

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

НАПРУЖЕННЯ ТА ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ЗВАРЮВАННІ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до самостійної роботи та виконання
домашніх завдань з дисципліни

Київ
«Політехніка»
2008

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

НАПРУЖЕННЯ ТА ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ЗВАРЮВАННІ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до самостійної роботи та виконання домашніх завдань з дисципліни
для студентів напрямку 050504 «Зварювання»
заочної форми навчання

Затверджено методичною радою НТУУ «КПІ»

Київ
«Політехніка»
2008

Напруження та деформації при зварюванні: Метод. вказівки до самост. роботи та викон. домаш. завдань з дисципліни для студ. напряму 050504 «Зварювання» /Уклад.: В.М. Прохоренко, О.В. Прохоренко. – К.: ІВЦ Видавництво «Політехніка», 2008. – 48 с.

*Гриф надано Методичною радою НТУУ «КПІ»
(Протокол №5 від 24.01.2008 р.)*

Навчальне видання

НАПРУЖЕННЯ ТА ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ЗВАРЮВАННІ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до самостійної роботи та виконання домашніх завдань з дисципліни
для студентів напряму 050504 «Зварювання»
заочної форми навчання

Укладачі: *Прохоренко Володимир Михайлович, д-р. техн. наук, проф.*
Прохоренко Одарка Володимирівна, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний

редактор *І. М. Чертов, канд. техн. наук, доц.*

Рецензент *В.Д. Кузнецов, д-р. техн. наук, проф.*

За редакцією укладачів

Темплан 2008 р., поз. 2-002

Підп. до друку 1.01. 2008. Формат 60×84¹/₁₆. Папір офс. Гарнітура – Arial

Спосіб друку – ризографія. Ум. друк. арк. 2,79. Обл.- вид. арк. 4,64. Зам. № 7-37. Наклад 100 пр.

Інформаційно-видавничий центр Видавництво «Політехніка» НТУУ «КПІ»
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,
виготовників і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 1665 від 28.01.2004 р.
03056, Київ-56, вул. Політехнічна, 14, корп. 15,
тел/факс: 044) 241-68-64, e-mail: izdatelstvo@ntu-kpi.kiev.ua

ПЕРЕДМОВА

Сучасний стан зварювального виробництва відкриває широкі можливості для створення відповідальних високотехнологічних і надійних зварних конструкцій різного призначення.

Проектування зварних конструкцій та технології їх виготовлення в наш час неможливо без глибокого знання процесів утворення зварювальних напружень та деформацій, впливу їх на міцність та працездатність зварних конструкцій, а також способів їх попередження або усунення.

При вивченні дисципліни «Напруження та деформації при зварюванні» студенти мають засвоїти фізичну сутність процесів утворення зварювальних деформацій та напружень, ознайомитись з існуючими розрахунковими та експериментальними методами визначення зварювальних напружень та деформацій, розподілом залишкових напружень у типових зварних з'єднаннях, впливом деформацій та напружень на властивості конструкцій, методами їх попередження або зменшення тощо.

Навчальним планом по дисципліні «Напруження та деформації при зварюванні» передбачені установочні лекції, практичні заняття, виконання контрольної роботи, виконання курсової роботи. Вивчення дисципліни завершується складанням іспиту.

Оволодіння матеріалом дисципліни базується на знаннях, отриманих при вивченні попередніх дисциплін навчального плану, таких як вища математика, фізика, теоретична механіка, опір матеріалів, теорія процесів зварювання, зварювання плавленням та ін.

Набуті під час вивчення даної дисципліни практичні навички розрахункового та експериментального визначення зварювальних напружень та деформацій дають можливість студентам у їх подальшій інженерній діяльності розв'язувати важливі і складні науково-

практичні задачі проектування та технології виготовлення різноманітних зварних конструкцій.

Дане видання містить навчальну програму дисципліни, методичні вказівки до вивчення окремих тем, завдання на контрольну роботу.

Види самостійної роботи:

1. Вивчення розділів дисципліни за літературними джерелами.
2. Вивчення матеріалу установочних лекцій.
3. Виконання контрольної роботи.

Список літератури

Основна

1. Касаткин Б.С., Прохоренко В.М., Чертов И.М. Напряжения и деформации при сварке. - К.: Выща шк., Голов. изд-во, 1987. - 246 с.

