

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Конспект лекцій

з дисципліни «Напруження та деформації при зварюванні» для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка», спеціалізація «Технологія та устаткування зварювання», «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій» всіх форм навчання

Рекомендовано НМК ІФФ
Протокол № 7
від 16.03.2021р.

ЗМІСТ

Вступ	4
Тема 1. Мета, завдання навчальної дисципліни та основні поняття	7
1.1. Важливість дисципліни для потреб сучасного виробництва	7
1.2 Основні поняття та визначення теорій пружності й пластичності	8
1.3 Основні поняття та визначення теорії зварювальних напружень і деформацій	16
Тема 2. Виникнення напружень та деформацій при зварюванні	19
2.1 Вплив типу напруженого стану на характер руйнування	19
2.2 Припущення при розрахунках деформаційно-напруженого стану	22
2.3. Механізм утворення деформацій при нагріванні	25
2.4 Методи розрахунків напружень та деформацій при зварюванні	32
Тема 3. Основні фізичні явища та фактори які впливають на величини напружень, деформацій та переміщень	34
3.1 Вплив температури на виникнення напружень та деформацій при зварюванні та наплавленні	34
3.2 Влив різних факторів на величини напружень, деформацій та переміщень	37
Тема 4. Методи зменшення залишкових напружень та деформацій	42
4.1 Вплив власних напружень і деформацій на зварні конструкції	42
4.2 Методи вимірювання напружень та деформацій	45
4.3 Методи попередження залишкових напружень та деформацій	47
4.3.1 Методи, які застосовуються до зварювання.	47
4.3.2 Методи, які застосовуються в процесі зварювання.	50
4.3.3 Методи, які застосовуються після зварювання	50
Додаток. Тести для перевірки	54

ВСТУП

Напруження, що залишилися після виготовлення виробів можуть як збільшити, так і зменшити термін експлуатації механізмів та конструкцій. Деформації та переміщення, що відбулися у процесі виготовлення деталей змінюють їх геометричну форму та ускладнюють виготовлення механізмів та конструкцій з яких вони складаються, а також впливають на їх умови експлуатації.

Метою дисципліни «Напруження та деформації при зварюванні» є отримання студентами глибоких знань та відомостей про процеси утворення, вплив на міцність, надійність та працездатність зварних конструкцій, різних способів попередження їх виникнення та методів усунення.

Завданням дисципліни є засвоєння студентами фізичної сутності процесів утворення зварювальних напружень, деформацій та переміщень, ознайомлення із існуючими методами розрахунків та експериментальним їх визначенням, розподілом залишкових напружень, впливом деформацій та напружень на властивості конструкцій, а також встановлення технологічних режимів зварювання та наплавлення, які діють на величину напружень та деформацій, застосування засобів попередження та зменшення залишкових напружень та деформацій або їх усунення.

Курс дисципліни складається з лекційних занять та наступних лабораторних робіт:

- Лабораторна робота № 1 «Визначення коефіцієнтів концентрації напружень в різних зварних з'єднаннях та виробих після наплавлення»;
- Лабораторна робота № 2 «Дослідження деформацій зварних з'єднань та виробів, на які наплавляється шар металу у процесі нагрівання та охолодження»;
- Лабораторна робота № 3 «Дослідження термічного впливу на структуру металу та виникнення в ньому неоднорідності властивостей у ЗТВ у зварних з'єднаннях та виробих після наплавлення».

У результаті вивчення навчальної дисципліни студенти повинні отримати:

- загальні компетентності: ЗК2. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності. ЗК4. Здатність

застосовувати знання у практичних ситуаціях. ЗК12. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел. ЗК13. Здатність оцінювати та забезпечувати якість робіт, щовиконуються;

- фахові компетентності: ФК1. Здатність аналізу матеріалів, конструкцій та процесів на основі законів, теорій та методів математики, природничих наук і прикладної механіки. ФК2. Здатність робити оцінки параметрів працездатності матеріалів, конструкцій і машин в експлуатаційних умовах та знаходити відповідні рішення для забезпечення заданого рівня надійності конструкцій і процесів, в тому числі і за наявності деякої невизначеності. ФК5. Здатність використовувати аналітичні та чисельні математичні методи для вирішення задач прикладної механіки, зокрема здійснювати розрахунки на міцність, витривалість, стійкість, довговічність, жорсткість в процесі статичного та динамічного навантаження з метою оцінки надійності деталей і конструкцій машин.

Очікувані програмні результати навчання: використовувати знання та навички в галузі зварювання та споріднених технологій для призначення параметрів технологічних процесів; вміти створювати конкурентну продукцію у відповідності до РН3– виконувати розрахунки на міцність, витривалість, стійкість, довговічність, жорсткість деталей машин; РН4– оцінювати надійність деталей і конструкцій машин в процесі статичного та динамічного навантаження; РН6– створювати і теоретично обґрунтовувати конструкції машин, механізмів та їх елементів на основі методів прикладної механіки, загальних принципів конструювання, теорії взаємозамінності, стандартних методик розрахунку деталей машин.

При вивченні дисципліни «Напруження та деформації при зварюванні» рекомендується наступна література та інформаційні ресурси, що були використані при написанні цього конспекту:

1. Напруження та деформації при зварюванні і паянні : підручник [Текст] / Л.М. Лобанов, Г.В. Єрмолаєв, В.В. Квасницький, та інші; за заг. ред. Л. М. Лобанова. – Миколаїв :НУК, 2016. – 246 с.

2. Касаткин, В.С. Напряжения и деформации при сварке [Текст] / В.С. Касаткин, В.М. Прохоренко, И.М. Чертков. – К.: Вища школа, 1987. – 246с.

3. Винокуров, В.А. Сварочные деформации и напряжения, Методы их устранения [Текст] / В.А. Винокуров. – М.: Машиностроение, 1968. – 236с.

4. Єрмолаєв, Г.В. Міцність зварних з'єднань: підручник [Текст] / Г.В. Єрмолаєв. – Миколаїв : НУК, 2007. – 220 с.
5. Касаткин, Б.С. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: Справочное пособие [Текст] / Б.С. Касаткин, А.Б. Кудрин, Л.М. Лобанов. – К.: Наукова думка, 1981. – 581с.
6. Гнюсов, С.Ф. Специальные главы материаловедения для сварщиков: Учебно-методическое пособие [Текст] / С.Ф. Гнюсов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 102 с.
7. Брок, Д. Основы механики разрушения [Текст]: Пер. с англ. / Д. Брок. – М.: Высшая школа, 1980, – 368 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. Теория сварочных процессов : учеб. для вузов [Текст] / В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров и др.; Под ред. В. В. Фролова. – М. : Высшая школа, 1988. – 559 с.
10. Сайт zntu@otzw.ua.
11. Все о сварке, сварочных технологиях и оборудовании <http://weldingsite.com.ua/gas.html>. Гуляев, А.П. Металловедение [Текст] / А.П. Гуляев, А.А. Гуляев. – М.: Альянс, 2015. – 544 с.

ТЕМА 1. МЕТА, ЗАВДАННЯ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ ТА ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ.

1.1 Важливість дисципліни для потреб сучасного виробництва

Зварювання широко застосовується у багатьох галузях сучасної промисловості, що обумовлене цілою низкою його особливостей і переваг у порівнянні з іншими технологічними процесами виготовлення нерознімних з'єднань. Зварювальні технології забезпечують простоту з'єднання, зменшення маси виробів, значні можливості для механізації та автоматизації технологічних процесів, зменшення собівартості та трудомісткості, скорочення термінів виробництва складних конструкцій тощо. Але зварювання має деякі особливості, які часто знижують його ефективність. Головними з них є зміна фізико-механічних властивостей зварюваних матеріалів у зоні термічного впливу та виникнення власних напружень, деформацій та переміщень унаслідок нерівномірного нагрівання елементів конструкції при зварюванні.

Залишкові напруження, у залежності від їх знаку (стискаючі та розтягувальні) суттєво впливають на експлуатаційну стійкість деталей, механізмів та конструкцій. Безпосередні умови експлуатації деталей визначають які повинні бути залишкові напруження за знаком. Наприклад, якщо деталь працює в умовах стискання то залишкові розтягувальні напруження сприятимуть збільшенню надійності та термінів експлуатації і навпаки.

Залишкові деформації, ускладнюють збирання великогабаритних конструкцій (блоків, вузлів та секцій). Збільшення розмірних припусків та допусків окремих елементів негативно впливає на конструкцію в цілому. Іноді трудомісткість операцій чи затрати на усунення зварювальних деформацій співставні з трудомісткістю зварювальних робіт. Залишкові деформації змінюють зовнішній вигляд та експлуатаційні характеристики конструкції.

Поєднання несприятливих чинників: таких, як низька температура(знижені пластичні властивості матеріалу),невдала форма деталі чи з'єднання, присутність дефектів із залишковими напруженнями 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 напружень і деформацій становлять важливу проблему – усунення їх впливу. Вміння правильно розраховувати очікувану величину напружень, деформацій та переміщень, а також визначення характеру їх розподілу дозволяє суттєво підвищити терміни експлуатації виробів та конструкцій.

Проблема зварювальних напружень та деформацій особливо гостро постала в 30-х роках XX сторіччя. У той час суттєвий вклад у розвиток теорії напружень і деформацій був зроблений 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 подальшому, чисельність наукових установ і фахівців, які займалися проблемами міцності, напружень та деформацій зварних конструкцій збільшилася.

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 втрати стійкості у тонколистових конструкціях, деформації в оболонкових конструкціях, напруження і деформації в сталях різного хімічного складу, титанових та інших сплавах, при паянні різнорідних матеріалів, розроблялися методи боротьби зі зварювальними напруженнями і деформаціями. В останні роки, розрахунки при застосуванні методів теорії пружності й пластичності відбуваються із залученням комп'ютерної техніки, різних програмних комплексів та комп'ютерних моделей, та направлені на дослідження зварювальних напружень і деформацій при вирішенні конкретних важливих проблем.

1.2 Основні поняття та визначення теорій пружності й пластичності

Опір матеріалів – це наука про інженерні методи розрахунку на міцність, жорсткість і стійкість елементів конструкцій, машин і споруд.

Теорія пружності– це розділ механіки суцільних середовищ, що досліджує та вивчає деформації та напруження у тілах, що перебувають у спокої або рухаються під дією навантажень.

Теорія пружності та опір матеріалів, досліджують напруження та деформації у твердому тілі під час розв'язування інженерно-технічних задач міцності. Теорія пружності дає більш точні рішення та дозволяє розв'язувати складні задачі з визначення напружень і деформацій при зовнішніх (заданих) навантаженнях у пружному тілі будь-якої форми, що недоступно для опору матеріалів.

Складності розрахунків, що використовуються у теорії пружності обмежує їх застосування в інженерних розрахунках звичайних конструкцій. Однак, теорія пружності дозволяє оцінити практичну придатність інженерних методів. Вона встановлює границі й умови застосування спрощених методів, що покладені у основу гіпотез опору матеріалів.

Основні передумови теорії пружності є результат ідеалізації реальних властивостей матеріалів пружного тіла. Ці припущення полягають у наступному:

- пружність матеріалу передбачається досконалою (ідеальною);
- тіло передбачається однорідним, а саме у всіх точках однаковим;
- матеріал тіла вважається ізотропним, тобто його фізичні властивості однакові у всіх напрямках;
- матеріал тіла є суцільним, тобто повністю заповнює зайнятий ним простір без розривів та пустот;
- початкові напруження у пружному тілі відсутні (будь які навантаження відсутні);
- матеріал працює в межах закону Гука (пропорційність напружень і деформацій);
- матеріал приймається жорстким (відносні переміщення точок, нерозривно зв'язаних з деформаціями, можуть вважатися дуже малими в порівнянні з лінійними розмірами тіла). Відповідно вважається, що сили прикладені в точках, визначених координатами до деформації тіла.

Матеріали, що застосовуються в машино-будівництві не мають зазначених властивостей. Крихкі та в'язкі матеріали мають різні діаграми одноосного розтягування (рис. 1.1), які відображують залежність між навантаження (P), або напруженнями (σ) та подовженням (l) або деформацією (ϵ). Для в'язких матеріалів, які не мають чіткої межі визначення σ_{y_n} та σ_T застосовують умовні значення $\sigma_{0,05}$ та $\sigma_{0,2}$. У інженерних розрахунках, при визначенні навантажень та геометричних розмірів деталей, застосовують межу плинності (σ_T) або

($\sigma_{0,2}$). Відповідно, опір навантаженням не виходить за межу пружності. Тобто, матеріали, що застосовуються в техніці (різні сталі, сплави, полімери та неметалеві матеріали) відповідають закону Гука. Це дозволяє застосовувати принцип незалежності дії сил, що використовується в опорі матеріалів.

