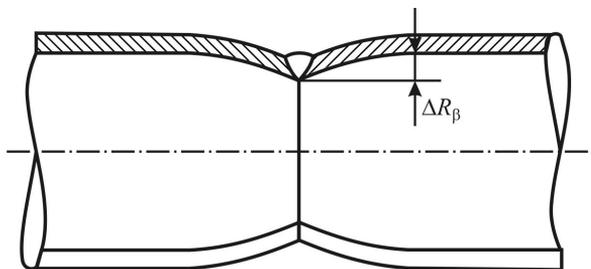


Рис. 5.14. Злам твірної товстостінної оболонки за рахунок кутових деформацій

У довгих оболонках неодноразність поперечної усадки по довжині кільцевого стику може призвести до зламу поздовжньої осі оболонки (рис. 5.15, *a*). Найбільшої величини цей злам досягає при однопрохідному зварюванні напрохід (див. рис. 5.15, *б*) з малою швидкістю, наприклад при електрошлаковому зварюванні поворотного стику. Зменшити цей злам можна застосуванням багат шарового зварювання. При цьому перший шар повинен зварюватися з максимальною великою швидкістю.

**Кругові з'єднання** в товстостінних оболонках зазвичай проблем не викликають, якщо тільки вздовж однієї твірної не розташовується велика кількість з'єднань. У протилежному випадку може виникнути помітний вигин поздовжньої осі оболонки (рис. 5.16).

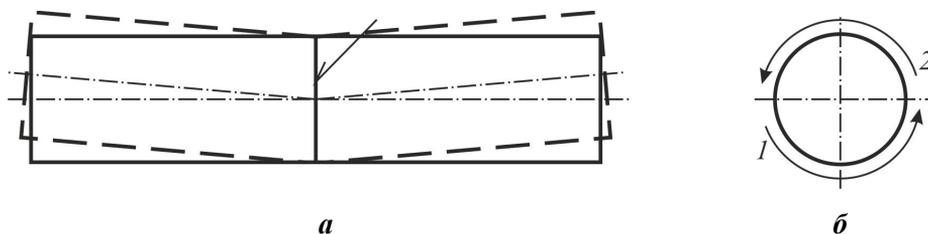


Рис. 5.15. Злам осі довгої оболонки (*a*) за рахунок неодноразності зварювання кільцевого шва ділянки 1 і 2 (*б*)

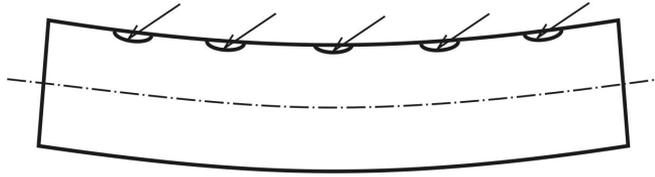


Рис. 5.16. Поздовжній вигин циліндричної труби від кругових швів

#### 5.4. Деформації при тепловому різанні

При тепловому різанні (газокисневому, плазмовому, лазерному тощо) присутні всі фактори, які спричиняють зварювальні деформації: нерівномірне нагрівання, розширення металу внаслідок нагрівання та пластичні деформації поблизу зони різання. Тому цей процес також супроводжується утворенням тимчасових та залишкових деформацій. Але оскільки при різанні відбувається розділення металу на частини по осі зони нагрівання, то деформації створюються тільки поздовжньою складовою напружень. Поперечні деформації (укорочення, кутовий злам) при цьому не виявляються. Таким чином, при тепловому різанні виникають деформації, пов'язані з поздовжньою усадкою (укороченням) зони нагрівання. Вони найбільш помітні при вирізанні вузьких, довгих штаб та включають у себе укорочення вирізаної штаби вздовж осі, вигин в її площині й втрату стійкості. Усі ці деформації розраховуються так само, як і при зварюванні, а точніше, наплавленні валика на крайку штаби.

Параметром, який визначає механічну дію зони різання на штабу, є усадкова сила  $P$  або об'єм поздовжнього укорочення  $v$ , величина якого для низьковуглецевих і низьколегованих сталей визначається залежно від погонної енергії нагрівання  $q_{\text{п}}$  за формулами (2.26) та (2.3).

Погонна енергія нагрівання кожної крайки при різанні залежить від товщини металу  $s$  та способу різання і може бути визначена за наступними формулами, отриманими на підставі експериментальних вимірювань:

для газокисневого різання  $q_{\text{п}} = 5210 s$ , Дж/см;

для плазмового різання в середовищі азоту  $q_{\text{п}} = 1670 s$ , Дж/см.

Слід зауважити, що збільшення інтенсивності охолодження при різанні помітно знижує ступінь нагрівання та, відповідно, величину залишкових пластичних деформацій.

Укорочення та стрілка прогину штаби розраховуються за формулами (2.6) і (2.7), де  $F = b s$  та  $I = sb^3/12$  – відповідно площа поперечного перерізу відрізаної штаби та його момент інерції;  $y = b/2$  – відстань від ЦВ штаби до її крайки.

При різанні двох протилежних крайок штаби загальні деформації знаходяться алгебраїчним підсумовуванням складових від кожного розрізу окремо. При визначенні деформацій від другого розрізу необхідно враховувати

початковий напружений стан, що створюється першим (див. підрозд. 2.5), та наявність або відсутність закріплень (перемичок при різанні), які перешкоджають деформаціям. З урахуванням цих чинників штаба, вирізана послідовно по двох крайках без закріплень, матиме залишковий прогин (увігнутість) з боку першого розрізу. Та ж штаба, вирізана з перемичками, що перешкоджають вигину, матиме залишковий прогин у зворотний бік (спробуйте пояснити – чому?). При одночасному різанні двох крайок залишкового вигину в площині штаби не буде.

Довгі ( $l$ ) штаби малої ширини ( $b$ ) та товщини ( $s$ ), які вирізані по крайках тепловим різанням, часто втрачають стійкість (порушується їх площа). Основна причина цього – виникаючі напруження стиску та деформації  $\varepsilon_{ст}$ , які перевищують критичні  $\varepsilon_{кр}$ :

Величину цих деформацій можна приблизно розрахувати за формулами  $\varepsilon_{ст} = (v_1 + v_2)/b s$  та  $\varepsilon_{кр} = 0,9 (s/l)^2$ .

Тоді умова втрати стійкості матиме наступний вигляд:

для газокисневого різання  $l > 10s\sqrt{b}$ ;

для плазмового різання  $l > 17s\sqrt{b}$ .

## 5.5. Контрольні запитання

1. Які основні причини утворення деформацій втрати стійкості при зварюванні?
2. Укажіть параметри режиму, які впливають на деформації втрати стійкості.
3. Укажіть конструктивні чинники, які впливають на деформації втрати стійкості при зварюванні пластини.
4. Укажіть параметри режиму, які визначають деформації втрати стійкості в інженерних розрахунках.
5. Укажіть геометричні параметри конструкції, які визначають деформації втрати стійкості в інженерних розрахунках.
6. Укажіть чинники, які визначають деформації втрати стійкості в інженерних розрахунках.
7. Як змінюється ймовірність втрати стійкості?
  - зі зміною товщини металу;
  - зі зміною модуля пружності металу;
  - зі зміною довжини (ширини) листової конструкції;
  - зі зміною погонної енергії зварювання.
8. Які основні причини утворення деформацій закручування при зварюванні таврових балок; коробчастих балок; балок хрестоподібного перерізу?
9. Як необхідно виконувати зварювання таврових балок для зменшення деформацій закручування?

10. Як слід виконувати зварювання сусідніх швів балок коробчатого перерізу для зменшення деформацій закручування?
11. Як необхідно виконувати зварювання балок хрестоподібного профілю для зменшення деформацій закручування при зварюванні?
12. Яка основна причина деформацій зламу осі товстостінних циліндричних оболонок при зварюванні кільцевих швів?
13. Які основні причини деформацій зламу твірної товстостінних оболонок при зварюванні кільцевих швів?
14. Яка основна причина зламу кільцевого перерізу товстостінної циліндричної оболонки при зварюванні поздовжніх швів?
15. Як рекомендується виконувати зварювання для зменшення деформації зламу осі товстостінної циліндричної оболонки при виконанні кільцевого шва?
16. Що рекомендується виконувати для зменшення деформації зламу твірної товстостінної циліндричної оболонки при зварюванні кільцевих швів?
17. Що рекомендується виконувати для зменшення деформації зламу кола (кільцевого перерізу) товстостінної циліндричної оболонки при зварюванні поздовжніх швів?
18. Яка основна причина деформації зламу твірної тонкостінної циліндричної оболонки при зварюванні кільцевого шва?
19. Яка основна причина деформації зламу кола (перерізу) тонкостінної циліндричної оболонки при зварюванні поздовжнього шва?
20. Що рекомендується використовувати для зменшення деформації зламу твірної тонкостінної циліндричної оболонки зі сталі при зварюванні кільцевого шва?
21. Що рекомендується використовувати для зменшення деформації зламу твірної тонкостінної циліндричної оболонки зі сплаву АМг при зварюванні кільцевих швів?
22. Що рекомендується робити для зменшення деформації зламу кола (перерізу) тонкостінної циліндричної оболонки при зварюванні поздовжнього шва?
23. Які деформації виникають при тепловому різанні довгих штаб? Від чого залежить величина цих деформацій?
24. Чому виникає вигин довгих штаб після теплового різання? Від чого залежать величина та напрям вигину?
25. Чому виникає втрата стійкості довгих штаб після теплового різання? Від чого залежить імовірність появи цього виду деформацій?

### 5.6. Приклад задачі

Визначити ймовірність втрати стійкості та очікувану стрілку прогину листів плоскої панелі довжиною  $l = 2,5$  м від приварювання ребер жорсткості (рис. 5.17). Матеріал – низьковуглецева сталь. Товщина листів  $s_{II} = 5$  мм,

ребра у вигляді прямокутної штаби розміром  $b \times s_p$  ( $70 \times 5$  мм) приварені до листів з'єднанням Т1, катетом  $k = 4$  мм, ручним дуговим зварюванням на відстані  $a = 600$  мм один від одного. Запропонувати заходи щодо зменшення стрілки прогину.

### Розв'язання

Погонна енергія приварювання набору до полотна

$$q_{\text{п}} = 64500 F_{\text{напл}} = 64500 \cdot 0,11 = 7200 \text{ Дж/см},$$

де  $F_{\text{напл}} = (k^2/2) k_0 = (0,4^2/2) \cdot 1,4 = 0,11 \text{ см}^2$  – площа наплавленого металу ( $k = 0,4$  см – значення катета шва за кресленням;  $k_0 = 1,4$  – коефіцієнт опуклості).

Відносний об'єм поздовжнього укорочення шва при зварюванні низьковуглецевої сталі

$$v = -1 \cdot 10^{-6} q_{\text{п}} = -1 \cdot 10^{-6} \cdot 7200 = 7,2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2.$$

Геометричні характеристики перерізу умовної балки (рис. 5.18) розрахуємо в табличній формі (табл. 5.1).

Таблиця 5.1. Геометричні характеристики перерізу умовної балки

| Номер елемента | Елемент балки | Розміри, см | Площа $F'$ , см <sup>2</sup> | $z$ , см | $F'z$ , см <sup>3</sup> | $Fz^2$          | $I_0$ |
|----------------|---------------|-------------|------------------------------|----------|-------------------------|-----------------|-------|
|                |               |             |                              |          |                         | см <sup>4</sup> |       |
| 1              | Штаба         | 7,0×0,5     | 3,5                          | 4,0      | 14,0                    | 56,0            | 14,3  |
| 2              | Поясок        | 25,0×0,5    | 12,5                         | 0,25     | 3,1                     | 0,8             | 0,2   |
| $\Sigma$       | –             | –           | 16,0                         | –        | 17,1                    | 56,8            | 14,5  |

Положення ЦВ перерізу умовної балки по висоті

$$z_0 = \frac{\Sigma Fz}{\Sigma F} = \frac{17,1}{16,0} = 1,07 \text{ см}.$$

Власний момент інерції перерізу умовної балки

$$I_{x_0} = \Sigma Fz^2 + \Sigma I_0 - \Sigma Fz_0^2 = 56,8 + 14,5 - 16,0 \cdot 1,07^2 = 53 \text{ см}^4.$$

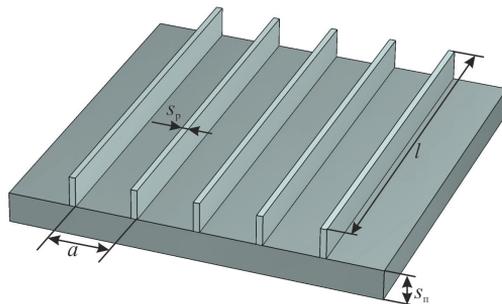


Рис. 5.17. Плоска панель, підкріплена ребрами жорсткості

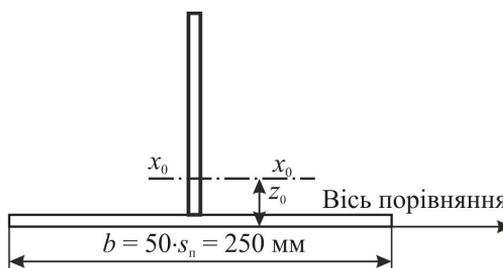


Рис. 5.18. Переріз умовної балки

Положення осі відносно ЦВ перерізу умовної балки:  
шва

$$z_1 = z_0 - s_{\Pi} = 1,07 - 0,5 = 0,57 \text{ см};$$

пояска

$$z_2 = z_0 - 0,5s_{\Pi} = 1,07 - 0,5 \cdot 0,5 = 0,82 \text{ см.}$$

Укорочення осі умовної балки:  
відносне (погонне)

$$\varepsilon_0 = \frac{v}{F} = \frac{-7,2 \cdot 10^{-3}}{16,0} = -4,5 \cdot 10^{-4};$$

абсолютне

$$\Delta l = \varepsilon_0 l = -4,5 \cdot 10^{-4} \cdot 250 = -0,112 \text{ см.}$$

Кривизна осі умовної балки

$$C = \frac{vz_1}{I_{x0}} = \frac{-7,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,57}{53} = -7,7 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}.$$

Напруження стиску в пояску

$$\sigma_{\text{ст}} = \varepsilon_0 E + C \cdot z_2 \cdot E = -4,5 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^5 - 7,7 \cdot 10^{-5} \cdot 0,82 \cdot 2 \cdot 10^5 = 103 \text{ МПа.}$$

Критичні напруження в пояску

$$\sigma_{\text{кр}} = 4E \left( \frac{s}{a} \right)^2 = 4 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot \left( \frac{0,5}{60} \right)^2 = 55,5 \text{ МПа.}$$

Критичні напруження менші від зварювальних, тому очікується втрата стійкості з утворенням хвилястості зі стрілкою прогину  $f = 0,6d \sqrt{(\sigma_{\text{ст}} - \sigma_{\text{кр}})/E} = 0,6 \cdot 60 \sqrt{(97 - 55,5)/(2 \cdot 10^5)} = 0,5 \text{ см}$ . За наявності початкової неплоскостності листів критичні напруження можна прийняти такими, що дорівнюють 0, тоді стрілка прогину  $f = 0,6d \sqrt{(\sigma_{\text{ст}} - \sigma_{\text{кр}})/E} = 0,6 \cdot 60 \sqrt{97/(2 \cdot 10^5)} = 0,8 \text{ см}$ .

Стрілку прогину можна зменшити за рахунок зменшення зварювальних або збільшення критичних напружень. Для зменшення зварювальних напружень можна збільшити жорсткість умовної балки (збільшенням товщини пояса чи перерізу ребра) або зменшити погонну енергію зварювання, застосувавши зварювання в захисному газі замість ручного. Для збільшення критичних напружень можна збільшити товщину листів або зменшити відстань між ребрами жорсткості.

### 5.7. Завдання для самостійної роботи

Виконати завдання згідно з табл. 5.2 і 5.3.

Таблиця 5.2. Варіанти розмірів до задач 5.1–5.6

| Номер<br>варіанта | $s_1$ | $s, s_2$ | $s_3$ | $a, b$ | $h$ | $D$  | $L$  | $q_n$ |
|-------------------|-------|----------|-------|--------|-----|------|------|-------|
|                   | мм    |          |       |        |     |      |      |       |
| 1                 | 5     | 5        | 30    | 500    | 100 | 1500 | 1200 | 7000  |
| 2                 | 6     | 6        | 32    | 550    | 120 | 1550 | 1300 | 7500  |
| 3                 | 7     | 5        | 34    | 600    | 140 | 1600 | 1400 | 8000  |
| 4                 | 5     | 6        | 36    | 650    | 150 | 1650 | 1500 | 8500  |
| 5                 | 6     | 5        | 38    | 700    | 100 | 1700 | 1600 | 9000  |
| 6                 | 7     | 6        | 40    | 750    | 120 | 1750 | 1700 | 9500  |
| 7                 | 5     | 5        | 30    | 800    | 140 | 1800 | 1200 | 10000 |
| 8                 | 6     | 6        | 32    | 500    | 150 | 1500 | 1300 | 10500 |
| 9                 | 7     | 5        | 34    | 550    | 100 | 1550 | 1400 | 11000 |
| 10                | 5     | 6        | 36    | 600    | 120 | 1600 | 1500 | 11500 |
| 11                | 6     | 5        | 38    | 650    | 140 | 1650 | 1600 | 7000  |
| 12                | 7     | 6        | 40    | 700    | 150 | 1700 | 1700 | 7500  |
| 13                | 5     | 5        | 30    | 750    | 100 | 1750 | 1200 | 8000  |
| 14                | 6     | 6        | 32    | 800    | 120 | 1800 | 1300 | 8500  |
| 15                | 7     | 5        | 34    | 500    | 140 | 1500 | 1400 | 9000  |
| 16                | 5     | 6        | 36    | 550    | 150 | 1550 | 1500 | 9500  |
| 17                | 6     | 5        | 38    | 600    | 100 | 1600 | 1600 | 10000 |
| 18                | 7     | 6        | 40    | 650    | 120 | 1650 | 1650 | 10500 |
| 19                | 5     | 5        | 30    | 700    | 140 | 1700 | 1200 | 11000 |
| 20                | 6     | 6        | 32    | 750    | 150 | 1750 | 1300 | 11500 |

**Задача 5.1.** У зварній тавровій балці з низьковуглецевої сталі (рис. 5.19) поясок ( $b \times s_1$ ) приварюється до стінки ( $h \times s_2$ ) зварюванням під флюсом дводуговим автоматом одночасно з двох сторін (з'єднання ТЗ, катет 5 мм).

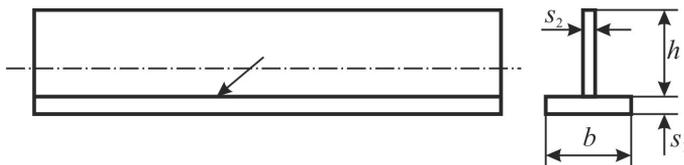


Рис. 5.19. Зварна таврова балка

1. Визначте ймовірність втрати стійкості пояса балки після зварювання.
2. За необхідності запропонуйте конструктивні та технологічні заходи для забезпечення стійкості пояса.

**Задача 5.2.** У зварній двотавровій балці з низьковуглецевої сталі (рис. 5.20) пояски ( $b \times s_1$ ) приварюються до стінки ( $h \times s_2$ ) зварюванням під флюсом дводуговим автоматом одночасно з двох сторін (з'єднання ТЗ, катет 5 мм).

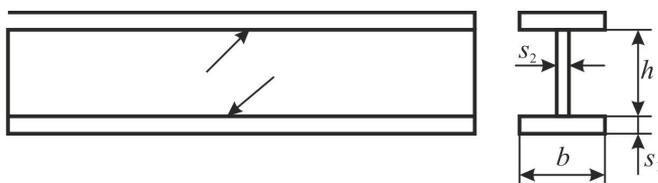
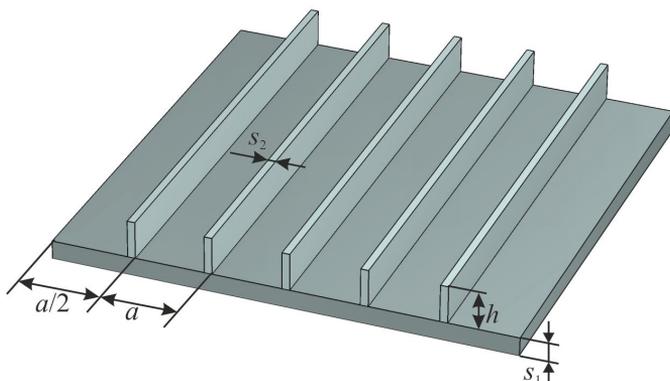


Рис. 5.20. Зварна двотаврова балка

1. Визначте ймовірність втрати стійкості поясів і стінки балки після зварювання.
2. За необхідності запропонуйте конструктивні й технологічні заходи для забезпечення стійкості поясів та стінки.

**Задача 5.3.** У зварній панелі з низьковуглецевої сталі (рис. 5.21) ребра – штаби ( $h \times s_2$ ) – приварюються до полотна ( $s_1$ ) на відстані  $a$  одне від одного. Зварювання виконується під флюсом автоматом по черзі з двох сторін (з'єднання ТЗ, катет 5 мм).



1. Визначте ймовірність втрати стійкості листів полотна після приварювання ребер.

Рис. 5.21. Зварна плоска панель

2. За необхідності запропонуйте конструктивні та технологічні заходи для забезпечення стійкості листів.

**Задача 5.4.** Визначте деформації після зварки кільцевого стику циліндричних обичайок товщиною  $s_3$  та діаметром  $D$  (рис. 5.22,а) з низьковуглецевої сталі при двох варіантах стику (див. рис. 5.22,б). Поясніть механізм деформації. Погонна енергія зварювання кожного проходу  $q_{\text{п}}$  однакова.

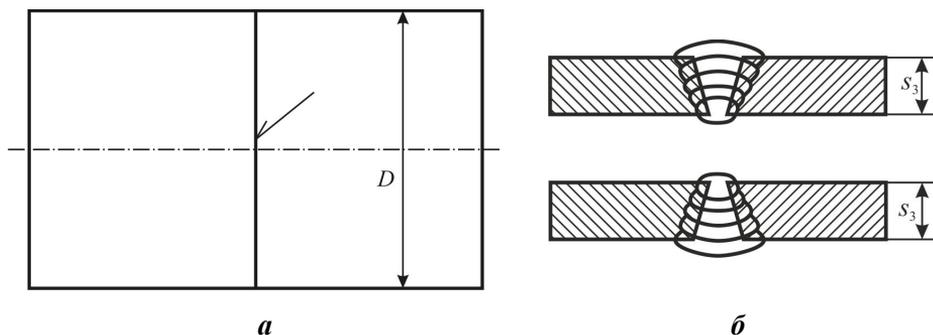


Рис. 5.22. Кільцевий стик циліндричних обичайок

**Задача 5.5.** Тонкостінна обичайка діаметром  $D$ , довжиною  $L$  і товщиною  $s$  з низьковуглецевої сталі зварюється поздовжнім швом з погонною енергією  $q_{\text{п}}$  (рис. 5.23).

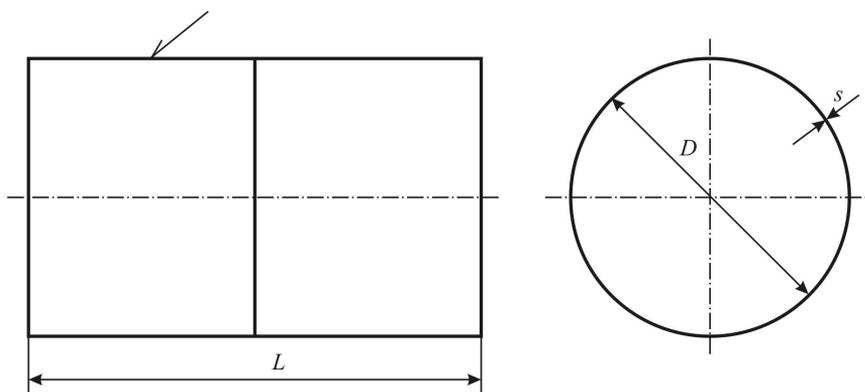


Рис. 5.23. Тонкостінна обичайка

1. Визначте прогин твірної після зварювання поздовжнього стику.
2. Як зміниться прогин, якщо збільшити погонну енергію, збільшити діаметр, зменшити товщину обичайки?

**Задача 5.6.** Товстостінна обичайка діаметром  $D$ , довжиною  $L$  і товщиною  $s_3$  з низьковуглецевої сталі (рис. 5.24) зварюється поздовжнім багат шаровим швом з погонною енергією  $q_{\text{п}}$  при двох варіантах стику (див. рис. 5.22,б).

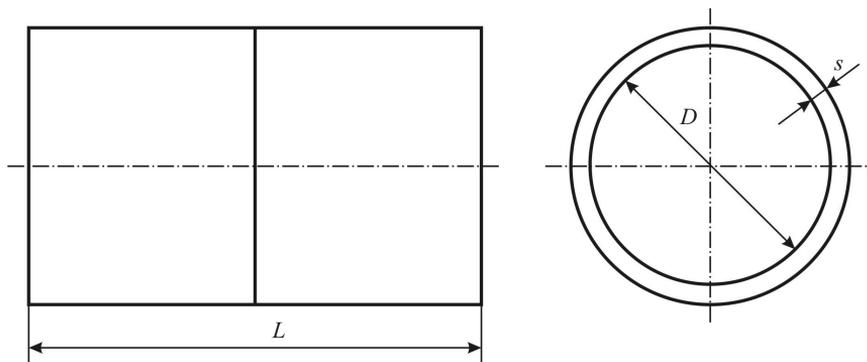


Рис. 5.24. Товстостінна обичайка

1. Визначте зменшення радіуса (викривлення кола) після зварювання поздовжнього стику.

2. Як зміниться прогин, якщо збільшити погонну енергію чи діаметр обичайки, зменшити кількість шарів або товщину обичайки?

**Задача 5.7.** Пластина з низьковуглецевої сталі відрізана термічним різанням по лінії  $c$  (рис. 5.25). Розміри пластини наведено в табл. 5.3.

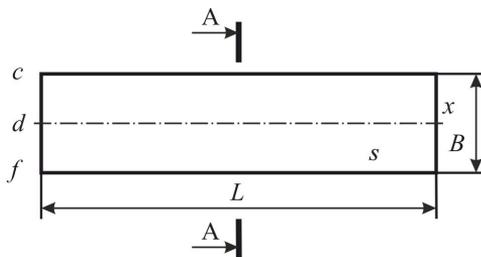


Рис. 5.25. Пластина з термічним різанням поздовжніх крайок

**Таблиця 5.3. Варіанти розмірів до задачі 5.7**

| Номер варіанта | $B$  | $S$ | $L$  |
|----------------|------|-----|------|
|                | мм   |     |      |
| 1              | 100  | 5   | 1000 |
| 2              | 200  | 6   | 1100 |
| 3              | 300  | 7   | 1200 |
| 4              | 400  | 8   | 1300 |
| 5              | 500  | 9   | 1400 |
| 6              | 600  | 10  | 1500 |
| 7              | 700  | 5   | 1600 |
| 8              | 800  | 6   | 1700 |
| 9              | 900  | 7   | 1800 |
| 10             | 1000 | 8   | 1900 |
| 11             | 100  | 9   | 2000 |
| 12             | 200  | 10  | 2100 |
| 13             | 300  | 5   | 2200 |
| 14             | 400  | 6   | 2300 |
| 15             | 500  | 7   | 2400 |

Продовж. табл. 5.3

| Номер варіанта | <i>B</i> | <i>S</i> | <i>L</i> |
|----------------|----------|----------|----------|
|                | мм       |          |          |
| 16             | 600      | 8        | 2500     |
| 17             | 700      | 9        | 2600     |
| 18             | 800      | 10       | 2700     |
| 19             | 900      | 5        | 2800     |
| 20             | 1000     | 6        | 2900     |

Примітка. Для парних варіантів спосіб різання – плазмовий, для непарних – газокисневий.

1. Покажіть форму вигину штаби після різання, визначте стрілку прогину.
2. Як зміниться вигин частин пластини після розділення її термічним різанням по лінії *d'*?
3. Покажіть форму пластини при одночасному термічному різанні по лініях *c* і *f*.
4. Покажіть епюру напружень у перерізі А–А пластини після термічного різання по лініях *c*, *c* і *f*.
5. Чи втратить пластина стійкість після різання по лініях *c* і *f*?

## Розділ 6. ЗВАРЮВАЛЬНІ ДЕФОРМАЦІЇ СЕКЦІЙ КОРПУСУ СУДНА

### 6.1. Загальні положення

Розрахунок очікуваних зварювальних деформацій суднокорпусних конструкцій виконується за методикою, яка розроблена під керівництвом С.А. Кузьміна і є основою галузевого стандарту ОСТ 5.980–80. Корпуса металлических судов. Методы определения и предотвращения остаточных сварочных деформаций.

Відповідно до цієї методики визначення загальних зварювальних деформацій конструкцій складної форми в більшості випадків зводиться до розрахунку деформацій балок. При цьому вся конструкція розбивається на ряд так званих умовних балок або розглядається як єдина балка. Наприклад, загальні зварювальні деформації плоскої секції з набором одного напрямку (рис. 6.1) у поздовжньому напрямі дорівнюють поздовжній деформації однієї умовної балки, що складається з ребра жорсткості й приєднаного пояска зовнішньої обшивки, а в поперечному напрямі – сумі поперечних деформацій усіх умовних балок.

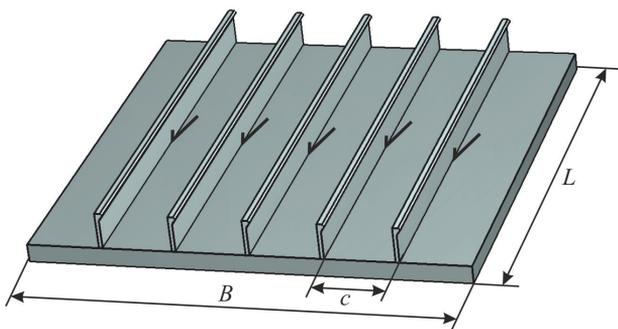


Рис. 6.1. Плоска секція (панель) з набором одного напрямку

Розрахунок зварювальних деформацій проводиться з урахуванням технологічної послідовності складання та зварювання конструкції. При цьому весь технологічний процес розбивається на ряд етапів, у кожний з яких включають тільки ті з'єднання, які заварюються при незмінному поперечному перерізі умовної балки. Наприклад, технологічний процес складання та зварювання днищевої секції з другим дном при розрахунку зварювальних деформацій зазвичай розбивається на три етапи, які описано нижче.

1. Складання та зварювання полотна зовнішньої обшивки з окремих листів без набору. Розрахунок ведеться за схемою плоского полотна. На цьому ж етапі проводяться складання та зварювання вузлів набору (ребер жорсткості й поясів до заготовок флорів, стрингерів, вертикального кіля) та інші операції з виготовлення і зварювання деталей та вузлів набору. Деформації, які виникають

на цьому етапі, як правило, не підсумовуються із загальними деформаціями секції. Вони компенсуються відповідними припущами або усуваються правкою перед подальшими операціями складання та зварювання їх між собою.

2. Установлення та приварювання поперечного і поздовжнього наборів до зовнішньої обшивки та між собою. Ці операції виконуються до установлення другого дна. Тому в склад умовної балки на цьому етапі листи обшивки другого дна не включаються.

3. Установлення та приварювання листів настилу другого дна. Умовна балка на цьому етапі включає у себе балки набору, зовнішню обшивку та друге дно.

Підсумовування деформацій укорочення на окремих етапах при необхідності виконують після приведення їх до однієї осі, яку зазвичай розташовують на нижній крайці зовнішньої обшивки.

Правильний вибір перерізу умовної балки має велике значення для точності розрахунку. Умовні балки, як правило, виділяються окремо вздовж та поперек секції. До умовної балки включаються одна або декілька балок набору та приєднаний пояс (або пояски) обшивки (рис. 6.2). Ширина приєднаного пояска приймається такою, що дорівнює відстані між сусідніми балками набору, але не більше від 50 товщин обшивки. Якщо перерізи балок однієї секції суттєво відрізняються, то в кожному напрямі може вибиратися й розраховуватися декілька умовних балок, наприклад дві крайні та одна в середній частині секції.

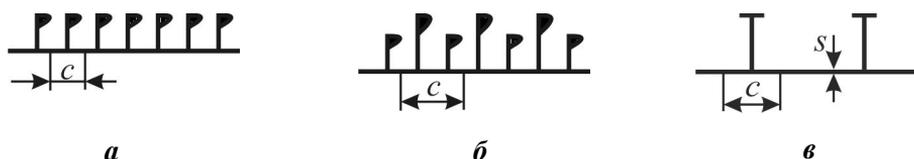


Рис. 6.2. Принцип виділення умовної балки при однаковому наборі (а), змінному наборі (б) та одиночних балках (в)

Геометричні характеристики умовних балок визначають окремо на кожному етапі виготовлення. Розрахунок зручно виконувати у вигляді таблиці (табл. 6.1). Вісь порівняння умовної балки зазвичай проводять по нижній її крайці. При заповненні стовпців (3), (4) і (7) для стандартних катаних профілів використовують дані з сортаменту (див. додаток).

Таблиця 6.1. Розрахунок геометричних характеристик умовної балки

| Номер елемента | Ескіз і розміри | Площа перерізу, $\text{см}^2$ | Відстань до осі порівняння, см | Статичний момент (3)·(4), $\text{см}^3$ | Момент інерції (4)·(5), $\text{см}^4$ | Власний момент інерції, $\text{см}^4$ |
|----------------|-----------------|-------------------------------|--------------------------------|---|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 1              | 2               | 3                             | 4                              | 5                                       | 6                                     | 7                                     |
| 1              |                 |                               |                                |   |                                       |                                       |
| 2              |                 |                               |                                |   |                                       |                                       |
| 3              |                 |                               |                                |   |                                       |                                       |
| ...            |                 |                               |                                |   |                                       |                                       |
| Сума           | —               | $\Sigma A$                    | —                              | $\Sigma B$                              | $\Sigma C$                            | $\Sigma D$                            |

Відстань ЦВ балки від осі порівняння обчислюється за формулою

$$z_0 = \Sigma B / \Sigma A;$$

власний момент інерції умовної балки

$$I_0 = \Sigma C + \Sigma D - \Sigma A \cdot z_0^2.$$

Розрахунок загальних зварювальних деформацій умовних балок проводиться як для звичайної балки з урахуванням усіх швів, які зварюються на даному етапі виготовлення. Для цього визначаються всі шви, які викликають деформацію балки за рахунок поздовжньої та поперечної усадок.

Як параметри механічної дії зварних з'єднань на умовну балку при розрахунку загальних зварювальних деформацій приймаються об'єми поздовжнього (для з'єднань уздовж балки)  $V_i$  і поперечного (для з'єднань поперек балки)  $W_j$  укорочення. Об'єми знаходяться з урахуванням теплофізичних властивостей матеріалу секції та параметрів режиму зварювання (погонної енергії  $q_{\text{пл}}$ ). На стадії проектування погонну енергію визначають за площею наплавленого металу в зварному з'єднанні (див. підрозд. 1.3).

Для об'єктивнішої оцінки очікуваних зварювальних деформацій необхідно враховувати, що реальні середньостатистичні катети кутових швів таврових з'єднань приблизно на 0,5 мм перевищують вказані на кресленнях.

За знайденими параметрами механічної дії та геометричними характеристиками перерізу умовної балки розраховуються основні параметри загальних зварювальних деформацій: укорочення по осі  $y$  (або) зовнішній обшивці, кут повороту кінцевих перерізів умовної балки та стрілка прогину.

Загальні деформації секції в поздовжньому та поперечному напрямках визначаються як сума деформацій відповідних умовних балок на кожному етапі виготовлення.

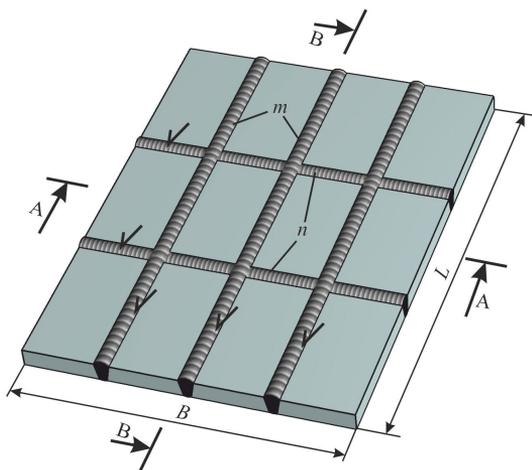


Рис. 6.3. Зварне полотно

## 6.2. Плоскі полотна

На цьому етапі виготовлення балки набору відсутні, тому умовні балки не виділяються. Розрахунок загальних зварювальних деформацій виконується для всієї секції цілком (рис. 6.3).

Укорочення вздовж секції складається з укорочення від поздовжньої усадки  $m$  пазів (поздовжніх з'єднань) та поперечної усадки  $n$  стиків (поперечних з'єднань). Загальне поздовжнє укорочення

полотна визначається за рівнянням

$$\Delta L = \frac{\sum_{i=1}^m V_i + \sum_{j=1}^n W_j}{F_{A-A}} = \frac{mV_{\text{п}} + nW_{\text{с}}}{F_{A-A}},$$

де  $F_{A-A}$  – площа поперечного перерізу полотна;  $V_{\text{п}}$  та  $W_{\text{с}}$  – об'єми відповідно поздовжнього й поперечного укорочення пазів і стиків.

Укорочення поперек секції спричиняється поздовжньою усадкою стиків та поперечною – пазів і визначається за рівнянням

$$\Delta B = \frac{\sum_{j=1}^n V_j + \sum_{i=1}^m W_i}{F_{B-B}} = \frac{nV_{\text{с}} + mW_{\text{п}}}{F_{B-B}},$$

де  $F_{B-B}$  – площа поздовжнього перерізу полотна;  $V_{\text{с}}$  і  $W_{\text{п}}$  – об'єми поздовжнього і поперечного укорочення стиків та пазів відповідно.

Поздовжня та поперечна усадки не викликають загального вигину полотна, оскільки ЦВ перерізу швів практично збігається із ЦВ перерізу листів (втрата стійкості та кутові деформації тут не враховуються, вони розраховуються окремо).

### 6.3. Плоскі секції з набором одного напрямку

Стики та пази полотнища такої секції зварюються до установаження набору, тому деформації від них розраховуються як у попередньому випадку.

Для визначення деформацій від приварювання набору (рис. 6.4, *а*) виділяється поздовжня умовна балка (див. рис. 6.4, *б*).

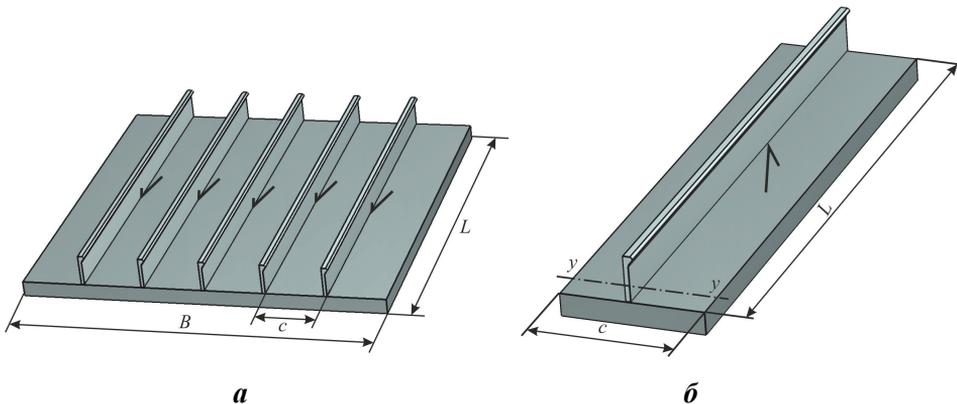


Рис. 6.4. Плоска секція з набором одного напрямку (*а*) та поздовжня умовна балка (*б*)

Унаслідок поздовжньої усадки шва балка отримує укорочення та вигин, які визначаються наступними рівняннями:

$$\text{укорочення по нейтральній осі умовної балки } \Delta L = \frac{V_1}{F};$$

$$\text{кут повороту кінцевих перерізів умовної балки } \varphi_L = \frac{V_1 z_1}{I_y};$$

$$\text{стрілка прогину умовної балки } f = \frac{\varphi_L L}{8};$$

$$\text{укорочення по зовнішній обшивці } \Delta L_{3,0} = \frac{V_1}{F} + \frac{V_1 z_1 z_0}{I_y},$$

де  $V_1$  – об'єм поздовжнього укорочення шва,  $\text{см}^3$ ;  $F$  – площа поперечного перерізу умовної балки,  $\text{см}^2$ ;  $I_y$  – власний момент інерції умовної балки відносно осі, перпендикулярної до площини вигину,  $\text{см}^4$ ;  $z_1$  і  $z_0$  – відстані від ЦВ перерізу умовної балки до осі шва й поверхні зовнішньої обшивки відповідно,  $\text{см}$ .

У загальному випадку за наявності декількох ( $n$ ) поздовжніх швів у межах однієї умовної балки деформації укорочення та вигину умовної балки визначаються виразами

$$\Delta L = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{F}; \quad \varphi_L = \frac{\sum_{i=1}^n V_i z_i}{I_y}; \quad f = \frac{\varphi_L L}{8}.$$

Знайдені параметри деформацій умовної балки показують, як деформується (коротшає та згинається) вся секція в поздовжньому напрямі.

Для визначення деформацій у поперечному напрямі умовна балка не виділяється. Деформації укорочення визначаються як для полотна:

$$\Delta B = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{F_{\text{В-В}}} = \frac{n W_i}{F_{\text{В-В}}},$$

де  $W_i$  – об'єми поперечного укорочення швів, що приварюють ребра жорсткості (набір), підраховані з урахуванням частини погонної енергії, яка йде на нагрівання полотна ( $q_{\text{п.п}}$ );  $F_{\text{В-В}}$  – площа поздовжнього перерізу полотна;  $n$  – кількість швів (при визначенні об'єму поперечного укорочення двосторонні шви враховуються як два односторонні).