Додаткова

1. Гатовский К.М., Кархин В.А. Теория сварочных деформаций и напряжений. Учеб. пос. Ленингр. кораблестр. ин-т, 1980. – 331 с.
2. Винокуров В.А., Григорьянц А.Г. Теория сварочных деформаций и напряжений. - М.: Машиностроение, 1984. - 280 с.
3. Винокуров В.А. Сварочные деформации и напряжения. - М.: Машиностроение, 1968. - 236 с.
4. Сагалевиц В.М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений. - М.: Машиностроение, 1974. - 248 с.
5. Кузьминов С.А. Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. - Л.: Судостроение, 1974. – 286 с.
6. Трочун И.П. Внутренние усилия и деформации при сварке. - М.: Машгиз, 1964. - 247 с.

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИВЧЕННЯ ТЕОРЕТИЧНОГО МАТЕРІАЛУ ЗА ТЕМАМИ ДИСЦИПЛІНИ

Тема 1. Деякі загальні відомості про напруження та деформації при зварюванні в техніці

Роль і значення зварювальних напружень та деформацій в техніці. Основні напрямки впливу зварювальних напружень та деформацій на технологічні, конструктивні і, головним чином, експлуатаційні показники зварних конструкцій. Сутність науки про термодформаційні процеси в металах при зварюванні. Основні етапи розвитку досліджень за проблемою зварювальних напружень та деформацій в нашій країні та за кордоном. Внесок вітчизняних вчених в дослідження напружень та деформацій при зварюванні. Вплив зварювальних напружень та деформацій на міцність та точність зварних конструкцій. Головні особливості полів зварювальних напружень та деформацій у зварних конструкціях.

Методичні вказівки до теми 1

Основну увагу необхідно приділити питанню впливу зварювальних напружень та деформацій на міцність та точність зварних конструкцій під час їх експлуатації та виготовлення. Це питання є найбільш важливим у даній темі. Необхідно також добре засвоїти в історичній послідовності основні етапи становлення та розвитку уявлень про зварювальні напруження та деформації, з'ясувати роль вітчизняних вчених в розробці розрахункових та експериментальних методів визначення напружень та деформацій при зварюванні. Успішне засвоєння матеріалу даної теми можливо на основі комплексного підходу до аналізу різних питань утворення та розвитку зварювальних напружень та деформацій

Контрольні питання до теми 1

1. Назвіть відомих вітчизняних та зарубіжних вчених, які внесли значний вклад в науку про напруження та деформації при зварюванні.
2. Яким чином зварювальні напруження впливають на технологічну та експлуатаційну міцність зварних конструкцій?
3. В чому полягає вплив залишкових напружень від зварювання на характер розвитку тріщин в конструктивних елементах зварних конструкцій?
4. Яким чином термодформаційні процеси при зварюванні впливають на зміну геометричних розмірів зварних конструкцій?
5. Яке значення мають пластичні деформації, що відбуваються у зварному з'єднанні при зварюванні?
6. В чому полягають особливості полів зварювальних напружень та деформацій?
7. Наведіть приклади негативного впливу зварювальних напружень на міцність зварних конструкцій.
8. Вкажіть місце і роль дисципліни у загальному циклі дисциплін, що відносяться до механіки деформівного середовища.
9. В чому полягає мета і задачі даної дисципліни?

Тема 2. Основні питання про напружено-деформований стан у точці суцільного деформівного середовища.

Основні гіпотези та принципи механіки твердого деформівного тіла. Поняття про напружений стан у довільній точці тіла. Вектор повних напружень на даній площадці у точці та його розклад на складові в осях довільної декартової системи координат. Тензор напру-

жень у точці тіла. Позначення компонентів тензора напружень в довільних осях координат. Часткові випадки тензора напружень. Головні нормальні та максимальні дотичні напруження у точці. Головні осі координат. Тензор напружень у головних осях координат. Орієнтація площадок дії максимальних дотичних напружень у точці. Напруження на площадці з довільною орієнтацією у просторі. Октаедричні напруження у точці. Інтенсивність напружень у точці. Інваріанти тензора напружень. Розклад тензора напружень на гідростатичну та дівіаторну частини. Запис шарового тензора напружень та дівіатора напружень. Середнє нормальне напруження у точці тіла.