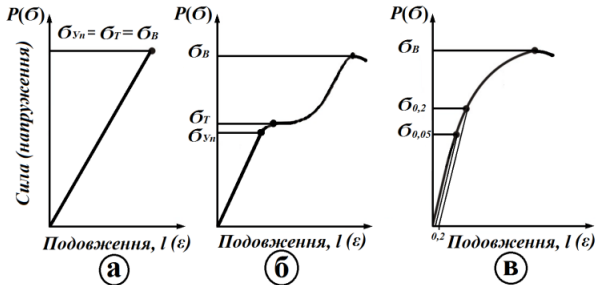


Рисунок 1.1 – Діаграми розтягування крихкого (а), в'язко-пластичного (б) та в'язкого (в) матеріалів

Ізотропність пружного стану, у певній мірі, забезпечується тим, що розміри елементів структури матеріалів мають дуже малі розміри у порівнянні із розмірами деталей. Слід зауважити, якщо у процесі навантаження чи нагрівання може змінюватися розмір зерен (кількість дефектів структури), це призведе до змін у міцності матеріалу. Залежність міцності від кількості дефектів наведено на рис. 1.2а.

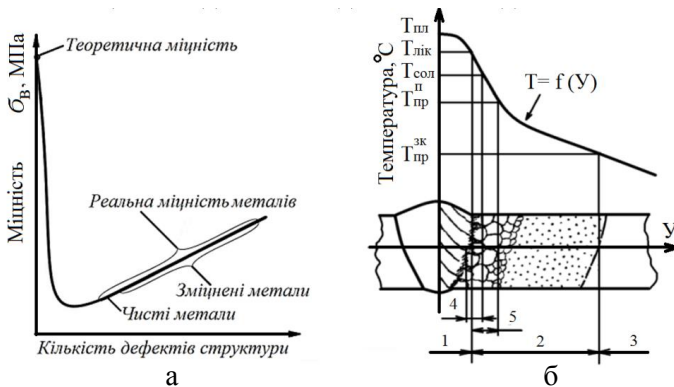


Рисунок 1.2 – Залежність міцності металів від кількості дефектів структури (а) та вплив температури на структуру металів при зварюванні (б)

Зварювальне стикове з'єднання у поперечному перетині має декілька ділянок із різними механічними властивостями (рис. 1.2б). Це, передусім, сам шов, зварюваний метал у стані прокату, зона біля шва, яка може зазнавати структурні перетворення у залежності від температури нагрівання (зона нормалізації, зона рекристалізації, зона високого відпуску, зона низького відпуску та інші). На рис. 1.2б вказані: зварювальний шов –1; зона термічного впливу –2; зварювальний метал –3; зона сплавлення –4; зона біля шва –5. Безпосередньо зона шва може бути умовно поділена (див. рис. 1.2б): на зону рідкого металу із температурою плавлення ($T_{пл}$); зону кристалізації із температурою початку утворення кристалів – температура ліквідус сплаву ($T_{лік}$) та температурою повного твердого стану – солідус ($T_{сол}$); температуру початку термічних перетворень ($T_{пр}^{II}$) та їх закінчення ($T_{пр}^{3K}$); та структури зварювального матеріалу, що відповідають температурам поліморфного перетворення та реструктуризації, характерної для цього сплаву. У цих зонах може відбуватися як зміцнювання (збільшення твердості) так і знеміцнення (зменшення твердості). В тій чи іншій мірі для усіх з'єднань характерна відмінність механічних властивостей металу на різних ділянках, так звана механічна неоднорідність. Загалом, розглядають неоднорідність властивостей, а саме зміну твердості у різних зонах у поперечному перетині зварного з'єднання. Зони, де метал має знижену границю плинності і твердості, відносно границі плинності та твердості сусідніх ділянок металу, називають м'якими прошарками.

Багато матеріалів, у тому числі й сталь, більш-менш задовольняють передумови щодо однорідності, суцільності та ізотропності пружного тіла. Не зважаючи на те, що сталь не є аморфним матеріалом і має складну кристалічну структуру, яка досить "безладна". 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 визначається рівнянням:

$$\varepsilon = \sigma_T / E, \quad (1.1)$$

де σ_T – межа плинності;
 E – модуль пружності.

Зазвичай величина ε не перевищує 0,001 мм (0,1 %). Модуль пружності для сталі Ст.3 становить $E=2,1 \cdot 10^5$ МПа

Напруження визначаються відношенням сили до площі на яку вони діють $\sigma = P/F$, МПа. Вони є мірою інтенсивності внутрішніх сил пружності, або сил контактної взаємодії окремих частин тіла, на які воно може бути поділеним перетинами. Стандарт ДСТУ 2825–94 визначає, що це є вектор внутрішніх сил, діючих на одиницю площі даного елементарного об'єму при стягуванні його у точку.

Вектор повного навантаження P_v може бути розкладено у напрямках координатних вісів, відповідно на P_{vx} , P_{vy} та P_{vz} . Індеси вказують напрямок проєкції та напрямок нормалі до площадки, в якій виникає дане напруження. Подвоєні індеси (σ_{xx}) замінюють одиничними (σ_x). Найчастіше орієнтуються на три взаємно перпендикулярні площадки, що перпендикулярні до координатних вісів (x , y і z). Розкладення P_v дозволяє визначити як нормальні напруження σ , так і дотичні напруження τ . Складові повних напружень (рис. 1.3) у цих площадках позначаються:

- у площадці, перпендикулярній до осі x , через σ_x , τ_{yx} , τ_{zx} ;
- у площадці, перпендикулярній до осі y , через σ_y , τ_{xy} , τ_{zy} ;
- у площадці, перпендикулярній до осі z , через σ_z , τ_{yz} , τ_{xz} .

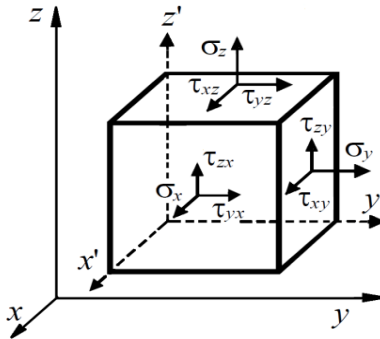


Рисунок 1.3 – Схема складових компонентів повного напруженого стану елемента тіла (паралелепіпеда)

Позитивними вважаються нормальні напруження, що розтягують матеріал, а стискаючі – негативними. Дотичні напруження вважаються позитивними, якщо вони прагнуть зменшити прямий двограний кут у

координатній системі біля початку координат. На рис. 1.3 показані позитивні напрямки напружень. Цю сукупність напружень прийнято представляти у вигляді матриці (тензора):

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Матриця напружень симетрична відносно до головної діагоналі, що отримала назву— закон парності дотичних напружень, а саме $\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ і $\tau_{xz} = \tau_{zx}$. Тензор напружень цілком визначає напружений стан матеріалу в області даної точки. Він має інваріанти, що не залежать від обраної системи координат.

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. Компоненти напруження мають задовольняти диференціальні рівняння рівноваги:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X = 0; \quad \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y = 0; \quad \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + Z = 0 \quad (1.3)$$

Оскільки все тіло, під дією сил, знаходиться у рівновазі то і кожен елемент також буде у рівновазі. Відповідно, для окремого елемента можливо скласти шість наступних умов рівноваги сил та моментів обертання:

$$\Sigma X = 0; \Sigma Y = 0; \Sigma Z = 0; \Sigma M_x = 0; \Sigma M_y = 0; \Sigma M_z = 0. \quad (1.4)$$

Деформація – це зміна розмірів і форми твердого тіла під дією зовнішніх сил (навантажень) або якихось інших факторів (температури або інших). Згідно ДСТУ 2825–94 деформація визначається як відносна величина взаємного переміщення точок об'єкта в результаті його деформації. Отже, при деформації точки твердого тіла змінюють своє положення. Зміна положення (координат) точки тіла при деформації називається переміщенням. Переміщення визначається вектором, що проведено із початкового положення точки у її кінцеве. Подібно напруженням для деформацій також існує поняття тензора деформацій. Тому деформацію зручніше описувати похідними від

переміщення, які утворюють тензор, що отримав назву тензора деформації:

$$T_{\varepsilon} = \begin{vmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_y & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_z \end{vmatrix} \quad (1.5)$$

Він (тензор) має аналогічні властивості, що і тензор напружень, тобто він симетричний відносно головної діагоналі та має ряд інваріантів. Компоненти тензора деформацій зв'язані з компонентами вектору переміщень диференціальними співвідношеннями. Вектор переміщення точки з одного положення у інше, при деформації, має три проекції $U_x(u)$, $U_y(v)$, $U_z(w)$ відповідно до вісів координат X , Y , Z . Між переміщеннями вздовж координатних вісів і деформаціями існують шість диференціальних залежностей, що називаються геометричними рівняннями (Коші).

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial U_x}{\partial x}; & \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x} \right); \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial U_y}{\partial y}; & \varepsilon_{yz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_y}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial y} \right); \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial U_z}{\partial z}; & \varepsilon_{xz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_x}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial x} \right), \end{aligned} \quad (1.6)$$

де U_x , U_y , U_z – переміщення точок тіла в напрямку вісів x , y , z ;
 ε_x , ε_y , ε_z – відносні подовження вздовж відповідних вісів;
 ε_{xy} , ε_{yz} , ε_{xz} – відносні зсуви (зміни кутів (початково прямих) між напрямками x - y , y - z , x - z , відповідно).

Відносні зсуви, для зручності, позначаються як γ_{xy} , γ_{yz} , γ_{xz} . Перший індекс біля деформації зсуву вказує до якої вісі перпендикулярна площа у якій відбувся зсув. Другий індекс вказує вдовж якої вісі відбувся зсув. Всі можливі деформації зсуву елементарного тіла показані на рис. 1.4.

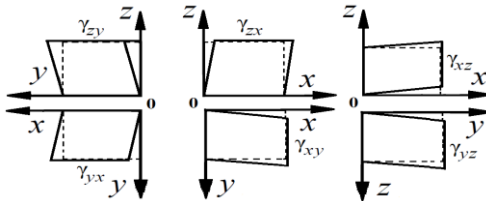


Рисунок 1. 4 – Деформації зсуву у точці

Тіло, що деформується повинно залишатися суцільним, нерозділеним. Отже деформації елементів тіла не можуть бути довільними, а повинні бути узгоджені між собою. Ця узгодженість деформацій в одній площині з деформаціями у інших визначається диференційними рівняннями суцільності деформацій.

Основні рівняння теорії пружності повинні задовольняти шістьом рівнянням суцільності (або нерозривності) Сен-Венана:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y}; & \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial y^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial z \partial y}; \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{xz}}{\partial x \partial z}; & \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y \partial z} &= \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} - \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} \right); \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x \partial z} &= \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \gamma_{zy}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} - \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} \right); & \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x \partial y} &= \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (1.7)$$

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:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)]; & \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)]; & \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_y + \sigma_x)]; \\ \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G}; & \gamma_{yz} &= \frac{\tau_{yz}}{G}; & \gamma_{xz} &= \frac{\tau_{xz}}{G}, \end{aligned} \quad (1.8)$$

де E – модуль пружності;

$G = E / [2(1+\mu)]$ – модуль зсуву;

μ – коефіцієнт Пуассона.

Таким чином, у загальному випадку, в кожній точці навантаженого тіла існують 15 невідомих, що потребують 15 рівнянь рівноваги: шість напружень, шість деформацій та три переміщення.

В теорії пружності існують пряма та зворотна задачі. Пряма це коли задані розміри та геометрія тіла, матеріал, об'ємні сили та граничні умови на всій поверхні тіла і потрібно визначити всі напруження, деформації та переміщення. Зворотна задача полягає у тому, що окрім розмірів, геометрії, матеріалу частково задані деякі із 15 рівнянь і потрібно визначити інші невідомі та об'ємні і поверхневі сили, що прикладені до тіла.

Граничні умови можуть бути статичними (задані навантаження), кінематичними (задані переміщення, температура) та змішаними.

1.3 Основні поняття та визначення теорії зварювальних напружень і деформацій

Аналізуючи зварювальні процеси та виникнення напружень і деформацій застосовують основні поняття механіки твердого тіла, опору матеріалів і теорії пружності. Зварювальні напруження належать до власних, оскільки виникають та існують за відсутності зовнішніх сил. Особливістю таких власних напружень є їх взаємна зрівноваженість у будь-якому перетині тіла, а саме те, що головний вектор P_v і головний момент M всіх внутрішніх сил дорівнюють нулю у будь-якій точці перетину. У випадку зовнішніх закріплень внутрішні сили тіла врівноважуються з урахуванням реакцій закріплень.

У залежності від часу існування напруження поділяють на тимчасові і залишкові. **Тимчасові напруження** існують тільки під час процесу зварювання та змінюються зі зміною температури, що обумовлено змінами об'єму у зонах нагріву. **Залишкові напруження** обумовлені незворотними процесами внаслідок виникнення пластичної деформації, що відбувається під час зварювання, й залишаються після повного закінчення зварювання і охолодження конструкції.