У разі підварювання стикових швів полотна після устанавлення та приварювання набору підварювальні шви також слід включити в розрахунок деформацій умовної балки. У цьому випадку для швів, розташованих уздовж умовної балки, необхідно визначити об'єм поздовжнього укорочення, а для тих, що розташовані поперек балки, – об'єм поперечного укорочення. Ці об'єми необхідно додати до суми об'ємів поздовжнього укорочення від приварювання набору при визначенні укорочення та вигину умовної балки. Для визначення поперечного укорочення полотна об'єми від підварювальних швів додаються до об'ємів поперечного укорочення від приварювання набору.

#### 6.4. Плоскі секції з набором двох напрямів

Технологічний процес складання та зварювання таких секцій (рис. 6.5) може бути розбитий на два (суміщений метод) або три (роздільний метод) етапи. При суміщеному методі, коли зварювання набору виконується після повного його устанавлення в обох напрямках, виділяються два етапи: складання та зварювання полотнища обшивки й устанавлення та зварювання набору двох напрямів. При роздільному методі, коли спочатку встановлюють та приварюють набір одного напрямку, а потім – іншого, другий етап розділяється на два самостійних: устанавлення та приварювання набору головного напрямку і устанавлення та приварювання перехресного набору.

Розглянемо схему розрахунку загальних зварювальних деформацій при суміщеному методі. На першому етапі розраховують деформації при зварюванні полотна з окремих листів (див. підрозд. 6.2). На другому етапі для визначення деформацій необхідно виділити умовні балки: поздовжню і поперечну (рис. 6.6).

Деформації кожної умовної балки розраховують у загальному порядку, враховуючи всі шви, які знаходяться в межах відповідної умовної балки, та їх розташування щодо осі балки.

Поздовжнє укорочення балки та кут повороту кінцевих перерізів балки визначаються за рівняннями

$$\Delta L = \frac{V_1 + \sum_{i=1}^n W_{2i} + \sum_{j=1}^m W_{3j}}{F_1} = \frac{V_1 + nW_2 + mW_3}{F_1};$$

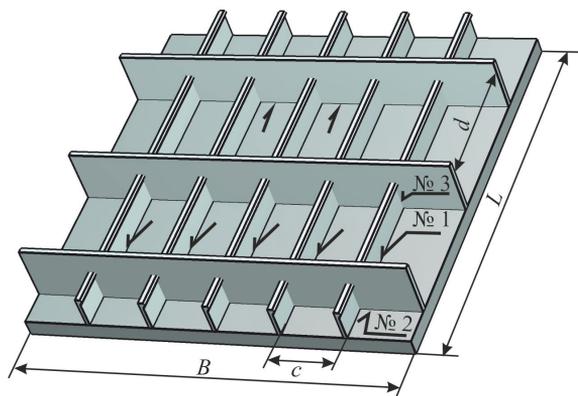


Рис. 6.5. Плоска секція з набором двох напрямів

$$\varphi_L = \frac{V_1 \cdot z_1 + \sum_{i=1}^n W_{2i} \cdot z_2 + \sum_{j=1}^m W_{3j} \cdot z_3}{I_y} = \frac{V_1 \cdot z_1 + nW_2 \cdot z_2 + mW_3 \cdot z_3}{I_y},$$

де  $F_1$  – площа поперечного перерізу поздовжньої умовної балки;  $V_1$  – об'єм поздовжнього укорочення шва № 1;  $W_2$  і  $W_3$  – об'єми поперечного укорочення відповідно швів № 2 і № 3, знайдені з урахуванням частини погонної енергії, яка йде на нагрівання пояска й стінки балки, а також довжини швів у межах умовної балки;  $n$  та  $m$  – кількість швів № 2 і № 3 у межах умовної балки;  $I_y$  – власний момент інерції перерізу поздовжньої умовної балки відносно осі, перпендикулярної до площини вигину;  $z_1$ ,  $z_2$  і  $z_3$  – відстані від ЦВ перерізу умовної балки до ЦВ швів № 1, № 2 і № 3 відповідно.

Положення ЦВ поздовжнього шва № 1 приймається на рівні верхньої крайки пояска, поперечного шва № 2 на пояску – на рівні половини товщини пояска, а поперечного шва № 3 на стінці – на рівні половини довжини цього шва. Знаки повинні відповідати прийнятому правилу знаків (додатні – при розташуванні ЦВ шва нижче від ЦВ перерізу балки, від'ємні – при розташуванні вище).

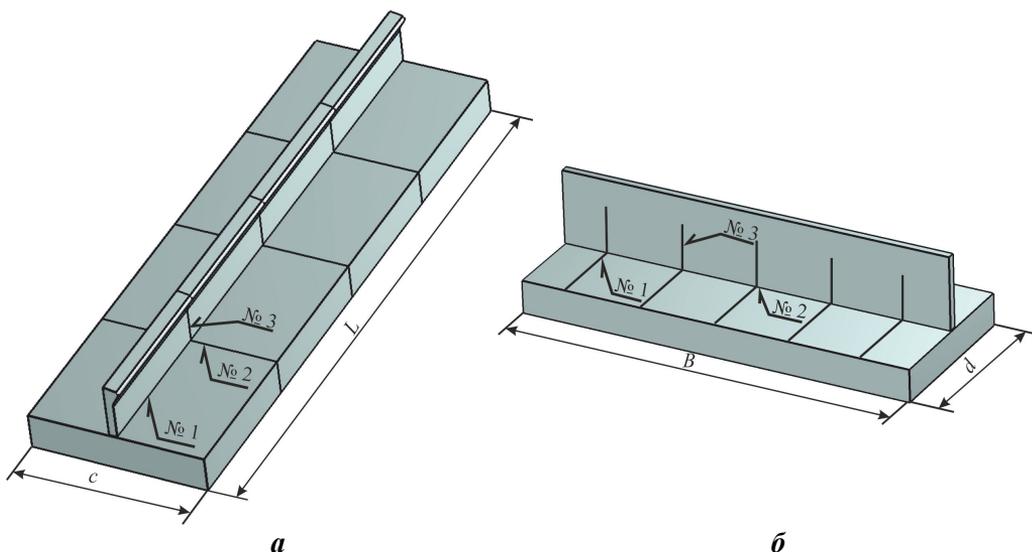


Рис. 6.6. Поздовжня (а) та поперечна (б) умовні балки

Стрілка прогину поздовжньої умовної балки визначається за виразом

$$f_L = \frac{\varphi_L L}{8},$$

де  $L$  – довжина балки.

Знайдені деформації укорочення та вигину умовної балки відображають величину і характер деформацій секції в цілому в поздовжньому напрямі.

Деформації поперек секції розраховуються для поперечної умовної балки (див. рис. 6.6,б) за рівняннями:

поздовжнє укорочення балки

$$\Delta B = \frac{V_2 + \sum_{i=1}^n W_{1i} + \sum_{j=1}^m W_{3j}}{F_2} = \frac{V_2 + nW_1 + mW_3}{F_2},$$

кут повороту кінцевих перерізів балки

$$\varphi_B = \frac{V_2 \cdot z_2 + \sum_{i=1}^n W_{1i} \cdot z_1 + \sum_{j=1}^m W_{3j} \cdot z_3}{I_{y2}} = \frac{V_2 \cdot z_2 + nW_1 \cdot z_1 + mW_3 \cdot z_3}{I_{y2}},$$

де  $F_2$  – площа поперечного перерізу поперечної умовної балки;  $V_2$  – об'єм поздовжнього укорочення шва № 2;  $W_1$  і  $W_3$  – об'єми поперечного укорочення відповідно швів № 1 і № 3, знайдені з урахуванням частини погонної енергії, що йде на нагрівання пояса та стінки балки, а також довжини швів у межах поперечної умовної балки;  $n$  і  $m$  – кількість швів № 1 і № 3 у межах поперечної умовної балки;  $I_{y2}$  – власний момент інерції перерізу поперечної умовної балки щодо осі, перпендикулярної до площини вигину;  $z_1$ ,  $z_2$  і  $z_3$  – відстані від ЦВ перерізу поперечної умовної балки до ЦВ швів № 1, № 2 і № 3 відповідно.

Положення ЦВ поздовжнього шва № 2 приймається на рівні верхньої крайки пояса, поперечного шва № 1 на пояску – на рівні половини товщини пояса, а поперечного шва № 3 на стінці – на рівні половини довжини цього шва.

Стрілку прогину поперечної умовної балки знаходять за виразом

$$f_B = \frac{\varphi_B B}{8},$$

де  $B$  – довжина поперечної умовної балки.

Знайдені деформації укорочення та вигину умовної балки відображають величину і характер деформацій секції в цілому в поперечному напрямі.

У разі використання роздільного методу складання та зварювання розрахунок зварювальних деформацій розбивається на три етапи. На першому етапі розраховуються деформації полотна (див. підрозд. 6.2), на другому – виконується розрахунок за схемою секції з набором в одному напрямі

(див. підрозд. 6.3) і лише на третьому використовується схема секції з набором двох напрямів. При цьому до розрахунку на кожному етапі включаються тільки шви, які виконуються на даному етапі. Залишкові деформації знаходять підсумовуванням укорочень, кутів вигину та стрілок прогину у відповідному напрямі на другому і третьому етапах.

### 6.5. Місцеві деформації площинних секцій

**Деформації втрати стійкості.** Цей вид деформацій характерний для тонколистових конструкцій: полотен, плоских секцій перегородок тощо. Основна причина цих деформацій – напруження стиску, які виникають унаслідок поздовжнього та поперечного укорочення зварних з'єднань. Загальні принципи розрахунків таких деформацій були розглянуті раніше (див. підрозд. 5.1).

Для полегшення визначення вже на стадії проектування ймовірності появи деформацій втрати стійкості в суднобудуванні використовуються графіки (рис. 6.7), які побудовані для конструкцій типу пластин (полотен) товщиною  $s$ , підкріплених ребрами жорсткості з відстанню  $a$  між ними, що приварені швом з катетом  $k$ . Тип шва тут ураховується коефіцієнтом  $m$ , для одностороннього безперервного він дорівнює 1, двостороннього – 1,07, переривистого одностороннього –  $l_{\text{ш}}/t$ , шахового –  $2l_{\text{ш}}/t$ . Якщо точка, що відповідає даному катету з урахуванням коефіцієнта типу з'єднання  $m$  та товщині полотна (вертикальна вісь), потрапляє в область вище за криві, то втрата стійкості малоімовірна, якщо нижче – слід подумати про заходи щодо запобігання деформаціям втрати стійкості. З графіків видно, що збільшення відстані  $a$  між ребрами і катета  $k$  та зменшення товщини листа збільшує область втрати стійкості. Користуючись цими графіками, можна приблизно оцінити ймовірність втрати стійкості, якщо це потрібно, прийняти необхідні конструктивні заходи (внести можливі зміни до конструкції).

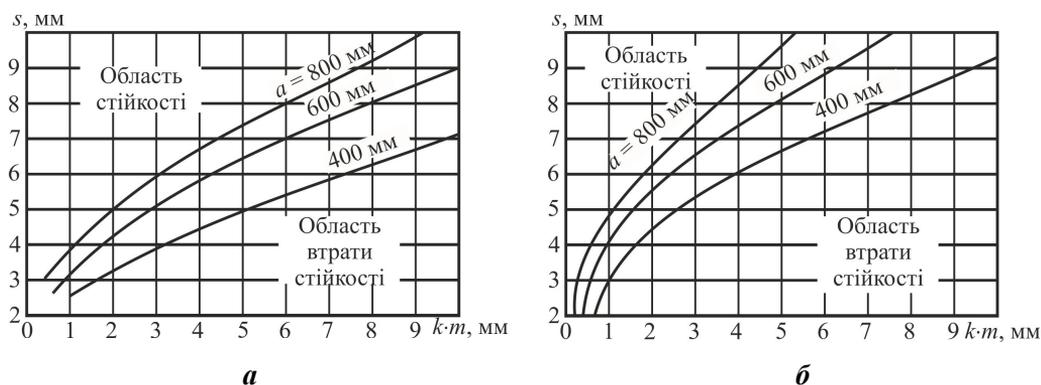


Рис. 6.7. Графіки для визначення ймовірності втрати стійкості панельних конструкцій з низьковуглецевої сталі (а) та з алюмінієвого сплаву (б)

**Приклад.** Оцінити ймовірність втрати стійкості обшивки плоскої секції з низьковуглецевої сталі після приварювання ребер жорсткості. Товщина листів – 6 мм, відстань між ребрами жорсткості – 800 мм, з'єднання – ТЗ, катет – 4 мм.

По горизонтальній осі графіків (див. рис. 6.7,а) відкладаємо  $k \cdot m = 4 \cdot 1,07 = 4,3$  мм, по вертикальній осі – товщину 6 мм. Точка, яка відповідає цим параметрам, розташовується нижче від кривої для  $a = 800$  мм, що показує високу ймовірність втрати стійкості. З метою забезпечення стійкості обшивки можна збільшити товщину полотна до 7 мм або зменшити відстань  $a$  до 500...600 мм.

**Кутові деформації** виникають унаслідок нерівномірного прогрівання по товщині та викликають злам поверхні, ребристість і коробоватість конструкції (див. розд. 4).

При приварюванні ребер жорсткості до плоского полотна загальним критерієм, який визначає кутові деформації, є сумарний кут зламу  $\beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_k$ , де  $\beta_1$  і  $\beta_2$  – кути зламу, які спричиняє нерівномірне по товщині нагрівання полотна при заварюванні шва з одного та іншого боків;  $\beta_k$  – додатковий кут зламу, який спричиняє усадку наплавленого металу при зварюванні другого шва таврового з'єднання (див. підрозд. 4.4).

Кутувий злам при зварюванні стикових з'єднань визначається підсумовуванням кутів від кожного проходу (шару) зварювання (наплавлення) та істотно залежить від типу з'єднання (див. підрозд. 4.3). Найбільшої величини він досягає при багат шаровому зварюванні з одного боку (V-подібні з'єднання).

## 6.6. Площинні секції з криволінійними обводами

Для секцій з криволінійними обводами (наприклад, днищевих) горизонтальне ( $s_i$ ) та вертикальне ( $f_i$ ) зміщення точки  $A_i$  на відстані  $b_i$  від нерухомого перерізу (наприклад, по діаметральній площині (ДП)) і відстані  $z_i$  від нейтральної осі (рис. 6.8) визначаються за формулами

$$s_i = \frac{\varphi_b b_i^2}{4b} \operatorname{tg} \beta_i + \frac{1}{2} (\Delta l_b + \varphi_b z_i) \frac{b_i}{b} \cos \beta_i; \quad (6.1)$$

$$f_i = \frac{\varphi_b b_i^2}{4b} - \frac{1}{2} (\Delta l_b + \varphi_b z_i) \frac{b_i}{b} \sin \beta_i, \quad (6.2)$$

де  $\beta_i$  – середній кут кілюватості на ділянці між ДП і точкою  $A_i$ ;  $b$  – півширота;  $\varphi_b$  і  $\Delta l_b$  – деформації на всю півшироту секції.

Точність розрахунку за формулами (6.1) і (6.2) залежить від точності визначення середнього кута  $\beta$ . Для секцій з криволінійними обводами точне визначення цього кута, як правило, є проблематичним.

Якщо розбити балку на декілька ділянок, то в межах кожної з них кут  $\beta_i$  може бути знайдений з більшою точністю. У цьому випадку переміщення будь-якої точки обчислюється як алгебраїчна сума її переміщень від деформації кожної окремої ділянки.

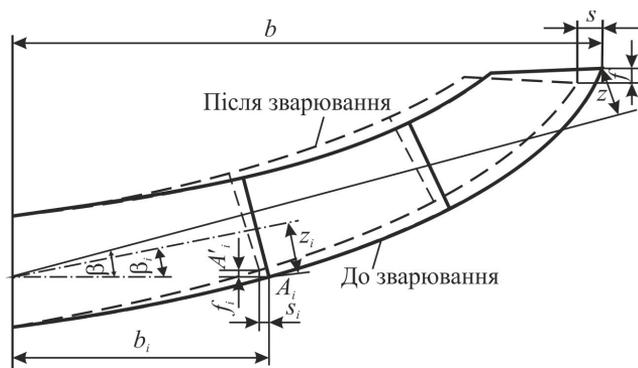


Рис. 6.8. Схема зміщень точок криволінійної секції внаслідок зварювальних деформацій

Розглянемо визначення переміщень крайньої точки ( $k$ ) секції від зварювання швів на одній з трьох ділянок, наприклад другій (рис. 6.9).

Унаслідок маленької довжини ділянки її обводи та вісь можна вважати прямолінійними, а розміри перерізу і жорсткість – постійними по всій довжині. Від зварювання швів на другій ділянці балка завдовжки  $x_i + x_0 = x_k$  отримає злам на кут  $\varphi_c$  і укорочення  $l_c$ , які вважатимемо зосередженими в початковому перерізі цієї ділянки. Горизонтальне ( $s_i$ ) та вертикальне ( $f_i$ ) переміщення точки  $k$ , що виникають при цьому, можна знайти з виразів

$$s_i = -\varphi_c y_k + l_c \frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}; \quad f_i = \varphi_c x_k + l_c \frac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}.$$

За прийнятим правилом знаків для  $\varphi_c$ ,  $l_c$ ,  $x$  та  $y$  позитивний напрям переміщень  $s_i$  – вправо,  $f_i$  – вверх.

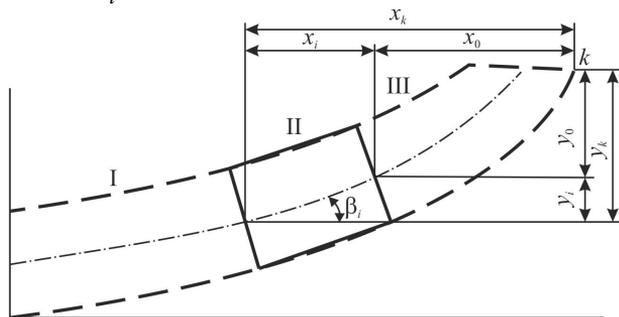


Рис. 6.9. Розбиття криволінійної балки на ділянки

Таким чином, розбивши секцію на ділянки – балки – та визначивши переміщення певної точки від зварювання швів на кожній ділянці, алгебраїчним підсумовуванням отримуємо переміщення точки від зварювання всієї секції.

### 6.7. Допуски на зварювальні деформації секцій

Знайдені величини зварювальних деформацій (укорочення, вигину, бухтинуватості, ребристості тощо) порівнюються з допустимими відхиленнями форми і розмірів секцій та окремих вузлів. Допустимі відхилення по всій довжині в площині стінки або полиці зварних балок набору наведено в табл. 6.2.

Таблиця 6.2. Максимальна стрілка прогину, мм

| Довжина профілю, м | Висота набору, мм |           |           |            |
|--------------------|-------------------|-----------|-----------|------------|
|                    | 200...300         | 301...500 | 501...800 | 801 і вище |
| до 3               | ± 3               | ± 3       | ± 2       | ± 2        |
| до 5               | ± 5               | ± 3       | ± 3       | ± 3        |
| до 8               | ± 8               | ± 5       | ± 5       | ± 3        |
| до 10              | ± 10              | ± 7       | ± 5       | ± 5        |

Допустимі місцеві неприлягання листів зовнішньої обшивки секцій днища, бортів, палуб, платформ, перегородок до лекал постілі наступні: по контуру секції – 2 мм, у решті перерізів – 6 мм. Неприлягання скулових листів до постілі не повинне перевищувати 5 мм.

Допустиму стрілку **поздовжнього** прогину для днищевих секцій по ДП і крайніх стрингерах наведено нижче.

|                     |      |       |        |         |
|---------------------|------|-------|--------|---------|
| Довжина секції, м   | до 3 | 4...5 | 6...10 | 12...14 |
| Стрілка прогину, мм | 6    | 8     | 10     | 12      |

Для бортових секцій у площині палубного і бортового стрингерів, палубних секцій у ДП та вздовж карленгсів, платформ, перегородок, а також інших площинних секцій у ДП та вздовж поздовжніх рамних жорсткостей допускається стрілка поздовжнього прогину ±3 мм на 1 м погонної довжини секції, але не більше 20 мм на всю її довжину.

Допустима стрілка поперечного прогину для плоских днищевих секцій по середньому та крайньому шпангоутах наведена нижче.

|                     |      |       |        |         |
|---------------------|------|-------|--------|---------|
| Довжина секції, м   | до 3 | 4...5 | 6...10 | 12...14 |
| Стрілка прогину, мм | 6    | 10    | 12     | 15      |

Для палубних секцій допустимі відхилення від плазової зігнутості по середніх та крайніх бiмсах дорівнюють +3 або –1,5 мм на 1 м погонної ширини секції, але не більш +20 і –10 мм на всю ширину секції; для бортових секцій, платформ, перегородок та інших площинних секцій у площині крайніх

шпангоутів вони становлять  $\pm 2$  мм на 1 м погонної ширини секції, але не більше  $\pm 15$  мм на всю ширину секції (знак "+" означає збільшення зігнутої, знак "-" – її зменшення).

Відхилення довжини секції від плазової допускається  $\pm 8$  мм.

Допустимі відхилення фактичних півширот від плазових у трьох перерізах для днищевих та інших об'ємних секцій з кілюватістю наведені нижче.

|                     |         |          |          |           |
|---------------------|---------|----------|----------|-----------|
| Ширина секції, м    | до 5    | до 6     | до 10    | більше 10 |
| Стрілка прогину, мм | $\pm 6$ | $\pm 10$ | $\pm 12$ | $\pm 14$  |

Відхилення висот точок притискання крайнього стрингера (другого дна) до зовнішньої обшивки допускається  $\pm 10$  мм. Зсув деталей і вузлів поздовжнього та поперечного наборів від ліній розмітки на полотні допускається  $\pm 2$  мм. Відхилення набору від вертикалі допускається  $\pm 3$  мм при висоті деталей до 0,5 м і  $\pm 4$  мм – понад 0,5 м.

За допусками на бухтиноватість (табл. 6.3) усі конструкції поділяються на п'ять груп.

Перша група – конструкції (незалежно від товщини листів, типу і призначення судна), від яких вимагається гарний зовнішній вигляд. До цієї групи належать зовнішні стінки надбудов, рубок, містків, фальшбортів, відкриті палуби і містки, палуби, майданчики, платформи, перегородки, які покриваються дерев'яним настилом, лінолеумом або ізоляційними плитами.

Друга група – конструкції, які забезпечують загальну міцність суден і розташовані в середній частині довжини корпусу (до  $0,25L$  у ніс і корму від міделя) для суден з поздовжньою системою набору незалежно від головних розмірів та суден з поперечною системою набору довжиною до 50 м. Це зовнішня обшивка, друге дно, вертикальний кіль, стрингери, кільсони, закриті безперервні палуби і платформи, настил півбака (при довжині його більше від  $1/3$  довжини корпусу), комінгси довгих вантажних люків, безперервні поздовжні перегородки, головні поперечні перегородки, поздовжні стінки довгих надбудов (що спираються не менше ніж на три поперечні перегородки), полотнища всіх інших конструкцій завтовшки понад 11 мм незалежно від їх розташування в корпусі та участі в загальній міцності.

Третя група – конструкції, які забезпечують загальну міцність суден довжиною понад 50 м з поперечною системою набору і розташовані в середній частині довжини корпусу (перелік конструкцій див. у групі 2).

Четверта група – флори днищевих секцій як за наявності другого дна, так і без нього.

П'ята група – конструкції по всій довжині корпусу, що не входять у групи 1–4.

Таблиця 6.3. Допуски на бухтиноватість

| Найменша довжина бухтини, мм | Допустимі стрілки прогину, мм, за групами |    |                        |                     |    |                        |                      |
|------------------------------|---|----|------------------------|---------------------|----|------------------------|----------------------|
|                              | 1   | 2  | 3                      |                     | 4  | 5                      |                      |
|                              |   |    | для товщин $\leq 5$ мм | для товщин $> 5$ мм |    | для товщин $\leq 5$ мм | для товщин 5...10 мм |
| 0...350                      | 4   | 5  | 4                      | 3                   | 2s | 10                     | 7                    |
| 351...400                    | 5   | 5  | 5                      | 4                   |    | 11                     | 8                    |
| 401...500                    | 6   | 5  | 6                      | 5                   |    | 11                     | 9                    |
| 501...600                    | 7   | 6  | 8                      | 6                   |    | 12                     | 10                   |
| 601...700                    | 8   | 8  | 9                      | 7                   |    | 12                     | 10                   |
| 701...800                    | 10  | 9  | 10                     | 8                   |    | –                      | –                    |
| $\geq 801$                   | 10  | 10 | 10                     | 9                   |    | –                      | –                    |

Вимірювання бухтин та перевірка на бухтиноватість проводяться після закінчення всіх зварювальних робіт на самій конструкції та в районі її установлення. Довжина бухтини заміряється сталевією або дерев'яною лінійкою.

За початковий розмір береться: при бухтинах одного знаку в сусідніх ділянках – найменший розмір бухтини в будь-якому напрямі, для різних знаків – величина шпації.

Вимірювання бухтин на криволінійних поверхнях проводиться коротким шаблоном, на конструкціях з малою плавною кривизною (палубах, бортах, середній частині судна) – допускається не за шаблонами, а плоскою лінійкою.

Допуски на величину "будиночків" (місцевих виходів полотнища з площини в районі монтажних та внутрішньосекційних зварних швів) між сусідніми жорсткостями встановлюються за внутрішньосекційними та монтажними стиками:

для листів товщиною до 8 мм – не більше від товщини зварюваних листів;

для листів товщиною 9...12 мм включно – не більше від 0,7 товщини зварюваних листів;

для листів товщиною більше 12 мм – не більше 0,5 товщини листа;

у місцях перетину стиків і пазів, а також на скуловому поясі допустима величина "будиночка" для всіх товщин збільшується в півтора рази при довжині "будиночка" не більше від шпації.

По монтажних пазах величини допусків на "будиночки" можуть бути збільшені порівняно з допусками по стиках на 25 %. Допуски на "будиночки" не розповсюджуються на конструкції надбудов.

## 6.8. Контрольні запитання

1. Що таке умовна балка, з якою метою вона виділяється?
2. Як вибираються умовні балки в секціях з набором одного та двох напрямів?
3. Як призначається ширина приєднаного пояса умовної балки?

4. Як враховується технологічна послідовність складання та зварювання при розрахунку зварювальних деформацій?
5. За яким принципом виділяються етапи технологічного процесу при розрахунку зварювальних деформацій?
6. Як підсумовуються зварювальні деформації, що утворюються на різних етапах виготовлення?
7. Які параметри механічної дії зварних з'єднань на конструкцію використовують при розрахунку загальних зварювальних деформацій у суднобудуванні?
8. Як визначаються загальні зварювальні деформації при зварюванні плоских полотен?
9. Як розраховуються загальні зварювальні деформації при зварюванні плоских секцій з набором одного напрямку?
10. Як визначаються загальні зварювальні деформації при зварюванні плоских секцій з набором двох напрямків?
11. Чому дорівнює укорочення вздовж осі умовної балки?
12. Чому дорівнює кут повороту кінцевих перерізів умовної балки?
13. Чому дорівнює стрілка прогину умовної балки?
14. Як враховується напрям вигину умовної балки?
15. Які місцеві зварювальні деформації утворюються при зварюванні площинних секцій та які причини їх появи?
16. З якою метою виконуються розрахунки зварювальних деформацій секцій?
17. У чому особливість розрахунку секцій з криволінійними обводами?
18. Як призначаються допуски на загальні зварювальні деформації секцій та величину бухтин?

### 6.9. Приклад задачі

Площинна секція перегородки (рис. 6.10) з низьковуглецевої сталі складається з полотна обшивки (довжина  $L = 6$  м, ширина  $B = 8$  м, товщина  $s_{\Pi} = 8$  мм), звареного з п'яти листів шириною 1600 мм, суцільних (нерозрізних) поздовжніх ребер жорсткості зі штабобульба № 12 ( $h_{\text{шб}} = 120$  мм), поставлених на відстані між ними (шпації)  $a = 600$  мм, та поперечних бракетів висотою  $h = 1$  м і товщиною  $s_{\text{бр}} = 6$  мм з відстанню між ними  $d = 2$  м. Усі з'єднання набору між собою та з листами обшивки – ТЗ із катетом 5 мм – виконані зварюванням у захисному газі. Стики листів обшивки виконані без скосу крайок автоматом під флюсом з двох сторін (С7). Конструкція належить до другої групи за допусками на бухтинуватість (ребристість). Складання та зварювання секції виконується з використанням роздільного методу в наступній послідовності: 1 етап – складання та зварювання листів обшивки між собою, 2 етап – установлення й приварювання поздовжніх ребер жорсткості до

полотна, 3 етап – установлення та приварювання поперечних бракетів до ребер жорсткості й полотна, підварювання стиків зовнішньої обшивки.

1. Визначте загальні зварювальні деформації секції на всіх етапах виготовлення.

2. Оцініть імовірність втрати стійкості листів після приварювання поздовжніх ребер жорсткості.

3. Визначте ребристість обшивки після приварювання ребер жорсткості.

4. Порівняйте очікувані деформації з допустимими.

### Розв'язання

1. Визначення загальних зварювальних деформацій.

*Перший етап виготовлення* – зварювання пазів полотна (рис. 6.11).

Оскільки поперечні шви відсутні, укорочення вздовж секції обумовлене тільки поздовжньою усадкою  $m$  пазів (поздовжніх з'єднань). Загальне поздовжнє укорочення полотна визначається за рівнянням

$$\Delta L = \frac{\sum_{i=1}^m V_i}{F_{A-A}} = \frac{mV_{\text{п}}}{F_{A-A}},$$

де  $F_{A-A}$  – площа поперечного перерізу полотна;  $V_{\text{п}}$  – об'єм поздовжнього укорочення пазів;  $m = 4$  – кількість пазів.

Об'єм поздовжнього укорочення одного паза для конструкцій з низьковоуглецевої сталі визначається за рівнянням

$$V = 1,0 \cdot 10^{-6} \cdot q_{\text{п}} \cdot L.$$

Погонну енергію зварювання одного проходу знайдемо за площею наплавленого металу для з'єднання С7:

$$F_{\text{п}} = b \cdot h + \frac{3}{4} e \cdot g,$$

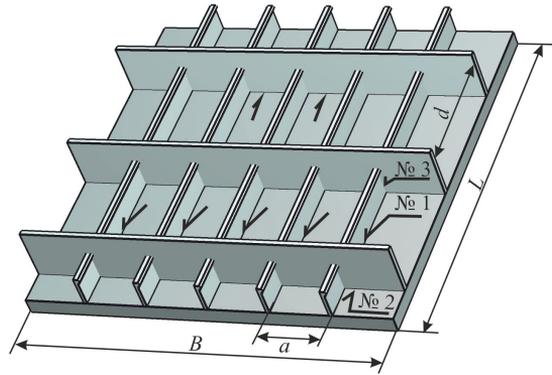


Рис. 6.10. Плоска секція з набором у двох напрямках

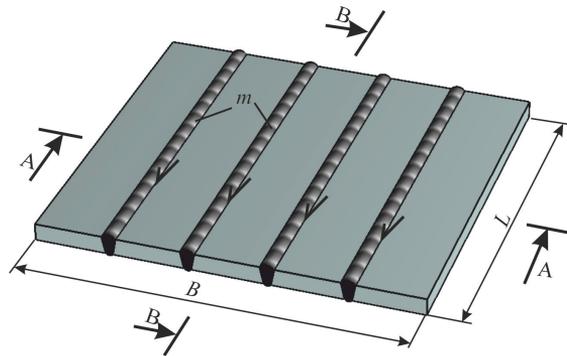


Рис. 6.11. Плоске полотно – перший етап виготовлення секції

де відповідно до ГОСТ 8713–70 прийемо зазор  $b = 1$  мм, глибину проплавлення  $h = 0,6s_{\pi} = 0,6 \cdot 8 \approx 5$  мм, ширину валика  $e = 19$  мм, опуклість  $g = 2$  мм.

Тоді площа наплавленого металу одного проходу

$$F_{\pi} = 1 \cdot 5 + 3/4 \cdot 19 \cdot 2 = 33,5 \text{ мм}^2 = 0,335 \text{ см}^2.$$

Для зварювання під флюсом погонна енергія

$$q_{\pi} = 64500 F_{\pi} = 64500 \cdot 0,335 = 21600 \text{ Дж/см}.$$

Тоді об'єм поздовжнього укорочення одного шва довжиною  $L = 600$  см

$$V = -1,0 \cdot 10^{-6} \cdot 21600 \cdot 600 = -13 \text{ см}^3.$$

Площа поперечного перерізу полотна

$$F_{A-A} = B s_{\pi} = 800 \cdot 0,8 = 640 \text{ см}^2.$$

Укорочення вздовж полотна

$$\Delta L = \frac{mV}{F_{A-A}} = 4 \cdot \frac{-13}{640} = -0,08 \text{ см} = -0,8 \text{ мм}.$$

Укорочення поперек секції викликається поперечною усадкою пазів:

$$\Delta B = \frac{\sum_{i=1}^m W_{\pi}}{F_{B-B}} = \frac{m W_{\pi}}{F_{B-B}},$$

де  $F_{B-B}$  – площа поздовжнього перерізу полотна;  $W_{\pi}$  – об'єм поперечного укорочення пазів.

Об'єм поперечного укорочення одного паза для конструкцій з низькоуглецевої сталі

$$W = -3,0 \cdot 10^{-6} \cdot q_{\pi} \cdot L = -3,0 \cdot 10^{-6} \cdot 21600 \cdot 600 = -38,9 \text{ см}^3.$$

Площа поздовжнього перерізу полотна  $F_{B-B} = L s_{\pi} = 600 \cdot 0,8 = 480 \text{ см}^2$ .

Укорочення поперек полотна  $\Delta B = \frac{m W_{\pi}}{F_{B-B}} = 4 \cdot \frac{-38,9}{480} = -0,32 \text{ см} = -3,2 \text{ мм}.$

Поздовжня і поперечна усадки швів не викликають загального вигину полотна, оскільки ЦВ перерізу швів практично збігається із ЦВ перерізу листів.

*Другий етап виготовлення* – установлення та приварювання ребер жорсткості (штабульців) на полотно (рис. 6.12).

Для визначення деформацій уздовж секції виділимо умовну балку у вигляді одного ребра (штабобульба) з приєднаним пояском зовнішньої обшивки шириною, що дорівнює шпациї (відстані між сусідніми ребрами), як показано на рис. 6.13.

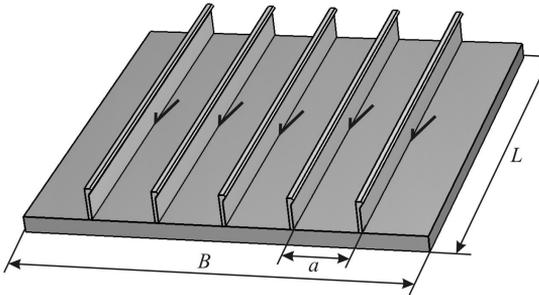


Рис. 6.12. Плоска секція з набором одного напрямку – другий етап виготовлення секції

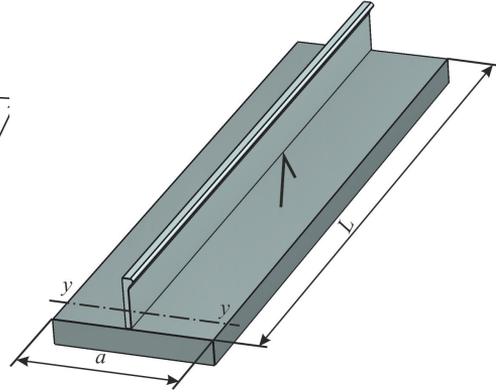


Рис. 6.13. Умовна балка в поздовжньому напрямі

Геометричні характеристики умовної балки розрахуємо в табличній формі (табл. 6.4). Вісь порівняння проведемо через нижню крайку приєданого пояса зовнішньої обшивки. Ширину приєданого пояса приймемо такою, що дорівнює 50 товщинам, тобто 400 мм.

Таблиця 6.4. Розрахунок геометричних характеристик поздовжньої умовної балки

| Елемент     | Ескіз і розміри | Площа перерізу, см <sup>2</sup> | Відстань від осі порівняння, см | Статичний момент (3)·(4), см <sup>3</sup> | Момент інерції (4)·(5) |     |
|-------------|-----------------|---------------------------------|---------------------------------|---|------------------------|-----|
|             |                 |                                 |                                 |   | см <sup>4</sup>        |     |
| 1           | 2               | 3                               | 4                               | 5   | 6                      | 7   |
| Штабобульба | № 12            | 11,15                           | 8,35                            | 93,0                                      | 777                    | 158 |
| Поясок      | 400×8           | 32,00                           | 0,40                            | 12,8                                      | 5                      | 2   |
| Сума        | –               | 43,15                           | –                               | 105,8                                     | 782                    | 160 |

Відстань ЦВ балки від осі порівняння розраховується за формулою  $z_0 = 105,8/43,15 = 2,45$  см; власний момент інерції умовної балки  $I_0 = 782 + 160 - 43,15 \cdot 2,45^2 = 683$  см<sup>4</sup>.

Погонну енергію приварювання штабобульба до полотна знайдемо через площу наплавленого металу, прийнявши середньостатистичний катет  $k = 5,5$  мм і коефіцієнт опуклості  $k_0 = 1,4$ , тоді  $F_H = 1,4 \cdot 0,55^2 / 2 = 0,2$  см<sup>2</sup>; погонна енергія  $q_H = 37500 F_H = 37500 \cdot 0,2 = 7500$  Дж/см.

Об'єм поздовжнього укорочення від приварювання ребра до пояса двостороннім швом послідовно з однієї та іншої сторін (коефіцієнт поздовжнього укорочення для двостороннього шва  $m_{1,2} = 1,25$ )  $V = -1,25 \cdot 1,0 \cdot 10^{-6} \cdot 7500 \cdot 600 = -5,6 \text{ см}^3$ .

Укорочення по нейтральній осі умовної балки

$$\Delta L = \frac{V_1}{F} = -5,6/43,15 = -0,13 \text{ см} = -1,3 \text{ мм};$$

кут повороту кінцевих перерізів умовної балки (з урахуванням відстані осі шва від осі балки  $z_1 = 2,45 - 0,8 = 1,65 \text{ см}$ )

$$\varphi_L = \frac{V_1 z_1}{I_y} = -5,6 \cdot 1,65 / 683 = -0,0135;$$

стрілка прогину умовної балки (тут знак "-" відповідає вигину опуклістю вгору)

$$f = \frac{\varphi_L L}{8} = -0,0135 \cdot 600 / 8 = -1,01 \text{ см} = -10 \text{ мм};$$

укорочення по зовнішній обшивці

$$\Delta L_{3,0} = \frac{V_1}{F} + \frac{V_1 z_1 z_0}{I_y} = -5,6/43,15 - 5,6 \cdot 1,65 \cdot 2,45 / 683 = -0,16 = -1,6 \text{ мм}.$$

Для визначення деформацій у поперечному напрямі умовна балка не виділяється. Деформації укорочення визначаються як для полотна:

$$\Delta B = \frac{n W_i}{F_{B-B}}.$$

Об'єми поперечного укорочення швів № 1, що приварюють ребра жорсткості (поздовжній набір), знайдемо з урахуванням частини погонної енергії, яка йде на нагрівання полотна:  $q_{п.п} = k_{п} q_{п.п'}$ , де  $k_{п} = 0,82 - 0,2 s_p/s_{п} = 0,82 - 0,2 \cdot 6,5/8 = 0,66$ , тоді  $q_{п.п} = 0,66 \cdot 7500 = 4950 \text{ Дж/см}$ .

Коефіцієнт впливу ступеня прогрівання знайдемо залежно від  $q_{п.п}/s^2 = 4950/1^2 = 4950 \text{ Дж/см}^3$  з графіка рис. 3.6:  $k_s = 0,3$ . На цьому етапі виготовлення ребра жорсткості, які перетинають шви № 1, відсутні. Тому коефіцієнт впливу жорсткості прийmemo  $k_{ж} = 1$ .

Об'єм поперечного укорочення одного шва

$$W_1 = -3,0 \cdot 10^{-6} (0,25 + 0,75 \cdot 0,3) \cdot 4950 \cdot 600 = -4,2 \text{ см}^2.$$

Поперечне укорочення секції

$$\Delta B = \frac{nW_i}{F_{B-B}} = 20 \cdot (-4,2) / 480 = -0,175 \text{ см} = -1,75 \text{ мм},$$

де  $F_{B-B} = 600 \cdot 0,8 = 480 \text{ см}^2$  – площа поздовжнього перерізу полотна;  $n = 10 \cdot 2 = 20$  – кількість швів, що приварюють ребра жорсткості (при визначенні об'єму поперечного укорочення двосторонні шви враховуються як два односторонніх).

Третій етап виготовлення – установлення та приварювання поперечних бракетів, підварювання стиків листів зовнішньої обшивки. На цьому етапі секція має набір двох напрямів, тому виділяємо умовні балки в поздовжньому (рис. 6.14, *а*) і поперечному (див. рис. 6.14, *б*) напрямках.

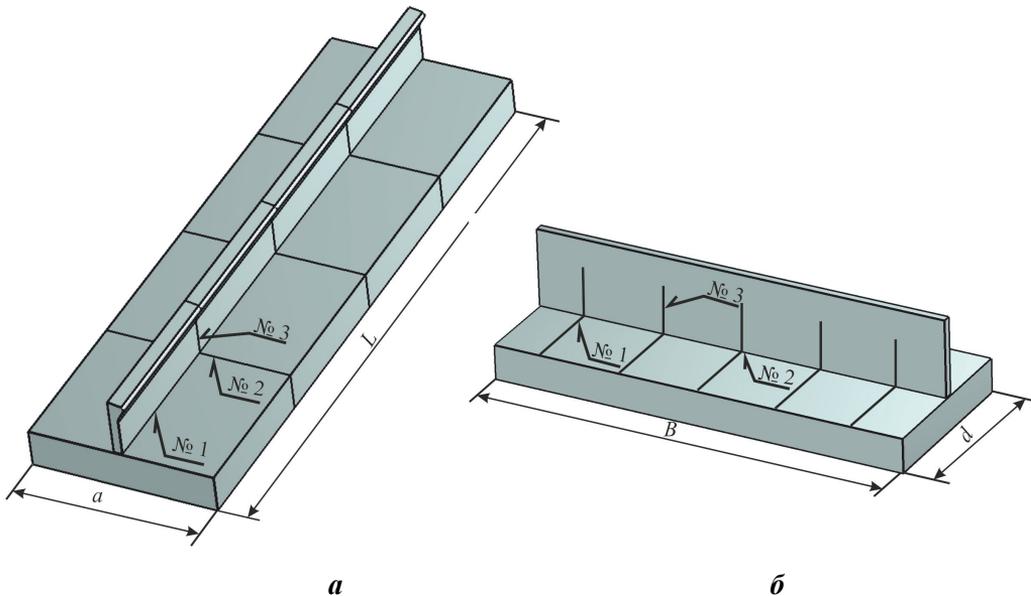


Рис. 6.14. Поздовжня (*а*) та поперечна (*б*) умовні балки на третьому етапі виготовлення

Геометричні характеристики поздовжньої умовної балки у порівнянні з попереднім етапом залишилися без зміни (див. табл. 6.4).