Деформований стан у довільній точці навантаженого тіла. Лінійні та зсувні деформації. Позначення деформацій. Тензор деформацій та його складові у довільній декартовій системі координат. Головні лінійні деформації. Запис тензора деформацій у головних осях координат. Інваріанти тензора деформацій. Інтенсивність деформацій у точці. Октаедричні деформації. Розклад тензора деформацій на гідростатичну та дівіаторну частини.

Поняття «плоскої задачі» про напружено-деформований стан. Запис тензорів напружень та деформацій для «плоскої задачі» в узагальненому вигляді. Різновиди «плоскої задачі». Запис тензорів напружень та деформацій для випадків плоского напруженого та плоского деформованого станів. Сімейство ліній, які характеризують напружено-деформований стан «плоскої задачі».

Умови пластичності у точці тіла. Умова пластичності Губера-Мізеса. Геометрична інтерпретація умови Губера-Мізеса для об'ємного та плоского напружених станів.

Сукупність рівнянь теорії пружності, що визначають постановку та розв'язання задач про напружено-деформований стан.

Методичні вказівки до теми 2

Особливу увагу звернути на вивчення напруженого стану у точці деформівного середовища, що є основою правильного розуміння всіх подальших питань даної дисципліни. Глибоко і всебічно необхідно засвоїти індексні позначення і орієнтацію різних компонентів тензора напружень у просторі вибраної довільної системи координат. Після засвоєння теорії напруженого стану у точці порівняно легко можна засвоїти основи деформованого стану у точці тіла, оскільки формально вони подібні. Важливою у даній темі є частина про умови пластичності. Тут треба з'ясувати якою мірою зміна напруженого стану у точці середовища сприяє настанню пластичної течії при об'ємному та плоскому напруженому стані. При вивченні наступних розділів дисципліни найбільшою мірою з даної теми буде використовуватись закон Гука. Тому знання залежностей закону Гука і розуміння його сутності є надто важливим.

Контрольні питання до теми 2

1. Запишіть тензори напружень і деформацій в довільних та головних осях координат.
2. Запишіть залежності для компонентів вектора повних напружень на довільно нахиленій площадці у точці тіла.
3. Як визначається середнє нормальне напруження у точці тіла?
4. Запишіть шаровий тензор та девіатор напружень у точці тіла.
5. Запишіть закон Гука для всіх видів напруженого стану.
6. Запишіть умову пластичності Губера-Мізеса для об'ємного та плоского напружених станів.
7. Поясніть індексацію компонентів тензора напружень.
8. Наведіть приклад зсувної деформації.

9. Запишіть інваріанти тензорів напружень та деформацій.
10. Як визначаються октаедричні напруження та деформації?
11. Покажіть орієнтацію площадок, на яких діють максимальні дотичні напруження.
12. Який зміст має розклад тензора напружень на шарову та девіаторну частини?
13. Скільки потрібно знати складових тензора напружень для повної характеристики напруженого стану у точці тіла?
14. В чому полягає зміст закону парності дотичних напружень?
15. Як змінюється тензор напружень при зміні виду напруженого стану?

Тема 3. Аналіз розвитку деформацій і напружень у моделях зварних з'єднань

Загальна характеристика простих моделей для аналізу розвитку деформацій і напружень при зварюванні. Ідеалізація властивостей металу. Повна деформація та її складові у точці тілі. Побудова і аналіз розвитку повної деформації та всіх її складових від температури для стержня та пластини з прорізами. Основні аналітичні залежності для деформацій та температури у довільний момент на стадії нагрівання та охолодження стержня або середньої полоси пластини з прорізами. Характер зміни напружень у поперечному перерізі пластини з прорізами по мірі нагрівання та охолодження середньої полоси. Вплив початкових умов (попереднього розтягу, стиснення, підігріву та охолодження) на розвиток деформацій та напружень в стержні та пластині з прорізами. Залишкові пластичні деформації скорочення в стержні та пластині з прорізами.