У прилеглій до шва зоні, виникають фізико-механічні процеси, що обумовлені нагріванням при зварюванні (рис. 1.26). Нагрівання викликає зміни об'єму в локальних зонах та структурні перетвореннями. Це призводить до появи пластичних деформацій. Напруження в тілі, що виникають у цей час називаються **активними**. Вони і є причиною деформації конструкції в цілому. Напруження, що діють далеко від зони зварювання у місцях закріплення, врівноважують активні й називаються **реактивними**.

Напруження також поділяють на три групи у залежності від об'єму зрівноваження. **Напруження I роду** врівноважуються в об'ємах усієї конструкції. **Напруження II роду** врівноважуються в мікроскопічних об'ємах в межах зерен металу. **Напруження III роду** врівноважуються в субмікроскопічних об'ємах, в межах кристалічної ґратки.

Напруження I роду мають певну орієнтацію відносно вісів зварного з'єднання (рис. 1.5). Напруження II і III роду не мають певної орієнтації відносно вісів конструкції, вони зазвичай змінюються при переході від одного зерна до іншого. Напруження I роду поділяють у залежно від орієнтації щодо вісів шва. **Поздовжні напруження** (σ_x), що

направлені вздовж вісі шва (головної вісі), **поперечні напруження** (σ_y), направлені поперек вісі шву в площині елемента і **напруження товщини** (σ_z), які направлені поперек вісі шва перпендикулярно до поверхні. При цьому напрям головної вісі шва може не збігатися з напрямом вісі зварного елемента (конструкції).

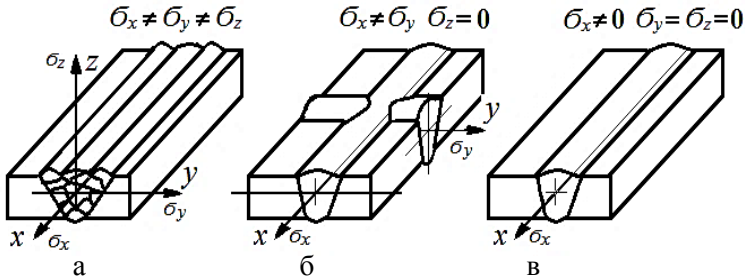


Рисунок 1.5 – Схема різних видів напруженого стану I роду в зварному з'єднанні: об'ємний або тривісний (а); площинний або двовісний (б); лінійний або одновісний (в)

В залежності від просторового положення та напрямку дії внутрішніх напружень та їх взаємодії між собою, власні напруження поділяють на **лінійні** (одновісні) орієнтовані уздовж вісі шва або лінії нагрівання (рис. 1.5в), **пласкі** або **площинні** (двовісні) орієнтовані уздовж координатних осей – уздовж вісі шва та у перпендикулярному до неї напрямку у площині виробу (рис. 1.5б) та **об'ємні** (тривісні), що діють у всіх координатних напрямках (рис. 1.5а).

Деформації поділяють за тими ж ознаками, що і зварювальні напруження, а саме на тимчасові й залишкові, поздовжні та поперечні. **Пружна деформація** (або оборотна), це коли тіло після усунення впливів, що спричинили деформацію, повністю відновлює свою початкову форму і розміри (внаслідок накопиченої потенціальної енергії). **Залишкова деформація** (або необоротна), виникає коли після усунення прикладених сил або інших впливів тіло не відновлює свою початкову форму і розміри (робота зовнішніх сил переходить у теплоту або у зміну структури, властивостей матеріалу та інше, що збільшують вільну енергію системи).

Залишкові деформації поділяються на пластичні, викликані зростанням напруження і в'язкі (повзучість), що відбуваються під навантаженням з перебігом часу. За збільшенням напружень до рівня

межі плинності відбуваються пластичні деформації, що залишаються після усунення впливу.

Окрім цього, деформації поділяють за причинами утворення: температурні, що пов'язані зі зміною температури тіла, повзучості які пов'язана з прирощенням часу, радіаційні від розпухання через отримання матеріалом дози радіації, структурні та силові (механічні).

Під **температурними деформаціями** - ϵ_t розуміють деформації, що виникли внаслідок теплового розширення при нагріванні й скорочення при охолодженні. Температурні деформації можуть бути як оборотними, за вільного розширення та скорочення так і необоротними, якщо вільне розширення або скорочення були неможливі.

Структурні деформації – ϵ_s викликані зміною питомого об'єму металу внаслідок структурних перетворень ($Fe_\alpha \leftrightarrow Fe_\gamma$). Структурні деформації можуть бути необоротними, якщо під час нагріву або охолодження відбулося виділення нових фаз чи трансформації існуючих з утворенням більш термодинамічно стабільних нових фаз.

Силові деформації – ϵ утворюються при дії зовнішніх сил (навантажень), зокрема реакцій закріплень або в наслідок нерівномірного нагрівання чи охолодження тіла через спротив холодних зон металу вільному розширенню чи скорочення нагрітих. Силові 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** (ϵ_e) та **пластичних** (ϵ_p), тобто $\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p$.

Пружна складова силової деформації залежить тільки від навантаження в даний момент і пов'язана з напруженнями законом Гука. Пластичні деформації визначаються всім процесом навантаження, тому між ними і напруженнями такої залежності немає.

Зварювальні переміщення, які зазвичай називають деформаціями конструкцій, поділяють на загальні й місцеві. Під **загальними деформаціями** (переміщеннями) розуміють такі, які призводять до зміни розмірів і форми усієї конструкції, а саме зміни габаритних розмірів і форми (вигин). **Місцеві деформації** (переміщення), на відміну від загальних, змінюють форму і розміри окремих елементів

конструкції. До них належать кутові деформації та деформації втрати стійкості, хвилястість крайок тощо.

ТЕМА 2. ВИНИКНЕННЯ НАПРУЖЕНЬ ТА ДЕФОРМАЦІЙ ПРИ ЗВАРЮВАННІ

2.1 Вплив типу напруженого стану на характер руйнування

Результатом зростання напружень, що переходять у пластичні деформації є утворення тріщин і подальше руйнування (розділення тіла на частини). Розподіл навантаження (напружень) суттєво впливає на процес руйнування. Нерівномірний розподіл напружень, а саме значне збільшення рівня напружень у локальних зонах називають концентрацією напруження. До концентраторів напружень належать всі види дефектів форми тіла: надрізи, мікро- та макро тріщини, дефекти металургійного та технологічного походження, отвори, різкий перехід від тонкого до товстого перетину, підсилення зварювального шва та інші різкі зміни площини прикладення сил (рис. 2.1).

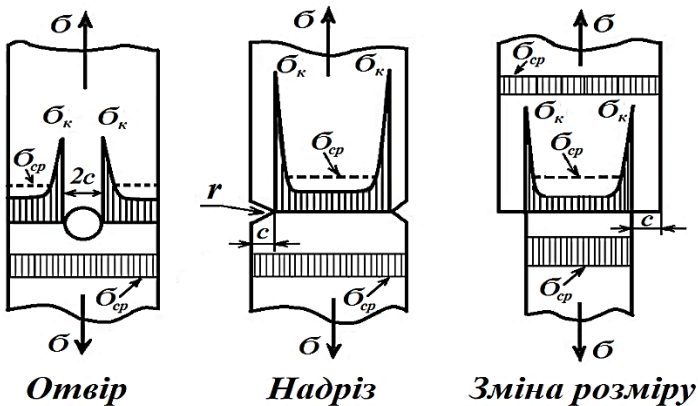


Рисунок 2.1 – Види концентраторів напружень

Величина σ_K (пік напружень) залежить від радіусу r та глибини надрізу (c), чим менший радіус концентратора напружень або більша глибина надрізу, тим більша величина піку. Величину концентрації напружень (K) можливо визначити за допомогою формули:

$$K = 2\sqrt{\frac{c}{r}}, \quad (2.1)$$

де l – довжина дефекту;

r – радіус закруглення дефекту.

Якщо відоме значення величини середнього напруження (σ_{cp}), то величину напруження у місці концентратора визначають за формулою:

$$\sigma_K = K \sigma_{cp} = 2 \sigma_{cp} \sqrt{\frac{c}{r}}. \quad (2.2)$$

У процесі пластичної деформації дислокації накопичуються на межах зерен або дефектах кристалічної будови. Скупчення дислокацій понад 100 одиниць (приблизно 0,001мм) вважається мікротріщиною. Мінімальний радіус r може дорівнювати величинам співставними з розмірами кристалічної ґратки металів. Такі дефекти знаходяться за межами звичайних методів технологічного контролю якості, у процесі виготовлення зварювальних виробів. В залежності від швидкості розповсюдження тріщини розрізняють на в'язке (мінімальна швидкість) та крихке (максимальна швидкість) руйнування. Швидкість розповсюдження тріщини за крихкого руйнування сягає 0,7 від швидкості звуку. У той же час існують енергетичні фактори, що стримують розповсюдження мікротріщин (рис. 2.2). Відповідно до цього за довжини тріщини до l_K її розповсюдження енергетично не вигідно.

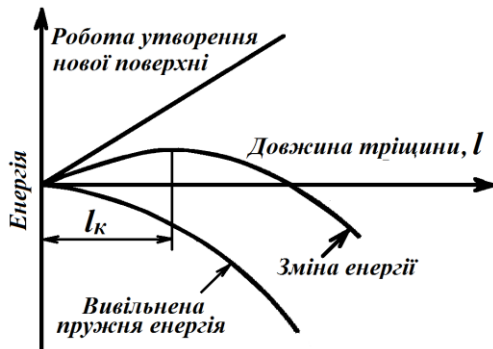


Рисунок 2.2 – Зміна вільної енергії від довжини тріщини

Вивченню концентрації напружень у зварних з'єднаннях присвячена значна кількість досліджень, в яких на основі рішень плоскої задачі теорії пружності для пластини змінної ширини запропоновані приближені формули для розрахунку коефіцієнтів концентрації напружень. Найбільш зручні для практичного використання є формули для зварних стикових з'єднань (рис. 2.3а), що має вигляд:

$$\alpha_K = 1 + 1.1g \frac{l_1^2 + 1}{S} \sqrt{\frac{g}{R}}, \quad (2.3)$$

де $l_1 = l/S$;

l - ширина зварного шва, мм;

S - товщина зварювального металу, мм;

g - висота підсилення зварного шва, мм;

R - радіус переходу від наплавленого металу до основного, мм.

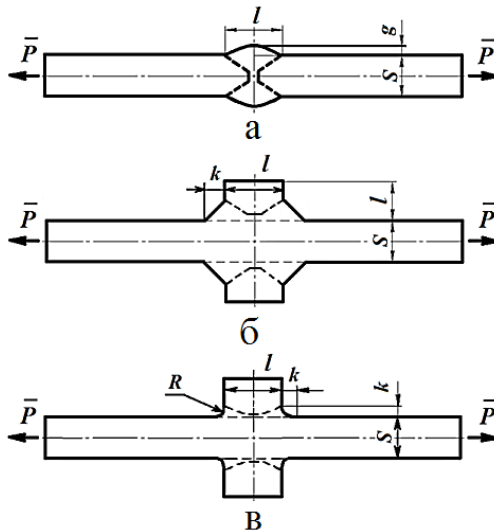


Рисунок 2.3 – Геометричні форми зварних з'єднань:– стикове (а) та таврові з'єднання (б, в)

Для зварних таврових з'єднань (рис. 2.3б) формула для визначення коефіцієнта концентрації напружень має вигляд:

$$\alpha_k = 1 + 0,2 \sqrt{\frac{2S - K}{R}}, \quad (2.4)$$

де K – катет шва, мм.

R – радіус обрису шва, мм;

S – товщина зварювального металу, мм.

Для зварного таврового з'єднання, шви якого мають увігнуту форму (рис. 2.3в), розрахунок коефіцієнта концентрації напружень проводиться за формулою:

$$\alpha_k = 1 + 0,4 \sqrt{\frac{2S + K}{R}}, \quad (2.5)$$

Приведені формули дозволяють розраховувати коефіцієнти концентрації напружень із достатньою, для практичних цілей, точністю ($\pm 10\%$).

2.2 Припущення при розрахунках деформаційно-напруженого стану

Основними причинами, що впливають на утворення залишкових напружень і деформацій при зварюванні та їх величину є:

- **Нерівномірне нагрівання конструкції** обумовлює поведінку зварного з'єднання в конструкції в умовах жорсткого закріплення. Головним чинником, що визначає ступінь нагрівання при зварюванні, є погонна енергія, величина якої залежить від параметрів та режиму: зварювання, сили струму, напруга, коефіцієнт корисної дії (ККД), процесу нагрівання (постійне або дискретне) та швидкості зварювання.