Виконаємо розрахунок геометричних характеристик поперечної умовної балки (табл. 6.5). Оскільки відстань між поперечними бракетами достатньо велика (2 м), ширину приєданого пояска приймемо такою, що дорівнює 50 товщинам, тобто 400 мм. Вісь порівняння проведемо через нижню крайку пояска.

Таблиця 6.5. Розрахунок геометричних характеристик поперечної умовної балки

| Елемент | Ескіз і розміри | Площа перерізу, см <sup>2</sup> | Відстань від осі порівняння, см | Статичний момент (3)·(4), см <sup>3</sup> | Момент інерції (4)·(5) | Власний момент інерції |
|---------|-----------------|---------------------------------|---------------------------------|---|------------------------|------------------------|
|         |                 |                                 |                                 |   | см <sup>4</sup>        |                        |
| 1       | 2               | 3                               | 4                               | 5   | 6                      | 7                      |
| Стінка  | 1000×6          | 60,0                            | 50,8                            | 3048                                      | 154840                 | 50000                  |
| Поясок  | 400×8           | 32,0                            | 0,4                             | 13  | 5                      | 2                      |
| Сума    | –               | 92,0                            | –                               | 3061                                      | 154845                 | 50002                  |

Відстань ЦВ балки від осі порівняння розраховується за формулою  $z_0 = 3061/92 = 33,3$  см; власний момент інерції умовної балки  $I_0 = 154845 + 50002 - 92 \cdot 33,3^2 = 102800$  см<sup>4</sup>.

Деформації на цьому етапі вздовж секції визначаються для поздовжньої умовної балки. Оскільки на третьому етапі виготовлення в поздовжній умовній балці заварюються тільки поперечні шви № 2 та № 3, її поздовжнє укорочення буде

$$\Delta L = \frac{\sum_{i=1}^n W_{2i} + \sum_{j=1}^m W_{3j}}{F_1} = \frac{nW_2 + mW_3}{F_1};$$

кут повороту кінцевих перерізів умовної балки

$$\varphi_L = \frac{\sum_{i=1}^n W_{2i} \cdot z_2 + \sum_{j=1}^m W_{3j} \cdot z_3}{I_y} = \frac{nW_2 \cdot z_2 + mW_3 \cdot z_3}{I_y},$$

де  $W_2$  і  $W_3$  – об'єми поперечного укорочення швів № 2 і № 3, знайдені з урахуванням частини погонної енергії, яка йде на нагрівання пояса й стінки балки, і довжини швів у межах умовної балки;  $n = 4$  та  $m = 8$  – відповідно кількості швів № 2 і № 3 у межах поздовжньої умовної балки з урахуванням двосторонніх швів;  $z_2 = z_0 - s_{\text{п}}/2 = 2,45 - 0,8/2 = 2,05$  см і  $z_3 = z_0 - s_{\text{п}} - h_{\text{шв}6}/2 = 2,45 - 0,8 - 12/2 = -4,35$  см – відповідно відстані від ЦВ швів № 2 та № 3 до ЦВ поздовжньої умовної балки.

Оскільки шви № 1, № 2 та № 3 заварюються одним способом і мають однакові катети, то погонна енергія для них буде однаковою, тобто  $q_{\text{п}1} = q_{\text{п}2} = q_{\text{п}3} = 37500 F_{\text{н}} = 37500 \cdot 0,2 = 7500$  Дж/см.

Об'єми поперечного укорочення швів № 2, що приварюють бракети до обшивки (поперечний набір), підрахуємо з урахуванням частини погонної енергії, яка йде на нагрівання полотна:

$$q_{п.п2} = k_{п2} \cdot q_{п.п2},$$

де  $k_{п2} = 0,82 - 0,2 s_{ор}/s_{п} = 0,82 - 0,2 \cdot 6/8 = 0,67$ , тоді  $q_{п.п2} = 0,67 \cdot 7500 = 5025$  Дж/см.

Коефіцієнт впливу ступеня прогрівання  $k_{s2}$  знайдемо залежно від  $q_{п.п2}/s_{п}^2 = 5025/0,8^2 = 7850$  Дж/см<sup>3</sup>, за графіком рис. 3.6  $k_{s2} = 0,7$ . Ребрами жорсткості, що перетинають шви № 2, є штабобульби, тому коефіцієнт впливу жорсткості прийемо для  $a/2s_{п} = 600/2 \cdot 8 = 37$ , за рис. 3.8  $k_{ж2} = 0,85$ .

Об'єм поперечного укорочення одного шва

$$W_2 = -3,0 \cdot 10^{-6} (0,25 + 0,75 \cdot 0,7 (0,1 + 0,9 \cdot 0,85)) \cdot 5025 \cdot 40 = -0,4 \text{ см}^3.$$

Об'єми поперечного укорочення швів № 3, які приварюють бракети до ребер жорсткості (набір між собою), підрахуємо з урахуванням частини погонної енергії, що йде на нагрівання ребра (нерозрізного елемента):  $q_{п.п3} = k_{п3} \cdot q_{п3}$ , де  $k_{п3} = 0,82 - 0,2 s_{ор}/s_{п} = 0,82 - 0,2 \cdot 6/6,5 = 0,64$ , тоді  $q_{п.п3} = 0,64 \cdot 7500 = 4800$  Дж/см.

Коефіцієнт впливу ступеня прогрівання  $k_{s3}$  знайдемо залежно від  $q_{п.п3}/s_{п}^2 = 4800/0,65^2 = 11360$  Дж/см<sup>3</sup>, за графіком рис. 3.6  $k_{s3} = 0,95$ . Коефіцієнт впливу жорсткості прийемо  $k_{ж3} = 1$ .

Об'єм поперечного укорочення одного шва

$$W_3 = -3,0 \cdot 10^{-6} (0,25 + 0,75 \cdot 0,95 (0,1 + 0,9 \cdot 1)) \cdot 4800 \cdot 12 = -0,17 \text{ см}^3.$$

Поздовжнє укорочення секції на третьому етапі виготовлення

$$\Delta L_3 = \frac{nW_2 + mW_3}{F_1} = (4(-0,4) + 8(-0,17))/43,15 = 0,07 \text{ см} = -0,7 \text{ мм}.$$

Кут повороту кінцевих перерізів умовної балки

$$\varphi_{L3} = \frac{nW_2 \cdot z_2 + mW_3 \cdot z_3}{I_y} = (4(-0,4) \cdot 2,05 + 8(-0,17) \cdot (-4,35))/683 = 0,0039.$$

Стрілка прогину поздовжньої умовної балки на третьому етапі виготовлення  $f_{L3} = \varphi_{L3} L/8 = 0,0039 \cdot 600/8 = 0,29$  см = 2,9 мм.

Деформації на третьому етапі виготовлення поперек секції визначаються для поперечної умовної балки. На цьому етапі виготовлення в балці зварюються поздовжні шви № 2 та поперечні № 3, тому її поздовжнє укорочення

$$\Delta B = \frac{\sum_{i=1}^n V_{2i} \cdot z_2 + \sum_{j=1}^m W_{3j} \cdot z_3}{F_2} = \frac{nV_2 + mW_3}{F_2};$$

кут повороту кінцевих перерізів поперечної умовної балки

$$\varphi_B = \frac{\sum_{i=1}^n V_{2i} \cdot z_2 + \sum_{j=1}^m W_{3j} \cdot z_3}{I_{y2}} = \frac{V_2 \cdot z_2 + mW_3 \cdot z_3}{I_{y2}},$$

де  $V_2$  та  $W_3$  – об'єми поздовжнього і поперечного укорочення відповідно швів № 2 та № 3, що знайдені з урахуванням довжини швів у межах умовної балки;  $m = 40$  – кількість швів № 3 у межах поперечної умовної балки з урахуванням двосторонніх швів;  $z_2 = z_{02} - s_{\text{п}} = 33,3 - 0,8 = 32,5$  см і  $z_3 = z_{02} - s_{\text{п}} - h_{\text{п.6}}/2 = 33,3 - 0,8 - 12/2 = 26,5$  см – відстані від ЦВ швів № 2 і № 3 до ЦВ поперечної умовної балки.

Об'єм поздовжнього укорочення швів № 2, які приварюють бракети до обшивки (поперечний набір), підрахуємо з урахуванням погонної енергії  $q_{\text{п2}} = 7500$  Дж/см, довжини шва  $l_3 = 800$  см і коефіцієнта двостороннього шва  $k_{1,2} = 1,25$ :

$$V_2 = -1,0 \cdot 10^{-6} \cdot 7500 \cdot 800 \cdot 1,25 = -7,5 \text{ см}^3.$$

Об'єми поперечного укорочення швів № 3, що приварюють бракети до ребер жорсткості (набір між собою), підрахуємо з урахуванням частини погонної енергії, яка йде на нагрівання розрізних бракетів:  $q_{\text{пр3}} = k_{\text{р3}} \cdot q_{\text{п3}}$ , де  $k_{\text{п3}} = 0,18 + 0,2 s_{\text{бр}}/s_{\text{р}} = 0,18 + 0,2 \cdot 6/6,5 = 0,36$ , тоді  $q_{\text{пр3}} = 0,36 \cdot 7500 = 2700$  Дж/см.

Коефіцієнти впливу ступеня прогрівання та жорсткості приймемо такими, що дорівнюють 1, тобто  $k_{\text{с3}} = 1$ ;  $k_{\text{ж3}} = 1$ .

Об'єм поперечного укорочення одного шва

$$W_3 = -3,0 \cdot 10^{-6} (0,25 + 0,75 \cdot (0,1 + 0,9 \cdot 1)) \cdot 2700 \cdot 12 = -0,097 \text{ см}^3.$$

Поперечне укорочення секції на третьому етапі виготовлення

$$\Delta B_3 = \frac{V_2 + mW_3}{F_2} = (-7,5 + 40(-0,097))/92 = -0,124 \text{ см} = -1,2 \text{ мм}.$$

Кут повороту кінцевих перерізів умовної балки

$$\varphi_{B3} = \frac{V_2 \cdot z_2 + mW_3 \cdot z_3}{I_{y2}} = (-7,5 \cdot 32,5 + 40(-0,097) \cdot 26,5)/102800 = -0,0034.$$

Стрілка прогину поперечної умовної балки на третьому етапі виготовлення

$$f_{B3} = \frac{\varphi_{B3} B}{8} = -0,0034 \cdot 800/8 = -0,34 \text{ см} = -3,4 \text{ мм}.$$

Сумарне укорочення по осі умовної балки на другому та третьому етапах виготовлення:

$$\text{у поздовжньому напрямі } \Delta L_{2,3} = \Delta L_2 + \Delta L_3 = -1,3 - 0,7 = -2,0 \text{ мм};$$

$$\text{у поперечному напрямі } \Delta B_{2,3} = \Delta B_2 + \Delta B_3 = -1,75 - 1,2 = -2,95 \text{ мм.}$$

Сумарний кут вигину:

$$\text{вздовж секції } \varphi_{L2,3} = \varphi_{L2} + \varphi_{L3} = -0,0135 + 0,0039 = -0,0096;$$

$$\text{поперек секції } \varphi_{B2,3} = \varphi_{B2} + \varphi_{B3} = 0 - 0,0034 = -0,0034.$$

Сумарна стрілка прогину:

$$\text{вздовж секції } f_{L2,3} = f_{L2} + f_{L3} = -10 + 2,9 = -7,1 \text{ мм};$$

$$\text{поперек секції } f_{B2,3} = f_{B2} + f_{B3} = 0 - 3,4 = -3,4 \text{ мм.}$$

2. Для оцінки ймовірності втрати стійкості полотна від приварювання поздовжніх ребер жорсткості скористаємося графіками рис. 6.7. Для середньостатистичного катета 5,5 мм з урахуванням коефіцієнта двостороннього шва  $m_k = 1,07 \cdot 5,5 = 5,9$  мм при шпациї  $a = 600$  мм товщина, при якій напруження наближаються до критичних, дорівнює 7 мм, тобто при товщині 8 мм втрати стійкості не буде.

Напруження від приварювання ребер жорсткості знайдемо через деформації укорочення зовнішньої обшивки  $\Delta L_{3,0} = -1,6$  мм (див. п. 1, другий етап виготовлення). Відносні деформації  $\varepsilon_{3,0} = L_{3,0}/L = -0,16/600 = -0,00027$ , напруження стиску  $\sigma_{3,0} = \varepsilon_{3,0} \cdot E = -0,00027 \cdot 2 \cdot 10^5 = -54$  МПа. Критичні напруження в середній частині панелі  $\sigma_k = 3,6 \cdot E \left(\frac{s}{a}\right)^2 = 3,6 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot (0,8/60)^2 =$

$$= 128 \text{ МПа, на крайках полотна } - \sigma_k = 0,5E \left(\frac{s}{a}\right)^2 = 0,5 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot (0,8/30)^2 =$$

$= 72$  МПа. Таким чином, напруження стиску, які виникають в обшивці, не перевищують критичних і втрата стійкості не очікується.

3. Деформації ребристості викликаються кутовим зломом обшивки від приварювання ребер жорсткості.

$$\text{Знайдемо сумарний кут зламу } \beta_\Sigma = \beta_1 + \beta_2 + \beta_k.$$

Кути 1 і 2, що обумовлені нерівномірним прогріванням листів обшивки, визначимо за графіками рис. 4.7. З урахуванням питомої погонної енергії, яка йде на прогрівання листів,  $q_{п.п}/s^2 = 4950/0,8^2 = 7730$  Дж/см<sup>3</sup> та відносної ширини зони прогрівання при заварюванні шва катетом 5,5 мм  $b/s = 1,7 \cdot 5,5/8 = 1,2$  отримаємо  $\beta_1 = \beta_2 = 0,015$ .

Кут додаткового зламу, обумовленого усадкою наплавленого металу другого шва:

$$\beta_k = 0,02 \left(\frac{k}{s_{п}}\right)^2 = 0,02 \left(\frac{5,5}{8}\right)^2 = 0,01.$$

Загальна кутова деформація після заварювання таврового з'єднання з двох сторін складе  $\beta_{\Sigma} = \beta_1 + \beta_2 + \beta_k = 0,015 + 0,015 + 0,01 = 0,04$ .

Максимальне відхилення листів обшивки від площини

$$f = \frac{\beta a}{8} = \frac{0,04 \cdot 600}{8} = 3 \text{ мм.}$$

Відхилення крайок обшивки від площини

$$f_k = \frac{3\beta b}{4} = \frac{3 \cdot 0,04 \cdot 300}{4} = 9 \text{ мм.}$$

4. Укорочення по довжині та ширині полотна на 1-му етапі виготовлення складає  $-0,8$  і  $-3,2$  мм відповідно, що не перевищує допуск  $+8$  мм. Після приварювання поздовжнього та поперечного набору укорочення вздовж і поперек секції складає  $2,0$  і  $2,95$  мм, що також знаходиться в межах допуску.

Загальний вигин (стрілка прогину) вздовж секції після приварювання набору складає  $-7,1$  мм, тобто  $-7,1/6 = -1,2$  мм на 1 м погонної довжини секції, що не виходить за межі допустимих  $15$  мм ( $2$  мм / 1 пог. м). Вигин поперек секції  $-3,4$  мм ( $-3,4/8 = -0,4$  мм / 1 пог. м) також не перевищує допуск. Прогин обшивки внаслідок кутових деформацій від приварювання набору (ребристість) складає  $3$  мм, що також знаходиться в межах допуску  $6$  мм.

Відхилення від площини крайок полотна внаслідок кутових деформацій від приварювання ребер жорсткості складає  $9$  мм, що дещо перевищує допуск на величину "будиночків" на внутрішньосекційних та монтажних стижах. Цей допуск для товщини до  $8$  мм включно дорівнює товщині, тобто в нашому випадку  $8$  мм.

### 6.10. Завдання для самостійної роботи

Виконати завдання за даними, які наведені в табл. 6.6.

Таблиця 6.6. Варіанти завдань для самостійного розв'язання

| Номер варіанта | <i>L</i> | <i>B</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>h</i> | Номер штабобульба | <i>s<sub>n</sub></i> | <i>s<sub>p</sub></i> | Тип з'єднання |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------------|----------------------|----------------------|---------------|
|                | м        |          |          | мм       |          |                   | мм                   |                      |               |
| 1              | 4        | 6        | 400      | 2        | 300      | 6                 | 5                    | 4                    | C7            |
| 2              | 5        | 7        | 500      | 3        | 400      | 7                 | 6                    | 5                    | C7            |
| 3              | 6        | 4        | 600      | 2        | 500      | 8                 | 7                    | 6                    | C21           |
| 4              | 7        | 5        | 400      | 3        | 300      | 9                 | 8                    | 7                    | C21           |
| 5              | 4        | 6        | 500      | 2        | 400      | 10                | 9                    | 8                    | C25           |
| 6              | 5        | 7        | 600      | 3        | 500      | 12                | 10                   | 4                    | C25           |
| 7              | 6        | 4        | 400      | 2        | 300      | 6                 | 5                    | 5                    | C7            |
| 8              | 7        | 5        | 500      | 3        | 400      | 7                 | 6                    | 6                    | C7            |
| 9              | 4        | 6        | 600      | 2        | 500      | 8                 | 7                    | 7                    | C21           |
| 10             | 5        | 7        | 400      | 3        | 300      | 9                 | 8                    | 8                    | C21           |

Продовж. табл. 6.6

| Номер<br>варіанта | $L$ | $B$ | $b$ | $c$ | $h$ | Номер штабо-<br>бульба | $s_{\Pi}$ | $s_p$ | Тип<br>з'єднання |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------------------------|-----------|-------|------------------|
|                   | м   |     |     | мм  |     |                        | мм        |       |                  |
| 11                | 6   | 4   | 500 | 2   | 400 | 10                     | 9         | 4     | C25              |
| 12                | 7   | 5   | 600 | 3   | 500 | 12                     | 10        | 5     | C25              |
| 13                | 4   | 6   | 400 | 2   | 300 | 6                      | 5         | 6     | C7               |
| 14                | 5   | 7   | 500 | 3   | 400 | 7                      | 6         | 7     | C7               |
| 15                | 6   | 4   | 600 | 2   | 500 | 8                      | 7         | 8     | C21              |
| 16                | 7   | 5   | 400 | 3   | 300 | 9                      | 8         | 4     | C21              |
| 17                | 4   | 6   | 500 | 2   | 400 | 10                     | 9         | 5     | C25              |
| 18                | 5   | 7   | 600 | 3   | 500 | 12                     | 10        | 6     | C25              |
| 19                | 6   | 4   | 400 | 2   | 300 | 6                      | 5         | 7     | C7               |
| 20                | 7   | 5   | 500 | 3   | 400 | 7                      | 6         | 8     | C7               |

**Задача 6.1.** Плоске полотно з низьковуглецевої сталі зварюється з листів (див. рис. 6.3) автоматом під флюсом. Товщина листів  $s_{\Pi}$ .

1. Визначте погонну енергію зварювання.
2. Знайдіть загальні зварювальні деформації полотна після зварювання.
3. Визначте величину кутового зламу.
4. Призначте оптимальний тип з'єднання з погляду зменшення кутового зламу.
5. Порівняйте отримані значення очікуваних деформацій з допустимими.

**Задача 6.2.** Плоска секція з набором одного напрямку з низьковуглецевої сталі (див. рис. 6.4,*a*) зварюється з листів товщиною  $s_{\Pi}$  та несиметричних штабобульбів. Стики обшивки зварюються під флюсом. Набір зварюється між собою та до обшивки приварюється в захисному газі, з'єднання ТЗ із катетом 5 мм. Секція належить до 1-ї групи за допусками на бухтинуватість.

1. Визначте погонну енергію зварювання.
2. Знайдіть загальні зварювальні деформації секції після зварювання.
3. Визначте величину ребристості обшивки.
4. Визначте ймовірність втрати стійкості листів обшивки та очікувану величину бухтин.
5. Порівняйте отримані значення очікуваних деформацій з допустимими.

**Задача 6.3.** Плоска секція з набором двох напрямів з низьковуглецевої сталі (див. рис. 6.5) зварюється з листів товщиною  $s_{\Pi}$ , симетричних штабобульбів та листів поперечного набору товщиною  $s_p$ . Стики обшивки та набір головного напрямку (штабобульби) до обшивки зварюються під флюсом. Перехресний набір зварюється з набором головного напрямку та до обшивки приварюється в захисному газі. Усі з'єднання ТЗ із катетом 5 мм. Секція належить до 2-ї групи за допусками на бухтинуватість.

1. Визначте погонну енергію зварювання.
2. Знайдіть загальні зварювальні деформації секції після зварювання.
3. Визначте величину ребристості обшивки після приварювання набору головного напрямку.
4. Визначте ймовірність втрати стійкості листів обшивки та очікувану величину бухтин після приварювання набору головного напрямку.
5. Порівняйте отримані значення очікуваних деформацій з допустимими.



## Розділ 7. НАПРУЖЕННЯ І ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ПАЯННІ ТА ДИФУЗІЙНОМУ ЗВАРЮВАННІ

### 7.1. Механізм та основні причини утворення власних напружень і деформацій при дифузійному зварюванні та паянні

Дифузійне зварювання (ДЗ) та паяння відрізняються від дугового зварювання відсутністю плавлення основного металу, а також практично рівномірним нагріванням у зоні з'єднання. Тому головною причиною утворення напружень і деформацій, зазвичай, є *неоднорідність з'єднаних матеріалів та відмінність їх фізико-механічних властивостей*.

Механізм утворення напружень і деформацій в умовах дифузійного зварювання та паяння відрізняється від механізму при зварюванні плавленням. При зварюванні плавленням із застосуванням місцевого нагрівання їх поява та накопичення починаються вже на стадії нагрівання, тоді як при паянні й дифузійному зварюванні із загальним рівномірним нагріванням цей процес починається тільки після утворення монолітного з'єднання (скріплення поверхонь при дифузійному зварюванні та кристалізації припою при паянні), тобто на стадії охолодження. Дифузійне зварювання також відрізняється тим, що напруження і деформації в процесі зварювання є одним з важливих параметрів режиму та необхідною умовою утворення якісного з'єднання. Саме напруження та деформації в зоні стику забезпечують утворення фізичного контакту з'єднаних поверхонь, деформаційну активацію і впливають на об'ємну взаємодію матеріалів (рекристалізацію та дифузію).

Залишкові напруження при ДЗ та паянні, як і при зварюванні плавленням, зазвичай належать до небажаних, оскільки можуть створювати проблеми в забезпеченні точності й міцності готових вузлів, а також призводити до їх руйнування при охолодженні або експлуатації в умовах термоцикування. На рис. 7.1 і 7.2 показані деякі приклади таких проблем.



Рис. 7.1. Деформація каналу МГД-пристрою після паяння (а) та його вигляд після застосування заходів щодо зменшення залишкових напружень (б)

У вузлі МГД-пристрою у вигляді тонкостінного каналу з ніобію, до якого припаяні мідні шини, залишкові напруження стиску після паяння призвели до втрати стійкості тонкої стінки каналу і зробили його непридатним до подальшого використання (див. рис. 7.1,*а*). Деяка зміна конструкції і технологічного процесу паяння дозволили зменшити залишкові напруження та отримати якісний вузол (див. рис. 7.1,*б*).



Рис. 7.2. Руйнування металографітового кільця після паяння

У металографітовому паяному кільці напруження розтягу призвели до руйнування крихкого графіту (див. рис. 7.2). Якісні з'єднання були отримані лише після того, як були вжиті певні конструктивні та технологічні заходи щодо зменшення залишкових напружень.

Механізм утворення власних напружень і деформацій у спаяному з'єднанні можна розглянути на прикладі двошарового бруса (рис. 7.3). При зміні температури незв'язаних між собою різнорідних шарів бруса кожний з них змінює свою довжину по-різному, як показано на рис. 7.3,*б*. Кожний шар має свою температурну деформацію, пропорційну зміні температури та ТКЛР.

У монолітному з'єднанні зміщення по границі з'єднання неможливе, тому утворюються власні силові деформації та напруження в металі й деформації всієї конструкції (вузла) як єдиного цілого (див. рис. 7.3,*в*).

Залишкові напруження тим більші, чим більші різниця ТКЛР та жорсткості (модулі пружності) матеріалів, а також зміна температури після кристалізації припою. Залишкові деформації, що виникають при цьому, будуть залежати також від форми та розмірів вузла.

Процеси паяння та ДЗ широко застосовують для з'єднання різнорідних матеріалів, фізико-механічні властивості яких можуть суттєво відрізнятись. Теплофізичні властивості деяких матеріалів наведено в табл. 7.1. Саме різниця ТКЛР з'єднуваних матеріалів є основною причиною утворення напружень і деформацій при паянні та ДЗ.

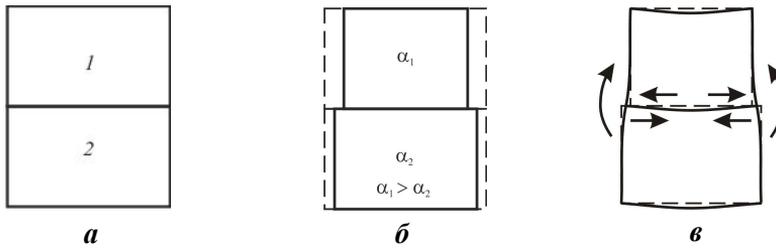


Рис. 7.3. Схема утворення власних напружень і деформацій при паянні різних матеріалів 1 і 2:

*a* – до охолодження; *б* – після охолодження у вільному стані;

*в* – після охолодження спаяного з'єднання

Таблиця 7.1. Теплофізичні властивості деяких матеріалів

| Матеріал             | $T_{\text{плавль}},$<br>°C | $T,$<br>°C | ТКЛР в інтервалі<br>$20 \dots T, 1/^\circ\text{C}$ | Модуль пружності,<br>$10^5$ МПа | Границя плинності<br>(границя міцності), МПа |
|----------------------|----------------------------|------------|--|---------------------------------|--|
| Алюміній             | 660                        | 20         | 23,5   | 0,7                             | (80...100)                                   |
|                      |                            | 100        | 23,9   | –                               | –  |
|                      |                            | 200        | 24,3   | –                               | –  |
|                      |                            | 300        | 25,3   | –                               | –  |
|                      |                            | 400        | 26,5   | –                               | –  |
| Вольфрам             | 3410                       | 20         | 4,5  | 3,7...4,1                       | (1180...1375)                                |
|                      |                            | 100        | 4,5  | –                               | –  |
|                      |                            | 500        | 4,6  | –                               | –  |
|                      |                            | 1000       | 4,6  | –                               | –  |
|                      |                            | 2000       | 5,4  | –                               | –  |
|                      |                            | 3000       | 6,6  | –                               | –  |
| Залізо ( $\alpha$ )  | 1539                       | 20         | 11,1   | 2,1                             | 120 (260)                                    |
|                      |                            | 100        | 12,2   | –                               | –  |
|                      |                            | 200        | 12,9   | –                               | –  |
|                      |                            | 400        | 13,8   | –                               | –  |
|                      |                            | 600        | 14,5   | –                               | –  |
|                      |                            | 800        | 14,6   | –                               | –  |
| Золото               | 1064                       | 20         | 14,1   | 0,78                            | (100...140)                                  |
|                      |                            | 100        | 14,2   | –                               | –  |
|                      |                            | 500        | 15,2   | –                               | –  |
|                      |                            | 900        | 16,7   | –                               | –  |
| Мідь (після відпалу) | 1083                       | 20         | 17,0   | 1,13                            | (216...235)                                  |
|                      |                            | 100        | 17,1   | 1,05                            | –  |
|                      |                            | 200        | 17,2   | 0,955                           | –  |
|                      |                            | 500        | 18,3   | 0,5                             | –  |
|                      |                            | 1000       | 20,3   | –                               | –  |
| Молібден             | 2620                       | 20         | 6,2  | 3,22                            | 445 (840...1400)                             |
|                      |                            | 500        | 5,7  | 2,87                            | (245...455)                                  |
|                      |                            | 1000       | 5,75   | 2,52                            | 74 (140...210)                               |
|                      |                            | 1500       | 6,51   | –                               | –  |
|                      |                            | –          | –  | –                               | –  |
| Нікель               | 1453                       | 20         | 13,3   | 2,05                            | 120 (395...490)                              |
|                      |                            | 100        | 13,3   | –                               | –  |
|                      |                            | 200        | 13,9   | –                               | –  |
|                      |                            | 300        | 14,4   | –                               | –  |
|                      |                            | 400        | 14,8   | –                               | –  |
|                      |                            | 500        | 15,2   | –                               | –  |
|                      |                            | 900        | 16,3   | –                               | –  |

178 НАПРУЖЕННЯ ТА ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ЗВАРЮВАННІ І ПАЯННІ

Продовж. табл. 7.1

| Матеріал                  | $T_{\text{плавль}},$<br>°C | $T,$<br>°C | ТКЛР в інтервалі<br>20... $T$ , 1/°C | Модуль пруж-<br>ності, $10^5$ МПа | Границя плинності<br>(границя міцності), МПа  |
|---------------------------|----------------------------|------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---|
| Ніобій                    | 2500                       | 20<br>800  | 7,2...9,5                            | 0,94...1,05                       | 210 (345...490)<br>(312)                      |
| Олово                     | 232                        | 20         | 23,5                                 | –                                 | (16,6)  |
|                           |                            | 100        | 23,8                                 | –                                 | –   |
|                           |                            | 200        | 24,2                                 | –                                 | –   |
| Свинець                   | 327                        | 20         | 29,0                                 | 0,16                              | (12...13)                                     |
|                           |                            | 100        | 29,1                                 | –                                 | –   |
|                           |                            | 200        | 30,0                                 | –                                 | –   |
|                           |                            | 300        | 31,3                                 | –                                 | –   |
| Срібло                    | 961                        | 20         | 19,1                                 | 0,76                              | (98...147)                                    |
|                           |                            | 100        | 19,6                                 | –                                 | –   |
|                           |                            | 500        | 20,6                                 | –                                 | –   |
|                           |                            | 900        | 22,4                                 | –                                 | –   |
| Титан                     | 1668                       | 20         | 8,9                                  | 1,08                              | 150 (245...345)                               |
|                           |                            | 100        | 8,8                                  | –                                 | –   |
|                           |                            | 200        | 9,1                                  | –                                 | –   |
|                           |                            | 400        | 9,4                                  | –                                 | 90  |
|                           |                            | 600        | 9,7                                  | –                                 | 65  |
|                           |                            | 800        | 9,9                                  | –                                 | –   |
| Хром                      | 1890                       | 20         | 8,2                                  | 2,0                               | (294...686)                                   |
|                           |                            | 100        | 8,2                                  | –                                 | –   |
|                           |                            | 400        | 8,4                                  | –                                 | –   |
|                           |                            | 700        | 9,4                                  | –                                 | –   |
| Цинк                      | 419                        | 20         | 31,0                                 | 0,9                               | (200...250)                                   |
|                           |                            | 100        | 31,0                                 | –                                 | –   |
|                           |                            | 200        | 33,0                                 | –                                 | –   |
|                           |                            | 300        | 34,0                                 | –                                 | –   |
| X18H10T                   | 1570                       | 20         | 16,0                                 | 2,0                               | 196 (490)                                     |
|                           |                            | 100        | 16,1                                 | –                                 | –   |
|                           |                            | 300        | 17,4                                 | –                                 | –   |
|                           |                            | 500        | 18,2                                 | –                                 | –   |
|                           |                            | 700        | 19,1                                 | –                                 | –   |
| Графіт                    | –                          | –          | 2,0                                  | 0,1                               | (55 – стиск)                                  |
| Кераміка<br>( $Al_2O_3$ ) | –                          | 200        | 6,0                                  | 3,5...3,6                         | (180...190 – розтяг,                          |
|                           |                            | 500        | 7,0                                  |                                   | 320 – згин,                                   |
|                           |                            | 900        | 7,5                                  |                                   | 2000 – стиск)                                 |
| Кераміка<br>(SiC)         | –                          | –          | 4,0...5,2                            | 4,0...4,4                         | (62 – розтяг,<br>200 – згин,<br>1000 – стиск) |
| Ковар                     | 1450                       | 200        | 5,5                                  | 2,0                               | 250   |
|                           |                            | 300        | 5,1                                  | –                                 | –   |
|                           |                            | 400        | 4,9                                  | –                                 | –   |
|                           |                            | 500        | 6,2                                  | –                                 | –   |
|                           |                            | 600        | 7,9                                  | –                                 | –   |
|                           |                            | 700        | 9,3                                  | –                                 | –   |
|                           |                            | 800        | 10,4                                 | –                                 | –   |
|                           |                            | 900        | 11,5                                 | –                                 | –   |

## 7.2. Інженерні методи розрахунку, засновані на гіпотезі плоских перерізів

Розглянемо деформації та напруження в багатошаровому брусі: симетричне (тришарове, так зване компенсоване), і несиметричне (некомпенсоване) з'єднання.

**Тришаровий брус (симетричне компенсоване з'єднання).** З'єднання називається компенсованим, оскільки при рівності площ та фізико-механічних властивостей зовнішніх шарів вигин після охолодження відсутній (рис. 7.4).

Умовою спільності деформацій елементів з'єднання є

$$\alpha_1 \Delta T_1 - \alpha_2 \Delta T_2 = \varepsilon_2 - \varepsilon_1, \quad (7.1)$$

де  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$  – ТКЛР матеріалів 1 і 2 відповідно;  $\Delta T_1$  і  $\Delta T_2$  – зменшення температури елементів при охолодженні після паяння;  $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_2$  – силові деформації, що виникають в елементах з'єднання.

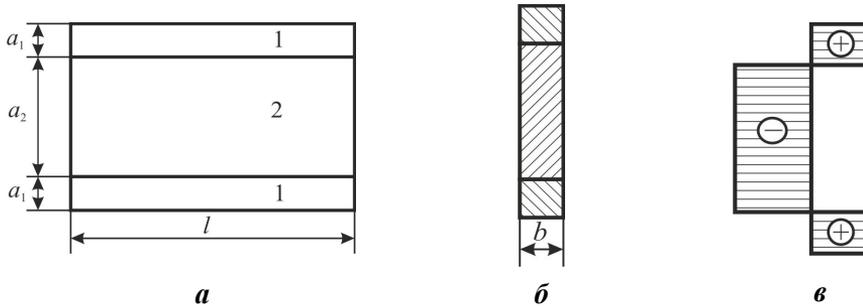


Рис. 7.4. Тришаровий брус (а), його поперечний переріз (б) та еюра залишкових напружень у ньому (в)

Умовою рівноваги такого з'єднання є

$$2\sigma_1 F_1 + \sigma_2 F_2 = 0,$$

або при виникненні тільки пружних деформацій ( $\sigma = E\varepsilon$ )

$$2\varepsilon_1 E_1 F_1 + \varepsilon_2 E_2 F_2 = 0, \quad (7.2)$$

де  $E_1$  та  $E_2$  – модулі пружності відповідно матеріалів 1 і 2;  $F_1$  та  $F_2$  – площі поперечних перерізів відповідно;  $\sigma_1$  і  $\sigma_2$  – напруження відповідно в матеріалах 1 і 2.

Розв'язуючи систему рівнянь спільності деформацій (7.1) та рівноваги (7.2), отримаємо наступні вирази:

для власних деформацій

$$\varepsilon_1 = -\frac{\alpha_1 \Delta T_1 - \alpha_2 \Delta T_2}{1 + 2E_1 F_1 / E_2 F_2}, \quad \varepsilon_2 = \frac{\alpha_1 \Delta T_1 - \alpha_2 \Delta T_2}{1 + E_2 F_2 / 2E_1 F_1};$$

для власних напружень

$$\sigma_1 = -E_1 \frac{\alpha_1 \Delta T_1 - \alpha_2 \Delta T_2}{1 + 2E_1 F_1 / E_2 F_2}; \quad \sigma_2 = E_2 \frac{\alpha_1 \Delta T_1 - \alpha_2 \Delta T_2}{1 + E_2 F_2 / 2E_1 F_1}. \quad (7.3)$$

Поперечні нормальні та дотичні напруження при виконанні гіпотези плоских перерізів дорівнюють нулю у всьому об'ємі з'єднання.

**Двошаровий брус (несиметричне некомпенсоване з'єднання).** У такому з'єднанні, як правило, присутній вигин після охолодження, тому його називають некомпенсованим (рис. 7.5).

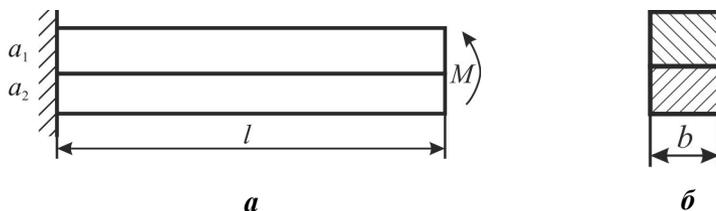


Рис. 7.5. Двошаровий брус (а) та його поперечний переріз (б)

При паянні несиметричних з'єднань нормальні напруження визначаються за виразами, аналогічними (7.3):

$$\sigma_1 = -E_1 \frac{\alpha_1 \Delta T_1 - \alpha_2 \Delta T_2}{1 + E_1 F_1 / E_2 F_2}; \quad \sigma_2 = E_2 \frac{\alpha_1 \Delta T_1 - \alpha_2 \Delta T_2}{1 + E_2 F_2 / E_1 F_1}. \quad (7.4)$$

Однак на ці напруження накладаються напруження від вигину моментом

$$M = \frac{\sigma_1 F_1 a}{2} = -\frac{\sigma_2 F_2 a}{2},$$

де  $a = a_1 + a_2$  – загальна висота вузла.

Розподіл деформацій по висоті перерізу при вигині моментом  $M$ , виходячи з гіпотези плоских перерізів, лінійний:

$$\varepsilon(z_i) = \frac{M(z_i - z_0)}{E_0 J_{x0}}.$$

Якщо вважати деформації суто пружними, то напруження

$$\sigma(z_i) = \varepsilon(z_i) E(z_i) = \frac{M(z_0 - z) E(z_i)}{E_0 J_{x0}}, \quad (7.5)$$

де  $z_i$  – ордината точки, в якій визначаються деформації і напруження по висоті перерізу відносно осі порівняння;  $E(z_i)$  – модуль пружності в даній точці;  $E_0 I_{x0}$  – пружний момент інерції перерізу складеного стрижня, який можна знайти за формулою

$$E_0 I_{x0} = E_1 \frac{b_1 a_1^3}{12} + E_2 \frac{b_2 a_2^3}{12} + E_1 a_1 b_1 (z_1 - z_0)^2 + E_2 a_2 b_2 (z_2 - z_0)^2, \quad (7.6)$$

де  $z_1$  і  $z_2$  – ординати ЦВ окремих елементів перерізу щодо осі порівняння;  $z_0$  – ордината пружного ЦВ по висоті складеного перерізу, що визначається за рівнянням

$$z_0 = \frac{E_1 a_1 b_1 z_1 + E_2 a_2 b_2 z_2}{a_1 b_1 E_1 + a_2 b_2 E_2}. \quad (7.7)$$

З урахуванням принципу накладання в будь-якій точці перерізу напруження будуть дорівнювати алгебраїчній сумі напружень від розтягу-стиску (7.4) та вигину (7.5).

Епюри напружень у перерізі двошарового бруса показані на рис. 7.6.

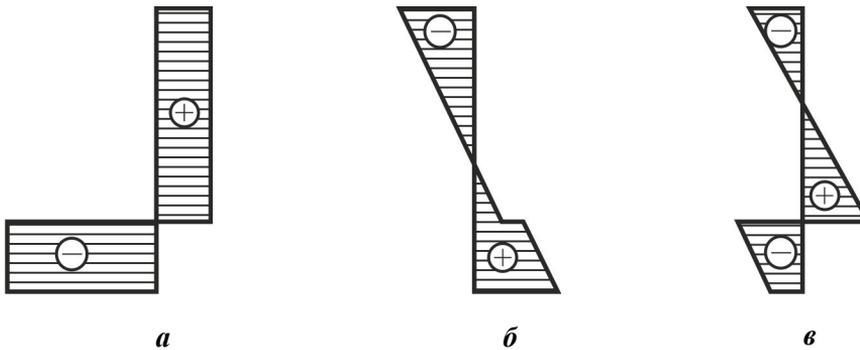


Рис. 7.6. Епюри напружень у перерізі двошарового бруса після охолодження від сил розтягу-стиску (а), згинального моменту (б) та сумарних напружень (в)

Максимальна стрілка прогину складеного стрижня під дією згинального моменту

$$f = \frac{Ml^2}{8E_0 I_{x0}}. \quad (7.8)$$

**Двошарова втулка.** Втулки, які поєднують у собі достатньо пластичний внутрішній шар зі сталі ( $\alpha_1$ ) з високоміцним та зносостійким зовнішнім шаром з твердого сплаву ( $\alpha_2$ ), можуть використовуватися як прокатні валки (рис. 7.7).