Методичні вказівки до теми 3

Головну увагу при вивченні даної теми слід звернути на розвиток пластичних деформацій у стержні і середній полосі пластини з прорізами, оскільки саме цей процес є основною складовою причини утворення залишкових напружень у зварних конструкціях. Не менш важливо з'ясувати роль у формуванні залишкового напружено-деформованого стану пластичних деформацій у середній полосі пластини з прорізами при температурах вищих за 600°C. Необхідно зрозуміти та добре засвоїти процес розвитку пластичних деформацій скорочення у середній полосі пластини з прорізами при її нагріванні в інтервалі температур (500...600)°C. Треба звернути увагу на фактори, які спричиняють утворення пластичної деформації скорочення при даних температурах. В результаті опрацювання матеріалу даної теми мають бути сформовані чіткі уявлення стосовно характеру розподілу та величини напружень, які утворюються при нагріванні та охолодженні середньої полоси пластини з прорізами.

Контрольні питання до теми 3

1. Покажіть графічно залежність для маловуглецевої сталі межі текучості від температури.
2. Покажіть графічно залежність напружень від деформацій для ідеального пружно-пластичного матеріалу.
3. Якими складовими визначається повна деформація у точці тіла?
4. Виведіть залежність від температури пружної та пластичної деформації у стержні та пластині з прорізами на будь-якому з інтервалів на стадії нагрівання чи охолодження.
5. Які процеси моделюються у стержні та пластині з прорізами?

6. Як впливає на залишкові напруження у пластині з прорізами її попередній розтяг?
7. Запишіть умову рівноваги поздовжніх внутрішніх сил у пластині з прорізами.
8. Виходячи з гіпотези плоских перерізів для повних деформацій та умови рівноваги внутрішніх сил виведіть залежності для пружних деформацій у полосах пластини при нагріванні середньої полоси від нуля до температури початку розвитку в ній пластичних деформацій скорочення.
9. Чому у пластині з прорізами після повного охолодження утворюються залишкові напруження та деформації?
10. Якими складовими визначається пластична деформація скорочення середньої полоси пластини з прорізами при її нагріванні в інтервалі температур від 500 до 600°C?
11. Як впливає пластична деформація скорочення, яка утворюється в середній полосі пластини з прорізами при температурах вище 600°C, на формування залишкових напружень у всій пластині?
12. Запишіть формули для визначення пружної, пластичної та повної деформації у стержні та пластині з прорізами при будь-якій температурі на стадіях нагрівання та охолодження.

Тема 4. Розрахункові методи визначення залишкових напружень та деформацій

Історичні етапи розробки розрахункових методів визначення напружень та деформацій при зварюванні. Загальна характеристика розрахункових методів. Вклад вітчизняних та зарубіжних вчених в розробку розрахункових методів. Метод Трочуна І.П. Припущення

методу Трочуна. Межі коректного застосування методу. Поняття про зону залишкових пластичних деформацій скорочення. Визначення ширини зони пластичних деформацій скорочення. Визначення залишкових реактивних напружень при зварюванні. Переваги і недоліки методу Трочуна. Метод Ніколаєва Г.О. Припущення методу Ніколаєва. Сутність методу Ніколаєва. Основні системи рівнянь методу. Переваги та недоліки методу Ніколаєва. Метод неплюсних перерізів, основні визначення та попередні припущення, його сутність, системи рівнянь, межі застосування, переваги та недоліки. Загальна характеристика розрахункових методів для розв'язування плоскої та об'ємної задач про напружено-деформований стан при зварюванні.

Методичні вказівки до теми 4

Основну увагу в даній темі необхідно приділити вивченню методу Трочуна як найбільш простого серед всіх інших методів і який, крім того, рекомендується для використання студентами при виконанні курсової роботи з даної дисципліни. Важливим моментом для успішного оволодіння знаннями сутності розрахункових методів є їх порівняльний аналіз із з'ясуванням всіх подробиць, навіть тих, які з першого погляду здаються незначними. Набуттю практичних навичок використання розрахункових методів допомагає розв'язування відповідних задач.

Контрольні питання до теми 4

1. Яких Ви знаєте вітчизняних та зарубіжних вчених, які внесли значний вклад у розробку розрахункових методів визначення напружень та деформацій при зварюванні?