- **Розширення металу при нагріванні** – що пов'язане із появою температурних і силових деформацій при нерівномірному нагріванні. Розширювання при нагріванні, яке визначається температурним коефіцієнтом лінійного розширення (ТКЛР) – α ($1/^\circ\text{C}$) та об'ємною теплоємністю – c_p ($\text{Дж}/(\text{см}^3\text{C})$), що визначає ступінь підвищення температури металу при зварюванні.

- **Пластичні деформації металу в зоні нагрівання** до високої температури, що є незворотні й не зникають після завершення зварювання та охолодження конструкції.

Для зручності дослідження й спрощення інженерних розрахунків задачу визначення зварювальних напружень і деформацій прийнято ділити на дві складові: **термомеханічну**, в якій розглядаються деформації металу в зоні зварювання (у металі шва і прилеглих ділянках основного металу), та **деформаційну**, в якій розглядаються напруження та деформації в конструкції в цілому.

У термомеханічній вихідними даними є температурне поле при зварюванні й теплофізичні властивості металу. Методи розв'язання цієї задачі – суто зварювальні. Знаходять параметри механічної (силової) дії зварного з'єднання на конструкцію, а саме усадкові сили P , об'єми скорочення V . Вплив температури на властивості матеріалів, наведено на рис.2.4.

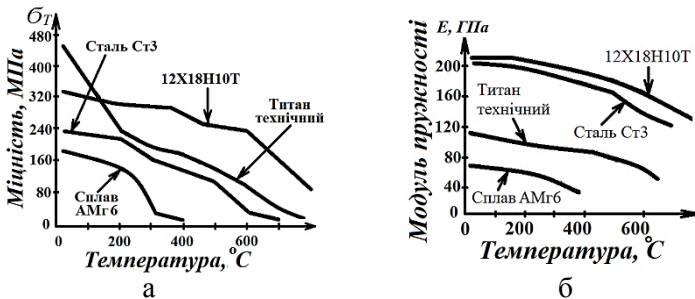


Рисунок 2.4 – Діаграми залежності межі плинності (а) та модуля пружності (б) від температури

У деформаційній частині, визначаються деформації (переміщення) всієї конструкції при зварюванні. Вихідні дані – це параметри, які визначені в термомеханічній задачі (P , V та деякі інші), та геометричні розміри і форма конструкції. Методи розв'язання – це методи механіки (опір матеріалів, прикладна теорія пружності, будівельна механіка). Знаходять переміщення точок (деформації) конструкції – укорочення, кути повороту перерізів, стрілки прогину, зсув окремих точок конструкції в просторі тощо.

За такого поділу не потрібне вирішення складних завдань термопружності й термопластичності. Це спрощує розрахунок

зварювальних деформацій різних конструкцій і стає доступним для інженера. Взаємозв'язок двох зазначених задач, у необхідних випадках враховується введенням додаткових корегувальних коефіцієнтів. Для спрощення розрахунків зроблені припущення:

- У зварному з'єднанні лінійні напруження є рівномірно розподіленими поперечним перетином напружень та деформацій обох знаків;
- Повні подовжні деформації у зварювальному з'єднанні відповідають гіпотезі плоских перерізів;
- Діаграма розтягування, що відповідає ідеальному пружному стану;
- Спрощена залежність межі плинності від температури.;
- Залежність відносної пружної деформації на рівні межі плинності, що подібно до прийнятої залежності (п.3);
- Коефіцієнт температурного розширення матеріалу постійний та не залежить від температури;
- Зварювальний шов виконано зразу по всій довжині з'єднання;
- Початкова температура зварного з'єднання дорівнює нулю;
- Зварне з'єднання умовно поділено на три зони: зварювальний шов і частини прилеглої деталі, що нагріті до високих температур та дві крайні зони, що «не нагрівалися».

Гіпотеза плоских перерізів. Будь-який поперечний переріз, плаский до зварювання, залишається пласким у процесі та після закінчення зварювання. Ця гіпотеза виконується в конструкціях балкового типу, до яких зводиться більшість зварних деталей та конструкцій.

Незмінність теплофізичних властивостей матеріалу за зміни температури. Параметри, що визначають ступінь нагрівання й розширення металу при певній кількості тепла, що вводиться при зварюванні, а саме коефіцієнт лінійного температурного розширення та об'ємна теплоємність є постійні за зміни температури. 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 низьковуглецевих низьколегованих сталей у широкому діапазоні температур залишається майже без зміни. Саме ця характеристика визначає величину зварювальних деформацій.

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. 2.5а).

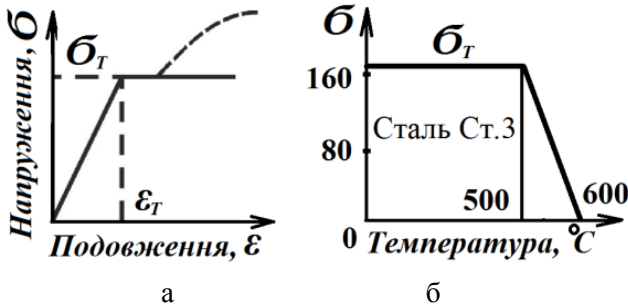


Рисунок 2.5 – Умовні діаграми розтягування (а) та схематична залежність межі плинності від температури (б)

Така умовна залежність не враховує зміцнення (наклеп) металу за границею плинності. При малих деформаціях похибка незначна і майже не впливає на точність розрахунків.

Умовна діаграма залежності границі плинності від температури. Поява і розвиток пластичних деформацій металу, що супроводжують нагрівання при зварюванні, визначаються границею плинності зварюваного матеріалу σ_T , величина якої в широкому діапазоні температур помітно змінюється. Урахування дійсних значень цієї характеристики при різних температурах значно ускладнює математичний опис процесу утворення зварювальних деформацій. Тому в більшості випадків доводиться обмежуватися умовними залежностями (рис. 2.5б). Зокрема, для низьковуглецевих та низьколегованих сталей границя плинності приймається незмінною в діапазоні 0...500 °C і лінійно зменшується до 0 в інтервалі 500...600 °C.

Гіпотеза лінійного напруженого стану (одновісності напружень). Відповідно до неї подовжні й поперечні деформації та напруження вважаються незалежними: при розгляді подовжніх деформацій і напружень (σ_x і ε_x) не враховують поперечних (σ_y і ε_y) та навпаки. Тобто розв'язання однієї плоскої задачі замінюється розв'язаннями двох лінійних. При цьому розрахунок спрощується, але похибка в деяких випадках досягає 20 %.

Гіпотеза одночасності нагрівання та охолодження по всій довжині шва. Згідно з нею напружено-деформований стан не залежить від послідовності й напрямку зварювання шва по довжині, а також довжини дільниць 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.

2.3 Механізм утворення деформацій при нагріванні

Зварювання має високий ступінь нерівномірності нагрівання (великі температурні із відповідними механічними деформації) та знижену жорсткість (практична відсутність пружності) нагрітого металу. При зварюванні метал заготовок, що нагрівається, в зоні з'єднання розширяється (температурні деформації). Зона нагрівання оточена мало нагрітим («холодним») металом і з достатньо високою жорсткістю. Холодний метал перешкоджає вільному розширенню нагрітого, при цьому з'являються реактивні сили, які викликають силові (механічні) напруження і деформації. Деформації, що виникають в зоні з'єднання, у металі нагрітому понад 500°C (сталь Ст.3) є пластичними, тобто незворотними. При охолодженні пластично деформований метал прагне скорочуватися порівняно з нагрітим станом, унаслідок чого в недеформованому металі з'являються реактивні сили, що призводять до появи розтягувальних напружень в нагрітій зоні де відбулися пластичні деформації. Решта конструкції (зони «холодного» металу) стискається цими ж силами.

Механізм та основні причини утворення зварювальних напружень і деформацій зручно розглянути на простому прикладі нагрівання стержня в різних умовах закріплення. Припускаємо, що нагрівання та охолодження не супроводжуються структурними перетвореннями, що можуть зміни питомий об'єм та викликати структурні деформації.

Стержень, довжиною l , що має один кінець закріплений, а другий, який може вільно переміщатися при нагріванні, подовжується (l_H), а після охолодження довжина (l_O) дорівнює довжині у початковому стані (рис. 2.6а). Подовження (Δl_H) дорівнює збільшенню розміру у відповідності до температури нагрівання (T) та ТКЛР (α). Довжина стержня після охолодження (l_O) до вихідної температури буде

дорівнювати довжині у початковому стані. Залишкові напруження, деформації та переміщення будуть відсутні, а саме:

$$\Delta_0 = 0; \varepsilon_0 = 0; \sigma_0 = 0.$$

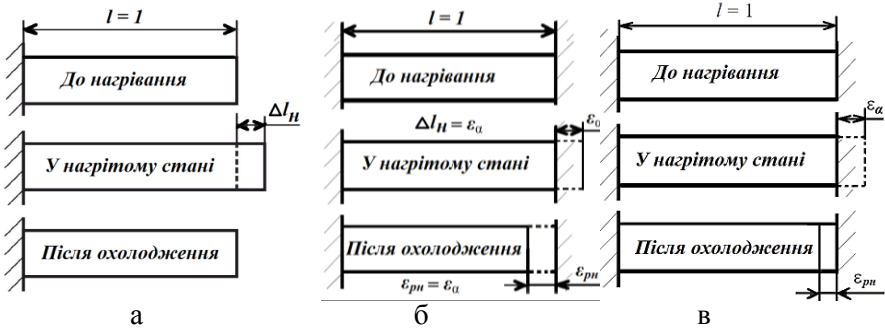


Рисунок 2.6 – Схема деформації стержня при нагріванні та охолодженні у вільному стані (а), що упирається у стінку (б) та закріпленому (в)

Таким чином, саме по собі нагрівання та охолодження, за відсутності перешкод тепловому розширенню, не викликає залишкових напружень та деформацій – $\Delta l_H = (l_H = \alpha T) - l$.

Стержень (той самий) має один кінець закріплений, а другий, що упирається в жорстку стінку, але не закріплений у ній (рис. 2.6б). За таких умов стержень не може подовжуватися, але може вільно скорочуватися. При нагріванні до температури T , унаслідок теплового розширення виникають температурні деформації, але розширенню зразка перешкоджає жорстка стінка. Тиск стінки на стержень (реактивна сила) викликає в ньому силові деформації ε_H , однакові за величиною, але протилежні за знаком температурним деформаціям ε_a . Переміщення кінця стержня відсутнє, але дорівнює сумі силових (пружних) та температурних (пластичних) деформацій, тобто –

$$\Delta_H = \varepsilon_H + \varepsilon_a = 0.$$

Силові деформації, що виникли в стержні, залежно від ступеня нагрівання можуть бути пружними (ε_{EH}), пластичними (ε_{PH}) та одночасно (пружно-пластичними), тобто $\varepsilon_H = \varepsilon_{EH} + \varepsilon_{PH}$.

Термомеханічні діаграма для стержня, що має один кінець закріплений показано на рис. 2.7. В реальних умовах зварювання низьковуглецевої сталі температура нагрівання, при якій крім пружних деформацій з'являються пластичні в умовах жорсткого закріплення

становить 100 °С. Тобто, за цієї температури пружні деформації сягають своєї межі. За подальшого нагрівання з'являються пластичні деформації. Величина пластичної складової тим вища, чим вища температура нагрівання.

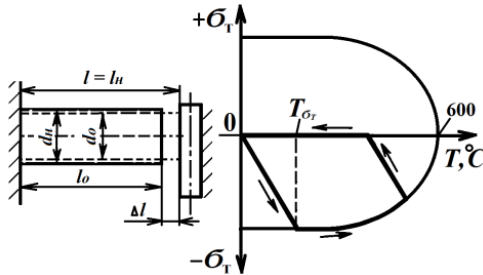


Рисунок 2.7 – Термомеханічна діаграма для стержня, що має один закріплений кінець

При $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ низьковуглецеві сталі втрачають свою пружність ($\sigma_T = 0$ і $\epsilon_T = 0$), тобто пружні деформації трансформуються у пластичні і всі силові деформації складаються тільки з пластичної складової.

При охолодженні стержня до початкової температури температурні деформації зникають. При цьому знімається тиск стінки на стержень, а отже, зникає і пружна складова силових деформацій. Пластична складова силових деформацій залишається після зняття зусилля, що їх викликає. Тому стержень стане коротшим на величину ϵ_{PH} . Це і є залишкові деформації – $\Delta_0 = \epsilon_0 \neq 0$; $\sigma_0 = 0$.

Таким чином, залишкові деформації є наслідком пластичних деформацій при нагріванні, які з'являються в результаті теплового розширення в закріпленому стані ($\epsilon_H = \epsilon_{PH} = \epsilon_0$).

Стержень, який має жорстко закріплені обидва кінці, не може ні збільшувати ні зменшувати свою довжину (рис. 2.7в). За нагрівання такого стержня з ним відбуваються всі процеси, які мають місце при нагріванні стержня з одним закріпленим кінцем. У процесі охолодження цей стержень не може змінювати свого розміру, тому під час охолодження в ньому будуть відбуватися всі процеси, що і при нагріванні тільки у зворотному порядку, спочатку пластичні потім пружно-пластичні, а після охолодження нижче $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ тільки пружні розтягування.