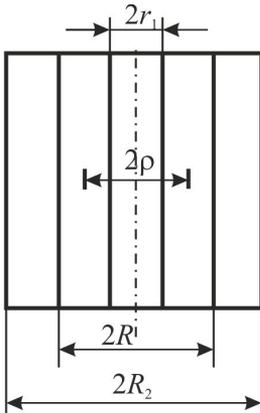


Рис. 7.7. Загальний вигляд вузла двошарової втулки ( $\alpha_1 > \alpha_2$ )

Для аналітичного розв'язання задачі визначення напружень у двошарових втулках можуть бути використані формули, які рекомендовані в літературі, зокрема: для радіальних напружень у внутрішньому шарі:

$$\sigma_r = -\frac{p_k R^2}{R^2 - r_1^2} \left( 1 - \frac{r_1^2}{\rho^2} \right),$$

для радіальних напружень у зовнішньому шарі:

$$\sigma_r = \frac{p_k R^2}{R_2^2 - R^2} \left( 1 - \frac{R_2^2}{\rho^2} \right),$$

для колових напружень у внутрішньому шарі:

$$\sigma_t = -\frac{p_k R^2}{R^2 - r_1^2} \left( 1 + \frac{r_1^2}{\rho^2} \right);$$

для колових напружень у зовнішньому шарі:

$$\sigma_t = \frac{p_k R^2}{R_2^2 - R^2} \left( 1 + \frac{R_2^2}{\rho^2} \right),$$

де  $r_1$  – внутрішній радіус втулки;  $R$  – радіус по межі розподілу шарів;  $\rho$  – змінний радіус;  $R_2$  – зовнішній радіус втулки;  $p_k$  – тиск на межі поділу шарів, що знаходиться за рівнянням

$$p_k = \frac{\Delta/2R}{\frac{1}{E_1} \left( \frac{1+k_1^2}{1-k_1^2} - \nu_1 \right) + \frac{1}{E_2} \left( \frac{1+k_2^2}{1-k_2^2} + \nu_2 \right)},$$

де  $k_1 = r_1/R$ ,  $k_2 = R/R_2$  – відношення радіусів шарів;  $E_1, E_2, \nu_1, \nu_2$  – модулі пружності та коефіцієнти Пуассона матеріалів відповідно внутрішнього й зовнішнього шарів;  $\Delta = (\alpha_1 - \alpha_2)TR$  – натяг ( $\alpha_1$  та  $\alpha_2$  – ТКЛР матеріалів внутрішнього й зовнішнього шарів відповідно;  $T$  – температура кристалізації припою або ДЗ).

У разі однакових пружних властивостей матеріалів шарів вираз значно спрощується:

$$P_k = \frac{E(\Delta/2R)}{\frac{1+k_1^2}{1-k_1^2} + \frac{1+k_2^2}{1-k_2^2}}.$$

Осьові напруження можна знайти з умови рівноваги. Вони визначаються аналогічно двошаровому брусу за рівняннями

$$\sigma_1 = -E_1 \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) \Gamma}{1 + E_1 F_1 / E_2 F_2}; \quad \sigma_2 = E_2 \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) \Gamma}{1 + E_2 F_2 / E_1 F_1},$$

де  $F_1 = \pi(R^2 - r_1^2)$  і  $F_2 = \pi(R_2^2 - R^2)$  – площі перерізів відповідно внутрішнього та зовнішнього шарів.

Наведені формули засновані на гіпотезі плоских перерізів та передбачають пружну роботу матеріалу у всьому об'ємі вузла. У реальних умовах паяння та ДЗ виникаючі напруження досягають границі плинності матеріалу і з'являються пластичні деформації. Це відбивається на напружено-деформованому стані: максимальні напруження зменшуються, а деформації збільшуються. На інженерному рівні врахувати вплив пластичних деформацій неможливо.

Розглянуті пружні методи розв'язання деяких задач можуть використовуватися тільки для наближеної оцінки напруженого стану після паяння та ДЗ. Вони не дають достатньо повної картини, особливо поблизу торцевих поверхонь, та не враховують пластичних деформацій, які виникають при зміні температури у значному діапазоні. Вони прості й зручні в розрахунку, але не дозволяють відповісти на багато питань, які постають при з'єднанні навіть простих зразків. Для отримання більш повної та точної картини напружено-деформованого стану необхідно використовувати методи теорії пружності й пластичності, зокрема МСЕ, на якому засновані сучасні програмні комплекси комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану.

### 7.3. Деякі результати комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану

**7.3.1. Двошаровий брус.** На рис. 7.8 показано плоску модель двошарового бруса, побудовану з прямокутних скінченних елементів, та її вигляд після охолодження. Модель відображає поведінку бруса як при ДЗ, так і паянні, якщо не враховувати прошарок припою внаслідок його малої товщини. З рисунка видно, що за рахунок більшого скорочення матеріалу верхнього шару брус згинається опуклістю вниз. Добре видно поворот перерізів та їх викривлення на торцях.

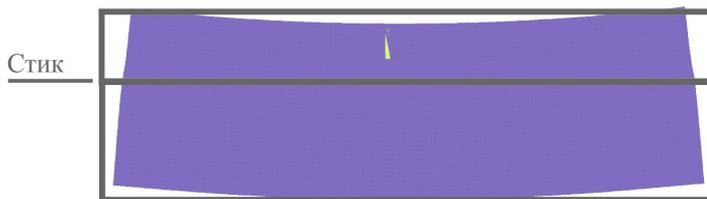


Рис. 7.8. Скінченноелементна модель двошарового бруса до і після охолодження

Поля напружень у цьому брусі показані на рис. 7.9, на якому зміна густини затемнення характеризує зміну рівня напружень. Аналіз полів свідчить, що на більшій частині довжини бруса поздовжні напруження змінюються тільки в поперечному напрямі, досягаючи максимальної величини на межі поділу шарів (див. рис. 7.9,*а*), поперечні та дотичні напруження відсутні (див. рис. 7.9,*б,в*). Тільки поблизу торців бруса поздовжні напруження змінюються як в поздовжньому, так і в поперечному напрямках. Поздовжні напруження біля торців зменшуються, з'являються поперечні та дотичні напруження. Останні досягають максимуму поблизу торця (рис. 7.10). На торці поздовжні та дотичні напруження відсутні, поперечні досягають максимальних значень. Рівень максималь-

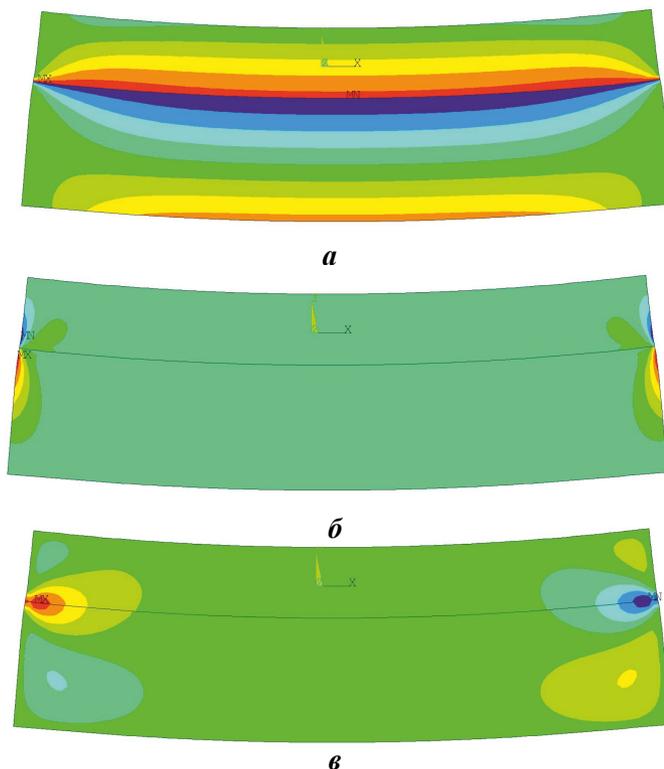


Рис. 7.9. Поля поздовжніх (*а*), поперечних (*б*) та дотичних (*в*) напружень у двошаровому брусі після охолодження

них поперечних напружень тут близький до максимальних поздовжніх у середній частині бруса, а максимальні дотичні складають дещо більше від половини цієї величини. Протяжність кінцевих зон з викривленими перерізами та складним напруженим станом не перевищує загальної висоти бруса.

Порівняння епюр поздовжніх напружень у середньому перерізі бруса та поблизу торця (рис. 7.11) підтверджує особливості характеру деформації кінцевих перерізів. У середній частині бруса епюра поздовжніх напружень повністю збігається з епюрою, отриманою за розрахунком з використанням виразів (7.4) та (7.5), поблизу торців епюри суттєво відрізняються внаслідок викривлення перерізів.

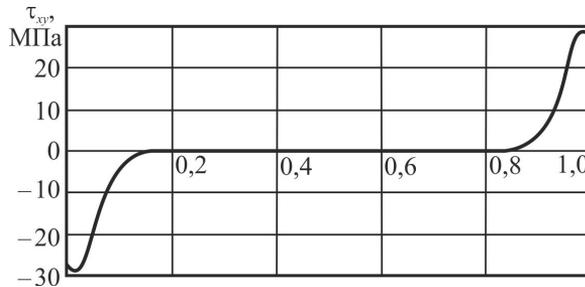


Рис. 7.10. Епюра дотичних напружень  $\tau_{xy}$  уздовж межі поділу двошарового бруса

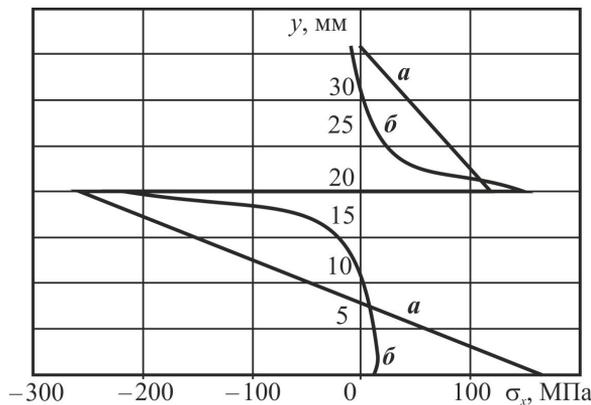


Рис. 7.11. Епюри поздовжніх напружень у середньому перерізі (а) та поблизу торця (б) двошарового бруса

**7.3.2. Двошарова втулка.** На рис. 7.12 показано вісесиметричні моделі двошарових втулок після ДЗ, які побудовані з кільцевих скінченних елементів прямокутного перерізу. Модель відображає також напружено-деформований стан спаяних втулок, якщо не враховується прошарок припою. Унаслідок симетрії втулок відносно середини її висоти при моделюванні розглядалася їх нижня половина з відповідним закріпленням вузлів по горизонтальній осі (див. рис. 7.12, б, з).

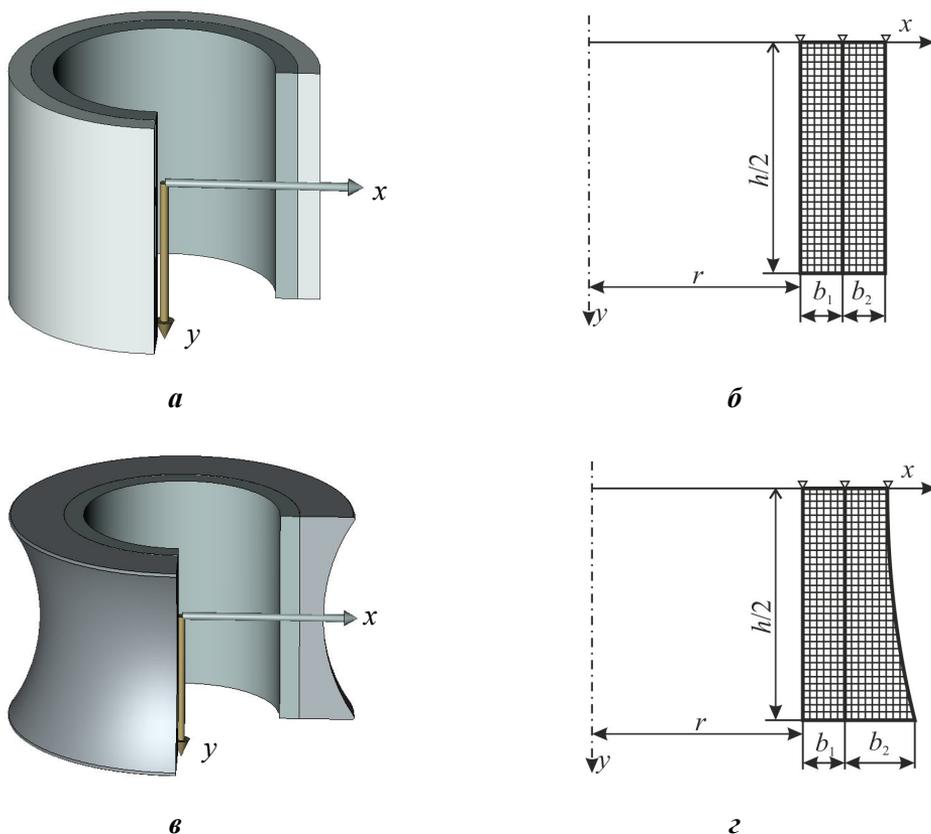


Рис. 7.12. Загальний вигляд вузлів (**a**, **в**) та перерізу моделей 1 (**б**) і 2 (**з**):  
 $h$  – загальна висота вузла;  $b_1$  і  $b_2$  – товщини відповідно внутрішнього та зовнішнього шарів;  $r$  – внутрішній радіус вузла

На рис. 7.13 показано поля залишкових напружень, які отримані методом комп'ютерного моделювання, в перерізі двохшарової втулки після ДЗ (паяння). Властивості для матеріалу внутрішнього шару (низьковуглецевої сталі) прийняті такими: модуль пружності  $E_1 = 2 \cdot 10^5$  МПа, термічний коефіцієнт лінійного розширення  $\alpha_1 = 12 \cdot 10^{-6}$   $1/^\circ\text{C}$ , границя плинності  $\sigma_T = 200$  МПа. Для матеріалу зовнішнього шару – як для твердого сплаву:  $E_2 = 4 \cdot 10^5$  МПа,  $\alpha_2 = 4 \cdot 10^{-6}$   $1/^\circ\text{C}$ , матеріал передбачався таким, що деформується тільки пружно.

З рис. 7.13 видно, що після охолодження вузла утворюється досить складний об'ємний напружений стан з достатньо великими напруженнями на окремих ділянках. У безпосередній близькості від торцевої поверхні (на відстані, меншій від товщини шару) радіальні напруження  $\sigma_x$  помітно збільшуються, особливо в зовнішньому шарі з жорсткішого матеріалу, та найбільших значень досягають на торцевій поверхні зовнішнього шару в безпосередній близькості від стику шарів (див. рис. 7.13, **a**). Оскільки це напруження розтягу, то вони небезпечні для матеріалу зовнішнього шару.

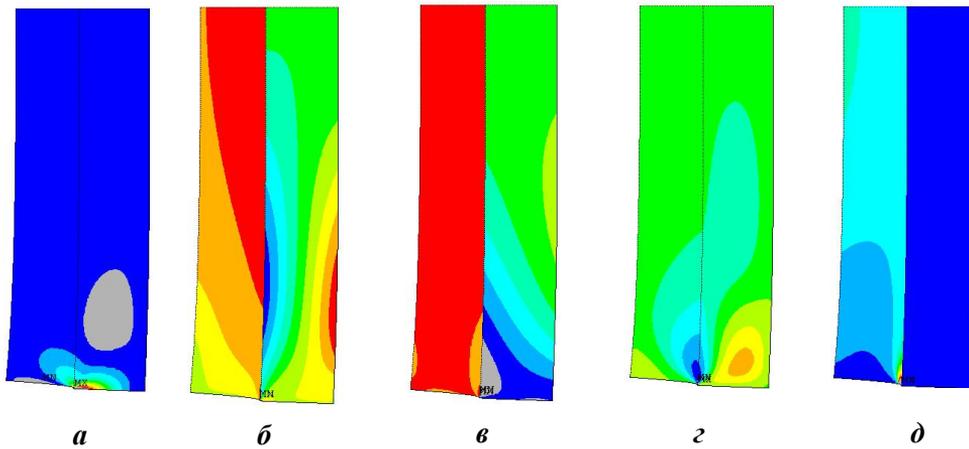


Рис. 7.13. Поля радіальних (а), осьових (б), колових (в) і дотичних (г) напружень та пластичних деформацій (д)

Осьові напруження  $\sigma_y$  (див. рис. 7.13, б) розподілені по всьому перерізу, у внутрішньому шарі переважають напруження розтягу, а в зовнішньому – стиску. Величина цих напружень в обох шарах зменшується при віддаленні від стику та наближенні до торців. Тангенціальні напруження  $\sigma_z$  (див. рис. 7.13, в) також є напруженнями розтягу у внутрішньому шарі та напруженнями стиску в зовнішньому. Очевидно, що ці напруження безпечні для матеріалу зовнішнього шару, який має велику міцність при стиску. Дотичні напруження  $\tau_{xy}$  (див. рис. 7.13, г) на більшій частині перерізу малі. Найбільшої величини вони досягають у матеріалі зовнішнього шару в стику поблизу торцевої поверхні. Пластичні деформації (див. рис. 7.13, д) зосереджені в матеріалі внутрішнього шару поблизу торців.

Аналіз полів напружень показує, що найбільш небезпечною щодо утворення тріщин є зона на торцевій поверхні поблизу стику (поверхні поділу шарів). На епюрах головних напружень розтягу  $\sigma_1$  уздовж торцевої поверхні (рис. 7.14) спостерігається їх різке зростання в цій зоні. У зовнішньому шарі, матеріал якого нездатний деформуватися пластично, ймовірність утворення тріщини достатньо велика.

Порівняння полів напружень та епюр для втулок з різним співвідношенням товщини шарів (див. рис. 7.14) показує, що при зменшенні товщини внутрішнього шару (з менш міцного і достатньо пластичного матеріалу) та відповідному збільшенні товщини зовнішнього (з твердого сплаву) рівень напружень розтягу в твердому сплаві знижується. При зворотній зміні співвідношення товщини максимальні напруження розтягу також знижуються.

Найбільш несприятливим випадком є рівність товщин. Тому при виборі співвідношення товщини шарів слід по можливості зменшувати товщину одного із шарів та збільшувати товщину іншого.

Порівняння полів напружень у втулках з прямолінійною (модель 1) і криволінійною (модель 2) формами твірної зовнішньої поверхні (див. рис. 7.11) показує, що при однакових властивостях матеріалів шарів та товщині в середній частині (посередині висоти) втулки рівень напружень у небезпечній зоні відрізняється мало, в межах 5...10 % (див. рис. 7.14, криві 2 і 4). Таким чином, основним визначальним для напружено-деформованого стану чинником крім термомеханічних властивостей є співвідношення товщини шарів.

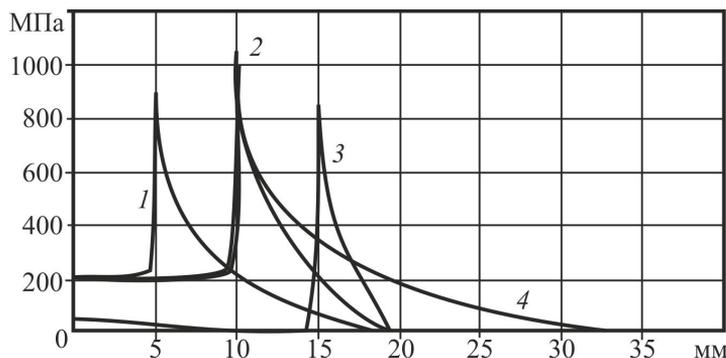


Рис. 7.14. Епюри головних напружень розтягу  $\sigma_1$  уздовж торцевої поверхні в двошарових втулках моделі 1 при різних товщинах шарів:  
1 – 5 + 15 мм; 2 – 10 + 10 мм; 3 – 15 + 5 мм – та моделі 2 при товщинах 10 + 10 мм (4)

**7.3.3. Складений циліндр та брус. З'єднання циліндричних деталей та брусь торцевими поверхнями.** У зв'язку із симетрією вузлів (рис. 7.15, а) відносно двох вертикальних площин досліджувалася модель однієї чверті з відповідними закріпленнями по двох гранях (див. рис. 7.15, б).

Порівняння полів напружень показує, що характер напруженого стану вузлів круглого і квадратного перерізів практично однаковий. Зміна температури на 100 °С у з'єднанні матеріалів з різними ТКЛР створює в зоні стику

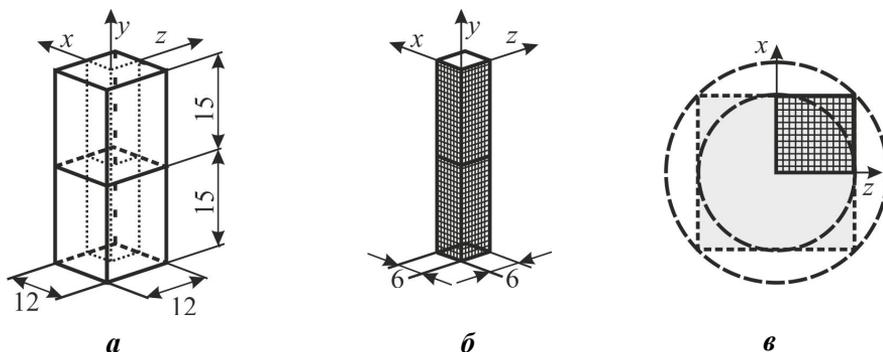


Рис. 7.15. Загальний вигляд вузла (а) і його скінченноелементна модель (б) та напрямки побудови епюр (в)

складний об'ємний напружений стан. При цьому радіальні напруження  $\sigma_x$ , направлені паралельно площині стику, досягають максимальної величини в площині стику (рис. 7.16, *а*). При зменшенні температури вони – розтягу в матеріалі з більшим ТКЛР і стиску в матеріалі з меншим ТКЛР. Осьові напруження  $\sigma_y$ , перпендикулярні до площини стику, на більшій його частині малі й лише на зовнішній поверхні зразка поза стиком збільшуються до рівня максимальних поперечних (радіальних) (див. рис. 7.16, *б*). Знаки їх – протилежні поперечним. Дотичні напруження майже лінійно змінюються від нуля на осі зразка до 0,6 максимальних нормальних поблизу зовнішньої поверхні (див. рис. 7.16, *в*). Еквівалентні напруження змінюються аналогічно: від мінімальних у середній частині стику (на осі зразка) до максимальних поблизу зовнішньої поверхні (див. рис. 7.16, *г*). Такий складний напружений стан створює сприятливі умови для пластичних деформацій саме в районі стику за рахунок достатньо великих еквівалентних напружень. Цю обставину доцільно використовувати для активації процесу утворення з'єднання при ДЗ, циклічно змінюючи температуру в деякому інтервалі.

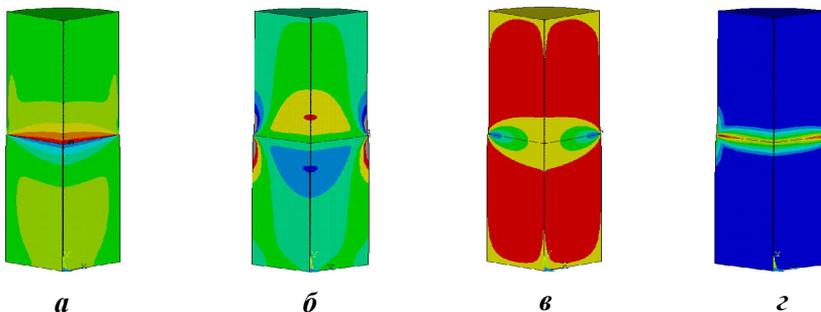


Рис. 7.16. Поля поперечних (радіальних) (*а*), осьових (*б*), дотичних (*в*) і еквівалентних (*г*) напружень у циліндричних вузлах при зміні температури на 100 °С

**7.3.4. Складена втулка.** На рис. 7.17 показано загальний вигляд та віссиметричну модель вузла типу "втулка–втулка" з різномірних матеріалів 1, 2, побудовану з кільцевих скінченних елементів прямокутного перерізу. Таку модель можна застосовувати як для дифузійного зварювання, так і для паяння втулок, якщо не враховувати прошарок припою внаслідок його малої товщини. Досліджувалися поля напружень при різних варіантах навантаження: стиском при напруженнях 40 МПа матеріалів різної жорсткості (варіант 1), нагріванні та охолодженні на 100 °С матеріалів з різними ТКЛР (варіант 2) та сумісній дії стиску і зміни температури матеріалів з різними ТКЛР (варіант 3), як наведено в табл. 7.2.

Отримані поля та епюри розподілу осьових, радіальних, дотичних й еквівалентних напружень у перерізі моделі показано на рис. 7.18–7.25.

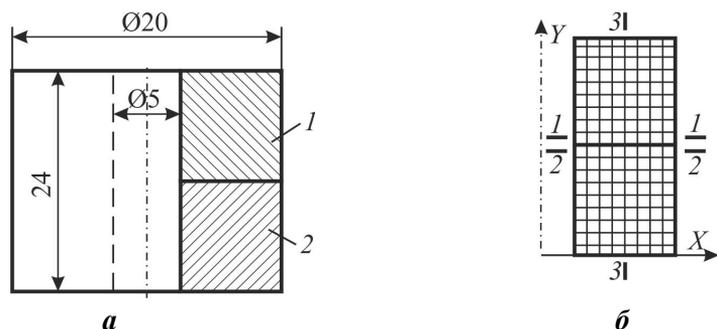


Рис. 7.17. Загальний вигляд вузла (а) та переріз його скінченно-елементної моделі (б)

Таблиця 7.2. Варіанти досліджуваних моделей

| Номер варіанта | $E_1$          | $E_2$          | $\alpha_1$        | $\alpha_2$        | $P$ , МПа | $\Delta T$ , °C |
|----------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|-----------|-----------------|
|                | МПа            |                | 1/°C              |                   |           |                 |
| 1              | $1 \cdot 10^5$ | $2 \cdot 10^5$ | $1 \cdot 10^{-6}$ | $1 \cdot 10^{-6}$ | 40        | 0               |
| 2              | $1 \cdot 10^5$ | $1 \cdot 10^5$ | $1 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-6}$ | 0         | $\pm 100$       |
| 3              | $1 \cdot 10^5$ | $1 \cdot 10^5$ | $1 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-6}$ | 40        | $\pm 100$       |

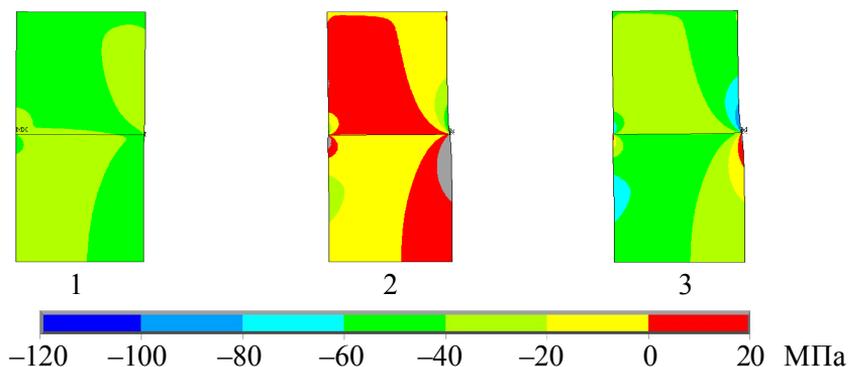


Рис. 7.18. Поля осевих напружень для трьох варіантів навантаження

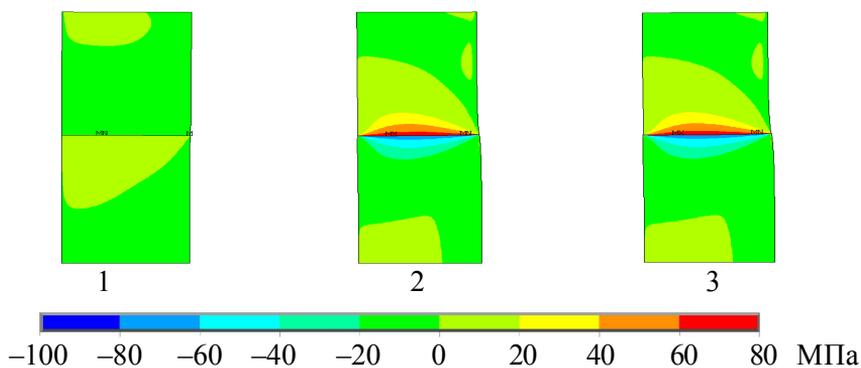


Рис. 7.19. Поля радіальних напружень для трьох варіантів навантаження

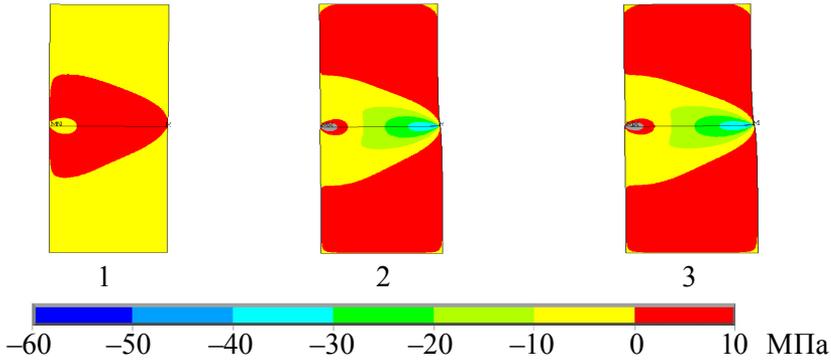


Рис. 7.20. Поля дотичних напружень для трьох варіантів навантаження

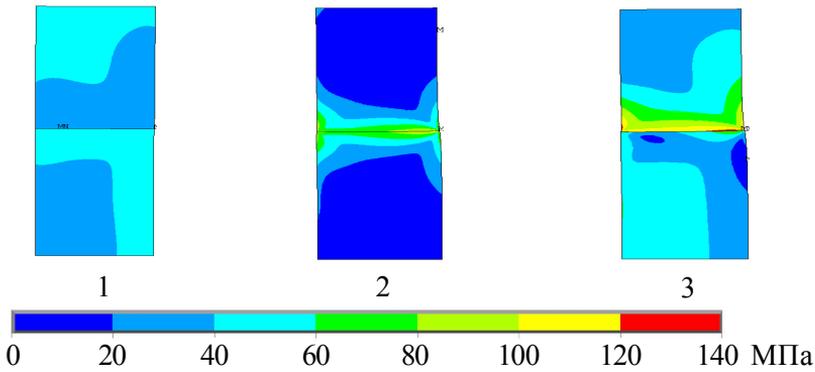


Рис. 7.21. Поля еквівалентних напружень для трьох варіантів навантаження

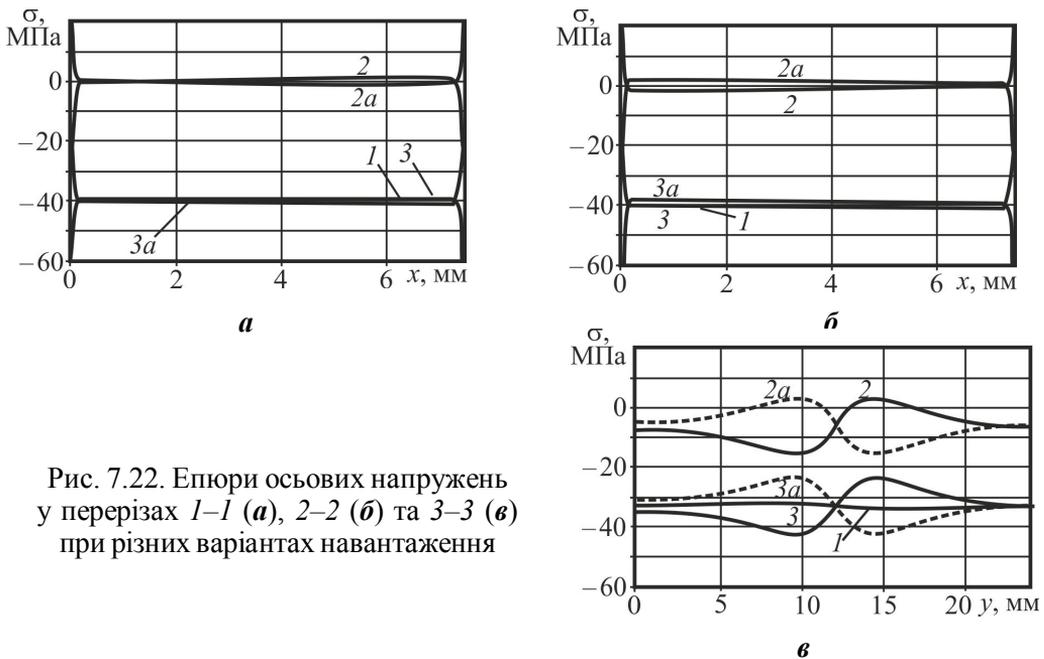
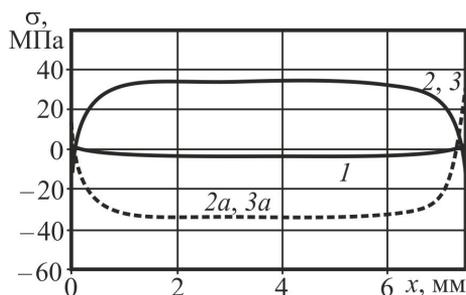
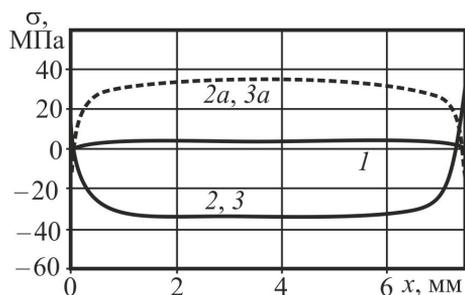


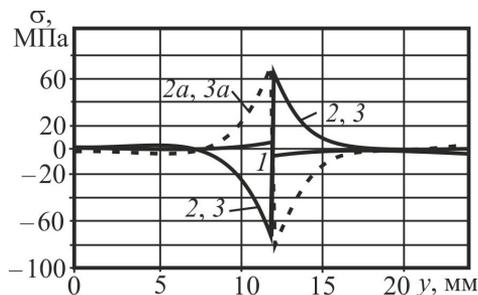
Рис. 7.22. Епюри осьових напружень у перерізах 1-1 (а), 2-2 (б) та 3-3 (в) при різних варіантах навантаження



**a**

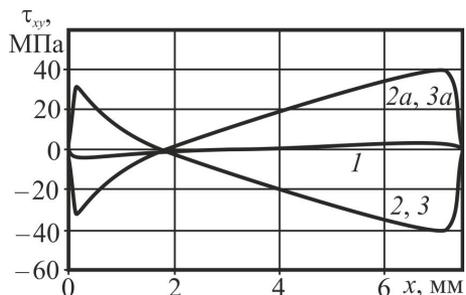


**б**

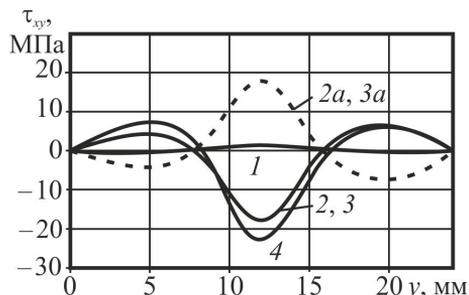


**в**

Рис. 7.23. Епюри радіальних напружень у перерізах 1–1 (а), 2–2 (б) та 3–3 (в) при різних варіантах навантаження



**a**



**б**

Рис. 7.24. Епюри дотичних напружень у перерізах 1–1 і 2–2 (а) та 3–3 (б) при різних варіантах навантаження

Аналіз результатів досліджень показує, що при стиску навіть простих зразків з матеріалів різної жорсткості (варіант 1) рівномірність розподілу напружень по перерізу зразків порушується (див. рис. 7.18–7.25, варіант 1). Поблизу стику напружений стан у цій зоні стає об'ємним: до осьових напружень додаються радіальні, колові та дотичні, які на більшій частині стику не перевищують 10...15 % розрахункових осьових. Характер розподілу та величина колових напружень близькі до радіальних, тому на рисунках вони не показані.

Дотичні напруження зростають від нульових у внутрішній частині стику до максимальних на його периферії. Точка (зона) з нульовими дотичними

напруженнями (так звана зона застою) розташовується ближче до внутрішньої поверхні втулки, на відстані біля 0,25 товщини втулки (див. рис. 7.24, *a*, *б*). Осьові та еквівалентні напруження вздовж більшої частини стику розподілені рівномірно (див. рис. 7.22, *a*, *б* і 7.25, *a*, *б*). З боку більш жорсткого матеріалу радіальні й колові напруження – розтягу (див. рис. 7.23, *б*), що у поєднанні з осьовими стиску дещо збільшує еквівалентні напруження (див. рис. 7.25, *б*). З боку менш жорсткого матеріалу радіальні та колові напруження – стиску (див. рис. 7.23, *a*), тому еквівалентні напруження зменшуються (див. рис. 7.25, *a*).

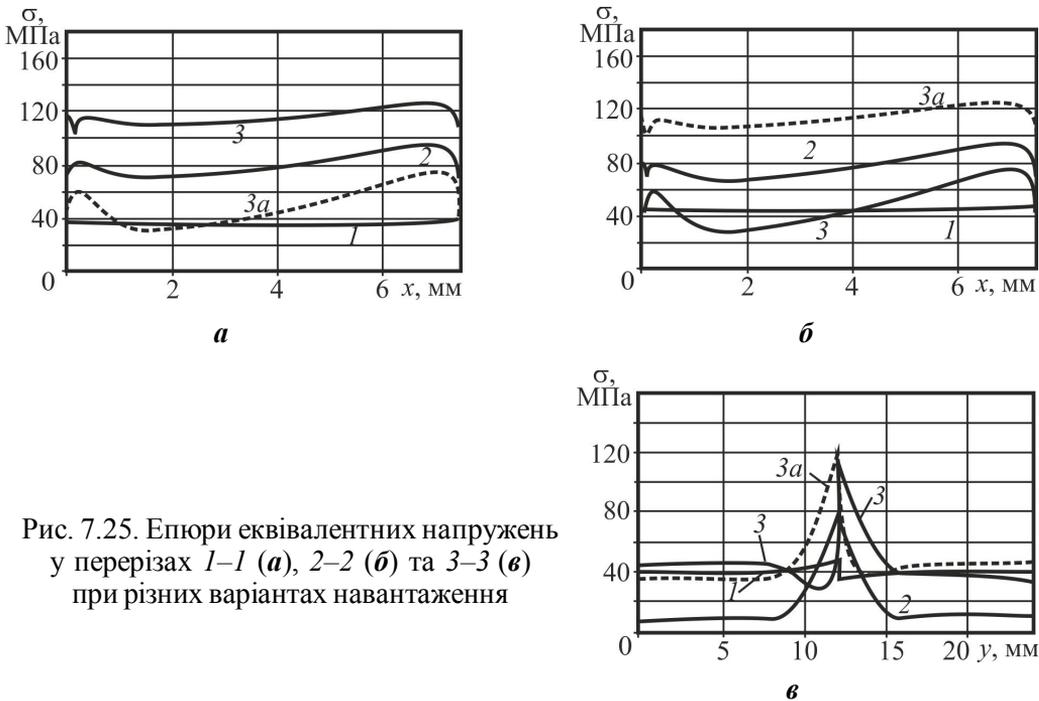


Рис. 7.25. Епюри еквівалентних напружень у перерізах 1–1 (*a*), 2–2 (*б*) та 3–3 (*в*) при різних варіантах навантаження

Таким чином, при стиску зразків різної жорсткості в матеріалі більшої жорсткості за рахунок деякого збільшення еквівалентних напружень створюються сприятливіші умови для пластичних деформацій. Проте в матеріалі меншої жорсткості в зоні стику еквівалентні напруження зменшуються, пластичні деформації відбуватимуться далеко від стику, що небажано, оскільки це збільшує загальні деформації деталі при зварюванні. Дотичні напруження невеликі, що мало сприяє активації поверхонь у зоні стику.

**Зміна температури на 100 °C** у з'єднанні зразків з матеріалів з різними ТКЛР (варіант 2) створює в зоні стику складніший об'ємний напружений стан (див. рис. 7.18–7.25, варіанти 2 і 2*a*). При цьому радіальні та колові напруження досягають величини 60...70 МПа, що складає 150...175 % від номінальних (див. рис. 7.23). При збільшенні температури (варіант 2)

це напруження розтягу в матеріалі 1 з меншим ТКЛР та стиску в матеріалі 2 з більшим ТКЛР, при зменшенні температури (варіант 2а) – навпаки. Осьові напруження на більшій частині стику близькі до нуля і лише на зовнішній поверхні зразка поза стиком збільшуються до 70 МПа. При віддаленні від стику вони зростають і на відстані близько 2...3 мм досягають 15...20 МПа (див. рис. 7.22, в). Знаки їх усередині зразка збігаються, а на поверхні – зворотні радіальним і коловим. Дотичні напруження майже лінійно зменшуються від +40 МПа поблизу зовнішньої поверхні до -30 МПа поблизу внутрішньої, точка з нульовими дотичними напруженнями розташовується на відстані біля 0,25 товщини втулки від внутрішньої поверхні (див. рис. 7.24). *Такий складний напружений стан створює сприятливі умови для пластичних деформацій саме в районі стику за рахунок достатньо великих еквівалентних напружень.* Останні збільшуються від 70 МПа всередині стику до 90...95 МПа поблизу зовнішньої його крайки (див. рис. 7.25, а, б, криві 2). При зниженні температури на 100 °С знаки всіх напружень змінюються на протилежні, епюри еквівалентних напружень не змінюються.

**При сумісній дії осьового зусилля стиску та збільшення температури на 100 °С** у матеріалах однакової жорсткості, але з різними ТКЛР (варіанти 3) напружений стан у зоні стику стає ще складнішим. При цьому величина та характер розподілу радіальних, колових і дотичних напружень зберігається (див. рис. 7.23 і 7.24). Величина осьових напружень змінюється у бік збільшення напружень стиску. В результаті помітно змінюється характер поля еквівалентних напружень (див. рис. 7.21, варіанти 3), порушується його симетрія вздовж та поперек стику (див. рис. 7.25, криві 3). У матеріалі з меншим ТКЛР еквівалентні напруження в районі стику істотно зростають, а в матеріалі з більшим ТКЛР – зменшуються і стають менше від номінальних. При зменшенні температури картина змінюється на зворотну (див. рис. 7.25, пунктирні криві 3а). *Таким чином, найбільш сприятливі умови для пластичних деформацій в обох матеріалах створюються при термоцикуванні в стисломому стані.* Ураховуючи нерівномірний розподіл дотичних і еквівалентних напружень уздовж стику, сприятливіші умови для активації поверхонь створюються на периферійних ділянках стику, пластичні деформації більшою мірою повинні відбуватися ближче до країв стику та менше – у внутрішній його частині.