2. Запишіть формули для визначення ширини зони пластичних деформацій скорочення за методом Трочуна.
3. Запишіть формулу для визначення за методом Трочуна реактивних напружень.
3. Покажіть графічно за методом Ніколаєва епюру максимальних пластичних деформацій скорочення, утворених на стадії нагрівання у симетричному стиковому з'єднанні.
4. Покажіть графічно за методом Ніколаєва епюру залишкових пластичних деформацій скорочення, утворених на стадії нагрівання у симетричному стиковому з'єднанні.
5. Запишіть сукупність рівнянь, що визначають розв'язок задачі про напружено-деформований стан за методом Ніколаєва та методом неплоских перерізів.
6. З якої причини при аналізі деформацій та напружень у зварному з'єднанні не приймаються до уваги пластичні деформації, які відбуваються при температурах вище $600\text{ }^{\circ}\text{C}$?
8. Дайте визначення приведеної товщини зварюваних швом конструктивних елементів?
9. Покажіть характер графіків для коефіцієнта $k_2(q_0, \sigma_T)$.
10. Запишіть розмірність параметрів q , q_n , q_0 .
11. Покажіть графічно епюру залишкових поздовжніх напружень за методами Трочуна та Ніколаєва.
12. Припущення в методах Трочуна та Ніколаєва.
13. Назвіть основну причину утворення залишкових напружень та деформацій у зварних конструкціях.
14. Дайте загальну характеристику розрахункових методів для визначення плоского та об'ємного напружено-деформованих станів при зварюванні.

Тема 5. Експериментальні методи визначення напружень та деформацій при зварюванні

Необхідність визначення напружено-деформованого стану при зварюванні експериментальними методами. Види задач по визначенню напружено-деформованого стану у зварних конструкціях. Групи методів експериментального визначення напружень та деформацій. Принципові основи групи механічних методів. Способи визначення відносних деформацій у заданій точці зварного з'єднання або конструкції. Типи деформометрів та принципи їх роботи. Типи тензодавачів опору та принципи їх роботи. Особливості визначення напружень та деформацій в межах зони залишкових пластичних деформацій скорочення та поза її межами. Експериментальне визначення поздовжніх залишкових пластичних деформацій скорочення, побудова епюри їх розподілу у поперечному перерізі стикового з'єднання за методом «гребінця». Визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях з товстого металу.

Загальна характеристика групи фізичних експериментальних методів. Сутність найбільш уживаних фізичних експериментальних методів. Визначення залишкових напружень неруйнівним магнітно-пружним методом. Застосування методів: поляризаційно-оптичного, муару, крихких покриттів, ультразвукового.

Дослідження кінетики розвитку деформацій та напружень при зварюванні зварних з'єднань або конструкцій.

Переваги і недоліки різних експериментальних методів. Похибки при визначенні напружень та деформацій експериментальними методами. Роль вітчизняних вчених у розвитку експериментальних методів визначення напружено-деформованого стану при зварюванні.

Методичні вказівки до теми 5

Головну увагу належить приділити питанню визначення зварювальних напружень та деформацій механічними методами у зв'язку з найбільш широким їх застосуванням. Важливо з'ясувати принцип роботи тензодавачів опору, зрозуміти сутність поляризаційно-оптичного, ультразвукового методів та методу муару. Доцільно також звернути увагу на неруйнівний магнітнопружний метод, оскільки останніми роками його застосування поширюється.

Контрольні питання до теми 5

1. Використання якого закону лежить в основі механічних експериментальних методів визначення залишкових напружень при зварюванні?
2. В чому полягає різниця у визначенні залишкових напружень у точках в межах зони пластичних деформацій та поза її межами?
3. Як визначається відносна лінійна деформація при використанні тензодавачів опору?
4. В чому полягає принцип роботи тензодавача опору?
5. Які типи деформометрів Вам відомі?
6. В чому полягають недоліки тензодавачів опору?
7. Які Ви знаєте методи визначення напружень у товстолистових зварних з'єднаннях?
8. В чому полягає сутність поляризаційно-оптичного, ультразвукового, муарового та магнітнопружного методів визначення залишкових напружень?
9. Як у зварному з'єднанні можна визначити залишкові поздовжні пластичні деформації скорочення?