Залишкові напруження та пластичні деформації – це результат укорочення стержня при охолодженні. Отже після охолодження у стержні існують залишкові пружні напруження і залишкові пружні деформації, але це – деформації подовження (розтягування). У нашому випадку залишкові пластичні й залишкові пружні деформації рівні за модулем. Ця рівність дотримується тільки при абсолютній жорсткості закріплення.

Таким чином, після нагрівання й охолодження стержня 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, а також пружні напруження від скорочення – $\Delta_0 = 0$; $\epsilon_0 \neq 0$; $\sigma_0 \neq 0$.

В реальних умовах виготовлення зварних конструкцій, у переважній більшості, жорсткого закріплення немає. Тому розгляд у випадку стержня дозволяє тільки з'ясувати механізми виникнення напружень та деформацій при нагріванні та охолодженні.

Більш наближеними до реальних умов є пластина з прорізами (рис. 2.8) за нагрівання середньої частини у випадках $F_{CP} < F_{KP}$ та $F_{CP} > F_{KP}$. Крайні частини пластини не є жорсткими, тому вони можуть розтягуватися і стискатися (деформуватися). Для побудови моделі напружень та деформацій потрібно визначити залежність межі плинності від температури.

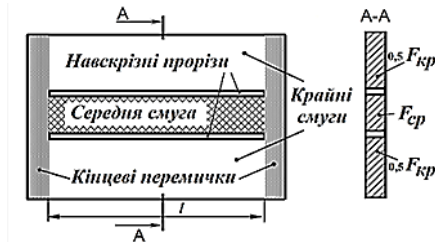
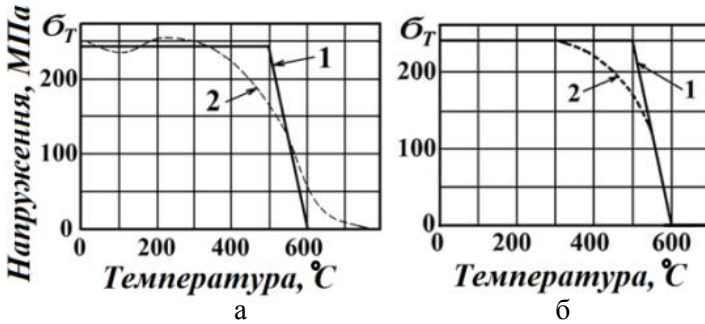


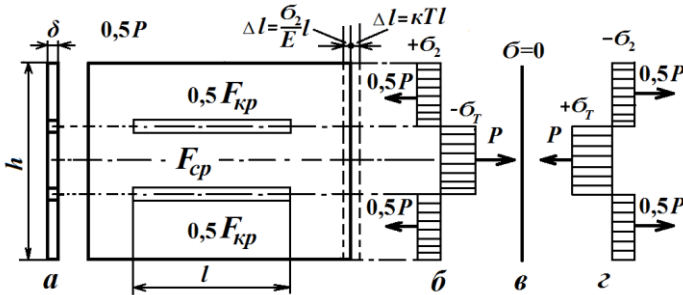
Рисунок 2.8 – Пластина з прорізами

Слід розрізняти дійсну, схематизовану та умовну модель (рис. 2.9). Найбільш прийнятною є умовна залежність межі плинності від температури (2), що максимально наближена до дійсної (рис. 2.9б). У графічних методах визначення напружень та деформацій використовують як схематизовану (більш спрощену) так і умовну залежність, а в аналітичних розрахунках тільки умовну.



а – дійсна залежність σ_T від температури (2) та схематизована (1);
 б – схематизована залежність σ_T від температури (1) та умовна (2)
 Рисунок 2.9 – Залежність межі плинності від температури дійсна, схематизована та умовна

При розгляді процесу нагрівання та охолодження пластини з прорізами приймаємо умову, що температура обох крайніх частин та поперечних країв полоси не змінюється і дорівнює початковій. За нагріву волокна середньої частини не можуть розширюватися вільно. Тому в середній частині виникають стискаючі напруження, а в крайніх розтягувальні (рис. 2.10).



а – пластина з прорізами при $F_{cp} < F_{kp}$;
 б – епюра напружень за нагріву середньої смуги при $T < 600 \text{ } ^\circ\text{C}$;
 в – епюра напружень за нагріву середньої смуги при $T > 600 \text{ } ^\circ\text{C}$;
 г – епюра залишкових напружень у смуги після повного охолодження

Рисунок 2.10 – Нагрівання та охолодження середньої смуги пластини з двома прорізами при $F_{cp} < F_{kp}$

Термомеханічні діаграми нагрівання та охолодження для пластин із прорізами за $F_{CP} < F_{KP}$ та $F_{CP} > F_{KP}$ при умовній залежності σ_T від температури показано на рис. 2.11.

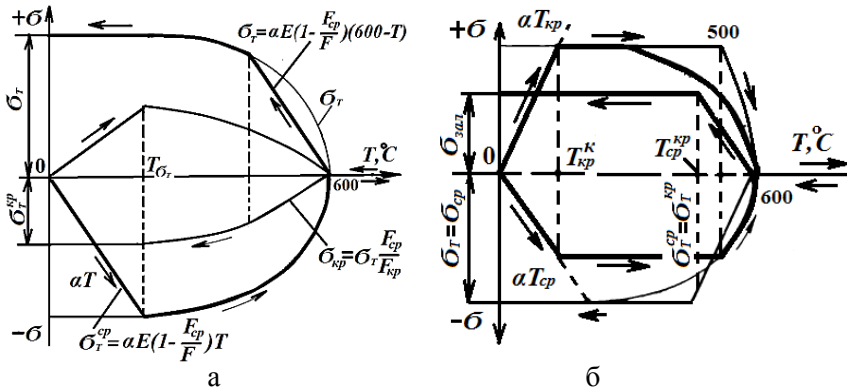


Рисунок 2.11 – Термомеханічні діаграми для пластин із прорізами за $F_{CP} < F_{KP}$ (а) та $F_{CP} > F_{KP}$ (б) при умовній залежності σ_T від температури

Розвиток подовжніх деформацій у смугах пластин в різні періоди нагрівання та охолодження середньої смуги показано на термомеханічних діаграмах для пластин із прорізами за $F_{CP} < F_{KP}$ (рис. 2.12а) та $F_{CP} > F_{KP}$ (рис. 2.12б) при схематичній залежності σ_T від температури. Як випливає із діаграм, показаних на рис. 2.12, після повного охолодження середньої смуги у крайніх і середній смугах пластини мають місце залишкові пружні деформації (напруження). Причина такого явища полягає в нерівномірності розподілу у поперечному перерізі пластини залишкових подовжніх пластичних деформацій.

Принципова відмінність термомеханічних діаграм нагрівання та охолодження пластин із прорізами при схематичній та умовній залежності σ_T від температури полягає у тому, що зміни σ_T від 500 °С до 600 °С при схематичній залежності відбуваються по прямій лінії, а при умовній – по дузі від 300 °С, що значно ускладнює графічне відображення.

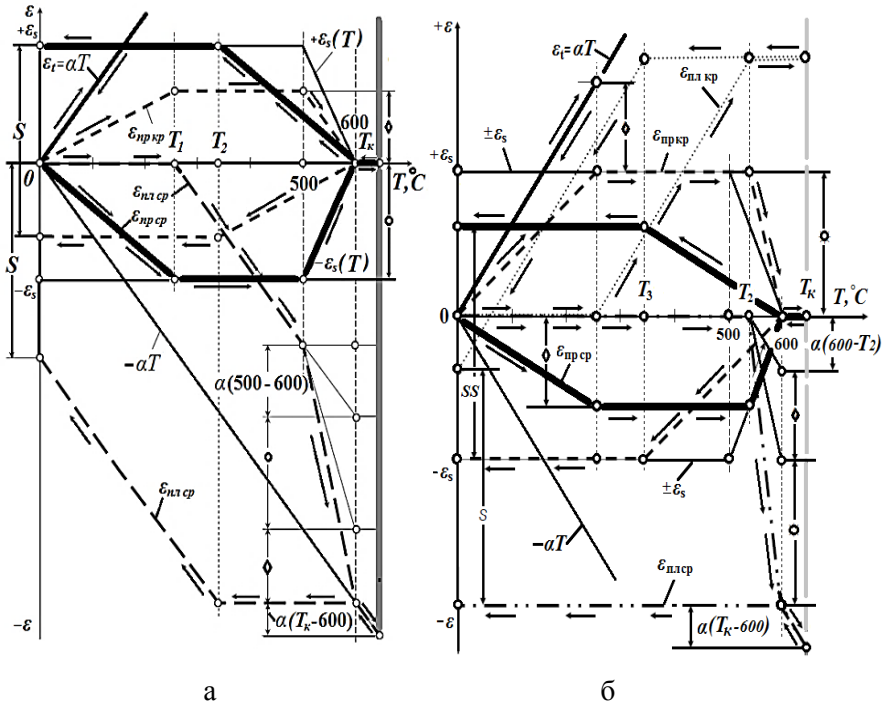


Рисунок 2.12 – Термомеханічні діаграми для пластин із прорізами за $F_{CP} < F_{KP}$ (а) та $F_{CP} > F_{KP}$ (б) при схематичній залежності σ_T від температури

2.4 Методи розрахунків напружень та деформацій при зварюванні

Всі методи розрахунків, що засновані на гіпотезі плоских перетинів, є простоти та знайшли широке застосування в інженерній практиці. Найбільшу розповсюдженість отримали графічні розрахунки напружено-деформаційного стану зварних деталей та конструкцій за методами Г.О. Ніколаєва, І. П. Трочуна та М.О. Окерблома. Вони використовуються при розрахунках як міцності зварних з'єднань та конструкцій, так і власних деформацій та напружень. Ці методи (за точністю) застосовують 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 стержнів, балок, стояків тощо.

Метод Г.О. Ніколаєва побудовано на наступних припущеннях: відповідність гіпотезі плоских перетинів; лінійність напруженого стану; схематизована залежність σ_T та відносної пружної деформації на рівні межі плинності від температури; модель ідеально пружного стану; незалежність теплофізичних властивостей металу від температури у широкому інтервалі температур, деформацій та напружень по товщині пластини.

Метод І.П. Трочуна, окрім припущень за методом Г.О. Ніколаєва, додатково припускається, що по ширині пластичної зони $2b$ залишкові напруження розподілені рівномірно та знаходяться на рівні межі плинності (σ_T). Тобто епюра залишкових напружень не трапецієвидна, а прямокутна.

На практиці застосовуються плоскі й об'ємні елементи і конструкції. В машинобудуванні також широко використовуються вузли з різнорідних 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. В останні роки із удосконаленням електронно-обчислювальної техніки застосовують числові методи, зокрема метод скінчених елементів (МСЕ).

Фізична сутність МСЕ ґрунтується на уявленні конструкції у вигляді сукупності окремих (геометрично визначених) скінчених 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 скінченим числом степенів вільності.

Після ідеалізації конструкції у вигляді сукупності дискретних скінчених елементів визначається зв'язок між вузовими 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.

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 стержневих систем.

Існує декілька найбільш уживаних типів скінченних елементів: брус, стержень, 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.

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. На цей час існує багато різних програм для розрахунків напружень та деформацій зварних деталей та конструкцій.

В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України розроблено пакет спеціалізованого ПЗ "WELD PREDICTION", в якому використовується 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" 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 не суцільності, уявними або виявленими в результаті неруйнівного контролю.

ТЕМА 3. ОСНОВНІ ФІЗИЧНІ ЯВИЩА ТА ФАКТОРИ ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ВЕЛИЧИНИ НАПРУЖЕНЬ, ДЕФОРМАЦІЙ ТА ПЕРЕМІЩЕНЬ

3.1 Вплив температури на виникнення напружень та деформацій при зварюванні та наплавленні

Як зазначалося вище, нерівномірне нагрівання є головною причиною виникнення напружень та деформацій при зварюванні та наплавленні. За нагріву відбувається вільне теплове розширення речовин ($\Delta l = \alpha T l$). Розподіл температури має певну залежність від точки максимального нагрівання ($f(T)$). Відповідно різні зони деталей нагріваються до різних температур та розширюються на різні величини, але тіло не розривається на частини через виникнення пружних напружень та пластичних деформацій. Пластина при наплавленні валика (рис. 3.1) подовжується на величину Δl – дійсні подовжні деформації, тобто у всіх смужках подовження будуть однаковими.