*Таким чином, дослідження показали, що при ДЗ навіть простих зразків з різномірних металів формується складний напружений стан, а не одновісний, як зазвичай вважали при розробці режимів.*

Наведені результати отримано при пружному розв'язанні задачі. Аналогічні дослідження виконані також з урахуванням пластичних деформацій. Порівняння пружного та пластичного розв'язань показало, що пластичні деформації зосереджені в точках концентрації напружень. Рівень напружень у цих точках зменшується, але дещо збільшуються напруження поблизу точок їх концентрації. На більшій частині зразка характер розподілу та рівень напружень практично не змінюються.

Особливості напружено-деформованого стану необхідно враховувати при виборі параметрів режиму зварювання вузлів з різнорідних матеріалів. Найбільш ефективним (оптимальним) шляхом локалізації пластичних деформацій у зоні стику при зварюванні матеріалів з різними ТКЛР є поєднання стику з термоцикуванням.

Крім розглянутих варіантів НДС у процесі дифузійного зварювання (утворення з'єднання) вивчався також *НДС при різних варіантах охолодження після зварювання (паяння) вузлів графіт-мідь як під тиском, так і без нього:*

пружне рішення при миттєвому (швидкому) зниженні температури від 900 до 500 °С (вар. 1);

пружно-пластичне рішення при миттєвому (швидкому) зниженні температури від 900 до 500 °С (вар. 2);

пружно-пластичне рішення з повзучістю при поступовому зниженні температури від 900 до 500 °С протягом 60 с і наступною витримкою до 6000 с при 500 °С (вар. 3);

пружно-пластичне рішення з повзучістю при поступовому зниженні температури від 900 до 500 °С протягом 600 с і наступною витримкою до 6000 с при 500 °С (вар. 4);

пружно-пластичне рішення з повзучістю при поступовому зниженні температури від 900 до 500 °С протягом 6000 с (вар. 5).

Термічні цикли для розглянутих варіантів наведено на рис. 7.26, а фізико-механічні властивості міді і графіту, прийняті в розрахунках, – в табл. 7.3.

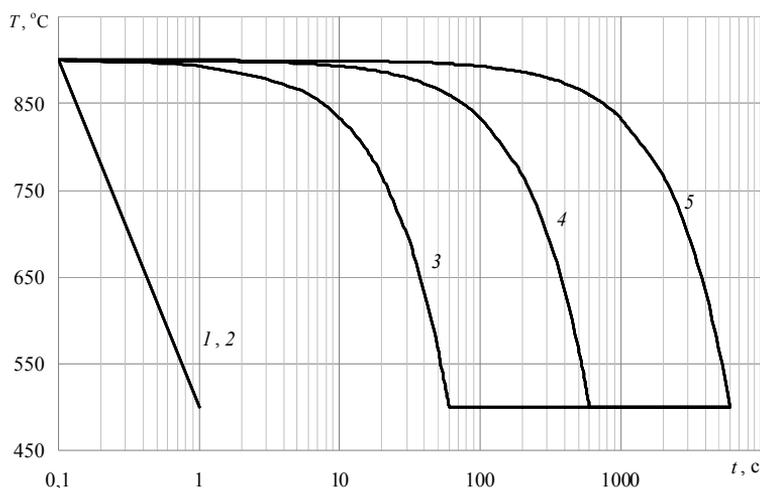


Рис. 7.26. Термічні цикли охолодження для розглянутих варіантів

Інтервал охолодження від 900 до 500 °С вибраний з міркувань, що при більш низьких температурах процеси повзучості в міді проходять дуже повільно і при реальному для практики часі охолодження величиною

деформації повзучості можна знехтувати. Тому при температурі нижче 500 °С для визначення НДС з достатньою точністю можна скористатися результатами варіанта 2 – пластична задача без повзучості.

**Таблиця 7.3. Фізико-механічні властивості з'єднаних матеріалів**

| Матеріали | Температура, °С | Модуль пружності $E \cdot 10^3$ МПа | Коефіцієнт Пуассона | ТКЛР $\cdot 10^6$ , 1/град | Границя плинності, МПа | Модуль зміцнення, $10^3$ МПа |
|-----------|-----------------|-------------------------------------|---------------------|----------------------------|------------------------|------------------------------|
| Графіт    | 500             | 9,9                                 | 0,18                | 5,2                        | –                      | –                            |
|           | 700             | 10,3                                |                     | 5,5                        | –                      | –                            |
|           | 800             | 10,8                                |                     | 5,7                        | –                      | –                            |
| Мідь      | 500             | 90                                  | 0,34                | 18,5                       | 40                     | 0,9                          |
|           | 700             | 60                                  |                     | 19,4                       | 30                     | 0,8                          |
|           | 800             | 40                                  |                     | 20,5                       | 20                     | 0,7                          |

У варіантах 3–5 швидкість повзучості міді визначалася за рівнянням

$$\dot{\epsilon} = C_1 \sigma^{C_2} e^{-\frac{C_3}{T}},$$

де коефіцієнти  $C_1 = 1,67 \cdot 10^{-30}$ ,  $C_2 = 5$ ,  $C_3 = 25872$  отримані експериментально при дослідженні повзучості міді;  $\sigma$  – напруження, Па;  $T$  – температура, К.

Аналізувалися поля та епюри розподілу напружень, деформацій і переміщень на різних стадіях охолодження, включаючи моменти закінчення зниження температури (всі варіанти) і закінчення витримки при температурі 500 °С (варіанти 3 і 4). Порівнювалися поля та епюри відповідних варіантів охолодження без тиску і з тиском.

Аналіз показав, що всі складові напружень, включаючи еквівалентні, помітно знижуються зі зменшенням швидкості охолодження. Подальша витримка при температурі 500 °С ще більше знижує їх. При цьому радіальні, колові, дотичні та еквівалентні напруження зосереджені поблизу стику, а осьові напруження, що викликають найбільший інтерес з точки зору утворення тріщин у крихкому графіті при охолодженні вузла (рис. 7.27 і 7.28), – у внутрішній і зовнішній поверхнях втулки.

Відповідно до напружень розподілені і пластичні деформації – з боку міді поблизу стику, більшою мірою на його частині, прилеглий до зовнішньої поверхні (рис. 7.29–7.31).

Аналіз полів і величин пластичних деформацій (див. рис. 7.29–7.31 і табл. 7.4) показав, що зі збільшенням часу охолодження миттєві деформації в міді зменшуються аж до нуля у варіанті 5 при охолодженні як без стиснення, так і з ним (від 1,4 % у вар. 1 до 0,0 % у вар. 5).

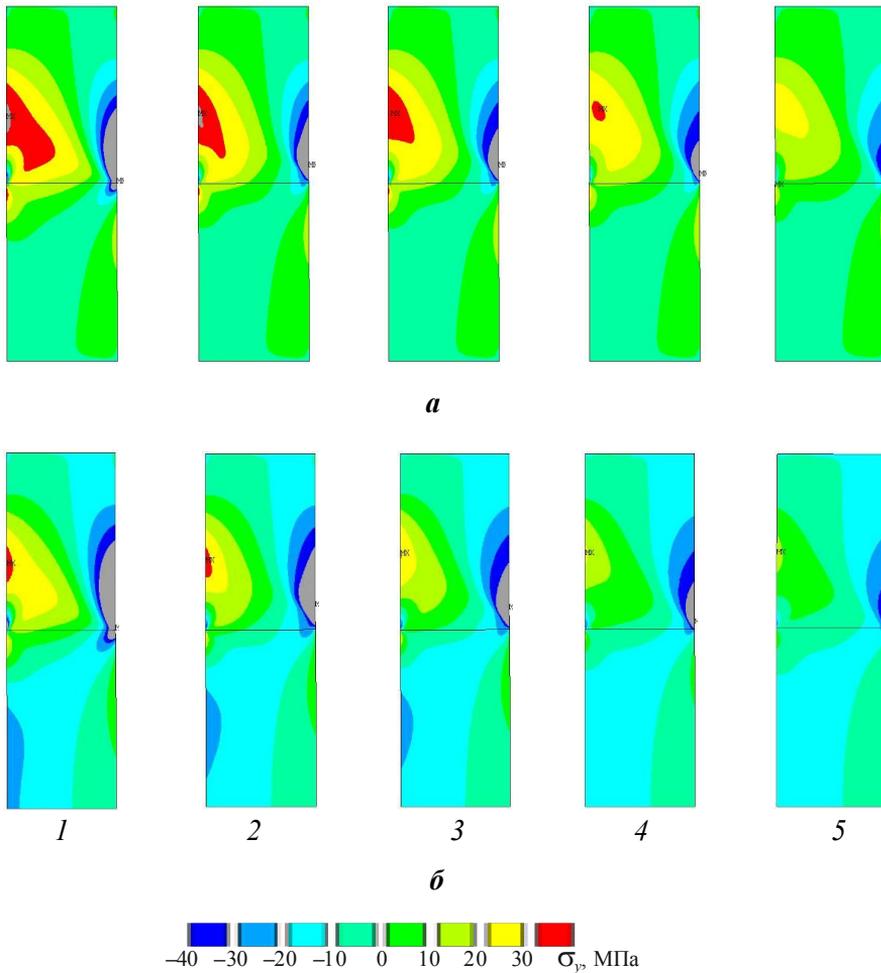


Рис. 7.27. Осьові напруження відразу після охолодження до 500 °С у варіантах 1–5 при охолодженні без тиску (*а*) і під тиском (*б*)

Деформації повзучості в процесі охолодження, навпаки, помітно збільшуються зі збільшенням часу охолодження до температури 500 °С, при цьому більш помітно при охолодженні під тиском (від 0,4 % у вар. 3 до 1,05 % у вар. 5). З'являються і розвиваються деформації в першу чергу в безпосередній близькості від стику, при охолодженні без стиснення на відстані близько чверті товщини втулки від її зовнішньої поверхні (див. рис. 7.30), і поширюються практично на всю довжину мідної частини зразка при охолодженні під тиском (див. рис. 7.31).

Сумарні деформації повзучості за весь період охолодження і витримки при 500 °С ростуть зі збільшенням часу охолодження і відповідним зменшенням часу витримки.

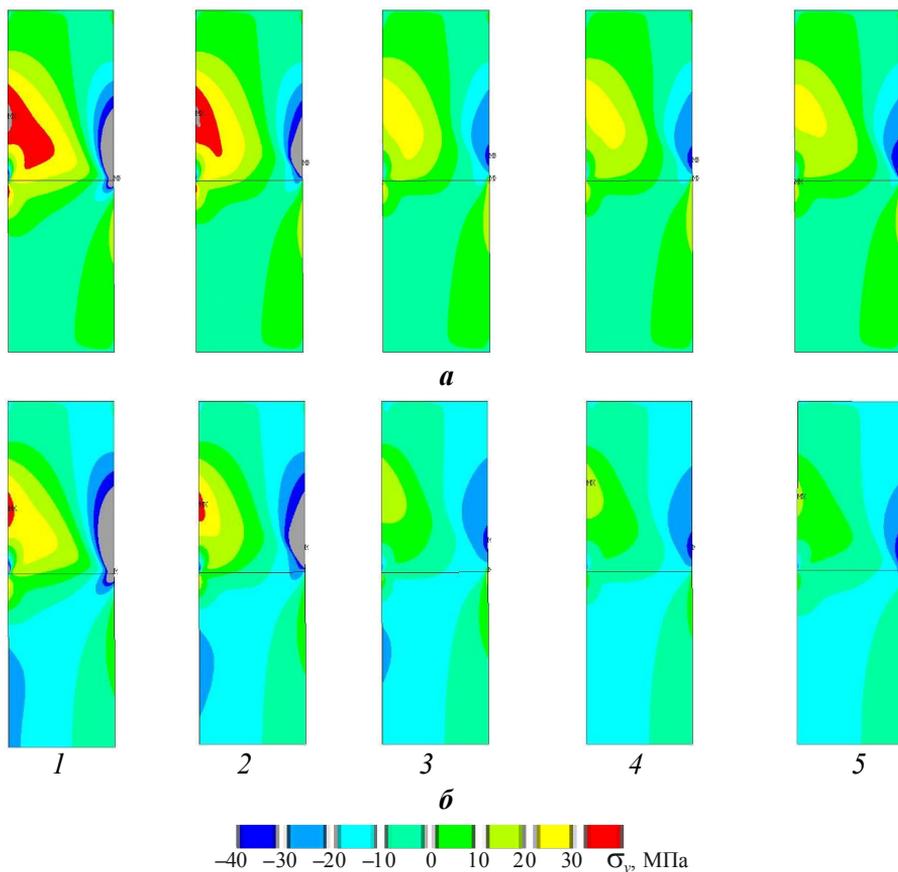


Рис. 7.28. Осьові напруження після охолодження до 500 °С у варіантах 1–5 і витримки (вар. 3 і 4) при охолодженні без тиску (*a*) і під тиском (*б*)

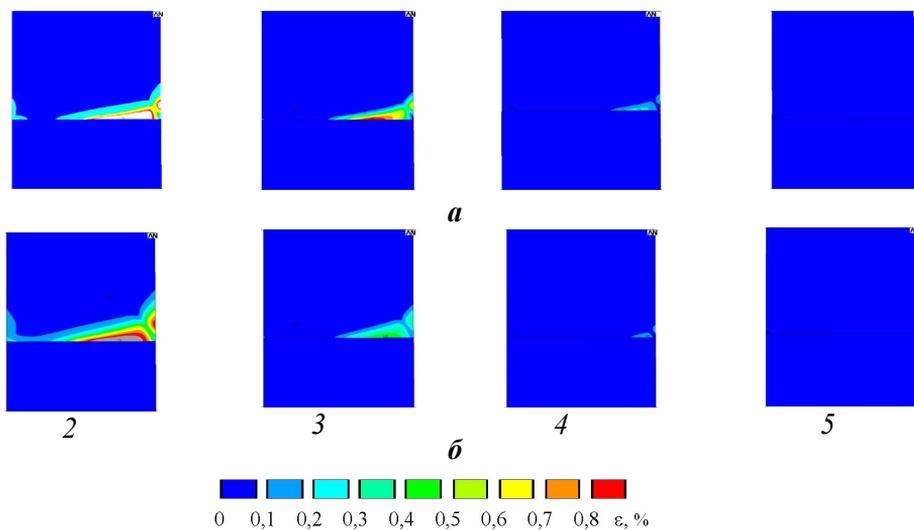


Рис. 7.29. Еквівалентні деформації миттєвої пластичності відразу після охолодження до 500 °С у варіантах 2–5 при охолодженні без тиску (*a*) і під тиском (*б*)

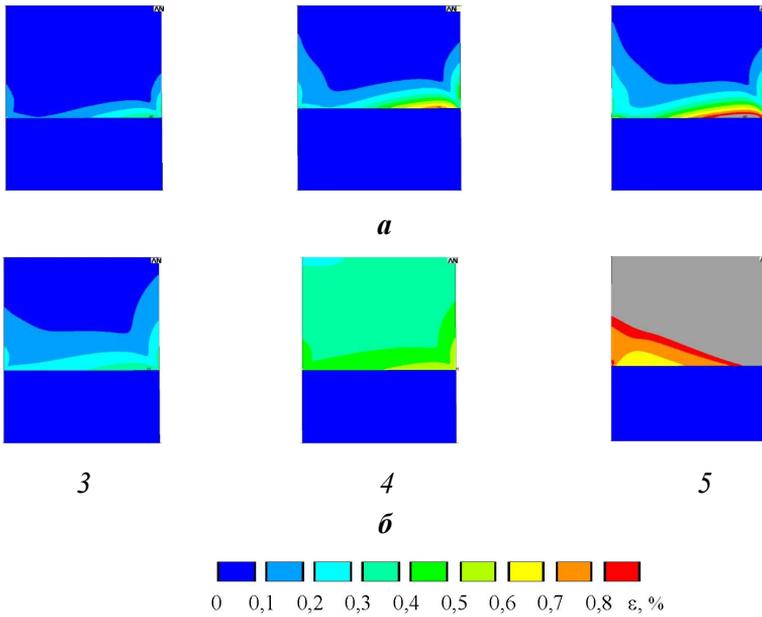


Рис. 7.30. Еквівалентні деформації повзучості після охолодження до 500 °С у варіантах 3–5 при охолодженні без тиску (*a*) і під тиском (*б*)

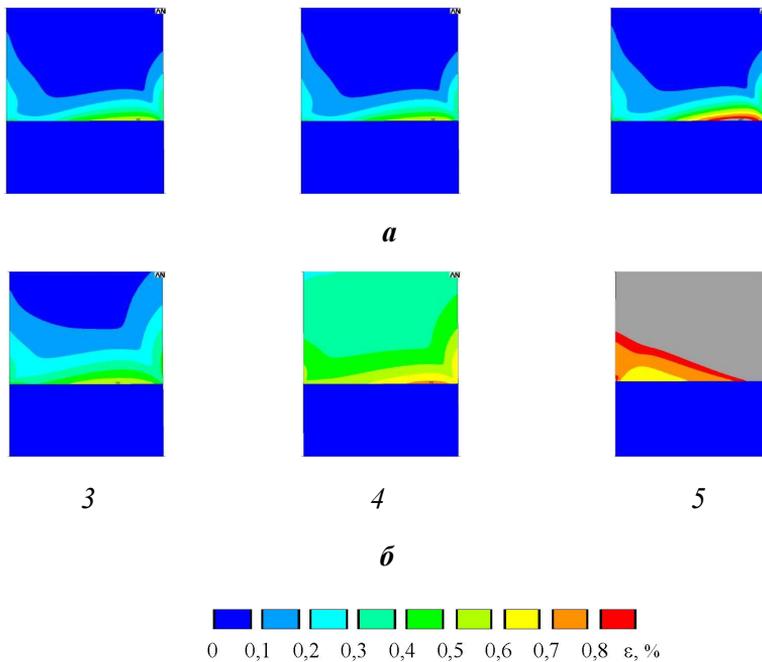


Рис. 7.31. Еквівалентні деформації повзучості після охолодження до 500 °С і витримки у варіантах 3–5 при охолодженні без тиску (*a*) і під тиском (*б*)

Таблиця 7.4. Максимальні пластичні (еквівалентні) деформації в міді, %, при охолодженні без тиску (*a*) і під тиском (*б*)

| Варіант | Закінчення охолодження |          |            |          |          |          | Закінчення витримки |          | Сумарні  |          |
|---------|------------------------|----------|------------|----------|----------|----------|---------------------|----------|----------|----------|
|         | Миттєві                |          | Повзучості |          | Сума     |          | Повзучості          |          |          |          |
|         | <i>a</i>               | <i>б</i> | <i>a</i>   | <i>б</i> | <i>a</i> | <i>б</i> | <i>a</i>            | <i>б</i> | <i>a</i> | <i>б</i> |
| 2       | 1,40                   | 1,12     | 0          | 0        | 1,40     | 1,12     | 0                   | 0        | 1,40     | 1,12     |
| 3       | 0,90                   | 0,46     | 0,40       | 0,39     | 1,30     | 0,85     | 0,59                | 0,57     | 1,49     | 1,03     |
| 4       | 0,23                   | 0,15     | 0,75       | 0,65     | 0,98     | 0,80     | 0,97                | 0,73     | 1,20     | 0,88     |
| 5       | 0                      | 0        | 1,05       | 9,10     | 1,05     | 9,10     | 1,05                | 9,10     | 1,05     | 9,10     |

Таким чином, з точки зору розвитку пластичних деформацій, зменшення швидкості охолодження більш ефективно, ніж збільшення часу витримки після зниження температури. Ще більший ефект дає охолодження під тиском, що сприяє зниженню рівня напружень у вузлі при охолодженні.

Пружне і пластичне деформування матеріалу втулки призводить до зміни форми її поверхонь. На рис. 7.32 і 7.33 показано епюри радіальних переміщень точок зовнішньої і внутрішньої поверхонь вузла (точок твірної).

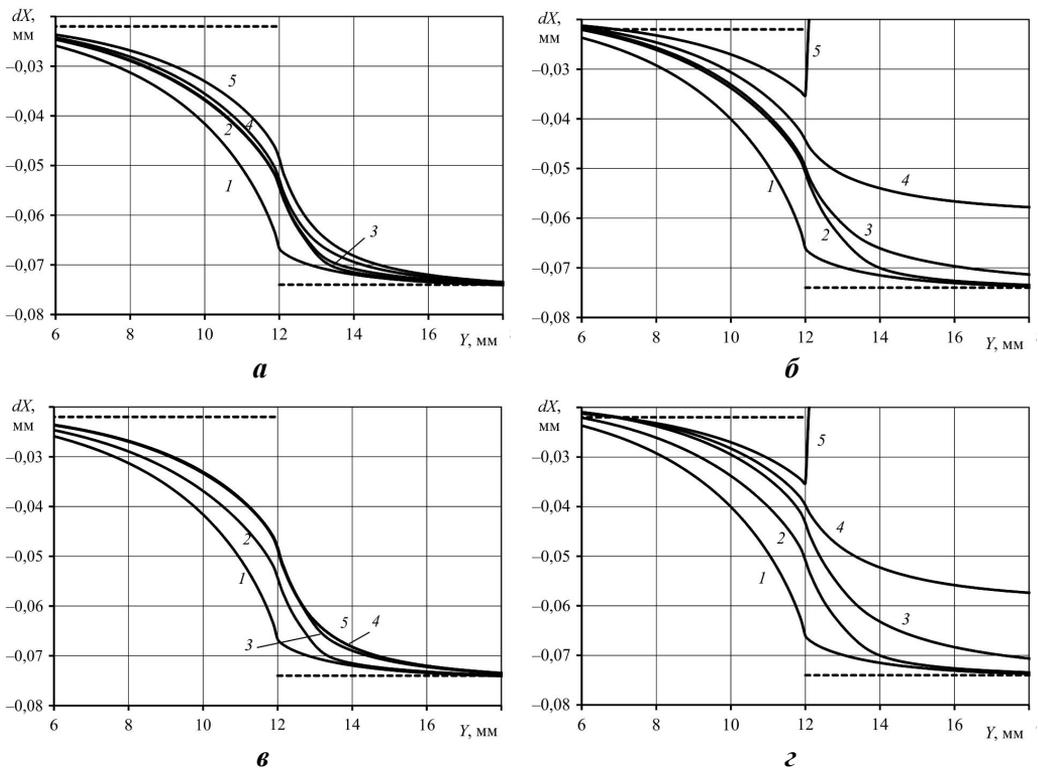


Рис. 7.32. Епюри радіальних переміщень точок зовнішньої поверхні втулки поблизу стику після охолодження до 500 °С (*a*, *б*) і після охолодження і витримки (в, г) моделей 1–5 (відповідні номери кривих) при охолодженні без тиску (*a*, *в*) і під тиском (*б*, *г*)

Епюри радіальних переміщень точок зовнішньої поверхні (див. рис. 7.32) і характер вигину твірної в цілому зберігаються такими ж, як і при однаковій жорсткості з'єднуваних матеріалів, але помітно порушується їх кососиметрія щодо площини стику при пружному навантаженні (вар. 1). Твірна з боку більш жорсткого матеріалу (міді) згинається менше, наближаючись до стану при вільному скороченні (пунктир на рис. 7.32). З боку менш жорсткого матеріалу (графіту) картина зворотна, вигин помітно збільшується.

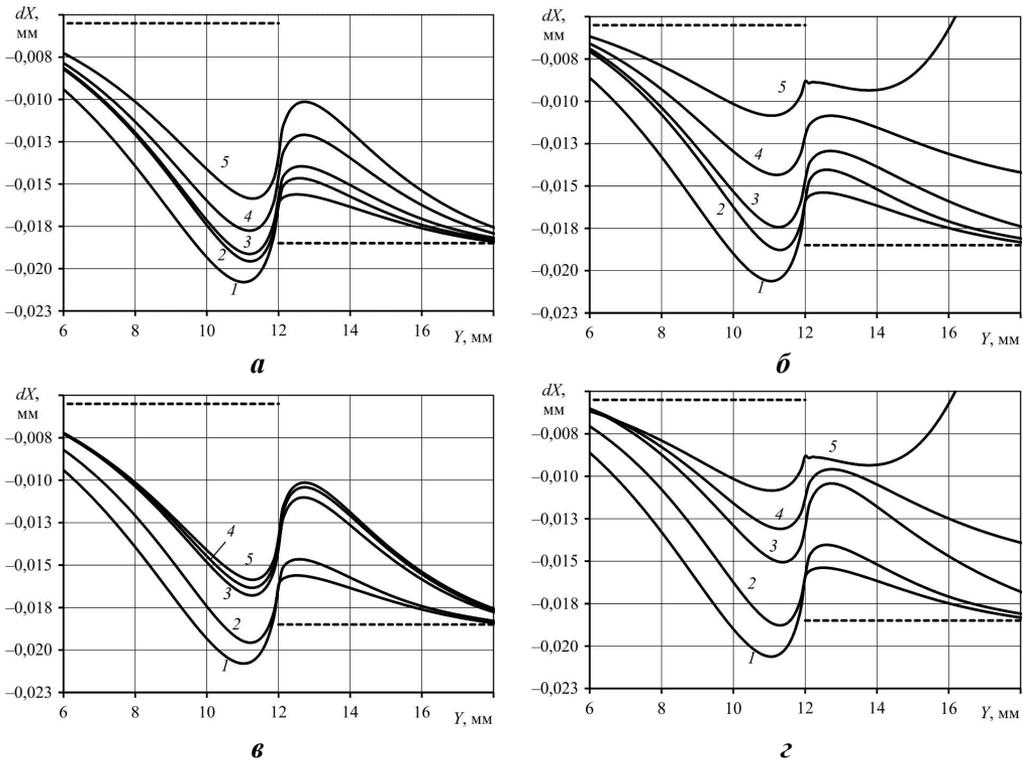


Рис. 7.33. Епюри радіальних переміщень точок внутрішньої поверхні втулки після охолодження до 500 °С (а, б) та після охолодження і витримки (в, г) моделей 1–5 (відповідні номери кривих) при охолодженні без тиску (а, в) і під тиском (б, г)

При виникненні пластичних деформацій, миттєвих і повзучості (вар. 2–5) вигин у більш жорсткому, але пластичному матеріалі (мідь) збільшується, а в менш жорсткому пружному матеріалі (графіт) зменшується, форма вигину твірної наближається до кососиметричної. Отже, короточасні пластичні деформації, що розвиваються при швидкому (миттєвому) охолодженні і деформації повзучості (вар. 3, 4 і 5) компенсують вищу жорсткість міді в пружному стані порівняно з графітом, зрівнюючи деформації зовнішньої поверхні в районі стику.

При цьому епюри радіальних переміщень точок зовнішньої поверхні після охолодження і витримки у варіантах 3, 4 і 5 практично збігаються (див. рис. 7.32, в), незважаючи на деяку відмінність у величині максимальних пластичних деформацій в міді (див. табл. 7.4).

Характер радіального переміщення точок внутрішньої бічної поверхні більш складний (рис. 7.33). Опукла частина поверхні графіту (матеріалу з меншим ТКЛР) в безпосередній близькості від стику (1–2 мм) поступово переходить в увігнуту в міру віддалення від нього. У міді (матеріалі з великим ТКЛР) картина зворотна: увігнута поверхня поблизу стику поступово переходить в опуклу при віддаленні від нього.

Така складна форма вигину твірної на внутрішній поверхні втулки пояснюється зустрічним впливом двох факторів. З одного боку, це різниця взаємного зміщення верхньої і нижньої частин втулки внаслідок різної зміни їх діаметрів, з іншого боку – різна зміна ширини перерізу при температурному скороченні матеріалів верхньої (металевої) і нижньої (графітової) частин вузла.

Взаємне зміщення верхньої і нижньої частин втулок призводить до утворення опуклості на зовнішній та увігнутості на внутрішній поверхні матеріалу з меншим ТКЛР (графіту). Різна зміна ширини призводить до утворення опуклості на обох поверхнях цього матеріалу. У результаті одночасної дії обох факторів характер викривлення зовнішньої поверхні, тобто опуклість назовні, зберігається, а внутрішньої – помітно змінюється (див. рис. 7.32 і 7.33).

Наявність (вплив) двох механізмів переміщень підтверджується також відсутністю симетрії щодо середини товщини втулки полів пластичних деформацій (див. рис. 7.29–7.31) і епюр дотичних напружень (рис. 7.34).

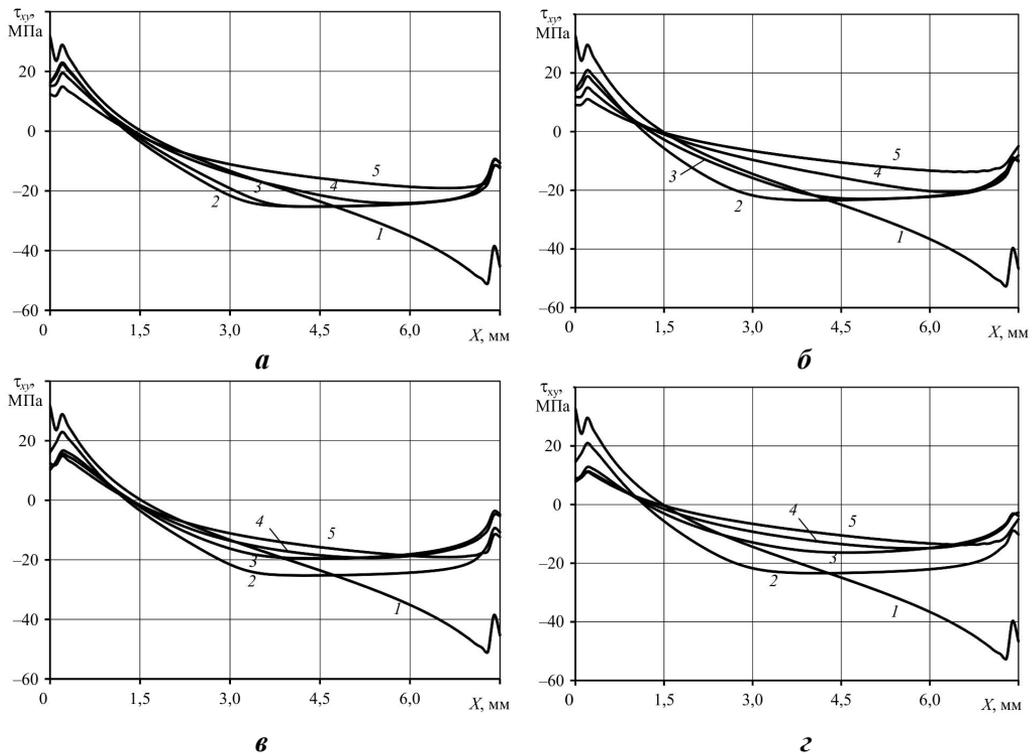


Рис. 7.34. Епюри дотичних напружень у стикі після охолодження (а, б) і після охолодження і витримки (в, г) моделей 1–5 (відповідні номери кривих) при охолодженні без тиску (а, в) і під тиском (б, г)

Кількісною характеристикою впливу зсуву частин втулки може служити рівень дотичних напружень посередині товщини втулки (близько 20 МПа).

При зміні режиму охолодження характер вигину внутрішньої поверхні зберігається (див. рис. 7.33), але величина переміщень зменшується при зниженні швидкості охолодження (вар. 3, 4 і 5). При подальшій витримці відмінність у переміщеннях зменшується (в).

Відповідно з деформацією поверхонь розподілені осьові напруження в них (рис. 7.35–7.37). На зовнішній поверхні осьові напруження стиску у верхній мідній втулці (з великим ТКЛР) і розтягу в нижній графітовій втулці (з меншим ТКЛР). Величина і характер їх розподілу в процесі витримки при 500 °С після охолодження (варіанти 3 і 4) істотно змінюються (табл. 7.5, див. рис. 7.35 і 7.36).

Після охолодження напруження розтягу досягають максимальної величини (близько 14 МПа) поблизу стику, на відстані 2...3 мм, поступово зменшуючись у міру віддалення від нього (див. рис. 7.35 і табл. 7.5). При подальшій витримці при 500 °С (вар. 3 і 4) максимальні напруження в графіті різко зростають до 30...35 МПа (див. рис. 7.36 і табл. 7.5), точка максимуму впритул наближається до стику.

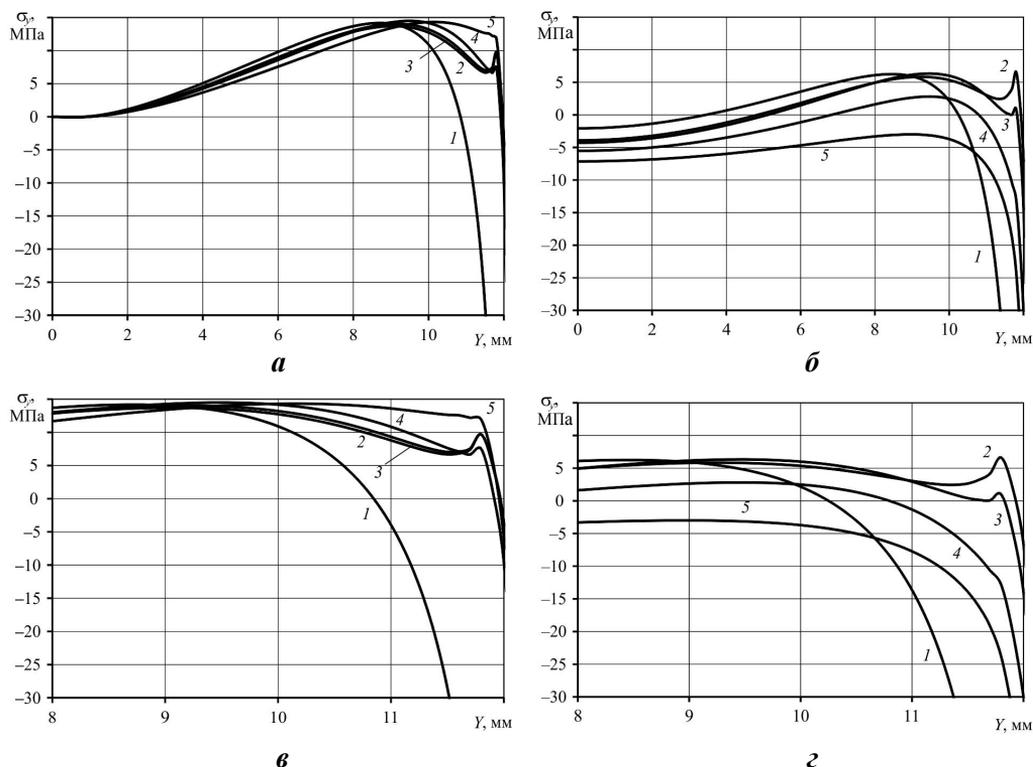


Рис. 7.35. Епюри осьових напружень на зовнішній поверхні графіту (а, б) і в безпосередній близькості від стику (в, з) відразу після охолодження моделей 1–5 (відповідні номери кривих) при охолодженні без тиску (а, в) і під тиском (б, з)

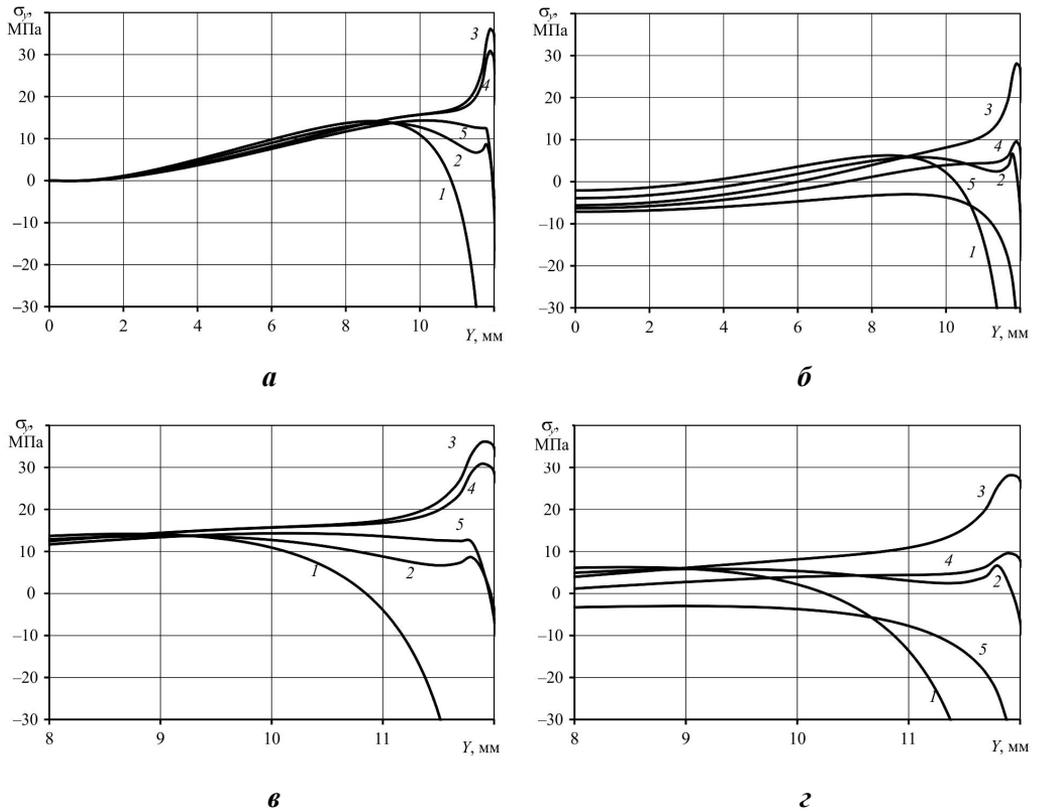


Рис. 7.36. Епюри осьових напружень на зовнішній поверхні графіту (*а, б*) і в безпосередній близькості від стику (*в, г*) після повного охолодження і витримки моделей 1–5 (відповідні номери кривих) при охолодженні без тиску (*а, в*) і під тиском (*б, г*)

На внутрішній поверхні розподіл більш складний (див. рис. 7.37). У нижній графітовій втулці осьові напруження поблизу стику–розтягу, вони поступово зменшуються до нуля (на відстані 2–3 мм від стику) і переходять у стиск в міру віддалення від стику, потім знову зменшуються до нуля на торці.

Для порівняння варіантів на рис. 7.38 і 7.39 наведено діаграми максимальних напружень розтягу в графіті після охолодження до 500 °С і витримки при цій температурі до 6000 с.

Аналіз рисунків показує, що з точки зору утворення тріщин у графіті після охолодження найбільш небезпечна внутрішня поверхня, де при всіх варіантах, крім 5, максимальні напруження розтягу наближаються до границі міцності графіту на вигин (45 МПа для графіту МПГ-8 і 34,3 МПа для графітів МПГ-6 і МПГ-7). На зовнішній поверхні небезпечними є варіанти 3 і 4, при яких витримка після охолодження призводить до великих напружень розтягу.

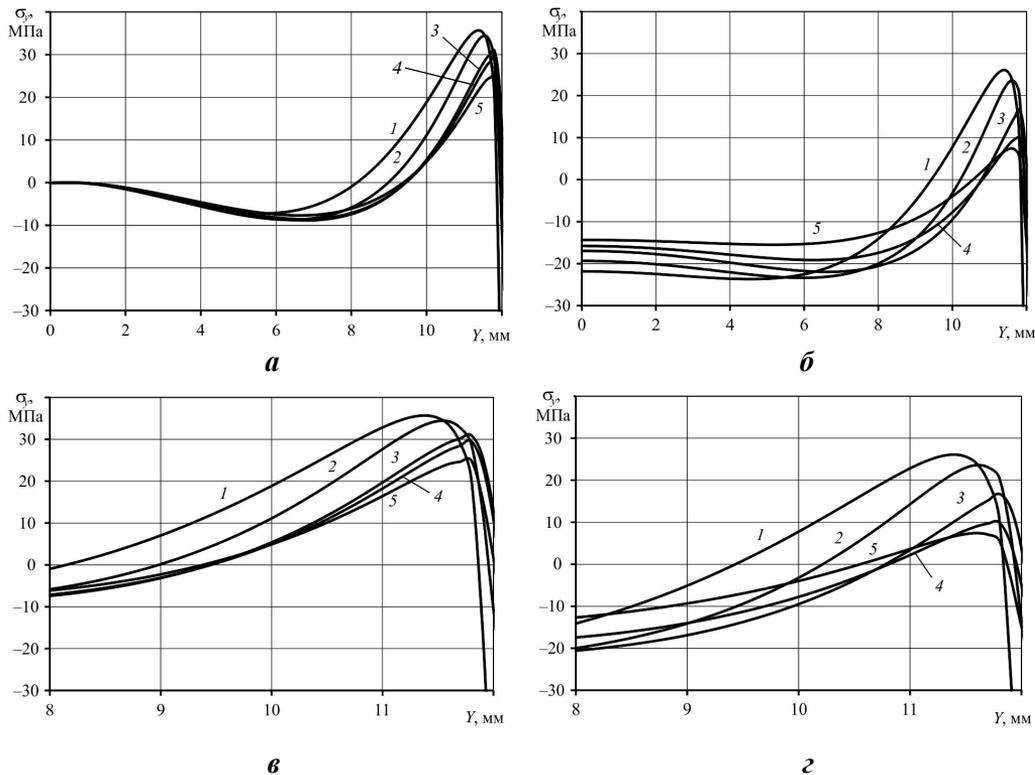


Рис. 7.37. Епюри осевих напружень на внутрішній поверхні графіту (*а, б*) і в безпосередній близькості від стику (*в, г*) після повного охолодження і витримки моделей 1–5 (відповідні номери кривих) при охолодженні без тиску (*а, в*) і під тиском (*б, г*)

Таблиця 7.5. Максимальні напруження розтягу в графіті, МПа, при охолодженні без тиску (*а*) і під тиском (*б*)

| Варіант | На зовнішній поверхні  |          |                     |          | На внутрішній поверхні |          |                     |          |
|---------|------------------------|----------|---------------------|----------|------------------------|----------|---------------------|----------|
|         | закінчення охолодження |          | закінчення витримки |          | закінчення охолодження |          | закінчення витримки |          |
|         | <i>а</i>               | <i>б</i> | <i>а</i>            | <i>б</i> | <i>а</i>               | <i>б</i> | <i>а</i>            | <i>б</i> |
| 1       | 14,2                   | 6,25     | –                   | –        | 35,7                   | 26,1     | –                   | –        |
| 2       | 13,7                   | 6,61     | –                   | –        | 13,7                   | 23,6     | –                   | –        |
| 3       | 14,0                   | 6,34     | 44,7                | 34,9     | 33,3                   | 19,0     | 31,0                | 16,70    |
| 4       | 14,5                   | 2,81     | 39,0                | 12,7     | 29,9                   | 11,3     | 28,5                | 9,95     |
| 5       | 14,3                   | 0        | 14,3                | 0        | 25,0                   | 7,42     | 25,0                | 7,42     |

Таким чином, для даного вузла оптимальним з точки зору зменшення небезпеки утворення тріщин у графіті після охолодження до 500 °С слід вважати варіант 5 (поступове зниження температури з 900 до 500 °С протягом 6000 с) без тиску, при якому напруження розтягу на внутрішній і зовнішній поверхнях не перевищують 25 і 15 МПа відповідно. Швидке охолодження

з наступною витримкою при 500 °С (варіанти 3 і 4) призводить до зростання максимальних напружень розтягу. Прикладення тиску 10 МПа до вузла в процесі охолодження пропорційно знижує напруження розтягу в графіті, але при цьому помітно зростають загальні деформації вузла за рахунок деформацій повзучості в усьому об'ємі мідної частини вузла.