10. Запишіть формули закону Гука для різних видів напруженого стану.
11. Як впливає на похибку величина бази виміру деформацій?
12. Назвіть вітчизняних та зарубіжних вчених, які внесли значний вклад у розвиток експериментальних методів визначення напружень та деформацій при зварюванні.

Тема 6. Розподіл залишкових напружень у типових зварних з'єднаннях

Розподіл поздовжніх напружень у поперечному перерізі зварного стикового з'єднання. Зміна поздовжніх напружень вздовж стикового з'єднання. Граничний ефект. Розподіл поперечних напружень у поздовжньому перерізі вздовж осі шва та в інших поздовжніх перерізах, паралельних шву. Розподіл дотичних напружень у стиковому з'єднанні. Розподіл напружень у осесиметричних перерізах при зварюванні кругових швів на площині. Розподіл нормальних напружень у поздовжньому перерізі (вздовж твірної лінії) при зварюванні кільцевих швів і у поперечному перерізі (перпендикулярно до осі труби) при зварюванні поздовжніх швів. Розподіл поздовжніх напружень у поперечному перерізі одномірних зварних конструкцій при зварюванні поздовжніх швів. Розподіл поздовжніх, поперечних та вздовж товщини металу напружень у зварних швах товстолистових стикових з'єднань. Розподіл напружень у з'єднаннях з металів зі структурними перетвореннями.

Методичні вказівки до теми 6

Рекомендується спочатку всебічно засвоїти особливості розподілу залишкових напружень у стикових з'єднаннях. Головним тут є

зрівноваженість епюр нормальних напружень у заданому перерізі. В подальшому на цій основі значно простіше можна буде зрозуміти закономірності розподілу залишкових напружень в інших видах зварних з'єднань. Основну увагу слід звертати на виявлення головних закономірностей в розподілі залишкових напружень в зварних з'єднаннях. У виробничих умовах можуть зустрічатись дуже різноманітні зварні конструкції і дати конкретні залежності розподілу залишкових напружень на всі випадки неможливо. Необхідно знати основні особливості їх розподілу, на основі яких практично завжди достатньо правдоподібно можна уявити, нехай у якісному відношенні, характер епюри залишкових напружень в тому чи іншому перерізі конкретної зварної конструкції.

Контрольні питання до теми 6

1. Покажіть графічно епюру поздовжніх напружень у стиковому з'єднанні.
2. Покажіть графічно епюру поперечних напружень у стиковому з'єднанні вздовж осі шва.
3. Покажіть графічно розподіл дотичних напружень у поздовжніх та поперечних перерізах стикового з'єднання.
4. Як розподіляються напруження у зварному шві з'єднання з товстого металу?
5. Як розподіляються напруження в осесиметричному перерізі стикового з'єднання з круговим швом у площині?
6. Покажіть графічно епюру нормальних напружень у поздовжньому перерізі труби з кільцевим стиковим швом.
7. Покажіть графічно епюру осьових напружень у поперечному перерізі труби з поздовжнім швом.

8. Як розподіляються залишкові напруження у поперечних перерізах одномірних конструкцій з поздовжніми швами?
10. Дайте приклад розподілу залишкових напружень у випадку структурних перетворень у металі шва та навколо шовної зони.
11. Покажіть графічно епюру поперечних напружень у зварному шві стикового з'єднання у жорсткому закріпленні.

Тема 7. Переміщення конструктивних елементів при зварюванні

Класифікація переміщень при зварюванні. Поняття про усадочну силу при зварюванні та її визначення. Переміщення у площині зварюваних листів. Розрахунок поздовжнього скорочення. Розрахунок поперечного скорочення. Розрахунок прогину у площині листа. Переміщення з площини зварюваних листів (так звані кутові деформації). Переміщення при зварюванні балочних конструкцій. Розрахунок поздовжнього скорочення від поздовжніх та поперечних швів. Розрахунок прогину від поздовжніх та поперечних швів. Деформації закручування конструкцій балочного типу. Переміщення, зумовлені втраченою стійкої форми рівноваги в тонколистових елементах зварних конструкцій. Переміщення при зварюванні оболонкових конструкцій.

Методичні вказівки до теми 7

Найбільш важливими є питання визначення поздовжнього та поперечного скорочення при зварюванні стикових з'єднань, вигину у площині зварюваних листів, поздовжнього скорочення та вигину від зварювання поздовжніх та поперечних швів одномірних конструкцій типу балочних.