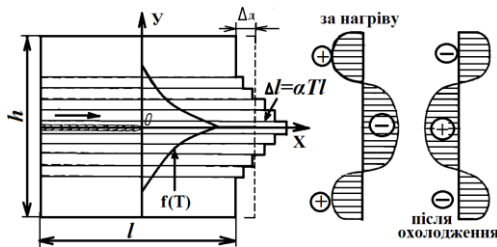


Рисунок 3.1 – Деформації та напруження за нагрівання середини пластини

Відповідно у більш нагрітих смужках будуть виникати напруження стискання, а в менш нагрітих напруження будуть розтягувальними. При досягнення напруженнями величини на рівні σ_T будуть відбуватися пластичні деформації. Це призводить до того, що в одній і тій же зоні при нагріванні будуть виникати напруження із певним знаком (+ або –), а при охолодженні напруження можуть знизитися до 0, а потім змінити свій знак (рис. 3.1). Такий перебіг зміни розмірів в окремих зонах при нагріванні та охолодженні і є причиною виникнення внутрішніх напружень (залишкових).

На розподіл температур по деталі (рис. 3.2) впливають не тільки величина отриманого тепла (енергії), а й технологія виготовлення деталей. Збільшення швидкості зварювання не тільки звужує температурне поле, а й зменшує його довжину (рис. 3.3), що дозволяє впливати на виникнення напружень та деформацій при зварюванні та наплавленні.

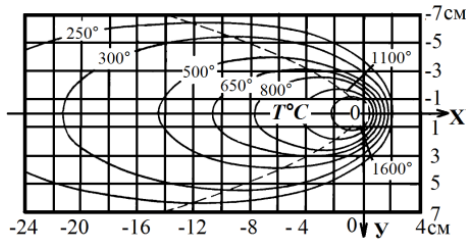


Рисунок 3.2 – Ізотерми рухомого температурного поля у пласкій тонкій пластині за М.М. Рикалінім.

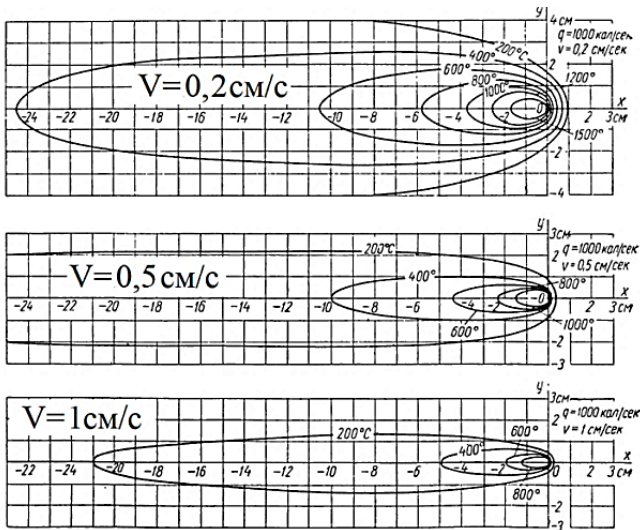


Рисунок 3.3 – Вплив швидкості руху зварювальної дуги на форму рухомого температурного поля у пластині

Подібний розподіл температурного поля відбувається і по товщині виробів, що особливо важливе при наплавленні (рис. 3.4) та при багато

шаровому зварюванні (рис. 3.5). Тобто ізоТЕРми у пласкій пластині дотичні ізоТЕРмам по товщині.

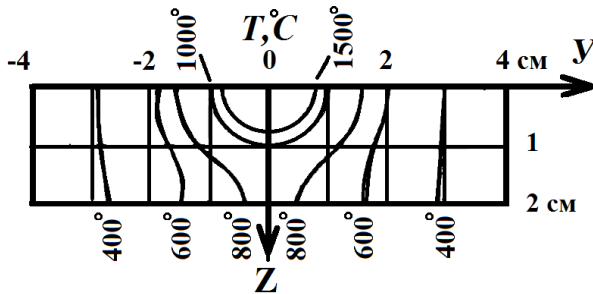


Рисунок 3.4 – Розподіл температурного поля по товщині

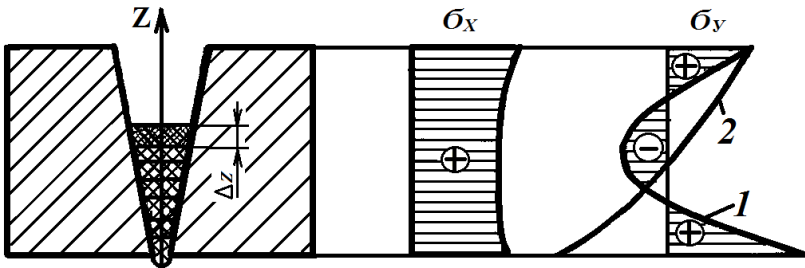


Рисунок 3.5 – Залишкові напруження у багатошарових швах

Слід зауважити, що при зварюванні дефектів у зварювальних швах можуть виникнути значні розтягувальні напруження, що виникають від поперечної усадки. Подібні несприятливі умови зварювання виникають при зварюванні елементів, що зібрані без зазорів. Виникаючі великі розтягувальні напруження дуже небезпечні тому, що щілини між зварювальними деталями будуть концентраторами напружень. Тому у відповідальних конструкціях не рекомендується застосовувати з'єднання із переривистими швами.

При зварюванні конструкцій значної товщини багатошаровими швами див. рис. 3.5, чи багатошаровому наплавленні, виникають залишкові напруження: подовжні σ_x , поперечні σ_y та в напрямку товщини σ_z . При товщині деталей менших за 40...80 мм спротив усадку металу за товщиною буде незначний.

Формування подовжніх напружень подібне до однопрохідних. Поперечні напруження виникають внаслідок поперечної усадки і дуже залежать від впливу наступних шарів (усадки наступного шару Δz), що призводить до виникнення кутових деформацій і нерівномірному розподілу напружень (крива 1 рис. 3.5). Використання різних видів закріплення змінюють розподіл напружень (крива 2 рис. 3.5).

3.2 Вплив різних факторів на величини напружень, деформацій та переміщень

Кристалізація та охолодження зварювального шва суттєво впливає на зміну форми зварних виробів та призводить не тільки до продовжних скорочень, а й до кутових деформацій. За кристалізації відбувається зміна об'єму металу і відповідно зміна лінійних розмірів у всіх напрямках. За швидкої кристалізації утворюються не врівноважені структури, які під час охолодження можуть змінюватися і викликати появу внутрішніх напружень та мікротріщин.

Зменшення лінійних розмірів зварювального шва відбувається нерівномірно, через те що посилення шва має більший розмір (l_1), а корінь шва менший розміри (l_2) (рис. 3.6а, 3.6б). Відповідно до формули, що враховує як розмір тіла так і різницю температур:

$$\Delta l = \alpha (T_1 - T_2) l.$$

Величина кута відхилення (ϕ) залежить від різниці довжин l_1 та l_2 (див. рис. 3.6б), розмірів (товщини) деталі та різниці температур. Змінюючи ці параметри можливо впливати на кутові відхилення та внутрішні напруження.

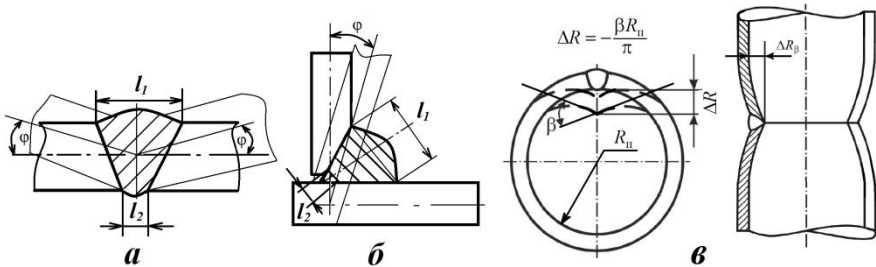


Рисунок 3.6 – Виникнення кутових деформацій у стиковому з'єднанні (а), кутовому (б) та в оболонці (в)

При розгляді деформацій поперечного скорочення передбачався їх рівномірний розподіл по товщині металу, визначалося його середнє значення. У реальному з'єднанні поперечне скорочення по товщині розподілене нерівномірно. Верхні шари металу, які розташовані ближче до джерела тепла, нагріваються більше, тому і поперечне скорочення у верхніх шарах більше від середньої розрахункової величини, а в нижніх – менше. Нерівномірність скорочення призводить до появи згинального моменту і утворення зламу з площини з'єднання на кут ϕ . Основною причиною утворення кутових деформацій є нерівномірність нагрівання та поперечного скорочення з'єднання по товщині. 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 подовжнього та поперечного скорочення.

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 зламу. 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 – це неоднозначна залежність від погонної енергії, а точніше від співвідношення погонної енергії та квадрата товщини q_n/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).

Отже величина внутрішніх напруження та деформації конструкцій при зварюванні залежать не тільки від того як відбувається зварювання, режимів зварювання, умов кристалізації шва, а й від конструкції виробу і розмірів з'єднуваних деталей. За співвідношення ширини пластини (B) до зони пластичних деформацій $(b_0)B/b_0 > 8$ (рис. 3.7а) пластини вважаються широкими, а кутові деформації від нерівномірного нагрівання незначними.

При зварюванні пластин в яких це відношення не виконується, можуть відбуватися кутові деформації. За зварювання пластин різної ширини ($B_1 > B_2$) (рис. 3.7б) існує ексцентриситет (y_0) відносно центральної вісі виробу і відповідно відбувається вигин виробу (f) та виникає певний кут поворотання виробу (φ) під дією усадкової сили (P_{yc}). При наплавленні валика на край пластини (рис. 3.7в) виникає кривизна центральної вісі C , яка змінюється у процесі наплавлення.

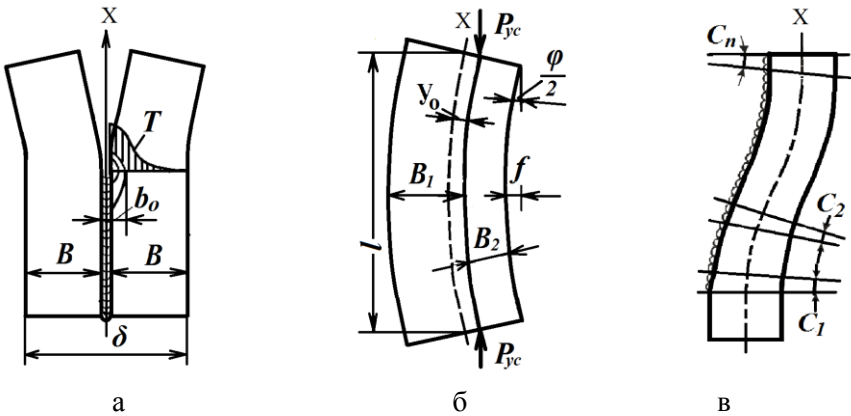


Рисунок 3.7 – Деформації зварного виробу при однаковій ширині зварюваних пластин (а), при різній ширині зварюваних пластин (б) та при наплавленні валика на край пластини.

Деформації втрати стійкості у вигляді хвиль часто спостерігаються при зварюванні площинних тонколистових конструкцій. Ці деформації зазвичай перевищують величину, що регламентується технічними вимогами до виробів. Виключення з роботи покоробленої (хвилястої) частини поперечного перерізу пластини 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 стискування.

Величина критичних напружень залежить від умов закріплення крайок конструкції, прямо пропорційна жорсткості матеріалу (модулю пружності), квадрату товщини s (для листових конструкцій) і обернено пропорційна квадрату протяжності стислої ділянки розмірами a .

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.

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.

Наростання кута повороту стінки відносно полиці відбувається при зварюванні напрохід першого шва таврового з'єднання за рахунок неодночасного охолодження по довжині. Оскільки основна причина повороту стінки відносно полиці – неодночасність зварювання по довжині, то уникнути цього наростання повороту можна змінивши послідовність зварювання, наприклад зварюванням ділянки 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.

Крутильна форма втрати стійкості характерна для перетинів, що мають велику кількість швів поблизу центру ваги. Найбільш здатні до цього виду закручування балки хрестоподібного перетину, а також таврові балки із широкими поясками. Головна причина такого закручування – напруження стискання в периферійних, віддалених від центру ваги перетину зонах. При закручуванні балки волокна в цих зонах, розташовуючись по гвинтовій лінії, подовжуються, за рахунок чого зменшуються напруження стискання. Можливостей регулювання цього виду закручування дуже мало, тому треба прагнути уникати такого розташування великої кількості швів поблизу центру ваги перетину на стадії проектування. Слід враховувати, що ні послідовність заварки швів (на прохід або ділянки), ні жорстке

закріплення балки в кондукторі в цьому випадку не дадуть ефекту. Закручування виявиться майже повною мірою після зняття закріплень.

Закручування закритих профілів відбувається за рахунок подовжнього зсуву крайок при зварюванні. Подовжній зсув крайок при зварюванні пов'язаний з неоднаковим нагрівом, а отже, і розширенням крайок 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 незамкнутах перерізах (таврових і двотаврових балках) такий зсув особливих наслідків не викликає. Труднощі виникають при замкнутах перерізах.