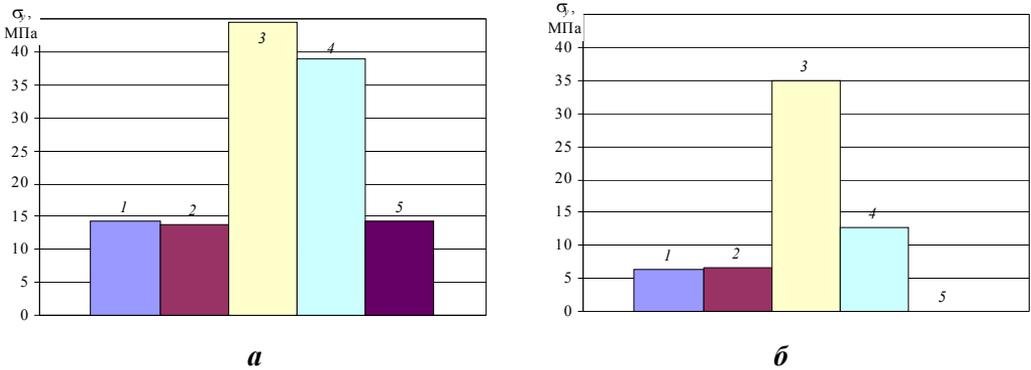


Рис. 7.38. Максимальні напруження розтягу на зовнішній поверхні графіту у варіантах 1–5 після охолодження до 500 °С і витримки при цій температурі (вар. 3 і 4) при охолодженні без тиску (а) і під тиском (б)

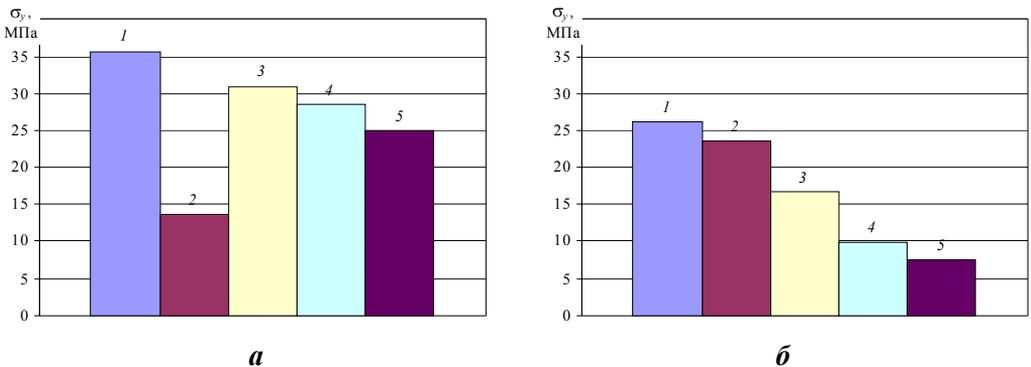


Рис. 7.39. Максимальні напруження розтягу на внутрішній поверхні графіту у варіантах 1–5 після охолодження до 500 °С і витримки при цій температурі (вар. 3 і 4) при охолодженні без тиску (а) і під тиском (б)

Подальше охолодження вузла до 20 °С відбувається в умовах зростання границі плинності та опору повзучості. Швидкість повзучості зменшується, і навіть при охолодженні від 500 до 20 °С протягом 3,8 годин залишкові напруження перевищують границю міцності графіту (більше 65 МПа). Таким чином, незважаючи на ефективний вплив деформацій миттєвої пластичності і повзучості в інтервалі температур 900...500 °С, застосування дифузійного зварювання або паяння мідними (срібними) припоями може призвести до руйнування вузла.

Розглядаючи технологічні варіанти з'єднання графіту з міддю, слід відзначити досить високі температури дифузійного зварювання порівняно з паянням, яке дозволяє регулювати рівень напружень, змінюючи температурний інтервал охолодження шляхом вибору припоїв з мінімальною температурою плавлення, яка забезпечує працездатність вузлів у конкретних умовах.

Розрахунки показали, що застосування низькотемпературних припоїв з температурою плавлення до 250 °С гарантує отримання бездефектних з'єднань. Якщо для змочування графіту припоєм необхідна більш висока температура, то доцільно проводити паяння за двоступеневою технологією з попереднім лудінням поверхні графіту. Час охолодження необхідно розраховувати для конкретного вузла з використанням отриманих у роботі параметрів повзучості міді.

Аналіз результатів моделювання для даного вузла дозволяє зробити наступні висновки:

1. Велика відмінність модулів пружності міді і графіту суттєво впливає на характер НДС, в основному, в пружній стадії навантаження.

2. Усі складові напружень, включаючи еквівалентні, помітно знижуються зі зменшенням швидкості охолодження за рахунок деформацій повзучості в міді. Подальша витримка при температурі 500 °С ще більше знижує їх.

3. Деформації повзучості у даному інтервалі температур помітно перевищують миттєві пластичні деформації і більш помітно знижують напруження, тому з точки зору розвитку пластичних деформацій у міді зменшення швидкості охолодження більш ефективно, ніж збільшення часу витримки після зниження температури. Це сприяє зниженню рівня напружень у вузлах при охолодженні.

4. З погляду утворення тріщин у графіті після охолодження для даного вузла найбільш небезпечна внутрішня поверхня, де при всіх варіантах, крім 5, максимальні напруження розтягу наближаються до границі міцності графіту на вигин. На зовнішній поверхні небезпечними є варіанти 3 і 4, при яких витримка після охолодження призводить до великих напружень розтягу.

5. Оптимальним з точки зору зменшення небезпеки утворення тріщин у графіті після охолодження до 500 °С слід вважати варіант 5 (поступове зниження температури з 900 до 500 °С протягом 6000 с), при якому напруження розтягу не перевищують 25 МПа. При швидкому охолодженні створюються великі напруження на зовнішній поверхні графіту.

6. Незважаючи на ефективний вплив деформацій миттєвої пластичності і повзучості в інтервалі температур 900...500 °С, застосування дифузійного зварювання або паяння мідними (срібними) припоями може призвести до руйнування вузла при охолодженні до нормальної температури. Найбільш доцільно для виготовлення мідно-графітових вузлів типу втулка-втулка застосовувати паяння низькотемпературними безсвинцевими припоями, а для забезпечення змочування графіту цими припоями використовувати попереднє лудіння поверхні графіту.

7. Рівень і характер НДС вузлів з різнорідних матеріалів при дифузійному зварюванні та паянні залежить від трьох факторів: фізико-механічних властивостей кожного з матеріалів, режиму зварювання та охолодження і геометрії вузла, його форми та співвідношення розмірів. При зміні хоча б одного з них змінюється і НДС. На жаль, аналітичні методи розрахунку, тим більше спрощені інженерні методи, не дозволяють вирішувати всі проблеми, пов'язані з НДС. Найбільш повну інформацію дають методи комп'ютерного моделювання з використанням сучасних програмних комплексів.

#### **7.4. Методи регулювання власних напружень і деформацій при дифузійному зварюванні та паянні**

Існуючі методи регулювання власних напружень і деформацій при дифузійному зварюванні та паянні вузлів з різнорідних матеріалів можна розділити на декілька груп.

1. Регулювання термічного циклу при паянні та ДЗ: наприклад, застосування припоїв з низькою температурою плавлення, локальне нагрівання зони паяння і ДЗ, підтримка при нагріванні та охолодженні відповідної різниці температур між різнорідними матеріалами.

2. Використання процесів релаксації для зниження напружень, наприклад за рахунок дуже повільного або ступінчастого охолодження, застосування "м'яких" припоїв або прокладок (проміжних елементів) з низьким опором пластичному деформуванню та повзучості.

3. Оптимальне конструктивне оформлення вузла: наприклад, застосування компенсаторів, прорізів, фігурних скосів для отримання плавних переходів від одного елемента до іншого, армуючих волокон або наповнювачів з низьким ТКЛР, проміжних елементів зі зменшеною жорсткістю за рахунок пористості, з'єднання не по всій площині стику, проміжних елементів із заданим розподілом властивостей, прошарків з металу зі зниженим модулем пружності, з'єднання по фігурній поверхні тощо.

Використання легкоплавких припоїв та прошарків, збільшення товщини паяного шва не завжди прийнятні, застосування сповільненого охолодження дещо знижує власні напруження, але повністю проблеми збереження площинності й запобігання тріщинам не вирішує.

Найбільше застосування знайшли методи другої та третьої груп, а також їх поєднання, що пояснюється їх більшою універсальністю, ефективністю й ширшими можливостями.

#### **7.5. Приклад розрахунку залишкових напружень і деформацій у паяному (дифузійному) з'єднанні**

Визначити залишкові напруження і деформації, які виникають при дифузійному зварюванні (паянні) двошарового бруса зі сплаву ніобію (верхній шар) та міді (нижній шар) (рис. 7.40). Розміри шарів наступні:  $a_1 = 2$  мм;  $b_1 = 13$  мм;

$a_2 = 8$  мм;  $b_2 = 13$  мм; довжина  $l = 100$  мм. Температура з'єднання  $900$  °С (товщиною шару припоєю знехтувати).

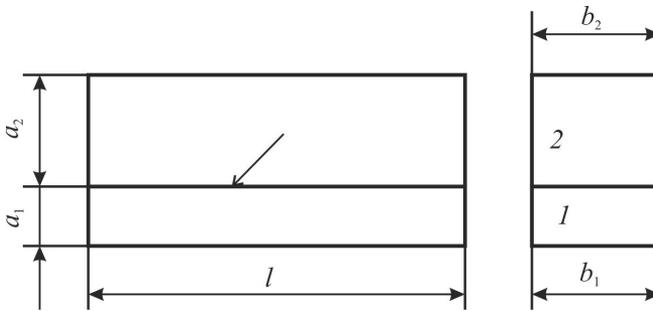


Рис. 7.40. Двошаровий брус з ніобію (1) та міді (2)

Модуль пружності ніобію приймемо  $E_1 = 1 \cdot 10^5$  МПа (див. табл. 7.1), модуль пружності міді  $E_2$  у діапазоні температури нагрівання при з'єднанні змінюється від  $1,13 \cdot 10^5$  МПа практично до 0, тому в розрахунок приймемо  $E_2 = 0,7 \cdot 10^5$  МПа; ТКЛР для ніобію  $\alpha_1 = 8,5 \cdot 10^{-6}$  1/°С, міді  $\alpha_2 = 20 \cdot 10^{-6}$  1/°С.

Розрахунковий перепад температур приймемо  $800$  °С з урахуванням низької міцності та високої релаксаційної здатності міді в області високих температур.

### Розв'язання

1. Площі поперечного перерізу шарів

$$F_1 = a_1 \cdot b_1 = 2 \cdot 13 = 26 \text{ мм}^2; F_2 = a_2 \cdot b_2 = 8 \cdot 13 = 104 \text{ мм}^2.$$

2. За формулами (7.4) визначимо напруження без урахування вигину: у ніобію

$$\sigma_1 = -E_1 \frac{\alpha_1 \Delta T_1 - \alpha_2 \Delta T_2}{1 + E_1 F_1 / E_2 F_2} = -1 \cdot 10^5 \cdot \frac{8,5 \cdot 10^{-6} \cdot (-800) - 20 \cdot 10^{-6} \cdot (-800)}{1 + 1 \cdot 10^5 \cdot 26 / (0,7 \cdot 10^5 \cdot 104)} = -678 \text{ МПа};$$

у міді

$$\sigma_2 = E_2 \frac{\alpha_1 \Delta T_1 - \alpha_2 \Delta T_2}{1 + E_2 F_2 / E_1 F_1} = 0,7 \cdot 10^5 \cdot \frac{8,5 \cdot 10^{-6} \cdot (-800) - 20 \cdot 10^{-6} \cdot (-800)}{1 + 0,7 \cdot 10^5 \cdot 104 / (1 \cdot 10^5 \cdot 26)} = 170 \text{ МПа}.$$

3. Брус згинається моментом

$$M = -\sigma_1 F_1 a / 2 = \sigma_2 F_2 a / 2 = 678 \cdot 26 \cdot 10 / 2 = 88140 \text{ Н} \cdot \text{мм},$$

де  $a = a_1 + a_2 = 2 + 8 = 10$  мм – загальна висота вузла.

4. Положення пружного ЦВ складеного перерізу по висоті визначаємо за формулою (7.7), вважаючи ординати ЦВ шарів  $z_1 = 1$  мм та  $z_2 = 6$  мм:

$$z_0 = \frac{E_1 a_1 b_1 z_1 + E_2 a_2 b_2 z_2}{a_1 b_1 E_1 + a_2 b_2 E_2} = \frac{1 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 13 \cdot 1 + 0,7 \cdot 10^5 \cdot 8 \cdot 13 \cdot 6}{2 \cdot 13 \cdot 1 \cdot 10^5 + 8 \cdot 13 \cdot 0,7 \cdot 10^5} = 4,68 \text{ мм.}$$

5. Пружний момент інерції складеного перерізу знаходимо за формулою (7.6):

$$\begin{aligned} E_0 I_{x0} &= E_1 \frac{b_1 a_1^3}{12} + E_2 \frac{b_2 a_2^3}{12} + E_1 a_1 b_1 (z_1 - z_0)^2 + E_2 a_2 b_2 (z_2 - z_0)^2 = \\ &= 1 \cdot 10^5 \cdot \frac{13 \cdot 2^3}{12} + 0,7 \cdot 10^5 \cdot \frac{13 \cdot 8^3}{12} + 1 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 13 \cdot (1 - 4,68)^2 + \\ &\quad + 0,7 \cdot 10^5 \cdot 8 \cdot 13 \cdot (6 - 4,68)^2 = 87,6 \cdot 10^6 \text{ МПа} \cdot \text{мм}^4. \end{aligned}$$

6. Напруження від вигину визначаємо за формулою (7.5):  
у верхній точці мідного шару ( $z_{2в} = 10$  мм)

$$\sigma(z_i) = \frac{M(z_0 - z_i)E(z_i)}{E_0 I_{x0}} = \frac{88140 \cdot (4,68 - 10) \cdot 0,7 \cdot 10^5}{87,6 \cdot 10^6} = -375 \text{ МПа};$$

у міді на межі поділу шарів ( $z_{2н} = 2$  мм)

$$\sigma(z_i) = \frac{88140 \cdot (4,68 - 2) \cdot 0,7 \cdot 10^5}{87,6 \cdot 10^6} = 189 \text{ МПа};$$

у ніобію на межі поділу шарів ( $z_{1в} = 2$  мм)

$$\sigma(z_i) = \frac{88140 \cdot (4,68 - 2) \cdot 1 \cdot 10^5}{87,6 \cdot 10^6} = 270 \text{ МПа};$$

у нижній точці шару з ніобію ( $z_{1н} = 0$  мм)

$$\sigma(z_i) = \frac{88140 \cdot (4,68 - 0) \cdot 1 \cdot 10^5}{87,6 \cdot 10^6} = 471 \text{ МПа.}$$

7. Сумарні напруження у відповідних точках:

$$\sigma_{1н} = -678 + 471 = -207 \text{ МПа};$$

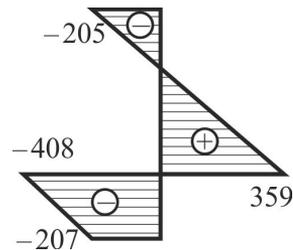
$$\sigma_{1в} = -678 + 270 = -408 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{2н} = 170 + 189 = 359 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{2в} = 170 - 375 = -205 \text{ МПа}.$$

8. Епюра розподілу напружень по висоті перерізу показана на рис. 7.41.

Рис. 7.41. Епюра розподілу залишкових напружень у перерізі двошарового бруса



Як видно з розрахунку, виникаючі напруження перевищують границю плинності міді (для міді у відпаленому стані вона дорівнює 100...150 МПа), отже, після охолодження в ній з'являться пластичні деформації.

9. Розрахункова (пружна) стрілка прогину знаходиться за формулою (7.8)

$$f = \frac{Ml^2}{8E_0I_{x0}} = \frac{88140 \cdot 100^2}{8 \cdot 87,6 \cdot 10^6} = 1,26 \text{ мм}.$$

З урахуванням пластичних деформацій реальна стрілка прогину бруса буде більша.

## 7.6. Контрольні запитання

1. Поясніть механізм утворення власних напружень і деформацій у паяних та дифузійних з'єднаннях. Чим він відрізняється від зварювання плавленням?

2. Які основні причини утворення власних напружень і деформацій при паянні та дифузійному зварюванні?

3. На якому етапі технологічного процесу паяння або ДЗ вони з'являються?

4. Які чинники впливають на величину власних напружень і деформацій при паянні та ДЗ?

5. Якими методами можна регулювати залишкові напруження і деформації в паяних та дифузійних з'єднаннях?

6. Як розподілені залишкові напруження в поперечному перерізі двошарового бруса?

7. Як впливають власні напруження на форму і працездатність паяних та дифузійних вузлів?

8. Які властивості з'єднуваних матеріалів впливають на напруження і деформації при паянні та ДЗ?

9. Чим відрізняються результати розрахунків напружено-деформованого стану спрощеними методами та методами теорії пружності?

10. Як впливає температура паяння (ДЗ) на рівень залишкових напружень та деформацій?

11. Як і чому впливає швидкість охолодження на рівень залишкових напружень при паянні та ДЗ?

12. Від чого залежить знак власних напружень у паяному та дифузійному з'єднанні?

### 7.7. Завдання для самостійної роботи

Виконати завдання згідно з вихідними даними табл. 7.6.

Таблиця 7.6. Варіанти вихідних даних до завдань

| Номер варіанта | Матеріал № 1 | Матеріал № 2                   | $l, h$ | $a_1$ | $a_2$ | $b, r$ | $T$  |
|----------------|--------------|--------------------------------|--------|-------|-------|--------|------|
|                |              |                                | мм     |       |       |        |      |
| 1              | Залізо       | Вольфрам                       | 50     | 5     | 10    | 10     | 1000 |
| 2              | Залізо       | Мідь                           | 60     | 10    | 10    | 15     | 800  |
| 3              | Залізо       | Ніобій                         | 70     | 15    | 10    | 20     | 1100 |
| 4              | Залізо       | Графіт                         | 80     | 20    | 15    | 25     | 1200 |
| 5              | Мідь         | Ковар                          | 90     | 5     | 15    | 30     | 700  |
| 6              | Мідь         | X18H10T                        | 100    | 10    | 15    | 35     | 900  |
| 7              | Мідь         | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 50     | 15    | 20    | 40     | 850  |
| 8              | Мідь         | Вольфрам                       | 60     | 20    | 20    | 45     | 800  |
| 9              | Ковар        | Мідь                           | 70     | 5     | 20    | 50     | 700  |
| 10             | Ковар        | Ніобій                         | 80     | 10    | 10    | 10     | 900  |
| 11             | Ковар        | Графіт                         | 90     | 15    | 10    | 15     | 950  |
| 12             | Залізо       | Ковар                          | 100    | 20    | 10    | 20     | 1000 |
| 13             | Залізо       | X18H10T                        | 50     | 5     | 15    | 25     | 1100 |
| 14             | Ковар        | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 60     | 10    | 15    | 30     | 950  |
| 15             | Ковар        | Вольфрам                       | 70     | 15    | 15    | 35     | 1200 |
| 16             | Залізо       | Мідь                           | 80     | 20    | 20    | 40     | 900  |
| 17             | Залізо       | Ніобій                         | 90     | 5     | 20    | 45     | 1150 |
| 18             | Залізо       | Графіт                         | 100    | 10    | 20    | 50     | 1200 |
| 19             | Залізо       | Ковар                          | 50     | 15    | 10    | 10     | 950  |
| 20             | Залізо       | X18H10T                        | 60     | 20    | 15    | 15     | 1000 |
| 21             | Залізо       | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 70     | 10    | 20    | 20     | 1200 |

**Задача 7.1.** Тришаровий брус (див. рис. 7.4,а,б) отриманий дифузійним зварюванням у вакуумі при температурі  $T$ .

1. Визначити величину напружень у шарах бруса після охолодження.
2. Побудувати епюру залишкових напружень у поперечному перерізі бруса.
3. Як зміниться епюра напружень?
  - якщо матеріали шарів поміняти місцями;
  - якщо збільшити товщину  $b$  усіх шарів;
  - якщо пропорційно збільшити ширину  $a$  всіх шарів;

- якщо збільшити ширину  $a_1$  зовнішніх шарів;
- якщо збільшити ширину  $a_2$  внутрішнього шару.

**Задача 7.2.** Двошаровий брус (рис. 7.42) отримано дифузійним зварюванням у вакуумі при температурі  $T$ .

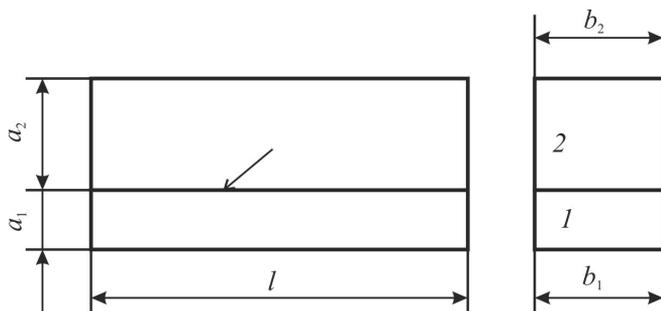


Рис. 7.42. Двошаровий брус

1. Визначити величину стрілки вигину бруса після охолодження.
2. Визначити величину напружень у шарах бруса після охолодження.
3. Побудувати епюру залишкових напружень у поперечному перерізі бруса.
4. Як зміниться епюра напружень?
  - якщо матеріали шарів поміняти місцями;
  - якщо збільшити товщину  $b$  усіх шарів;
  - якщо пропорційно збільшити ширину  $a$  усіх шарів;
  - якщо збільшити тільки ширину  $a_1$  нижчого шару;
  - якщо збільшити тільки ширину  $a_2$  верхнього шару?

**Задача 7.3.** Двошарову втулку (див. рис. 7.7) отримано дифузійним зварюванням у вакуумі при температурі  $T$ .

1. Визначити величину залишкових напружень у шарах втулки після охолодження.
2. Побудувати епюри залишкових осьових, радіальних і тангенціальних напружень у поперечному перерізі втулки.
3. Як зміняться епюри напружень?
  - якщо матеріали шарів поміняти місцями;
  - якщо пропорційно збільшити товщину всіх шарів;
  - якщо пропорційно збільшити висоту всіх шарів;
  - якщо збільшити тільки товщину зовнішнього шару;
  - якщо збільшити тільки товщину внутрішнього шару.

## Розділ 8. РЕГУЛЮВАННЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ НАПРУЖЕНЬ І ДЕФОРМАЦІЙ

### 8.1. Вплив власних напружень і деформацій на зварні конструкції

Вплив зварювальних напружень і деформацій різноманітний та не завжди однозначний. У різних конструкціях та різних ситуаціях він проявляється по-різному. При цьому в одних випадках неприємності та проблеми пов'язані з напруженнями, в інших – з деформаціями і переміщеннями.

Розглянемо спочатку деякі проблеми, пов'язані зі зварювальними напруженнями.

**1. Порушення точності виготовлення конструкцій при механічній обробці.** Зварювальні напруження належать до власних, тобто існують у конструкції за відсутності зовнішніх сил. Характерною особливістю таких напружень є їх взаємна зрівноваженість за силами та моментами в будь-якому перерізі конструкції. Наприклад, при наявності напружень розтягу в одних точках металу вони обов'язково зрівноважуються напруженнями стиску в інших.

Механічна обробка конструкції (вузла, деталі) завжди супроводжується видаленням частини металу. Разом з металом видаляється частина напружень, що порушує рівновагу, і конструкція сама по собі змінює свою форму та розміри для відновлення рівноваги. При видаленні частини металу з поверхні наплавленого шва на верхню крайку пластини (рис. 8.1,*а*) площа пружно-пластичних деформацій зменшується. Відповідно зменшується сила усадки, внаслідок чого зменшуються укорочення по осі та стрілка прогину  $f$ , тобто пластина мимоволі подовжиться і зменшить прогин (див. рис. 8.1,*б*). Так відбуватиметься до тих пір, поки послідовним зняттям шарів не буде видалена вся зона ППД. Після цього пластина повністю відновить свою первинну (до зварювання) довжину та прямолінійну форму.

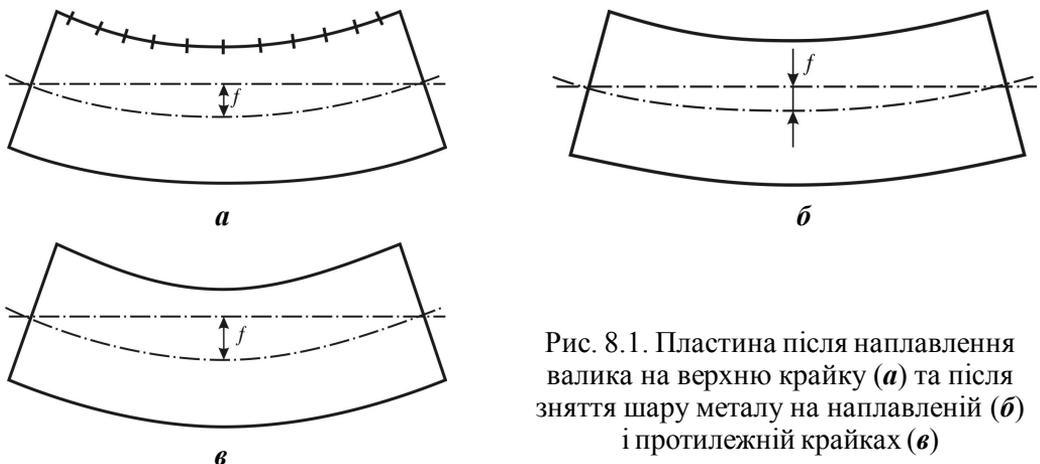


Рис. 8.1. Пластина після наплавлення валика на верхню крайку (*а*) та після зняття шару металу на наплавленій (*б*) і протилежній крайках (*в*)

Якщо видаляти частину металу на протилежній до наплавленої крайці, тобто в реактивній частині, то жорсткість перерізу зменшується. Тоді при незмінних величинах площі активної зони та сили усадки деформації укорочення й вигину збільшуватимуться (див. рис. 8.1, в).

Величина деформацій при механічній обробці залежить не тільки від величини залишкових напружень, але і від жорсткості конструкції: чим менша жорсткість, тим більша деформація при обробці.

**2. Порушення точності виготовлення конструкції при першому навантаженні** виникає в тому випадку, якщо зовнішнє навантаження розтягує активну зону. Оскільки після зварювання напруження розтягу в цій зоні вже досягають границі плинності, тобто запас пружних деформацій вичерпаний, то навіть невелике навантаження викликає появу пластичних деформацій. Ці деформації зменшують об'єм поздовжнього укорочення, тому після розвантаження зварювальне укорочення та вигин зменшуються, а конструкція не повертається в первинні форму і розміри. Крім того, пластичні деформації можуть виникнути далеко від активної зони, якщо зварювальні напруження разом з робочими (під дією зовнішнього навантаження) досягнуть границі плинності матеріалу конструкції.

Цю обставину надзвичайно важливо враховувати в машинобудівних конструкціях, де потрібна висока точність (співвісність валів, паралельність робочих поверхонь тощо).

**3. Зниження міцності в поєднанні з іншими несприятливими чинниками.** Вплив зварювальних напружень на міцність конструкції аналогічний впливу концентрації напружень. Тобто, якщо в конструкціях з достатнім запасом пластичності матеріалів при їх роботі в умовах статичного навантаження руйнуванню металу передують значні пластичні деформації, то власні напруження практично не впливають на міцність.

У конструкціях, які працюють при циклічному навантаженні, границя витривалості (утоми) може зменшитися, якщо в зоні утворення утомної тріщини діють зварювальні напруження розтягу, або, навпаки, збільшиться, якщо діють напруження стиску.

Наявність інших несприятливих чинників (зміна механічних властивостей у зоні термічного впливу, концентратори напружень, пов'язані з дефектами форми і несучільностями в зоні зварних з'єднань, перетинання швів по двох і, особливо, трьох взаємно перпендикулярних осях, що створює плоский або об'ємний напружений стан, низькі температури тощо) зазвичай посилює вплив через зниження запасу пластичності та тріщиностійкості й може суттєво знизити міцність конструкції.

До дефектів форми належать геометричні зсуви і кутові деформації, а також дефекти типу: подрізи, напливи, пористість металу зварного шва, пропали, утяжини тощо. Однак найбільш небезпечними є пропущені в процесі виготовлення дефекти несучільності типу непроварів, гарячі і холодні тріщини,

тріщини відпуску, ламелярні тріщини. Найчастіше такі технологічні дефекти під дією зовнішніх навантажень і внутрішніх залишкових зварювальних напружень є осередками розвитку експлуатаційних дефектів несучільності: утомних і корозійних тріщин, тріщин повзучості, а також крихких руйнувань.

Питання виникнення тріщин при зварюванні детально розглядаються в курсах "Теорія процесів зварювання" та "Зварювання спеціальних сталей і сплавів".

**4. Зменшення жорсткості.** Активна зона, в якій напруження досягають границі плинності, практично виключається з робочого перерізу, оскільки метал у ній тече не чинячи опору навантаженню. Це зменшує площу та момент інерції, а також жорсткість при розтягу і вигині. Зварна балка, яка має залишкові напруження, під дією навантаження прогинається більше, ніж катана такого ж перерізу.

**5. Зниження стійкості.** Зварювальні напруження стиску можуть викликати втрату стійкості окремих елементів конструкції навіть за відсутності зовнішнього навантаження. Якщо зварювальні напруження низькі, то і в цьому випадку разом з робочими напруженнями стиску вони можуть досягти критичних, що призведе до втрати стійкості при менших робочих зусиллях.

**6. Зниження корозійної стійкості.** Напруження розтягу в активній зоні знижують корозійну стійкість металу, що призводить до прискореної корозії саме в зоні з'єднання.

**7. Створення умов для сповільненого руйнування.** Цей негативний вплив залишкових напружень проявляється в металах, схильних до сповільненого руйнування. У зоні ППД напруження розтягу з часом можуть призвести до утворення тріщин.

Залишкові зварювальні деформації також можуть створювати проблеми при виготовленні та в процесі експлуатації конструкцій. Розглянемо деякі із них.

**1. Необхідність збільшення припуску на механічну обробку.** Допуски на відхилення форми і розмірів при механічній обробці на декілька порядків жорсткіші, ніж для зварних конструкцій (деталей, вузлів), які не підлягають обробці. Тому, якщо зварна заготівка після зварювання (наплавлення) не піддається правці й підлягає механічній обробці, всі зміни форми та розмірів необхідно включити в припуск, який буде видалений при подальшій обробці. Це дозволить отримати готову деталь (вузол) із заданою точністю (у заданих допусках).

**2. Проблеми при складанні конструкцій з окремих зварних вузлів.** Великогабаритні конструкції складають і зварюють зазвичай з окремих зварних вузлів (секцій, блоків, відправних елементів). Якщо вузли при зварюванні деформуються по-різному, скласти їх між собою з необхідними зазорами стає неможливо. Доводиться витратити багато сил, часу, енергії, щоб "припасувати" такі вузли один до одного. Іноді витрати на таке припасування стають сумірними з витратами на зварювання.

**3. Погіршення експлуатаційних характеристик.** Геометрична форма конструкції часто впливає на її експлуатаційні характеристики. Наприклад, у сферичних і циліндричних посудинах, які працюють під дією внутрішнього тиску, будь-яке відхилення від правильної сферичної або циліндричної поверхні призводить до різкого зростання робочих напружень у матеріалі. При недостатньому запасі пластичності це може призвести до зниження міцності посудини та її руйнування. Ребристість зовнішньої обшивки корпусу судна в підводній її частині призводить до погіршення умов обтікання, збільшення опору води при русі судна і, відповідно, до зменшення його швидкості та збільшення витрати палива.

**4. Порушення естетичних вимог, погіршення зовнішнього вигляду.** Для деяких конструкцій важливі не тільки експлуатаційні характеристики, але і зовнішній вигляд. Це, перш за все, побутова техніка, зовнішня поверхня транспортних засобів, різні декоративні елементи конструкцій тощо.

## **8.2. Загальні принципи боротьби з власними напруженнями та деформаціями**

У попередніх розділах показано, що величина залишкових зварювальних деформацій і напружень визначається алгебраїчною сумою (або різницею абсолютних величин) пластичних деформацій металу (переміщення зварюваних крайок) при нагріванні та охолодженні в процесі зварювання. Тому всі методи зменшення зварювальних напружень і деформацій засновані на трьох принципах (окремо або в поєднанні):

зменшення пластичних деформацій укорочення (зближення крайок) при нагріванні;

збільшення пластичних деформацій подовження (розходження крайок) при охолодженні або після нього;

компенсації деформацій.

Оскільки вплив напружень та деформацій на конструкцію різний, а крім того, зменшення деформації не завжди зменшує напруження і навпаки, у кожному конкретному випадку перед призначенням засобів боротьби слід чітко встановити, що складає основну проблему, і відповідно шукати метод регулювання (зменшення) зварювальних напружень або деформацій.

## **8.3. Методи зменшення зварювальних напружень**

**1. Попереднє або супутнє підігрівання** полягає в тому, що зварювання конструкції виконується в нагрітому до деякої температури стані. При цьому зменшується нерівномірність зварювального нагрівання, відповідно зменшуються і пластичні деформації при нагріванні. Таким чином, тут використовується перший принцип.

Мета підігрівання в цьому випадку інша, ніж при зварюванні сталей, схильних до гартування, коли підігрівання виконується для зменшення швидкості охолодження та зменшення кількості мартенситу.

Ефективність цього методу зниження зварювальних напружень прямо пропорційна температурі попереднього підігрівання. При нагріванні до температури втрати пружних властивостей (для низьковуглецевої сталі біля 600 °С) залишкові напруження знижуються практично до нуля.

**2. Проковування зони з'єднання після зварювання** полягає в місцевій пластичній деформації ударами молотка. При цьому в напрямі товщини створюються деформації укорочення, а вздовж і поперек шва – подовження. Напруження розтягу при цьому знижуються і можуть перейти в напруження стиску. В цьому методі використовується другий принцип – збільшення деформацій подовження після охолодження. Проковування здійснюється в межах зони ППД, тобто там, де зосереджені залишкові пластичні деформації укорочення після зварювання. Ефект проковування розповсюджується зазвичай на невелику глибину (декілька міліметрів).

Перевагою цього методу є його простота. Він не вимагає для виконання складного устаткування та значних витрат енергії. Проковування знижує вірогідність утворення холодних тріщин і підвищує міцність при циклічних навантаженнях. Недолік цього методу – складність контролю через відсутність можливості вимірювання параметрів процесу. В результаті цього важко розрахувати ступінь деформації та гарантувати рівномірність проковування в з'єднанні. Крім того, за рахунок створення додаткових пластичних деформацій у холодному стані дещо зменшується запас пластичності металу.

**3. Прокатування роликми зони з'єднання після зварювання.** За механізмом зменшення напружень цей метод схожий на проковування: також за рахунок пластичного укорочення по товщині при сплюсненні відбувається пластичне подовження вздовж і поперек шва, за рахунок чого напруження розтягу зменшуються (рис. 8.2). При цьому усуваються в основному деформації та напруження, які викликані поздовжнім укороченням. Деформації металу в поперечному напрямі, викликані сплюсненням, невеликі й, як правило, не усуваються зварювальних.

Прокатування проводиться в зоні ППД вузькими сталевими роликми (завтовшки 5...15 мм) на спеціальних машинах. Метод розроблено С.О. Куркіним (МВТУ ім. Баумана). Він запропонував формулу для розрахунку зусилля притиснення ролика  $P$  за товщиною металу в зоні прокатування  $s$ , діаметром  $d$ , шириною ролика  $b$ , модулем пружності  $E$  та границею плинності ( $\sigma_T$ ) металу в зоні прокатування:

$$P = b \sqrt{\frac{10,1d \cdot s \cdot \sigma_T^3}{E}}$$

Знайдене за формулою зусилля може бути уточнене дослідним шляхом при правці конкретних виробів.

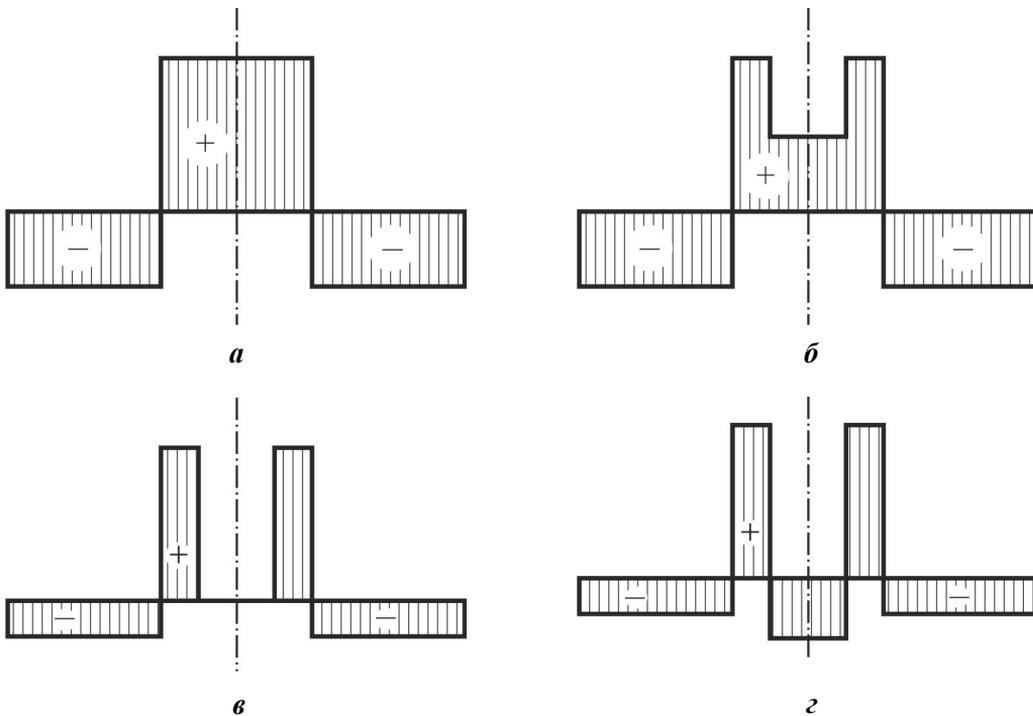


Рис. 8.2. Епюри поздовжніх напружень після зварювання (а) та прокатування при недостатньому (б), нормальному (в) і надмірному (з) зусиллях стиску

Прокатувати необхідно зону шва та прилеглі до нього ділянки пришовної зони (зону ППД). Для цього прокатування необхідно вести в декілька проходів. При доступності для прокатування лише дуже вузької зони зняти деформації можна перекаткою, тобто прикладанням зусилля більшого, ніж необхідно. При цьому в зоні перекатки створюються напруження стиску, які зрівноважують напруження розтягу, що залишилися в непрокатаній зоні (див. рис. 8.2,з). При недостатньому зусиллі стиску напруження розтягу знімаються неповністю (див. рис. 8.2,б). Для їх зменшення можна застосувати повторне прокатування, проте слід мати на увазі, що за рахунок наклепу металу при першому прокатуванні подальші проходи на тих же режимах створюють значно меншу пластичну деформацію (всього 10...15 % від деформації першого проходу). Крім того, при перекатці всієї зони ППД конструкція почне деформуватися у зворотний бік.

Цей метод рекомендується застосовувати для тонколистових конструкцій завтовшки в декілька міліметрів (для сплавів АМг до 12 мм) для зменшення як напружень, так і деформацій. На відміну від методу проковування, всі параметри процесу прокатування легко контролюються.

**4. Зовнішнє навантажування зусиллями (напруженнями) розтягу в процесі зварювання та після нього.** При навантажуванні зусиллями розтягу при зварюванні зменшуються пластичні деформації укорочення в процесі нагрівання та збільшуються пластичні деформації подовження при охолодженні, тобто використовуються перші два принципи. Якщо розтягування проводиться після зварювання, працює тільки другий принцип, тобто збільшуються деформації подовження після зварювання.

Наблизивши напруження розтягу вздовж з'єднання до границі плинності, можна залишкові напруження та деформації подовжнього укорочення зменшити практично до нуля. Цей метод дуже ефективний, але часто зв'язаний з технічними труднощами практичного використання, оскільки в реальних конструкціях іноді важко створити необхідні напруження розтягу вздовж усього з'єднання.

Один з різновидів методу – термомеханічне навантаження – полягає в тому, що ділянки основного металу по обидві сторони від осі зварного з'єднання нагріваються рухомих пальником, створюючи дві рухомі нагріті плями металу, які розширюються і розтягують зону ППД.

Окремий випадок виконання механічного навантажування – **вібраційне навантажування**, особливістю якого є чергування в металі півхвиль розтягу та стиску. При невисокому рівні цих напружень (менше від границі плинності) їх вплив позначається тільки на металі в зоні ППД, де напруження розтягу досягає границі плинності. При цьому негативна півхвиля (напруження стиску) дещо знижує напруження розтягу, не викликаючи пластичних деформацій. Позитивна ж півхвиля (напружень розтягу) в цій зоні створює пластичні деформації подовження, оскільки метал уже розтягнутий до границі плинності. При багаторазовому повторенні процесу пластичні деформації подовження підсумовуються компенсуючи пластичне укорочення, що утворилося при нагріванні.

Додатковим чинником, який сприяє збільшенню ступеня пластичної деформації при вібраційному навантаженні, є зниження рівня границі плинності при високій частоті. За рахунок збільшення енергії коливань атомів кристалічної ґратки відбувається перехід пружних деформацій у пластичні аналогічно термообробці. Ефект вібраційної обробки збільшується при накладанні статичного та вібраційного навантажень.

Створюється вібраційне навантаження спеціальним пристроєм – вібратором (механічним, електромагнітним), який жорстко кріпиться на конструкції, передаючи їй механічні коливання. Загальний час вібраційної обробки зазвичай складає декілька десятків хвилин.

**5. Високий відпуск** полягає в тому, що конструкцію витримують при підвищеній температурі (для конструкційної сталі 600...700 °С) протягом деякого часу, який зазвичай складає від однієї до декількох годин. Цей метод зняття зварювальних напружень традиційно широко використовується

в машинобудуванні, перевершуючи за об'ємом застосування всі інші методи, хоча за ефективністю (енергоємністю, тривалістю, громіздкістю устаткування тощо) він поступається методу вібраційної обробки.

Витримка при підвищених температурах (високий відпуск) супроводжується двома дуже важливими для зварних конструкцій процесами:

- 1) зміною властивостей металу – зняттям наклепу, гартівних структур та деформаційного старіння і відновленням пластичності;
- 2) зняттям напружень (першого, другого та третього роду).

Явища першої групи розглядаються в металознавстві, другої – в механіці. Розділ механіки, що займається вивченням явищ, які відбуваються при відпуску, називається теорією повзучості. У цій теорії розглядаються два крайні випадки поведінки металу при високій температурі: повзучість та проста релаксація.

При повзучості в металі під постійним навантаженням (при постійному напруженні) із часом пластичні деформації зростають. Графік залежності деформацій  $\varepsilon$  від часу при постійному напруженні й температурі називається кривою повзучості (рис. 8.3, *a*).

При простій релаксації величина деформації залишається постійною, а рівень напружень із часом знижується. Графік залежності напружень  $\sigma$  від часу при постійній деформації і температурі називається кривою релаксації (див. рис. 8.3, *б*).

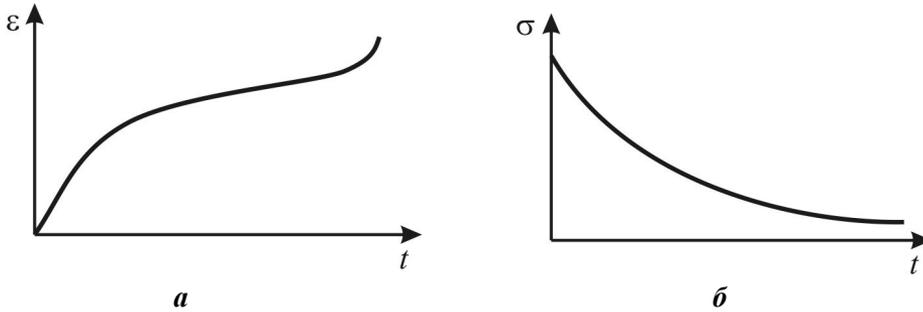


Рис. 8.3. Криві повзучості (*a*) та релаксації (*б*)

В умовах роботи конструкції під навантаженням при підвищених температурах найбільший практичний інтерес викликають процеси повзучості. При відпуску зварних конструкцій відбуваються явища, близькі до простої релаксації, оскільки в процесі відпуску зняття напружень відбувається за рахунок переходу пружних деформацій у пластичні, загальна величина деформацій при цьому практично не змінюється.

Процес відпуску можна розділити на два періоди: період нагрівання і вирівнювання температури та період витримки при температурі відпуску. Дослідження, проведені В.О. Винокуровим (МВТУ ім. Баумана), показали, що відпуск починається та відбувається в основному в перший період – період нагрівання (рис. 8.4). Установлено також, що збільшення часу витримки мало впливає на зниження напружень  $\sigma$ . Більш ефективним є підвищення

температури відпуску  $T$ . Для низьковуглецевих низьколегованих сталей достатніми є температури  $600 \dots 650 \text{ }^\circ\text{C}$  та час витримки  $2 \dots 3$  год. Інтенсивніше проходять процеси релаксації при лінійному напруженому стані.

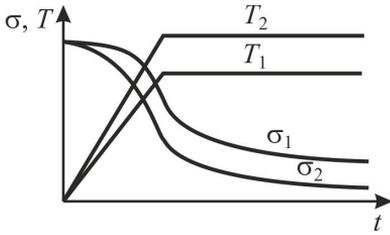


Рис. 8.4. Криві релаксації напружень у зварному з'єднанні з низьковуглецевої сталі

При об'ємному напруженому стані релаксація уповільнюється і рівень залишкових напружень при тих же режимах відпуску в  $2 \dots 3$  рази вищий порівняно з лінійним станом.

При застосуванні для зняття напружень високого відпуску необхідно враховувати, що при різних теплофізичних властивостях (перш за все термічних коефіцієнтів розширення) основного та наплавленого металів або металу з'єднаних деталей (у вузлах з різнорідних металів) після охолодження виникають нові напруження.

У великогабаритних конструкціях, які неможливо нагрівати цілком, виконують нагрівання та відпуск тільки тієї частини, в якій розташоване зварне з'єднання. Проводиться так званий *місцевий відпуск*.

При використанні місцевого відпуску необхідно мати на увазі, що внаслідок нерівномірного нагрівання після охолодження в конструкції знову виникають залишкові напруження. Проте це не виключає можливість його застосування, оскільки можна регулювати характер залишкового напруженого стану та ступінь його небезпеки з причини крихкого руйнування. Наприклад, урахувавши те, що найбільш небезпечними є залишкові напруження в зоні їх концентрації (непровар у корені шва), можна вибрати розподіл температури при місцевому відпуску таким, щоб зони з максимальними залишковими напруженнями та деформаціями розташовувалися якнайдалі від концентратора (рис. 8.5). У цьому випадку рекомендується розширення зони нагрівання з плавним переходом від нагрітого до холодного металу.

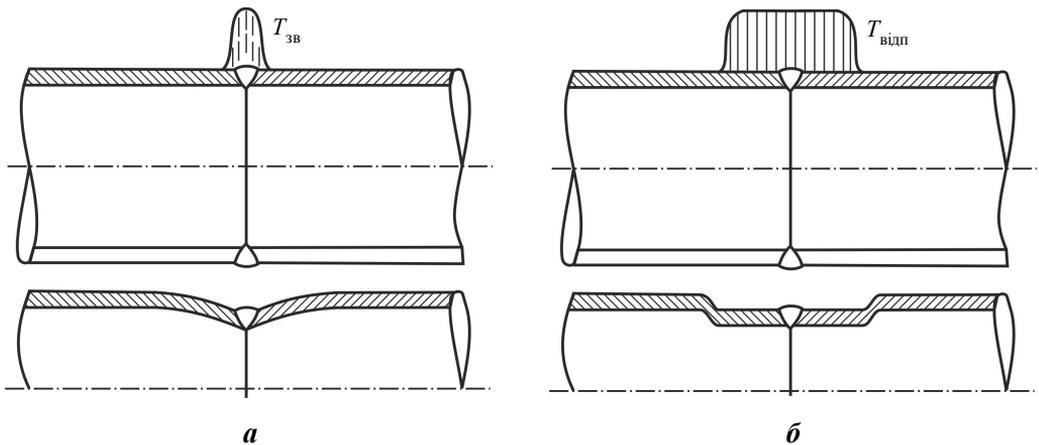


Рис. 8.5. Розподіл температури і залишкових деформацій у районі стику вала після зварювання  $T_{зв}$  (а) та місцевого відпуску  $T_{відп}$  (б)

Не слід призначати місцеву термообробку в замкнутому контурі, коли скорочення металу при охолодженні не може відбуватися вільно (рис. 8.6). У цьому випадку доцільно провести симетричне нагрівання декількох частин конструкції (ділянки *A* та *B* на рис. 8.6).

#### 8.4. Методи зменшення зварювальних деформацій

За організаційно-технологічним принципом методи боротьби зі зварювальними деформаціями, їх зменшення та регулювання поділяються на три групи: методи, які застосовують до зварювання, в процесі зварювання та після нього. Як правило, найбільш ефективними і найменш трудомісткими є методи першої групи, найбільш трудомісткими – третьої.

##### Методи, які застосовуються до зварювання

**1. Раціональне проектування.** Досвідчений конструктор передбачає появу зварювальних деформацій уже на стадії проектування. Тут діє відомий принцип – легше запобігти, ніж усувати наслідки. Основні принципи раціонального щодо зварювальних деформацій проектування спрямовані або на зменшення ступеня нагрівання і відповідно пластичних деформацій при нагріванні, або на компенсацію одних деформацій іншими.

*Призначення способів зварювання, які забезпечують мінімальне нагрівання.* За зростанням ступеня нагрівання способи зварювання можна розташувати в такий ряд: контактне точкове, дугове, газове зварювання. У свою чергу ступінь нагрівання при дугових методах зварювання тим більший, чим менший коефіцієнт наплавлення  $\alpha_n$ . Тому максимальна кількість тепла вводиться при ручному дуговому зварюванні ( $\alpha_n$  до 10 г/(А·год)), дещо менша при зварюванні під флюсом ( $\alpha_n = 12 \dots 14$  г/(А·год)) і найменша – в захисному газі ( $\alpha_n$  досягає до 20 г/(А·год)).

*Призначення типів зварних з'єднань з мінімальною кількістю наплавленого металу.* Ступінь нагрівання при зварюванні будь-яким способом визначається кількістю металу, який необхідно наплавити (розплавити) для отримання з'єднання. Кількість наплавленого металу залежить від типу з'єднання. Мінімальну кількість має з'єднання без скосу крайок. За наявності скосу кількість наплавленого металу визначається площею обробки.

*Застосування по можливості переривчастих швів.* Досить часто мало-завантажені таврові з'єднання мають завищені катети, оскільки останні визначаються не вимогами міцності, а рекомендаціями нормативних документів щодо величини мінімальних катетів залежно від товщини основного металу. В таких з'єднаннях при збереженні умов міцності та мінімальних катетів

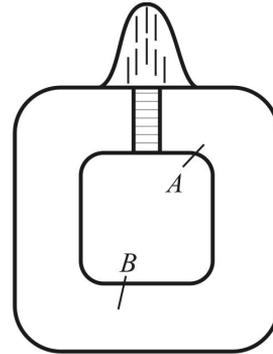


Рис. 8.6. Місцевий відпуск зварного з'єднання в замкнутому контурі

можна безперервні шви замінити переривчастими. Проте слід мати на увазі, що в деяких конструкціях, наприклад працюючих при циклічних навантаженнях, застосування таких швів обмежується технічними вимогами внаслідок підвищеної концентрації в них напружень.

*Симетричне розташування зварних з'єднань щодо осі конструкції.* Найбільші проблеми в зварних конструкціях зазвичай створюються деформаціями вигину. Оскільки напрям вигину залежить від розташування шва відносно осі конструкції, то необхідно використовувати принцип компенсації, коли вигин, який викликається одними швами, частково або повністю компенсується іншими.

### 2. Попередня зміна форми та розмірів конструкції при складанні.

Якщо об'єктивно неможливо отримати зварну конструкцію з відхиленнями від заданих розмірів та форми в межах установлених допусків, слід складати її під зварювання не "в чистий розмір", а змінити форму й розміри з відповідним припуском і "розвалом" (рис. 8.7) таким чином, щоб протидіяти зварювальним деформаціям. Такий прийом широко використовується для складних великогабаритних конструкцій, зокрема секцій корпусу судна. Основна складність застосування цього методу – необхідність попереднього визначення величини та характеру очікуваних зварювальних деформацій розрахунковим або експериментальним шляхом.



Рис. 8.7. Попередній розвал плоскої плити (а) і секції корпусу судна (б)

**3. Зворотний пружний вигин** за допомогою спеціальних пристроїв (кондукторів) (рис. 8.8). При цьому в зоні зварювання необхідно створити початкові напруження розтягу, які зменшують поздовжню усадку (усадкову силу й об'єм поздовжнього укорочення). У результаті зменшуються деформації, обумовлені цією причиною. Навантажуючий пристрій знімається після повного охолодження конструкції.

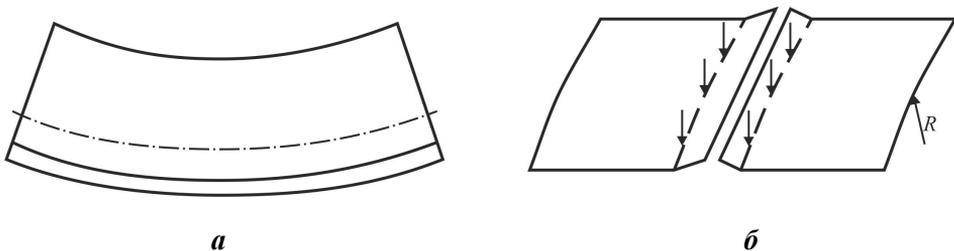


Рис. 8.8. Попередній пружний вигин таврової балки (а) та стику тонколистового полотнища на циліндричному стенді (б)

Приклад застосування такого методу – зварювання стику тонколистового полотнища на циліндричному пристрої з виступним пояском у зоні шва (див. рис. 8.8,б). Унаслідок притиснення полотнища до пристрою зона шва виявляється розтягнутою перед зварюванням.

**4. Зворотний пластичний вигин до зварювання**, тобто створення механічною дією до зварювання пластичних деформацій, які змінюють форму конструкції так, щоб протидіяти зварювальним деформаціям. Приклади застосування цього методу наступні: зворотний пластичний вигин балки перед зварюванням, розкочування крайки кільцевого стику циліндричної оболонки або кругового шва сферичної оболонки. Цей метод, порівняно з попередніми, має найбільші витрати енергії та трудомісткість, але ці витрати значно менші від тих, які буде потрібно зробити для зменшення зварювальних деформацій після зварювання.

#### Методи, які застосовуються в процесі зварювання

**1. Застосування економічних режимів**, які забезпечують мінімальне нагрівання і мінімальні деформації конструкції в процесі зварювання.

**2. Штучне охолодження зони нагрівання в процесі зварювання**, наприклад притисненням мідних охолоджуваних планок у пришовній зоні.

**3. Зварювання в жорсткому закріпленні** ефективно тільки для конструкцій, які мають малу власну жорсткість, і при великих переміщеннях елементів конструкції в процесі зварювання (великих тимчасових деформаціях). Для достатньо жорстких конструкцій додаткове жорстке закріплення перед зварюванням дає можливість знизити залишкові зварювальні деформації не більше ніж на 15...20 %.

**4. Навантаження зони шва напруженнями розтягу** в процесі зварювання, наприклад наплавленням "холостих" валиків поперек вивідних планок (рис. 8.9).

**5. Вибір раціональної послідовності складання та зварювання.** При зварюванні складних конструкцій залишкові зварювальні деформації суттєво залежать від послідовності чергування складальних та зварювальних операцій. Це необхідно враховувати при розробці технологічного процесу, вибираючи оптимальний варіант.

#### Методи, які застосовуються після зварювання

Зварювальні деформації найчастіше усувають після того, як вони виникли, замість їх попередження до або в процесі зварювання. Це пояснюється організаційно-технічними причинами, іноді також недостатньою кваліфікацією фахівців.

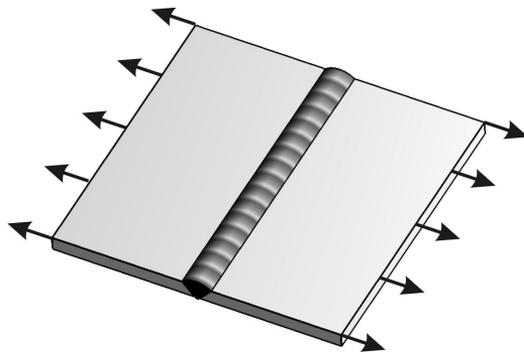


Рис. 8.9. Створення напружень розтягу при зварюванні стику листів за допомогою вивідних планок

**1. Механічна правка**, тобто створення механічною дією пластичних деформацій, зворотних зварювальним: вигин під пресом, плющення роликками, проковування молотком.

**2. Правка місцевим нагріванням, або "безударний" метод правки**, заснована на принципі компенсації, тобто створенні нерівномірним нагріванням після зварювання додаткових пластичних деформацій металу, які викликають деформації (переміщення) конструкції, зворотні зварювальним. Механізм утворення деформацій при термічній правці той же, що і при зварюванні.

Цей метод знайшов широке застосування завдяки його простоті та універсальності. Але, як правило, він вимагає від робітника певної майстерності, відповідної кваліфікації та досвіду.

Для правки можна використовувати будь-які джерела нагрівання, проте перевагу треба надавати тим джерелам, які дозволяють наступне:

- регулювати кількість та розподіл тепла при нагріванні;
- візуально визначати температуру нагрівання;
- не змінювати суттєво властивостей матеріалу й виду поверхні;
- давати більш концентроване нагрівання.

Найповніше цим вимогам задовольняє нагрівання газовим пальником, ацетилено-кисневим полум'ям. Температура нагрівання повинна дещо перевищувати температуру, при якій метал втрачає свої пружні властивості (для низьковуглецевих низьколегованих сталей це 650...800 °С). Для правки конструкцій з титанових та АМг сплавів використовують зазвичай накладання так званих "холостих" валиків прогріванням дугою неплавким електродом.

При правці нагрівають ті зони, в яких після охолодження необхідно отримати укорочення металу. За характером нагрівання слід розрізнити листові елементи, що втратили стійкість, та балкові, які отримали вигин.

При правці листових конструкцій проводять нагрівання плямами. Нагрівання повинне бути по можливості більш концентрованим. Тільки в цьому випадку розширення металу супроводжуватиметься пластичними деформаціями укорочення. При охолодженні відбувається деяке зменшення площі листа в зоні нагрівання і підтягування навколишніх холодних зон, стрілка прогину листа від втрати стійкості зменшиться. Нагрівання сусідніх плям можна проводити не чекаючи повного охолодження перших, але розташовувати їх слід на холодних ділянках. Основна складність при цьому полягає в тому, щоб не допустити збільшення стрілки прогину в процесі нагрівання, при якому зменшується ефективність правки. При недостатньому виправленні деформацій правку можна повторити.

Суттєве значення має форма плям нагрівання та їх розташування на листі відносно "хлопуна" (опуклості). Витягнута форма плями нагрівання у вигляді смуги (рис. 8.10,*а*) ефективніша за круглі плями (див. рис. 8.10,*б*).

Це пояснюється двома чинниками: по-перше, при тих же витратах тепла площа зони нагрівання у вигляді смуги до температури правки буде більшою, по-друге, поперечна усадка металу в смугі відбувається вільніше і величина її більша. При цьому скорочення площі смуги до 2,5 разів більше, ніж круглих плям, при тій же кількості витраченого на нагрівання тепла. Смуги нагрівання слід розташовувати з урахуванням того, що укорочення поперек смуги більше до 2–3 разів, ніж удовж.

"Хлопуни" у вигляді сферичної поверхні можна виправляти проводячи кільцеве нагрівання по контуру (рис. 8.11).

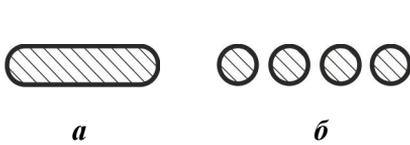


Рис. 8.10. Форма плям нагрівання при правці листових елементів

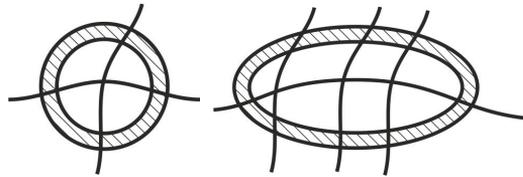


Рис. 8.11. Форма нагрівання при правці сферичних "хлопунів"

При нагріванні плямами, коли їх розміри великі, застосовують додаткове проковування молотками. Основне призначення проковування – не стоншування листів, а зменшення виходу з площини листа при нагріванні й тим самим підвищення ефективності правки.

Для усунення вигину балкових конструкцій їх нагрівають з опуклого боку (рис. 8.12). Розташування смуги нагрівання поперек і якнайдалі від осі балки (див. рис. 8.12,а) ефективніше, ніж уздовж (див. рис. 8.12,б). Найбільш ефективна форма смуги нагрівання – клиноподібна з вістрям на нейтральній осі балки (див. рис. 8.12,в).

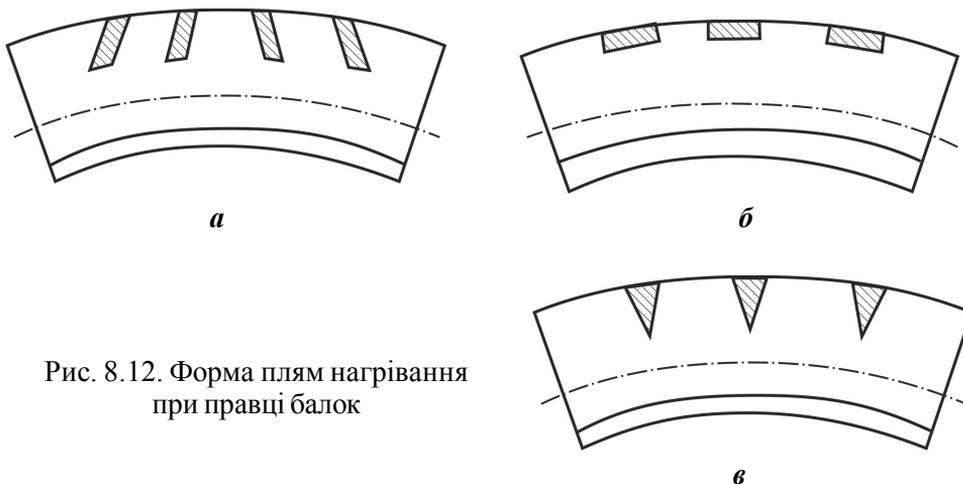


Рис. 8.12. Форма плям нагрівання при правці балок

**3. Високий відпуск у затискних пристроях.** Високий відпуск, що широко використовується для зняття напружень, практично не змінює форму та розміри конструкції. Вони залишаються такими ж, як до відпуску. Проте його можна використовувати для усунення зварювальних деформацій. Для цього конструкцію необхідно закріпити в спеціальному пристрої, надавши їй потрібну форму, наприклад прямолінійну форму осі, й у такому вигляді виконати відпуск. У процесі відпуску пружні деформації переходять у пластичні, напруження знімаються. Після охолодження та зняття закріплення конструкція зберігає потрібну форму.

### 8.5. Контрольні запитання

1. У чому полягає шкідливий вплив зварювальних напружень на конструкцію?
2. Із чим пов'язано порушення точності виготовлення зварного вузла при його подальшій механічній обробці; при його першому навантажуванні?
3. Як впливають зварювальні напруження на міцність при статичному навантаженні, якщо конструкція виготовлена з достатньо пластичного матеріалу?
4. Як впливають зварювальні напруження на міцність конструкції при циклічному навантаженні?
5. Як впливають зварювальні напруження:
  - а) на жорсткість конструкції;
  - б) на стійкість конструкції;
  - в) на корозійну стійкість металу;
  - г) на сповільнене руйнування металу.
6. На верхню крайку смуги зі сталі наплавлено валик.
  - а) Як зміниться вигин смуги, якщо на нижній крайці видалити невеликий шар металу?
  - б) Як зміниться вигин смуги, якщо на наплавленій крайці видалити невеликий шар металу?
  - в) Як зміниться вигин смуги, якщо видалити наплавлений метал разом із зоною пружно-пластичних деформацій?
  - г) Як зміниться довжина смуги, якщо на наплавленій крайці видалити невеликий шар металу?
  - д) Як зміниться довжина смуги, якщо видалити наплавлений метал разом із зоною пружно-пластичних деформацій?
  - е) Як зміниться довжина смуги, якщо на нижній крайці видалити невеликий шар металу?
7. У чому полягає шкідливий вплив зварювальних деформацій на конструкцію?
8. На яких основних принципах засновані всі методи зменшення зварювальних напружень?

9. На яких основних принципах засновані всі методи зменшення зварювальних деформацій?
10. Які методи можна застосувати для зменшення зварювальних напружень?
11. Які методи зменшення зварювальних деформацій можна застосувати на стадії проектування?
12. Назвіть основні принципи раціонального проектування з точки зору зменшення зварювальних напружень.
13. Назвіть основні принципи раціонального проектування з точки зору зменшення зварювальних деформацій.
14. Якому способу зварювання слід надати перевагу з точки зору зменшення зварювальних напружень та деформацій?
15. Якому способу дугового зварювання слід надати перевагу з точки зору зменшення зварювальних напружень та деформацій?
16. Якій формі підготовки крайок стикового з'єднання слід надати перевагу з точки зору зменшення зварювальних напружень та деформацій?
17. Які методи зменшення зварювальних деформацій можна застосувати до зварювання?
18. Які методи зменшення зварювальних деформацій можна застосувати в процесі зварювання?
19. Які методи зменшення зварювальних деформацій можна застосувати після зварювання?
20. У чому полягає метод правки місцевим нагріванням?
21. З яких міркувань вибирається форма та розташування плями нагрівання?
22. Назвіть основні переваги та недоліки методу зняття залишкових напружень проковуванням.
23. Назвіть основні переваги та недоліки методу зняття залишкових напружень плющенням.
24. Назвіть основні переваги та недоліки методу зняття залишкових напружень високим відпуском.
25. Чим відрізняється місцевий відпуск від загального, в чому його переваги та недоліки?
26. У чому полягає механізм методу зняття залишкових напружень вібрацією, в чому його переваги?

### **8.6. Приклад задачі**

Після зварювання кільцевого стику тонкостінної циліндричної оболонки зі сталі виникає прогин (злам твірної) усередину. Для усунення цього прогину часто застосовують попередній пружний вигин крайок до зварювання (рис. 8.13).

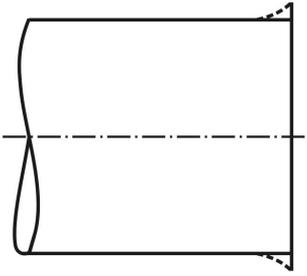


Рис. 8.13. Пружний вигин крайок оболонки до зварювання

1. Поясніть механізм впливу пружного вигину на величину деформацій зламу твірної.
2. Визначте необхідну величину пружного вигину  $\Delta R$  для повного усунення прогину. Матеріал оболонки – сталь Ст3; радіус  $R = 1$  м.
3. Як зміниться величина пружного вигину, якщо оболонка виготовлена зі сталі 09Г2?

### Розв'язання

1. Вплив попереднього пружного вигину визначається початковими напруженнями на крайці, що створюються вигином. Прогин оболонки всередину в районі кільцевого стику обумовлений поздовжнім укороченням. При зварюванні по розтягнутому металу поздовжнє укорочення зменшується пропорційно рівню початкових напружень.

2. Для повного усунення прогину після зварювання початкові напруження розтягу повинні бути такими, що дорівнюють границі плинності (для сталі Ст3  $\sigma_T = 240$  МПа). Відповідно початкові пружні деформації (за законом Гука) повинні бути  $\epsilon_T = \sigma_T / E$ . Величина деформацій подовження визначається зміною радіуса і відповідно – довжини кола, тобто  $\epsilon = \Delta R / R$ . Прирівнявши деформації  $\epsilon$  і  $\epsilon_T$ , отримаємо  $\Delta R / R = \sigma_T / E = 240 / 2 \cdot 10^5 = 1,2 \cdot 10^{-3}$  (тут модуль пружності  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа) або  $\Delta R = 1,2 \cdot 10^{-3} R$ .

3. Якщо оболонка виготовлена зі сталі 09Г2, що має границю плинності  $\sigma_T = 310$  МПа, тобто в 1,3 разу більше, ніж у сталі Ст3, необхідний пружний вигин збільшиться в 1,3 разу.

## 8.7. Завдання для самостійної роботи

**Задача 8.1.** Після зварювання (термічного різання) смуга зігнута опуклістю вгору (рис. 8.14). Покажіть найбільш ефективне положення плям нагрівання для усунення вигину.

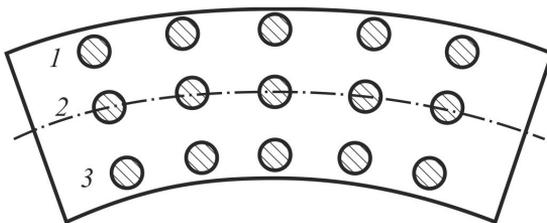
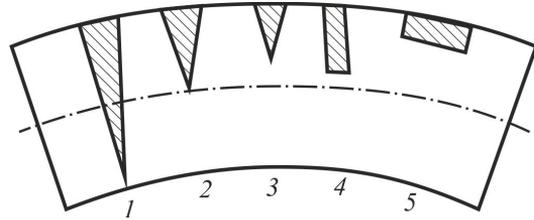


Рис. 8.14. Варіанти розташування плям нагрівання

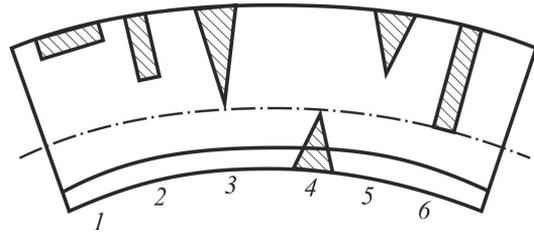
**Задача 8.2.** Після зварювання (термічного різання) смуга зігнута опуклістю вгору (рис. 8.15). Покажіть найбільш ефективну форму смуг нагрівання для усунення вигину.

Рис. 8.15. Варіанти форми смуг нагрівання



**Задача 8.3.** Після зварювання таврова балка зігнута опуклістю вгору (рис. 8.16). Покажіть найбільш ефективну форму смуг нагрівання для усунення вигину.

Рис. 8.16. Варіанти форми смуг нагрівання для виправлення таврової балки



**Задача 8.4.** Після зварювання на верстаті сталева таврова балка зігнута опуклістю вгору. Стінка перед зварюванням не прихвачується до пояска. Варіанти вихідних даних наведені в табл. 8.1.

Таблиця 8.1. Варіанти вихідних даних до задачі 8.4

| Номер варіанта | Границя плинності, МПа | Переріз стінки, мм |            | Відстань між опорними роликami $l$ , мм |
|----------------|------------------------|--------------------|------------|---|
|                |                        | Товщина $s$        | Висота $h$ |   |
| 1              | 240                    | 5                  | 100        | 500                                     |
| 2              | 240                    | 6                  | 120        | 550                                     |
| 3              | 240                    | 7                  | 140        | 600                                     |
| 4              | 240                    | 8                  | 160        | 650                                     |
| 5              | 240                    | 9                  | 180        | 700                                     |
| 6              | 240                    | 10                 | 200        | 750                                     |
| 7              | 240                    | 5                  | 80         | 500                                     |
| 8              | 310                    | 6                  | 100        | 550                                     |
| 9              | 310                    | 7                  | 120        | 600                                     |
| 10             | 310                    | 8                  | 140        | 650                                     |
| 11             | 310                    | 9                  | 160        | 700                                     |
| 12             | 310                    | 10                 | 180        | 750                                     |
| 13             | 310                    | 5                  | 120        | 500                                     |
| 14             | 310                    | 6                  | 140        | 550                                     |
| 15             | 400                    | 7                  | 160        | 600                                     |
| 16             | 400                    | 8                  | 180        | 650                                     |
| 17             | 400                    | 9                  | 200        | 700                                     |
| 18             | 400                    | 10                 | 220        | 750                                     |
| 19             | 400                    | 5                  | 140        | 500                                     |
| 20             | 400                    | 6                  | 160        | 550                                     |

1. Поясніть механізм впливу пружного вигину на величину деформацій вигину балки після зварювання.
2. Яким зусиллям  $P$  необхідно пружно навантажити стінку балки до зварювання, щоб максимально зменшити цей вигин, якщо відстань між опорами  $l$  (рис. 8.17)?
3. Яким при цьому повинен бути вертикальний зсув натискного ролика?

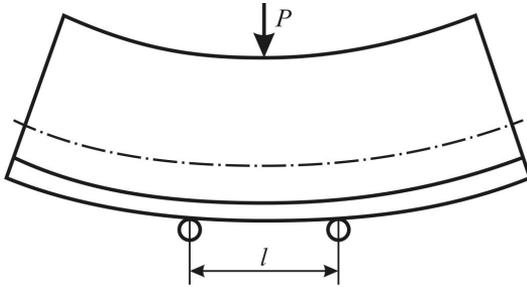


Рис. 8.17. Схема навантаження балки до зварювання для зменшення вигину

**Задача 8.5.** Після зварювання полиця сталеві таврової балки отримує недопустимий вигин ("грибоподібність"). Варіанти вихідних даних наведені в табл. 8.2.

Таблиця 8.2. Варіанти вихідних даних до задачі 8.5

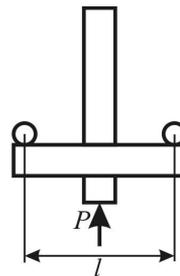
| Номер варіанта | Границя плинності, МПа | Товщина пояска $s$ | Відстань між опорними роликами $l$ |
|----------------|------------------------|--------------------|------------------------------------|
|                |                        | мм                 |                                    |
| 1              | 240                    | 6                  | 50                                 |
| 2              | 240                    | 7                  | 55                                 |
| 3              | 240                    | 8                  | 60                                 |
| 4              | 240                    | 9                  | 65                                 |
| 5              | 240                    | 10                 | 70                                 |
| 6              | 240                    | 12                 | 75                                 |
| 7              | 240                    | 14                 | 80                                 |
| 8              | 310                    | 6                  | 50                                 |
| 9              | 310                    | 7                  | 55                                 |
| 10             | 310                    | 8                  | 60                                 |
| 11             | 310                    | 9                  | 65                                 |
| 12             | 310                    | 10                 | 70                                 |
| 13             | 310                    | 12                 | 75                                 |
| 14             | 310                    | 14                 | 80                                 |
| 15             | 400                    | 6                  | 55                                 |
| 16             | 400                    | 7                  | 60                                 |
| 17             | 400                    | 8                  | 65                                 |
| 18             | 400                    | 9                  | 70                                 |
| 19             | 400                    | 10                 | 75                                 |
| 20             | 400                    | 12                 | 80                                 |

1. Поясніть механізм впливу пружно-го вигину на величину деформацій вигину полиці після зварювання.

2. Яким погонним зусиллям необхідно пружно навантажити полицю балки до зварювання, щоб максимально зменшити цей вигин (рис. 8.18)?

3. Яким при цьому повинен бути вертикальний зсув нижнього натискного ролика?

Рис. 8.18. Схема навантаження полиці балки до зварювання



## РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. **Бельчук, Г. А.** Сварка судовых конструкций [Текст] / Г. А. Бельчук, К. М. Гаатовский, Б. А. Кох. – Л. : Судостроение, 1980. – 448 с.
  2. **Винокуров, В. А.** Сварочные деформации и напряжения [Текст] / В. А. Винокуров. – М. : Машиностроение, 1968. – 236 с.
  3. **Єрмолаєв, Г. В.** Міцність зварних з'єднань [Текст] : підручник / Г. В. Єрмолаєв. – Миколаїв : НУК, 2007. – 220 с.
  4. **Кузьминов, С. А.** Сварочные деформации судовых корпусных конструкций [Текст] / С. А. Кузьминов. – Л. : Судостроение, 1974. – 286 с.
  5. **Малинин, Н. Н.** Прикладная теория пластичности и ползучести [Текст] / Н. Н. Малинин. – М. : Машиностроение, 1978. – 400 с.
  6. **Махненко, В. И.** Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций [Текст] / В. И. Махненко. – К. : Наукова думка, 2006. – 620 с.
  7. Напруження та деформації при зварюванні [Текст] : навчальний посібник / В. І. Махненко, Г. В. Єрмолаєв, В. В. Квасницький, А. В. Лабарткава. – Миколаїв : НУК, 2011. – 240 с.
  8. **Николаев, Г. А.** Расчет, проектирование и изготовление сварных конструкций [Текст] / Г. А. Николаев, С. А. Куркин, В. А. Винокуров. – М. : Высшая школа, 1971. – 760 с.
  9. **Окерблом, Н. О.** Проектирование технологии изготовления сварных конструкций [Текст] / Н. О. Окерблом, В. П. Демянцевич, И. П. Байкова. – Л. : Судпромгиз, 1967. – 602 с.
  10. Паяння матеріалів [Текст] : підручник / Г. В. Єрмолаєв, В. В. Квасницький, В. Ф. Квасницький, С. В. Максимова, В. Ф. Хорунов, В. В. Чигарьов ; за заг. ред. В. Ф. Хорунова і В. Ф. Квасницького. – Миколаїв : НУК, 2015. – 340 с.
  11. Справочник по сварке [Текст] : в 3 т. ; под ред. В. А. Винокурова. – М. : Машиностроение, 1970. – Т. 3. – 504 с.
  12. Теория сварочных процессов [Текст] : учеб. для вузов ; под ред. В. В. Фролова. – М. : Высшая школа, 1988. – 559 с.
  13. **Тимошенко, С. П.** Курс теории упругости [Текст] / С. П. Тимошенко. – К. : Наукова думка, 1972. – 508 с.
-

## ДОДАТОК

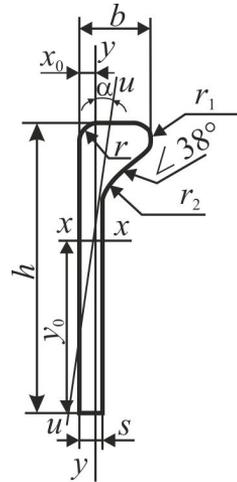


Рис. 1Д. Профіль штабульба

**Таблиця 1Д. Основні геометричні характеристики профілів сталюого штабульба для суднобудування (за ГОСТ 21937–76)**

| Номер профілю | $h$ | $b$ | $s$  | $F, \text{см}^2$ | $I_x, \text{см}^4$ | $i_x$ | $x_0$ | $y_0$ |
|---------------|-----|-----|------|------------------|--------------------|-------|-------|-------|
|               | мм  |     |      |                  |                    |       | см    |       |
| 5             | 50  | 16  | 4,0  | 2,86             | 6,85               | 1,55  | 0,41  | 3,13  |
| 5,5           | 55  | 17  | 4,5  | 3,47             | 10,10              | 1,70  | 0,44  | 3,41  |
| 6             | 60  | 19  | 5,0  | 4,28             | 14,60              | 1,85  | 0,50  | 3,74  |
| 7             | 70  | 21  | 5,0  | 5,07             | 23,80              | 2,17  | 0,54  | 4,40  |
| 8             | 80  | 22  | 5,0  | 5,84             | 35,98              | 2,49  | 0,55  | 5,07  |
| 9             | 90  | 24  | 5,5  | 7,03             | 55,60              | 2,81  | 0,58  | 5,65  |
| 10            | 100 | 26  | 6,0  | 8,63             | 83,45              | 3,11  | 0,65  | 6,29  |
| 12            | 120 | 30  | 6,5  | 11,13            | 157,36             | 3,76  | 0,72  | 7,55  |
| 14a           | 140 | 33  | 7,0  | 14,05            | 271,51             | 4,39  | 0,79  | 8,82  |
| 14б           | 140 | 35  | 9,0  | 16,85            | 324,11             | 4,38  | 0,84  | 8,53  |
| 16a           | 160 | 36  | 8,0  | 17,94            | 452,07             | 5,02  | 0,86  | 9,99  |
| 16б           | 160 | 38  | 10,0 | 21,11            | 531,10             | 5,00  | 0,91  | 9,75  |
| 18a           | 180 | 40  | 9,0  | 22,18            | 712,53             | 5,67  | 0,93  | 11,13 |
| 18б           | 180 | 42  | 11,0 | 25,78            | 823,78             | 5,65  | 0,98  | 10,83 |
| 20a           | 200 | 44  | 10,0 | 27,36            | 1083,40            | 6,29  | 1,02  | 12,35 |
| 20б           | 200 | 46  | 12,0 | 31,36            | 1236,10            | 6,28  | 1,08  | 12,06 |
| 22a           | 220 | 48  | 11,0 | 32,82            | 1574,90            | 6,93  | 1,11  | 13,53 |
| 22б           | 220 | 50  | 13,0 | 37,22            | 1777,30            | 6,91  | 1,16  | 13,20 |
| 24a           | 240 | 52  | 12,0 | 38,75            | 2217,00            | 7,56  | 1,19  | 14,71 |
| 24б           | 240 | 54  | 14,0 | 43,55            | 2478,80            | 7,54  | 1,25  | 14,41 |

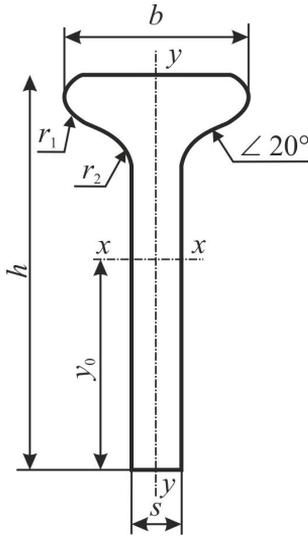
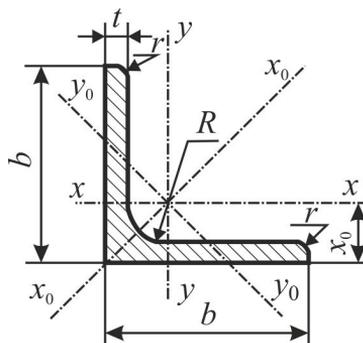