Оскільки більше нагрівається і розширюється крайка стінки, то її переміщення вздовж шва при розширенні до півтора разів 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 поясу, повинні заварюватися в одному напрямі, а не назустріч.

Косий вигин, тобто вигин балки в двох площинах одночасно. Такий вигин спричиняють шви, що 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.

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 (до 4...5 мм) та товстостінні (8...10 мм і більше) 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.

ТЕМА 4. МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ ТА ДЕФОРМАЦІЙ

4.1 Вплив власних напружень і деформацій на зварні конструкції

У різних деталях та конструкціях вплив зварювальних напружень та деформацій проявляється по різному. В одних випадках вплив мають тільки напруження, а у інших деформації та переміщення.

Внутрішні залишкові напруження призводять до:

- порушення точності виготовлення конструкцій при механічній обробці;
- порушення точності виготовлення конструкції при першому навантаженні;
- зниження міцності в поєднанні з іншими несприятливими чинниками;
- зменшення жорсткості;
- зниження стійкості;
- зниження корозійної стійкості;
- створення умов для сповільненого руйнування.

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 врівноважуються 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 площа пружно-пластичних деформацій (ППД) зменшується. Відповідно зменшується сила усадки, внаслідок чого зменшуються укорочення по осі та стрілка прогину f , тобто пластина мимоволі подовжиться і зменшить прогин. 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.

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 подовжнього скорочення, 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).

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 (втоми) може зменшитися, якщо в зоні утворення втомної тріщини діють зварювальні напруження розтягу, або, навпаки, збільшиться, якщо діють напруження стиску. Наявність інших несприятливих чинників, а саме: зміна механічних властивостей у зоні термічного впливу, концентратори напружень, пов'язані з дефектами форми і не суцільністю в зоні зварних з'єднань, перетинання швів по двох, особливо, трьох взаємно перпендикулярних вісях, що створює плоский або об'ємний напружений стан, низькі температури та інші, 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: втомних і корозійних тріщин, тріщин повзучості, а також крихких руйнувань.

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.

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.

Зниження корозійної стійкості. Напруження розтягу в активній зоні знижують корозійну стійкість металу, що призводить до прискореної корозії саме в зоні з'єднання. Зниження корозійної стійкості може бути спричинено виділенням карбідів у ЗТВ.

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.

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 заготовка 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).

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 співставними з витратами на зварювання.

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.

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.

4.2 Методи вимірювання напружень та деформацій

Вимірювання напружень, деформацій та переміщень виконується різними методами за допомогою засобів, що вимірюють лінійні розміри та кути. Всі ці види вимірювань визначають зміни розмірів елементів виробів чи їх відносного положення, відхилення або вигин (рис. 4.1).

Вимірювання залишкових пружних напружень у деталях чи виробках відбувається після їх розділення на частини і є руйнівними методами дослідження. До розділення на виробах роблять помітки (бази) певних розмірів або геометричних фігур. Для вимірювання лінійних розмірів застосовують лінійки, штангенциркулі, а для більш

точного виміру мікрометри та індикатори годинникового типу (рис. 4.2а), що встановлюються на деформометрах (рис. 4.2б).

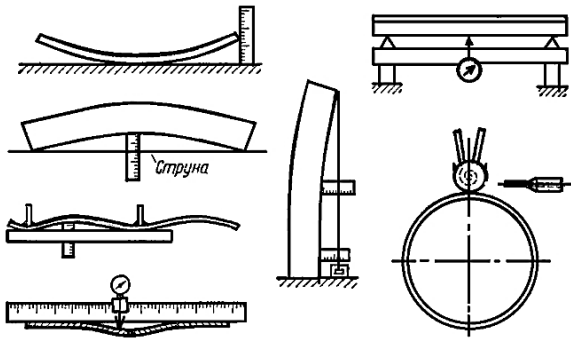


Рисунок 4.1 – Різні види вимірювання деформацій

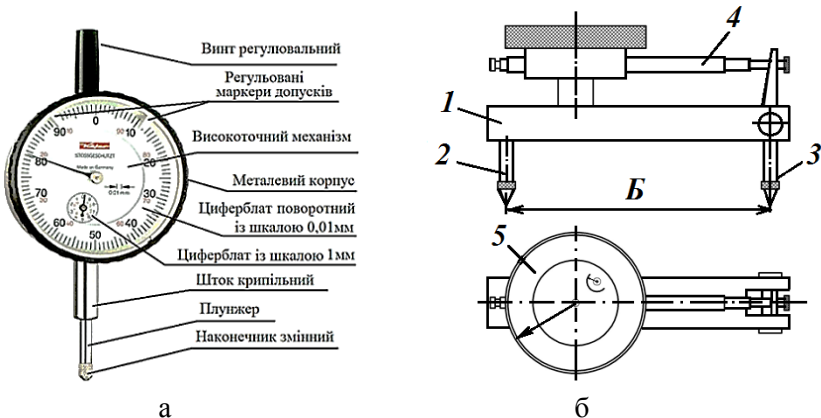


Рисунок 4.2 – Індикатор годинникового типу (а) та деформометр (б)

Деформометр є приладом, який складається з корпусу - 1, на якому розташовані нерухома (2) та рухома (3) ніжки (рис. 4.2б.). Кінці ніжок виконані у вигляді конусів для встановлення їх у спеціально підготовлені отвори на досліджуваному зразку. Відстань між отворами називається базою вимірювання і позначається «Б». Для дослідження деформацій і напружень найчастіше використовують деформометри з базами 25, 50 або 100 мм. Верхній кінець рухомої ніжки взаємодіє зі

штоком (4) індикаторної головки годинникового типу (5), з ціною поділок в діапазоні від 0,1 мкм до 0,01 мм.

Вимірювання деформацій (переміщень) у процесі зварювання виконують на установці, що показано на рис. 4.3. В процесі нагрівання, зварювання або наплавлення валика відбувається вигин пластини (1) вниз. Після охолодження пластина вирівнюється, але не приймає первинного положення, що обумовлено перебігом пластичних деформацій в зоні нагрівання, як у період нагрівання, так і під час охолодження. Відхилення кінця пластини фіксується – індикатор годинникового типу (4). Величина та знак відхилення залежать від властивостей матеріалу, режимів та технології зварювання (наплавлення).

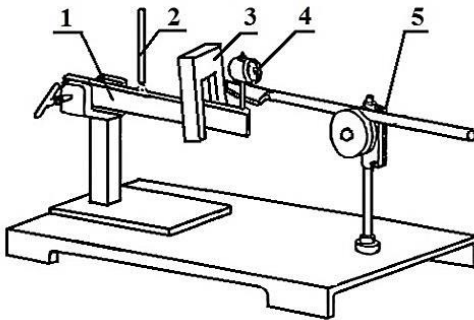


Рисунок 4.3 – Установка для вимірювання деформацій у процесі зварювання чи наплавлення та охолодження де: 1– пластина (зразок), що нагрівається; 2 – електрод; 3 – захисний екран; 4 – індикатор годинникового типу; 5 – штатив

4.3 Методи попередження залишкових напружень та деформацій

Методи боротьби зі зварювальними деформаціями, їх зменшення та регулювання поділяються на три групи: методи, які застосовують до зварювання, в процесі зварювання та після нього. Головними факторами, що викликають залишкові зварювальні напруження і деформації конструкцій є : залишкові уздовж ні пластичні деформації скорочення у пластичній зоні; рівномірна або нерівномірна пластична деформація скорочення по товщині у поперечному напрямку;

розбіжність центру ваги поперечного перетину зони пластичних деформацій скорочення з центром ваги поперечного перетину зварюваних елементів (поза центрова дія P_{yc}); зміни структури металу, що викликані нагріванням при зварюванні.

4.3.1 Методи, які застосовуються до зварювання.

Рациональне проектування. Конструктор передбачає появу зварювальних деформацій уже на стадії проектування, за принципом – легше запобігти, ніж усувати наслідки. Основні принципи раціонального проектування спрямовані 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 зварювальні процеси можливо розташувати в наступний ряд: контактне точкове, дугове, газове зварювання. У свою чергу ступінь нагрівання при дугових методах зварювання тим більший, чим менший коефіцієнт наплавлення. Тому кількість тепла, що вводиться при ручному дуговому зварюванні, дещо менша при зварюванні під флюсом і найменша – в захисному газі.

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 таврові з'єднання мають завищені катети за рекомендаціями нормативних документів щодо величини мінімальних катетів залежно від товщини основного металу. В таких з'єднаннях при збереженні умов міцності та мінімальних катетів 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 зменшує напруження та деформації. Оскільки не завжди можливо проектувати тільки симетричні конструкції та найбільш частим є вигин, що залежить від розташування шва відносно осі конструкції, то необхідно використовувати принцип компенсації, коли вигин, який викликається одними швами, частково або повністю компенсується іншими.

Попередня зміна форми та розмірів конструкції при складанні (компенсація деформацій). Ці методи полягають у попередній зміні форми, розмірів зварювальних елементів або їх розташування до зварювання (рис. 4.4). Якщо об'єктивно неможливо отримати зварну конструкцію з відхиленнями від заданих розмірів та форми в межах установлених допусків, слід складати заготовки до зварювання не "в розмір", а змінити форму й розміри з відповідним припуском, щоб протидіяти зварювальним деформаціям. Такий прийом широко використовується для складних великогабаритних конструкцій. Основна складність застосування цього методу – необхідність попереднього визначення величини та характеру очікуваних зварювальних деформацій розрахунковим або експериментальним шляхом.

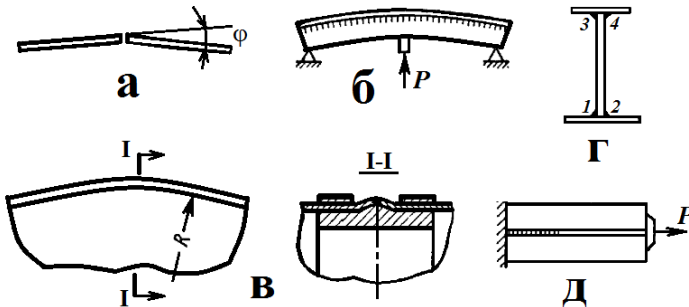


Рисунок 4.4 – Різновиди методів запобігання зменшенню зварювальних деформацій де а – взаємне розташування з урахуванням усадки; б, в – створення деформацій зворотних до зварювальних; г – раціональна послідовність швів; д – розтягування зварювального виробу у процесі зварювання

Зворотний пружний вигин за допомогою спеціальних пристроїв-кондукторів (компенсація деформацій). При цьому в зоні зварювання необхідно створити початкові напруження розтягу, які зменшують подовжню усадку (усадкову силу й об'єм подовжного укорочення). У результаті зменшуються деформації, обумовлені цією причиною. Пристрій, що навантажував знімається після повного охолодження. Унаслідок притиснення полотнища до пристрою зона шва виявляється розтягнутою перед зварюванням.

Зворотний пластичний вигин до зварювання (компенсація деформацій) – 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.

4.3.2 Методи, які застосовуються в процесі зварювання

Застосування економічних режимів, які забезпечують мінімальне нагрівання і мінімальні деформації конструкції в процесі зварювання.

Регулювання теплового стану металу зварного з'єднання. *Застосування концентрованих джерел енергії. Зварювання «холодним металом». Зварювання з періодичним перериванням дуги. Штучне охолодження зони нагрівання в процесі зварювання, наприклад притисненням мідних охолоджуваних планок у зоні біля шву.*

Зварювання в жорсткому закріпленні ефективне 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 %.

Навантаження зони шва напруженнями розтягу в процесі зварювання, наприклад наплавленням "холостих" валиків поперек вивідних планок.

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.

4.3.3 Методи, які застосовуються після зварювання

Зварювальні деформації найчастіше усувають після того, як вони виникли, замість їх попередження або в процесі зварювання. Це пояснюється організаційно-технічними причинами, іноді також недостатньою кваліфікацією фахівців. Існують два види усунення деформацій після зварювання механічний(силовий) та тепловий (термічна обробка).

Механічна правка, тобто створення механічною дією пластичних деформацій, зворотних до зварювальних: вигин під пресом, плющення роликми, проковування молотком. Механічна правка може буди у процесі зварювання, у процесі охолодження та після повного охолодження.

Термічна правка, що поділяється на правку місцевим нагріванням та правку загальним нагріванням, а також високий відпуск у затискних пристроях.

Загальна термічна обробка. Різновиди термічної обробки наведено на рис. 4.5.

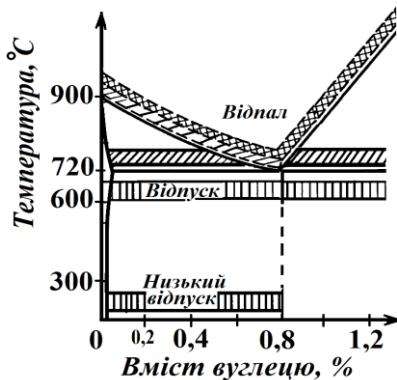


Рисунок 4.5 – Різновиди термічної обробки

Загальна термічна обробка здійснюється для зняття внутрішніх напружень першого і другого роду за температури 150...450°C (низькотемпературний відпуск). За відпуску при 150...250°C твердість виробу не змінюється. За відпуску при 300...450°C відбувається незначне зниження твердості при підвищенні в'язкості та пластичності. Нагрівання до температур 600...720°C (високотемпературний відпуск) призводить до перетворення напружень у пластичні деформації та суттєво знижує твердість, за підвищення пластичності. Відпуск це остаточна термічна обробка.

Правка місцевим нагріванням. Цей метод правки, засновано на принципі компенсації, тобто створення, нерівномірним нагріванням після зварювання, додаткових пластичних деформацій металу, що викликають деформації (переміщення) конструкції, зворотні до зварювальних. Форми плям нагрівання наведено на рис. 4.6.



Рисунок 4.6 – Форми плям для нагрівання

Механізм утворення деформацій при термічній правці той же, що і при зварюванні. Цей метод знайшов широке застосування завдяки його простоті та універсальності. Але, він вимагає від робітників певної майстерності та відповідної кваліфікації і досвіду. При правці нагрівають ті зони, в яких після охолодження необхідно отримати укорочення металу. За характером нагрівання слід розрізняти листові елементи, що втратили стійкість, балкові та ті, що отримали вигин.

Для правки можна використовувати будь-які джерела нагрівання. Перевагу треба надавати тим джерелам, що дозволяють наступне: регулювати кількість та розподіл тепла при нагріванні (концентроване нагрівання); візуально визначати температуру нагрівання; не змінювати суттєво властивості матеріалу та вид поверхні. Найповніше цим вимогам задовольняє нагрівання ацетиленокисневим полум'ям. Температура нагрівання повинна перевищувати температуру, при якій метал втрачає свої пружні властивості (для низьковуглецевих низьколегованих сталей це 650...800 °C). Для правки конструкцій з

титанових та АМг сплавів використовують прогрівання валиків дугою неплавким електродом.

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. Головна складність при цьому полягає в тому, щоб не допустити збільшення прогину в процесі нагрівання, при якому зменшується ефективність правки. При недостатньому виправленні деформацій правку можна повторювати.

Суттєве значення має форма плям нагрівання та їх розташування на листі при правці виробів з кільцевим швом. Витягнута форма плям нагрівання у вигляді смуги ефективніша за круглі плями. 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 тепла, витраченого на нагрівання. Смуги нагрівання слід розташовувати з урахуванням того, що укорочення поперек смуги більше до 2–3 разів, ніж удовж.

Деформації у вигляді сферичної поверхні можливо виправляти виконуючи кільцеве нагрівання по контуру. При нагріванні плямами, коли їх розміри великі, застосовують додаткове проковування. Основне призначення проковування – це не зменшити товщину 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. Смуги нагрівання розташовують поперек балки якнайдалі від осі балки, що ефективніше, ніж удовж. Найбільш ефективна форма смуги нагрівання це клиноподібна з вістрям на нейтральній вісі балки.

Високий відпуск у затискних пристроях. Високий відпуск при 650...720°C (температура нижча за температуру $\alpha \leftrightarrow \gamma$ структурних

перетворень) широко використовується для зняття напружень, практично не змінює форму та розміри конструкції. 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.

Додаток А

Тести для перевірки

Потрібно вибрати вірний варіант відповіді.

1. Вкажіть, за якою формулою розраховують повні напруження на похилій площині?

А – $P_v = \sqrt{P_{vx}^2 + P_{vy}^2 + P_{vz}^2}$;

Б – $P_v =$;

В – $P_v = \Sigma P_{vx} + \Sigma P_{vy} + \Sigma P_{vz}$;

Г – $UP_v = \Sigma P_{vx} + \Sigma P_{vy} + \Sigma P_{vz}$.

2. Вкажіть, за якою формулою розраховують дотичні напруження на площині?

А – $\phi_v = \sqrt{\tau_{vx}^2 + \tau_{vy}^2 + \tau_{vz}^2}$;

Б – $\phi_v = \sqrt{\sigma_{vx}^2 + \sigma_{vy}^2 + \sigma_{vz}^2}$;

В – $\phi_v = \sqrt{P_v^2 - \sigma_v^2}$;

Г – $U\phi_v = U_{vx} + U_{vy} + U_{vz}$.

3. Вкажіть, яка чисельність рівнянь рівноваги сил у тілі?

А – 3;

Б – 6;

В – 9;

Г – 15.

4. Вкажіть, яка загальна чисельність рівнянь рівноваги у кожній крапці напруженого тіла (у загальному випадку)?

А – 3;

Б – 6;

В – 9;

Г – 15.

5. Вкажіть, що не є припущенням при розрахунках напружень та деформацій зварних конструкцій?

А – початкова температура зварного з'єднання дорівнює 0°C;

Б – межа плинності постійна та не залежить від температури до 1000°C;

В – тіло ізотропне (однорідне)

Γ – коефіцієнт термічного розширення матеріалу не залежить від температури.

6. Вкажіть, за якої температури межа плинності зменшується до 0°C , за припущеннями при розрахунках напружень та деформацій зварних конструкцій з низьковуглецевих сталей?

А – 500°C ;

Б – 600°C ;

В – 800 ;

Γ – 1000°C .

7. Вкажіть, за яким рівнянням визначається повна деформація стержня, що жорстко защемлений після повного охолодження?

А – $e_{\text{пов}} = e_i + e_{\text{пр}} + e_{\text{пл}}$;

Б – $e_{\text{пов}} = e_i + e_{\text{пр}}^{\text{наг}} - e_{\text{пр}}^{\text{охл}} + e_{\text{пл}}$;

В – $e_{\text{пов}} = e_i + e_{\text{пр}} + e_{\text{пл}}^{\text{наг}} - e_{\text{пл}}^{\text{охл}}$;

Γ – $e_{\text{пов}} = e_i - e_{\text{кін}} + e_{\text{пр}} + e_{\text{пл}}$.

8. Вкажіть, яке рівняння для пластини із прорізами відповідає переважній більшості зварних з'єднань?

А – $F_{\text{ср}} / F_{\text{кр}}$;

Б – $F_{\text{ср}} = F_{\text{кр}}$;

В – $F_{\text{ср}} > F_{\text{кр}}$;

Γ – $F_{\text{ср}} < F_{\text{кр}}$.

9. Вкажіть, які напруження виникають у середній смузі пластини із прорізами після повного циклу нагрівання та охолодження за умови $F_{\text{ср}} < F_{\text{кр}}$?

А – пружні напруження стискання;

Б – пружні напруження розтягування;

В – напруження від пластичної деформації;

Γ – повна відсутність будь яких напружень.

10. Вкажіть, які напруження виникають у середній смузі пластини із прорізами після повного циклу нагрівання та охолодження за умови $F_{\text{ср}} > F_{\text{кр}}$?

А – пружні напруження стискання;

Б – пружні напруження розтягування;

В – напруження від пластичної деформації;

Γ – повна відсутність будь яких напружень.

11. Вкажіть, що покладено в основу за розгляду процесів виникнення напружень та деформацій при зварюванні?

- А – закон Гука;
- Б – теорія пружності;
- В – фізика твердого тіла;
- Г – гіпотеза плоских перетинів.

12. Продовжить речення. Гіпотеза плоских перетинів полягає у

- А – поєднанні закону Гука та механіки руйнування;
- Б – поєднанні фізики твердого тіла та механіки руйнування;
- В – поділу перетину зразка на окремі смужки;
- Г – поділу перетину зразка на з'єднані смужки.

13. Вкажіть, які напруження виникають в середині кругового шву?

- А – пружні напруження стискання;
- Б – пружні напруження розтягування;
- В – напруження від пластичної деформації;
- Г – повна відсутність будь яких напружень.

14. Вкажіть, у яких одиницях деформометри вимірюють напружено-деформований стан?

- А – в омах;
- Б – у міліамперах;
- В – у мілівольтах;
- Г – у міліметрах.

15. Вкажіть, у яких одиницях вимірюють напружено-деформований стан методом тензометрії?

- А – в омах;
- Б – у міліамперах;
- В – у мілівольтах;
- Г – у міліметрах.

16. Вкажіть, у чому полягає відмінність розрахунків за методом Трочуна від методу Ніколаєва?

А – метод Трочуна передбачає додаткові припущення у залежності міцності матеріалу від температури;

Б – метод Трочуна не враховує нерівномірність розподілу залишкових напружень по ширині пластичної зони;

В – метод Трочуна не враховує нерівномірність розподілу деформацій по ширині пластичної зони;

Г – метод Трочуна передбачає рівномірний розподіл залишкових напружень по ширині зони пластичної деформації, а також те, що величина цих напруження дорівнює $\sigma_{пл}$.

17. Вкажіть фактор, який не впливає на напружено-деформаційний стан?

А – залишкові пластичні деформації скорочення удовж пластичної зони;

Б – пластична деформація скорочення то товщині у поперечному напрямку;

В – структурні зміни від нагрівання при зварюванні;

Г – залежність міцності від температури.

18. Вкажіть, на яких етапах можливо зменшення напружень та деформацій при зварюванні?

А – під час утворення зварювального шва;

Б – після остаточного охолодження зварного з'єднання;

В – під час утворення зварювального шва та після остаточного охолодження зварного з'єднання;

Г – зменшення взагалі не можливо.

19. Продовжить речення. Вплив на величину залишкової пластичної деформації під час зварювання можливий, якщо... .

А – змінити тепловий стан під час зварювання;

Б – зробити попередній силовий вплив;

В – застосуванням матеріалів із меншою межею плинності;

Г – всіма вказаними засобами А, Б і В.

20. Продовжить речення. Вплив на величину залишкової пластичної деформації після остаточного охолодження зварного з'єднання можливий, якщо

А – створити зону пластичних деформацій стискання;

Б – створити зону пластичних деформацій розтягування;

В – створити зону пластичних деформацій протилежного знаку;

Г – всіма вказаними засобами А, Б і В.

21. Вкажіть, які залишкові напруження найбільш небезпечні?

А – нормальні та дотичні напруження на рівні близькому до $y_{пл}$;

Б – стискаючі напруження на рівні близькому до $y_{пл}$;

В – розтягувальні напруження на рівні близькому до $y_{пл}$;

Г – всі вказані А, Б і В.

22. Вкажіть, від чого залежить характер розподілу напружень та деформацій, а також їх величина?

А – від ступеня нерівномірності нагрівання (охолодження) по товщині та закріплення виробу;

Б – від швидкості нагрівання;

В – від швидкості охолодження після зварювання;

Г – від попереднього нагрівання деталей.

23. Вкажіть, на що впливають структурні перетворення в матеріалах, що викликані нагріванням при зварюванні?

А – на місцеві та загальні деформації зварених елементів;

Б – на утворення твердих та м'яких прошарків;

В – на виникнення міжкристалічної корозії;

Г – всі вказані А, Б і В.

24. Вкажіть, які засоби зменшення зварювальних напружень та деформацій найбільш ефективні?

А – ті, що запобігають утворенню зварювальних напружень та деформацій;

Б – ті, що усувають утворення зварювальних напружень та деформацій;

В – комбінація факторів, що запобігають та усувають утворення зварювальних напружень та деформацій;

Г – всі вказані А, Б і В.

25. Вкажіть, що не є методом попередження зварювальних напружень та деформацій?

А – регулювання теплового потоку;

Б – активне механічне навантаження;

В – термічна обробка;

Г – компенсація деформацій.

26. Вкажіть, що не є методом усунення зварювальних напружень та деформацій?

А – регулювання теплового потоку при нагріванні та охолодженні;

Б – активне механічне навантаження;

В – термічна обробка;

Г – термічна правка.

27. Вкажіть, що не є концентрованим джерелом нагрівання?

А – імпульсно-дугове зварювання;

Б – плазмове;

В – зварювання вольфрамовим електродом;

Г – електронно-променеве зварювання.

28. Вкажіть, що не є методом компенсації зварювальних напружень та деформацій?

А – раціональне проектування зварної конструкції;

- Б – попередня термічна обробка;
- В – розробка певної послідовності зварювання;
- Г – деформації із зворотнім знаком до зварювання.

29. Вкажіть, у чому полягає призначення термічної правки балок?

- А – у створенні певної зони пластичної деформації для виникнення моменту вигину протилежного знаку;
- Б – в усуненні залишкових напружень у певній зоні;
- В – в усуненні залишкових деформацій у певній зоні;
- Г – всі вказані А, Б і В.

30. Вкажіть, на який стадії циклу термічної обробки відбувається суттєве зменшення напружень?

- А – на стадії нагрівання;
- Б – на стадії витримки;
- В – на стадії охолодження;
- Г – протягом доби після термічної обробки.