Рис. 2Д. Профіль симетричного штабульба

Таблиця 2Д. Основні геометричні характеристики профілів симетричного сталюго штабульба для суднобудування (за ГОСТ 9235–76)

| Номер профілю | $h$ | $b$   | $s$  | $F, \text{ см}^2$ | $I_x, \text{ см}^4$ | $i_x$ | $y_0$ | $I_y$  |
|---------------|-----|-------|------|-------------------|---------------------|-------|-------|--------|
|               | мм  |       |      |                   |                     | см    |       |        |
| 935           | 90  | 31,0  | 5,0  | 6,82              | 55,19               | 2,85  | 5,86  | 1,91   |
| 1035          | 100 | 35,5  | 5,5  | 8,53              | 84,81               | 3,15  | 6,58  | 3,23   |
| 1235          | 120 | 37,5  | 5,5  | 10,15             | 146,77              | 3,88  | 7,89  | 4,16   |
| 1446          | 140 | 42,0  | 6,0  | 13,10             | 257,02              | 4,43  | 9,25  | 6,85   |
| 1447          | 140 | 43,5  | 7,5  | 15,20             | 300,51              | 4,45  | 8,94  | 7,88   |
| 1646          | 160 | 48,5  | 6,5  | 16,47             | 422,40              | 5,06  | 10,66 | 11,59  |
| 1658          | 160 | 50,0  | 8,0  | 18,87             | 488,39              | 5,09  | 10,32 | 13,06  |
| 1857          | 180 | 55,0  | 7,0  | 20,20             | 656,07              | 5,70  | 12,06 | 18,41  |
| 1858          | 180 | 56,5  | 8,5  | 22,90             | 751,29              | 5,73  | 11,70 | 20,44  |
| 2068          | 200 | 60,4  | 8,4  | 26,06             | 1049,53             | 6,35  | 13,21 | 27,74  |
| 20610         | 200 | 62,0  | 10,0 | 29,26             | 1185,44             | 6,37  | 12,86 | 30,76  |
| 2268          | 220 | 64,0  | 8,0  | 28,24             | 1371,90             | 6,97  | 14,75 | 34,76  |
| 22610         | 220 | 68,0  | 10,0 | 33,14             | 1624,05             | 7,00  | 14,34 | 43,06  |
| 2478          | 240 | 71,0  | 8,5  | 33,17             | 1915,56             | 7,60  | 16,19 | 50,80  |
| 24710         | 240 | 75,5  | 10,5 | 38,65             | 2252,44             | 7,63  | 15,78 | 62,94  |
| 271010        | 270 | 102,0 | 10,0 | 41,75             | 3163,03             | 8,70  | 17,96 | 114,15 |
| 27812         | 270 | 82,0  | 12,0 | 48,33             | 3582,17             | 8,61  | 17,54 | 89,54  |
| 30810         | 300 | 89,0  | 10,0 | 51,00             | 4557,50             | 9,45  | 20,62 | 86,87  |
| 30812         | 300 | 91,0  | 12,0 | 57,00             | 5165,00             | 9,53  | 20,00 | 98,27  |

Рис. 3Д. Профіль кутової сталі з рівними полицями



Таблиця 3Д. Основні геометричні характеристики кутової сталі з рівними полицями (за ГОСТ 8509–93)

| Номер профілю | b<br>мм | t<br>мм | F,<br>см <sup>2</sup> | I <sub>x</sub> , I <sub>y</sub> ,<br>см <sup>4</sup> | W <sub>x</sub> , W <sub>y</sub> ,<br>см <sup>3</sup> | i <sub>x</sub> , i <sub>y</sub> ,<br>см | I <sub>x0</sub> ,<br>см <sup>4</sup> | i <sub>x0</sub> ,<br>см | I <sub>y0</sub> ,<br>см <sup>4</sup> | i <sub>y0</sub> ,<br>см | I <sub>xy</sub> ,<br>см <sup>4</sup> | x <sub>0</sub> , y <sub>0</sub> ,<br>см |
|---------------|---------|---------|-----------------------|--|--|---|--------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|---|
|               |         |         |                       |  |  |   |                                      |                         |                                      |                         |                                      |   |
| 2             | 20      | 3       | 1,13                  | 0,40   | 0,28   | 0,59                                    | 0,63                                 | 0,75                    | 0,17                                 | 0,39                    | 0,23                                 | 0,60                                    |
|               |         | 4       | 1,46                  | 0,50   | 0,37   | 0,58                                    | 0,78                                 | 0,73                    | 0,22                                 | 0,38                    | 0,28                                 | 0,64                                    |
| 2,5           | 25      | 3       | 1,43                  | 0,81   | 0,46   | 0,75                                    | 1,29                                 | 0,95                    | 0,34                                 | 0,49                    | 0,47                                 | 0,73                                    |
|               |         | 4       | 1,86                  | 1,03   | 0,59   | 0,74                                    | 1,62                                 | 0,93                    | 0,44                                 | 0,48                    | 0,59                                 | 0,76                                    |
| 2,8           | 28      | 3       | 1,62                  | 1,16   | 0,58   | 0,85                                    | 1,84                                 | 1,07                    | 0,48                                 | 0,55                    | 0,68                                 | 0,80                                    |
| 3             | 30      | 3       | 1,74                  | 1,45   | 0,67   | 0,91                                    | 2,30                                 | 1,15                    | 0,60                                 | 0,59                    | 0,85                                 | 0,85                                    |
|               |         | 4       | 2,27                  | 1,84   | 0,87   | 0,90                                    | 2,92                                 | 1,13                    | 0,77                                 | 0,58                    | 1,08                                 | 0,89                                    |
| 3,2           | 32      | 3       | 1,86                  | 1,77   | 0,77   | 0,97                                    | 2,80                                 | 1,23                    | 0,74                                 | 0,63                    | 1,03                                 | 0,89                                    |
|               |         | 4       | 2,43                  | 2,26   | 1,00   | 0,96                                    | 3,58                                 | 1,21                    | 0,94                                 | 0,62                    | 1,32                                 | 0,94                                    |
| 3,5           | 35      | 3       | 2,04                  | 2,35   | 0,93   | 1,07                                    | 3,72                                 | 1,35                    | 0,97                                 | 0,69                    | 1,37                                 | 0,97                                    |
|               |         | 4       | 2,67                  | 3,01   | 1,21   | 1,06                                    | 4,76                                 | 1,33                    | 1,25                                 | 0,68                    | 1,75                                 | 1,01                                    |
|               |         | 5       | 3,28                  | 3,61   | 1,47   | 1,05                                    | 5,71                                 | 1,32                    | 1,52                                 | 0,68                    | 2,10                                 | 1,05                                    |
| 4             | 40      | 3       | 2,35                  | 3,55   | 1,22   | 1,23                                    | 5,63                                 | 1,55                    | 1,47                                 | 0,79                    | 2,08                                 | 1,09                                    |
|               |         | 4       | 3,08                  | 4,58   | 1,60   | 1,22                                    | 7,26                                 | 1,53                    | 1,90                                 | 0,78                    | 2,68                                 | 1,13                                    |
|               |         | 5       | 3,79                  | 5,53   | 1,95   | 1,21                                    | 8,75                                 | 1,52                    | 2,30                                 | 0,78                    | 3,22                                 | 1,17                                    |
| 4,5           | 45      | 3       | 2,65                  | 5,13   | 1,56   | 1,39                                    | 8,13                                 | 1,75                    | 2,12                                 | 0,89                    | 3,00                                 | 1,21                                    |
|               |         | 4       | 3,48                  | 6,63   | 2,04   | 1,38                                    | 10,52                                | 1,74                    | 2,74                                 | 0,89                    | 3,89                                 | 1,26                                    |
|               |         | 5       | 4,29                  | 8,03   | 2,51   | 1,37                                    | 12,74                                | 1,72                    | 3,33                                 | 0,88                    | 4,71                                 | 1,30                                    |
| 5             | 50      | 3       | 2,96                  | 7,11   | 1,94   | 1,55                                    | 11,27                                | 1,95                    | 2,95                                 | 1,00                    | 4,16                                 | 1,33                                    |
|               |         | 4       | 3,89                  | 9,21   | 2,54   | 1,54                                    | 14,63                                | 1,94                    | 3,80                                 | 0,99                    | 5,42                                 | 1,38                                    |
|               |         | 5       | 4,80                  | 11,20  | 3,13   | 1,53                                    | 17,77                                | 1,92                    | 4,63                                 | 0,98                    | 6,57                                 | 1,42                                    |
|               |         | 6       | 5,69                  | 13,07  | 3,69   | 1,52                                    | 20,72                                | 1,91                    | 5,43                                 | 0,98                    | 7,65                                 | 1,46                                    |
| 5,6           | 56      | 4       | 4,38                  | 13,10  | 3,21   | 1,73                                    | 20,79                                | 2,18                    | 5,41                                 | 1,11                    | 7,69                                 | 1,52                                    |
|               |         | 5       | 5,41                  | 15,97  | 3,96   | 1,72                                    | 25,36                                | 2,16                    | 6,59                                 | 1,10                    | 9,41                                 | 1,57                                    |
| 6,3           | 63      | 4       | 4,96                  | 18,86  | 4,09   | 1,95                                    | 29,90                                | 2,45                    | 7,81                                 | 1,25                    | 11,00                                | 1,69                                    |
|               |         | 5       | 6,13                  | 23,10  | 5,05   | 1,94                                    | 36,80                                | 2,44                    | 9,52                                 | 1,25                    | 13,70                                | 1,74                                    |
|               |         | 6       | 7,28                  | 27,06  | 5,98   | 1,93                                    | 42,91                                | 2,43                    | 11,18                                | 1,24                    | 15,90                                | 1,78                                    |

Продовж. табл. 3Д

| Номер профілю | $b$ | $t$ | $F$ ,           | $I_x, I_y$ ,    | $W_x, W_y$ ,    | $i_x, i_y$ , | $I_{x0},$       | $i_{x0},$ | $I_{y0},$       | $i_{y0},$ | $I_{xy},$       | $x_0, y_0,$ |
|---------------|-----|-----|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|-------------|
|               | мм  |     | см <sup>2</sup> | см <sup>4</sup> | см <sup>3</sup> | см           | см <sup>4</sup> | см        | см <sup>4</sup> | см        | см <sup>4</sup> | см          |
| 7             | 70  | 4,5 | 6,20            | 29,04           | 5,67            | 2,16         | 46,03           | 2,72      | 12,04           | 1,39      | 17,00           | 1,88        |
|               |     | 5   | 6,86            | 31,94           | 6,27            | 2,16         | 50,67           | 2,72      | 13,22           | 1,39      | 18,70           | 1,90        |
|               |     | 6   | 8,15            | 37,58           | 7,43            | 2,15         | 59,64           | 2,71      | 15,52           | 1,38      | 22,10           | 1,94        |
|               |     | 7   | 9,42            | 42,98           | 8,57            | 2,14         | 68,19           | 2,69      | 17,77           | 1,37      | 25,20           | 1,99        |
|               |     | 8   | 10,67           | 48,16           | 9,68            | 2,12         | 76,35           | 2,68      | 19,97           | 1,37      | 28,20           | 2,02        |
| 7,5           | 75  | 5   | 7,39            | 39,53           | 7,21            | 2,31         | 62,65           | 7,91      | 16,41           | 1,49      | 23,10           | 2,02        |
|               |     | 6   | 8,78            | 46,57           | 8,57            | 2,30         | 73,87           | 2,90      | 19,28           | 1,48      | 27,30           | 2,06        |
|               |     | 7   | 10,15           | 53,34           | 9,89            | 2,29         | 84,61           | 2,89      | 22,07           | 1,47      | 31,20           | 2,10        |
|               |     | 8   | 11,50           | 59,84           | 11,18           | 2,28         | 94,89           | 2,87      | 24,80           | 1,47      | 35,00           | 2,15        |
|               |     | 9   | 12,83           | 66,10           | 12,43           | 2,27         | 104,72          | 2,86      | 27,48           | 1,46      | 38,60           | 2,18        |
| 8             | 80  | 5,5 | 8,63            | 52,68           | 9,03            | 2,47         | 83,56           | 3,11      | 21,80           | 1,59      | 30,90           | 2,17        |
|               |     | 6   | 9,38            | 56,97           | 9,80            | 2,47         | 90,40           | 3,11      | 23,54           | 1,58      | 33,40           | 2,19        |
|               |     | 7   | 10,85           | 65,31           | 11,32           | 2,45         | 103,60          | 3,09      | 26,97           | 1,58      | 38,30           | 2,23        |
|               |     | 8   | 12,30           | 73,36           | 12,80           | 2,44         | 116,39          | 3,08      | 30,32           | 1,57      | 43,00           | 2,27        |
| 9             | 90  | 6   | 10,61           | 82,10           | 12,49           | 2,78         | 130,00          | 3,50      | 33,97           | 1,79      | 48,10           | 2,43        |
|               |     | 7   | 12,28           | 94,30           | 14,45           | 2,77         | 149,67          | 3,49      | 38,94           | 1,78      | 55,40           | 2,47        |
|               |     | 8   | 13,93           | 106,11          | 16,36           | 2,76         | 168,42          | 3,48      | 43,80           | 1,77      | 62,30           | 2,51        |
|               |     | 9   | 15,60           | 118,00          | 18,29           | 2,75         | 186,00          | 3,46      | 48,60           | 1,77      | 68,00           | 2,55        |
| 10            | 100 | 6,5 | 12,82           | 122,10          | 16,69           | 3,09         | 193,46          | 3,89      | 50,73           | 1,99      | 71,40           | 2,68        |
|               |     | 7   | 13,75           | 130,59          | 17,90           | 3,08         | 207,01          | 3,88      | 54,16           | 1,98      | 76,40           | 2,71        |
|               |     | 8   | 15,60           | 147,19          | 20,30           | 3,07         | 233,46          | 3,87      | 60,92           | 1,98      | 86,30           | 2,75        |
|               |     | 10  | 19,24           | 178,95          | 24,97           | 3,05         | 283,83          | 3,84      | 74,08           | 1,96      | 110,00          | 2,83        |
|               |     | 12  | 22,80           | 208,90          | 29,47           | 3,03         | 330,95          | 3,81      | 86,84           | 1,95      | 122,00          | 2,91        |
|               |     | 14  | 26,28           | 237,15          | 33,83           | 3,00         | 374,98          | 3,78      | 99,32           | 1,94      | 138,00          | 2,99        |
| 11            | 110 | 16  | 29,68           | 263,82          | 38,04           | 2,98         | 416,04          | 3,74      | 111,61          | 1,94      | 152,00          | 3,06        |
|               |     | 7   | 15,15           | 175,61          | 21,83           | 3,40         | 278,54          | 4,29      | 72,68           | 2,19      | 106,00          | 2,96        |
| 12,5          | 125 | 8   | 17,20           | 198,17          | 24,77           | 3,39         | 314,51          | 4,28      | 81,83           | 2,18      | 116,00          | 3,00        |
|               |     | 8   | 19,69           | 294,36          | 32,20           | 3,87         | 466,76          | 4,87      | 121,98          | 2,49      | 172,00          | 3,36        |
|               |     | 9   | 22,00           | 327,48          | 36,00           | 3,86         | 520,00          | 4,86      | 135,88          | 2,48      | 192,00          | 3,40        |
|               |     | 10  | 24,33           | 359,82          | 39,74           | 3,85         | 571,04          | 4,84      | 148,59          | 2,47      | 211,00          | 3,45        |
|               |     | 12  | 28,89           | 422,23          | 47,06           | 3,82         | 670,02          | 4,82      | 174,43          | 2,46      | 248,00          | 3,53        |
|               |     | 14  | 33,37           | 481,76          | 54,17           | 3,80         | 763,90          | 4,78      | 199,62          | 2,45      | 282,00          | 3,61        |
| 14            | 140 | 16  | 37,77           | 538,56          | 61,09           | 3,78         | 852,84          | 4,75      | 224,29          | 2,44      | 315,00          | 3,68        |
|               |     | 9   | 24,72           | 465,72          | 45,55           | 4,34         | 739,42          | 5,47      | 192,03          | 2,79      | 274,00          | 3,76        |
|               |     | 10  | 27,33           | 512,29          | 50,32           | 4,33         | 813,62          | 5,46      | 210,96          | 2,78      | 301,00          | 3,82        |
| 16            | 160 | 12  | 32,49           | 602,49          | 59,66           | 4,31         | 956,98          | 5,43      | 248,01          | 2,76      | 354,00          | 3,90        |
|               |     | 10  | 31,43           | 774,24          | 66,19           | 4,96         | 1229,10         | 6,25      | 319,33          | 3,19      | 455,00          | 4,30        |
|               |     | 11  | 34,42           | 844,21          | 72,44           | 4,95         | 1340,06         | 6,24      | 347,77          | 3,18      | 496,00          | 4,35        |
|               |     | 12  | 37,39           | 912,89          | 78,62           | 4,94         | 1450,00         | 6,23      | 375,78          | 3,17      | 537,00          | 4,39        |
|               |     | 14  | 43,57           | 1046,47         | 90,77           | 4,92         | 1662,13         | 6,20      | 430,81          | 3,16      | 615,00          | 4,47        |
|               |     | 16  | 49,07           | 1175,19         | 102,64          | 4,89         | 1865,73         | 6,17      | 484,64          | 3,14      | 690,00          | 4,55        |
|               |     | 18  | 54,79           | 1290,24         | 114,24          | 4,87         | 2061,03         | 6,13      | 537,46          | 3,13      | 771,00          | 4,63        |
| 18            | 180 | 20  | 60,40           | 1418,85         | 125,60          | 4,85         | 2248,26         | 6,10      | 589,43          | 3,12      | 830,00          | 4,70        |
|               |     | 11  | 38,80           | 1216,44         | 92,47           | 5,60         | 1933,10         | 7,06      | 499,78          | 3,59      | 716,00          | 4,85        |
|               |     | 12  | 42,19           | 1316,62         | 100,41          | 5,59         | 2092,78         | 7,04      | 540,45          | 3,58      | 776,00          | 4,89        |

Продовж. табл. 3Д

| Номер<br>профілю | $b$ | $t$ | $F, \text{см}^2$ | $I_x, I_y, \text{см}^4$ | $W_x, W_y, \text{см}^3$ | $i_x, i_y, \text{см}$ | $I_{x0}, \text{см}^4$ | $i_{x0}, \text{см}$ | $I_{y0}, \text{см}^4$ | $i_{y0}, \text{см}$ | $I_{xy}, \text{см}^4$ | $x_0, y_0, \text{см}$ |
|------------------|-----|-----|------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|
|                  | мм  |     |                  |                         |                         |                       |                       |                     |                       |                     |                       |                       |
| 20               | 200 | 12  | 47,10            | 1822,78                 | 124,61                  | 6,22                  | 2896,16               | 7,84                | 749,40                | 3,99                | 1073,00               | 5,37                  |
|                  |     | 13  | 50,85            | 1960,77                 | 134,44                  | 6,21                  | 3116,18               | 7,83                | 805,35                | 3,98                | 1156,00               | 5,42                  |
|                  |     | 14  | 54,60            | 2097,00                 | 144,17                  | 6,20                  | 3333,00               | 7,81                | 861,00                | 3,97                | 1236,00               | 5,46                  |
|                  |     | 16  | 61,98            | 2362,57                 | 163,37                  | 6,17                  | 3755,39               | 7,78                | 969,74                | 3,96                | 1393,00               | 5,54                  |
|                  |     | 20  | 76,54            | 2871,47                 | 200,37                  | 6,12                  | 4860,42               | 7,72                | 1181,92               | 3,93                | 1689,00               | 5,70                  |
|                  |     | 25  | 94,29            | 3466,21                 | 245,59                  | 6,06                  | 5494,04               | 7,63                | 1438,38               | 3,91                | 2028,00               | 5,89                  |
|                  |     | 30  | 111,54           | 4019,60                 | 288,57                  | 6,00                  | 6351,05               | 7,55                | 1698,16               | 3,89                | 2332,00               | 6,07                  |
| 22               | 220 | 14  | 60,38            | 2814,36                 | 175,18                  | 6,83                  | 4470,15               | 8,60                | 1158,56               | 4,38                | 1655,00               | 5,91                  |
|                  |     | 16  | 68,58            | 3175,44                 | 198,71                  | 6,80                  | 5045,37               | 8,58                | 1305,52               | 4,36                | 1869,00               | 6,02                  |
| 25               | 250 | 16  | 78,40            | 4717,10                 | 258,43                  | 7,76                  | 7492,10               | 9,78                | 1942,09               | 4,98                | 2775,00               | 6,75                  |
|                  |     | 18  | 87,72            | 5247,24                 | 288,82                  | 7,73                  | 8336,69               | 9,75                | 2157,78               | 4,96                | 3089,00               | 6,83                  |
|                  |     | 20  | 96,96            | 5764,87                 | 318,76                  | 7,71                  | 9159,73               | 9,72                | 2370,01               | 4,94                | 3395,00               | 6,91                  |
|                  |     | 22  | 106,12           | 6270,32                 | 348,26                  | 7,69                  | 9961,30               | 9,69                | 2579,04               | 4,93                | 3691,00               | 7,00                  |
|                  |     | 25  | 119,71           | 7006,39                 | 391,72                  | 7,65                  | 11125,52              | 9,64                | 2887,26               | 4,91                | 4119,00               | 7,11                  |
|                  |     | 28  | 133,12           | 7716,86                 | 434,25                  | 7,61                  | 12243,84              | 9,59                | 3189,89               | 4,90                | 4527,00               | 7,23                  |
|                  |     | 30  | 141,96           | 8176,82                 | 462,11                  | 7,59                  | 12964,66              | 9,56                | 3388,98               | 4,89                | 4788,00               | 7,31                  |
|                  |     | 35  | 163,71           | 9281,05                 | 530,11                  | 7,53                  | 14682,73              | 9,47                | 3879,37               | 4,87                | 5401,68               | 7,53                  |

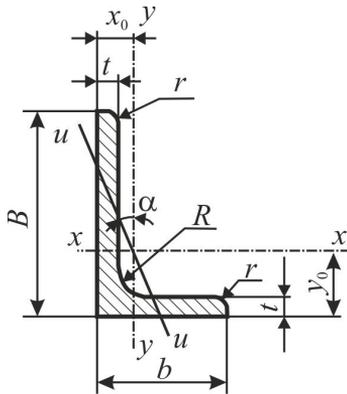


Рис. 4Д. Профіль кутової сталі з нерівними полицями

Таблиця 4Д. Основні геометричні характеристики кутової сталі з нерівними полицями (за ГОСТ 8510–86)

| Номер профілю | B   | b  | t   | F, см <sup>2</sup> | Ix, см <sup>4</sup> | ix, см | Iy, см <sup>4</sup> | iy, см | Iimin, см <sup>4</sup> | iimin, см | x0   | y0   |
|---------------|-----|----|-----|--------------------|---------------------|--------|---------------------|--------|------------------------|-----------|------|------|
|               |     |    |     |                    |                     |        |                     |        |                        |           |      |      |
| 2,5/1,6       | 25  | 16 | 3   | 1,16               | 0,70                | 0,78   | 0,22                | 0,44   | 0,13                   | 0,34      | 0,42 | 0,86 |
|               |     |    | 4   | 1,49               | 1,52                | 1,01   | 0,46                | 0,55   | 0,28                   | 0,43      | 0,49 | 1,08 |
| 3,2/2         | 32  | 20 | 3   | 1,94               | 1,93                | 1,00   | 0,57                | 0,54   | 0,35                   | 0,43      | 0,53 | 1,12 |
|               |     |    | 4   | 2,47               | 3,93                | 1,26   | 1,18                | 0,69   | 0,71                   | 0,54      | 0,63 | 1,37 |
| 4/2,5         | 40  | 25 | 3   | 1,89               | 3,06                | 1,27   | 0,93                | 0,70   | 0,56                   | 0,54      | 0,59 | 1,32 |
|               |     |    | 4   | 2,47               | 3,93                | 1,26   | 1,18                | 0,69   | 0,71                   | 0,54      | 0,63 | 1,37 |
|               |     |    | 5   | 3,03               | 4,73                | 1,25   | 1,41                | 0,68   | 0,86                   | 0,53      | 0,66 | 1,41 |
| 4,5/2,8       | 45  | 28 | 3   | 2,14               | 4,41                | 1,48   | 1,32                | 0,79   | 0,79                   | 0,61      | 0,64 | 1,47 |
|               |     |    | 4   | 2,80               | 5,68                | 1,42   | 1,69                | 0,78   | 1,02                   | 0,60      | 0,68 | 1,51 |
| 5/3,2         | 50  | 32 | 3   | 2,42               | 6,18                | 1,60   | 1,99                | 0,91   | 1,18                   | 0,70      | 0,72 | 1,60 |
|               |     |    | 4   | 3,17               | 7,98                | 1,59   | 2,56                | 0,90   | 1,52                   | 0,69      | 0,76 | 1,65 |
| 5,6/3,6       | 56  | 36 | 4   | 3,58               | 11,37               | 1,78   | 3,70                | 1,02   | 2,19                   | 0,78      | 0,84 | 1,82 |
|               |     |    | 5   | 4,41               | 13,82               | 1,77   | 4,48                | 1,01   | 2,65                   | 0,78      | 0,88 | 1,87 |
| 6,3/4,0       | 63  | 40 | 4   | 4,04               | 16,33               | 2,01   | 5,16                | 1,13   | 3,07                   | 0,87      | 0,91 | 2,03 |
|               |     |    | 5   | 4,98               | 19,91               | 2,00   | 6,26                | 1,12   | 3,73                   | 0,86      | 0,95 | 2,08 |
|               |     |    | 6   | 5,90               | 23,31               | 1,99   | 7,29                | 1,11   | 4,36                   | 0,86      | 0,99 | 2,12 |
|               |     |    | 8   | 7,68               | 29,60               | 1,96   | 9,15                | 1,09   | 5,58                   | 0,85      | 1,07 | 2,20 |
| 7/4,5         | 70  | 45 | 5   | 5,59               | 27,76               | 2,23   | 9,05                | 1,27   | 5,34                   | 0,98      | 1,05 | 2,28 |
| 7,5/5         | 75  | 60 | 5   | 6,11               | 34,81               | 2,39   | 12,47               | 1,43   | 7,24                   | 1,09      | 1,17 | 2,39 |
|               |     |    | 6   | 7,25               | 40,92               | 2,38   | 14,60               | 1,42   | 8,48                   | 1,08      | 1,21 | 2,44 |
|               |     |    | 8   | 9,47               | 52,38               | 2,35   | 18,52               | 1,40   | 10,87                  | 1,07      | 1,29 | 2,52 |
| 8/5           | 80  | 50 | 5   | 6,36               | 41,64               | 2,56   | 12,68               | 1,41   | 7,57                   | 1,00      | 1,13 | 2,60 |
|               |     |    | 6   | 7,55               | 46,98               | 2,55   | 14,85               | 1,40   | 8,88                   | 1,08      | 1,17 | 2,65 |
| 9/5,6         | 90  | 56 | 5,5 | 7,86               | 65,28               | 2,88   | 19,67               | 1,58   | 11,77                  | 1,22      | 1,26 | 2,92 |
|               |     |    | 6,0 | 8,54               | 70,58               | 2,88   | 21,22               | 1,58   | 12,70                  | 1,22      | 1,28 | 2,95 |
|               |     |    | 8,0 | 11,18              | 90,87               | 2,85   | 27,08               | 1,56   | 16,29                  | 1,21      | 1,36 | 3,04 |
| 10/6,3        | 100 | 63 | 6   | 9,58               | 98,29               | 3,20   | 30,58               | 1,79   | 18,20                  | 1,38      | 1,42 | 3,23 |
|               |     |    | 7   | 11,09              | 112,86              | 3,19   | 34,99               | 1,78   | 20,83                  | 1,37      | 1,46 | 3,28 |
|               |     |    | 8   | 12,57              | 126,96              | 3,18   | 39,21               | 1,77   | 23,38                  | 1,36      | 1,50 | 3,32 |
|               |     |    | 10  | 15,47              | 153,95              | 3,15   | 47,18               | 1,75   | 28,34                  | 1,35      | 1,58 | 3,40 |

Продовж. табл. 4Д

| Номер<br>профілю | <i>B</i> | <i>b</i> | <i>t</i> | <i>F</i> ,<br>см <sup>2</sup> | <i>I<sub>x</sub></i> ,<br>см <sup>4</sup> | <i>i<sub>x</sub></i> ,<br>см | <i>I<sub>y</sub></i> ,<br>см <sup>4</sup> | <i>i<sub>y</sub></i> ,<br>см | <i>I<sub>umin</sub></i> ,<br>см <sup>4</sup> | <i>i<sub>umin</sub></i> | <i>x</i> <sub>0</sub> | <i>y</i> <sub>0</sub> |
|------------------|----------|----------|----------|-------------------------------|---|------------------------------|---|------------------------------|--|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                  | мм       |          |          |                               |   |                              |   |                              |  |                         | см                    |                       |
| 11/7             | 110      | 70       | 6,5      | 11,45                         | 142,42                                    | 3,53                         | 45,61                                     | 2,00                         | 26,94  | 1,53                    | 1,58                  | 3,55                  |
|                  |          |          | 8,0      | 13,93                         | 171,54                                    | 3,51                         | 54,64                                     | 1,98                         | 32,31  | 1,52                    | 1,64                  | 3,61                  |
| 12,5/8           | 125      | 60       | 7        | 14,06                         | 226,53                                    | 4,01                         | 73,73                                     | 2,29                         | 43,40  | 1,76                    | 1,80                  | 4,01                  |
|                  |          |          | 8        | 15,98                         | 225,62                                    | 4,00                         | 80,95                                     | 2,28                         | 48,82  | 1,75                    | 1,84                  | 4,05                  |
|                  |          |          | 10       | 19,70                         | 311,61                                    | 3,98                         | 100,47                                    | 2,26                         | 59,33  | 1,74                    | 1,92                  | 4,14                  |
|                  |          |          | 12       | 23,36                         | 364,79                                    | 3,95                         | 116,84                                    | 2,24                         | 69,47  | 1,72                    | 2,00                  | 4,22                  |
| 14/9             | 140      | 90       | 8        | 18,00                         | 363,68                                    | 4,49                         | 119,79                                    | 2,58                         | 70,27  | 1,58                    | 2,03                  | 4,49                  |
|                  |          |          | 10       | 22,24                         | 444,45                                    | 4,47                         | 145,54                                    | 2,58                         | 85,51  | 1,96                    | 2,12                  | 4,58                  |
| 16/10            | 160      | 100      | 9        | 22,87                         | 605,97                                    | 5,15                         | 186,03                                    | 2,85                         | 110,40                                       | 2,20                    | 2,24                  | 5,19                  |
|                  |          |          | 10       | 25,28                         | 666,59                                    | 5,13                         | 204,09                                    | 2,84                         | 121,16                                       | 2,19                    | 2,28                  | 5,23                  |
|                  |          |          | 12       | 30,04                         | 784,22                                    | 5,11                         | 238,75                                    | 2,82                         | 142,14                                       | 2,18                    | 2,36                  | 5,32                  |
|                  |          |          | 14       | 34,72                         | 897,19                                    | 5,08                         | 271,60                                    | 2,80                         | 162,49                                       | 2,16                    | 2,43                  | 5,40                  |
| 18/11            | 180      | 110      | 10       | 28,33                         | 952,28                                    | 5,80                         | 276,37                                    | 3,12                         | 165,44                                       | 2,42                    | 2,44                  | 5,83                  |
|                  |          |          | 12       | 33,69                         | 1122,56                                   | 5,77                         | 324,09                                    | 3,10                         | 194,28                                       | 2,40                    | 2,52                  | 5,97                  |
| 20/12,5          | 200      | 125      | 11       | 34,87                         | 1449,02                                   | 6,45                         | 446,36                                    | 3,58                         | 263,84                                       | 2,75                    | 2,79                  | 6,50                  |
|                  |          |          | 12       | 37,89                         | 1568,19                                   | 6,43                         | 481,93                                    | 3,57                         | 285,04                                       | 2,74                    | 2,83                  | 6,54                  |
|                  |          |          | 14       | 43,87                         | 1800,83                                   | 6,41                         | 550,77                                    | 3,54                         | 326,54                                       | 2,73                    | 2,91                  | 6,62                  |
|                  |          |          | 16       | 49,77                         | 2026,08                                   | 6,38                         | 616,66                                    | 3,52                         | 366,99                                       | 2,72                    | 2,99                  | 6,71                  |



Таблиця 6Д. Основні геометричні характеристики сталевих швелерів з паралельними гранями полиць (за ГОСТ 8240–97)

| Номер профілю | $h$ | $b$ | $s$ | $t$  | $F_y$ ,<br>см <sup>2</sup> | $I_x$ ,<br>см <sup>4</sup> | $i_x$ ,<br>см | $I_y$ ,<br>см <sup>4</sup> | $i_y$ | $z_0$ |
|---------------|-----|-----|-----|------|----------------------------|----------------------------|---------------|----------------------------|-------|-------|
|               | мм  |     |     |      |                            |                            |               |                            |       |       |
| 5П            | 50  | 32  | 4,4 | 7,0  | 6,16                       | 22,8                       | 1,92          | 5,95                       | 0,98  | 1,21  |
| 6,5 П         | 65  | 36  | 4,4 | 7,2  | 7,51                       | 48,8                       | 2,55          | 9,35                       | 1,12  | 1,29  |
| 8 П           | 80  | 40  | 4,5 | 7,4  | 8,98                       | 89,8                       | 3,16          | 13,90                      | 1,24  | 1,38  |
| 10 П          | 100 | 46  | 4,5 | 7,6  | 10,90                      | 175,0                      | 3,99          | 22,60                      | 1,44  | 1,53  |
| 12 П          | 120 | 52  | 4,8 | 7,8  | 13,30                      | 305,0                      | 4,79          | 34,90                      | 1,62  | 1,66  |
| 14 П          | 140 | 58  | 4,9 | 8,1  | 15,60                      | 493,0                      | 5,61          | 51,50                      | 1,81  | 1,82  |
| 16 П          | 160 | 64  | 5,0 | 8,4  | 18,10                      | 750,0                      | 6,44          | 72,80                      | 2,00  | 1,97  |
| 16аП          | 160 | 68  | 5,0 | 9,0  | 19,50                      | 827,0                      | 6,51          | 90,50                      | 2,15  | 2,19  |
| 18 П          | 180 | 70  | 5,1 | 8,7  | 20,70                      | 1090,0                     | 7,26          | 100,00                     | 2,20  | 2,14  |
| 18аП          | 180 | 74  | 5,1 | 9,3  | 22,20                      | 1200,0                     | 7,34          | 123,00                     | 2,35  | 2,36  |
| 20 П          | 200 | 76  | 5,2 | 9,0  | 23,40                      | 1530,0                     | 8,08          | 134,00                     | 2,39  | 2,30  |
| 22 П          | 220 | 82  | 5,4 | 9,5  | 26,70                      | 2120,0                     | 8,90          | 178,00                     | 2,58  | 2,47  |
| 24 П          | 240 | 90  | 5,6 | 10,0 | 30,60                      | 2910,0                     | 9,75          | 248,00                     | 2,85  | 2,72  |
| 27 П          | 270 | 95  | 6,0 | 10,5 | 35,20                      | 4180,0                     | 10,90         | 314,00                     | 2,99  | 2,78  |
| 30 П          | 300 | 100 | 6,5 | 11,0 | 40,50                      | 5830,0                     | 12,00         | 393,00                     | 3,12  | 2,83  |
| 33 П          | 330 | 105 | 7,0 | 11,7 | 46,50                      | 8010,8                     | 13,10         | 491,00                     | 3,25  | 2,90  |
| 36 П          | 360 | 110 | 7,5 | 12,6 | 53,40                      | 10850,0                    | 14,30         | 611,00                     | 3,38  | 2,99  |
| 40 П          | 400 | 115 | 8,0 | 13,5 | 61,50                      | 15260,0                    | 15,80         | 760,00                     | 3,51  | 3,05  |

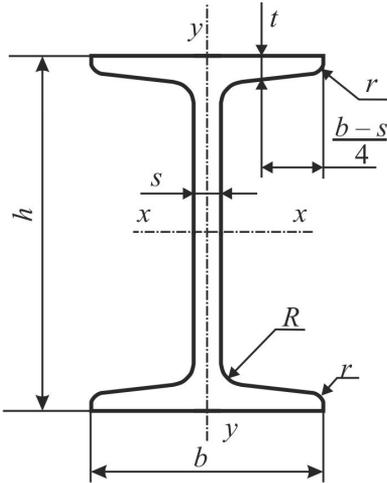


Рис. 7Д. Профіль сталевго двотавра

Таблиця 7Д. Геометричні характеристики сталевго двотавра (за ГОСТ 8239–89)

| Номер профілю | $h$ | $b$ | $s$  | $t$  | $F$ ,<br>см <sup>2</sup> | $I_x$ ,<br>см <sup>4</sup> | $i_x$ ,<br>см | $I_y$ ,<br>см <sup>4</sup> | $i_y$ ,<br>см |
|---------------|-----|-----|------|------|--------------------------|----------------------------|---------------|----------------------------|---------------|
|               | мм  |     |      |      |                          |                            |               |                            |               |
| 10            | 100 | 55  | 4,5  | 7,2  | 12,0                     | 198                        | 4,06          | 17,9                       | 1,22          |
| 12            | 120 | 64  | 4,8  | 7,3  | 14,7                     | 350                        | 4,88          | 27,9                       | 1,38          |
| 14            | 140 | 73  | 4,9  | 7,5  | 17,4                     | 572                        | 5,73          | 41,9                       | 1,55          |
| 16            | 160 | 81  | 5,0  | 7,8  | 20,2                     | 873                        | 6,57          | 58,6                       | 1,70          |
| 18            | 180 | 90  | 5,1  | 8,1  | 23,4                     | 1290                       | 7,42          | 82,6                       | 1,88          |
| 20            | 200 | 100 | 5,2  | 8,4  | 26,8                     | 1840                       | 8,28          | 115                        | 2,07          |
| 22            | 220 | 110 | 5,4  | 8,7  | 30,6                     | 2550                       | 9,13          | 157                        | 2,27          |
| 24            | 240 | 115 | 5,6  | 9,5  | 34,8                     | 3460                       | 9,97          | 198                        | 2,37          |
| 27            | 270 | 125 | 6,0  | 9,8  | 40,2                     | 5010                       | 11,2          | 260                        | 2,54          |
| 30            | 300 | 135 | 6,5  | 10,2 | 46,5                     | 7080                       | 12,3          | 337                        | 2,69          |
| 33            | 330 | 140 | 7,0  | 11,2 | 53,8                     | 9840                       | 13,5          | 419                        | 2,79          |
| 36            | 360 | 145 | 7,5  | 12,3 | 61,9                     | 13380                      | 14,7          | 516                        | 2,89          |
| 40            | 400 | 155 | 8,3  | 13,0 | 72,6                     | 19062                      | 16,2          | 667                        | 3,03          |
| 45            | 450 | 160 | 9,0  | 14,2 | 84,7                     | 27696                      | 18,1          | 808                        | 3,09          |
| 50            | 500 | 170 | 10,0 | 15,2 | 100,0                    | 39727                      | 19,9          | 1043                       | 3,23          |
| 55            | 550 | 180 | 11,0 | 16,5 | 118,0                    | 55962                      | 21,8          | 1356                       | 3,39          |
| 60            | 600 | 190 | 12,0 | 17,8 | 138,0                    | 76806                      | 23,6          | 1725                       | 3,54          |

Таблиця 8Д. Площі наплавленого металу швів стикових з'єднань (конструктивні елементи швів за ГОСТ 5264) [4]

| C21                             | C25 | Площа наплавки, см <sup>2</sup> |
|---------------------------------|-----|---------------------------------|
| Товщина листів, мм              |     |                                 |
| 5                               | –   | 0,32                            |
| 6                               | –   | 0,40                            |
| 7                               | 13  | 0,47                            |
| 8                               | 15  | 0,58                            |
| 9                               | 17  | 0,70                            |
| 10                              | 19  | 1,01                            |
| 11                              | 21  | 1,10                            |
| 12                              | 23  | 1,30                            |
| 13                              | 25  | 1,50                            |
| 14                              | 27  | 1,70                            |
| 15                              | 29  | 1,90                            |
| 16                              | 31  | 2,10                            |
| 17                              | 33  | 2,30                            |
| 18                              | 35  | 2,55                            |
| 19                              | 37  | 2,80                            |
| 20                              | 39  | 3,00                            |
| 21                              | 41  | 3,30                            |
| 22                              | 43  | 3,60                            |
| 23                              | 45  | 3,90                            |
| 24                              | 47  | 4,20                            |
| 25                              | 49  | 4,50                            |
| Підварювання $s < 8$            |     | 0,19                            |
| Підварювання $8 \leq s \leq 15$ |     | 0,26                            |
| Підварювання $s > 15$           |     | 0,32                            |

Таблиця 9Д. Площі наплавленого металу кутових швів таврових з'єднань (конструктивні елементи швів за ГОСТ 5264) [4]

| Номер проходу | За кресленням |                        | Середньостатистичні |                        |
|---------------|---------------|------------------------|---------------------|------------------------|
|               | катет, мм     | площа, см <sup>2</sup> | катет, мм           | площа, см <sup>2</sup> |
| 1             | 2             | 0,04                   | 2,5                 | 0,045                  |
| 1             | 3             | 0,07                   | 3,5                 | 0,077                  |
| 1             | 4             | 0,12                   | 4,5                 | 0,130                  |
| 1             | 5             | 0,17                   | 5,5                 | 0,180                  |
| 1             | 6             | 0,24                   | 6,5                 | 0,260                  |
| 1             | 8             | 0,20                   | 8,5                 | 0,210                  |
| 2             |               |                        |                     |                        |
| 1             | 10            | 0,29                   | 10,5                | 0,290                  |
| 2             |               | 0,30                   |                     | 0,300                  |
| 1             | 12            | 0,42                   | 12,0                | 0,420                  |
| 2             |               |                        |                     |                        |
| 1             | 14            | 0,37                   | 14,0                | 0,370                  |
| 2             |               |                        |                     |                        |
| 3             |               |                        |                     |                        |