Особливу увагу необхідно звернути на методику визначення скорочення та вигину через реактивні напруження стиску, а також че-

рез усадочну силу. Важливо засвоїти різницю між сутністю активної, реактивної та усадочної сил у зварному з'єднанні. Треба чітко зрозуміти яким чином визначається усадочна сила від зварювання поздовжніх та поперечних зварних швів. Поняття про усадочну силу при зварюванні є фундаментальним для даної дисципліни. Не менш важливим є з'ясування також питань стосовно причин утворення та визначення переміщень з площини зварюваних листів (розрахунок кутових деформацій). При розгляді переміщень, зумовлених втратою стійкої форми рівноваги у тонколистових елементах можна обмежитись розглядом наближеного підходу і розв'язуванням таких задач. Переміщення оболонкових конструкцій можна розглянути в загальних рисах.

Контрольні питання до теми 7

1. Назвіть класифікацію переміщень конструктивних елементів при зварюванні.
2. Запишіть загальну формулу для визначення усадочної сили від зварювання поздовжніми швами тонколистових елементів.
3. Запишіть формулу для визначення поздовжнього скорочення при зварюванні поздовжніх швів.
4. Запишіть формулу для визначення згинального моменту, який діє на балку від зварювання поздовжніх або поперечних швів.
5. Яка з двох сил активна чи усадочна більше і чому?
6. Як визначається площа прогину балки несиметричного перерізу від зварювання?
7. Назвіть причину утворення переміщень при втраті стійкої форми рівноваги плоским елементом конструкції.
8. Яким методом розв'язуються задачі по визначенню прогину

одномірних конструкцій від зварювання поперечних швів?

9. Назвіть причини утворення переміщень із площини зварюваних листів при зварюванні стикових та таврових з'єднань.
10. Перелічіть складові загального переміщення із площини при зварюванні таврових з'єднань.
11. Як визначаються переміщення із площини при зварюванні багато прохідних стикових швів з двох сторін?
12. Що треба розуміти під розрахунковою товщиною при визначенні переміщень із площини?
13. Яким чином враховується зменшення вкладу кожного з послідовних швів у величину переміщення із площини при зварюванні багато прохідних стикових швів?
14. Покажіть графічно характер залежності величини глибини переміщення з площини від глибини проплавлення листа.
15. Як впливає швидкість зварювання на величину переміщення з площини зварюваних листів?

Тема 8. Макро- та мікро пластичні деформації при зварюванні

Особливості розвитку макропластичних деформацій при зварюванні. Способи виявлення макропластичних деформацій у зварних з'єднаннях. Основні типи смуг ковзання у зварному з'єднанні та закономірності їх утворення. Аналіз напружено-деформованого стану зварного з'єднання за картиною макропластичних деформацій. Вплив конструктивних концентраторів напружень на розвиток макропластичних деформацій у зварному з'єднанні.

Розвиток макропластичних деформацій при зварюванні. Перша група механізмів утворення пластичної деформації при зварюванні – зсувні процеси (ковзання, утворення двійників, вигин або скидання).

Друга група – дифузійні процеси (механізм дифузійної пластичності, дислокаційно-дифузійний механізм). Третя група – приграничні процеси (ковзання по границях зерен, міграція границь зерен, утворення субструктури, рекристалізація). Зони мікропластичної деформації у зварних з'єднаннях. Особливості розвитку мікропластичних деформацій у високо- та низькотемпературних зонах зварного з'єднання. Вплив пластичних деформацій на структуру та фізико-хімічні властивості металу зварного з'єднання. Вплив пластичних деформацій на утворення навколошовних тріщин. Способи виявлення макропластичних деформацій при зварюванні.

Методичні вказівки до теми 8

Найбільш важливим у даній темі є питання про механізми розвитку мікропластичних деформацій у зварному шві та прилеглих до шва зонах основного металу. Необхідно засвоїти розділ про вплив пластичних деформацій при зварюванні на властивості зварного з'єднання. Як свідчить практичний досвід, достатнього рівня розуміння питань даної теми можна досягти шляхом встановлення взаємозв'язку між питаннями даної теми та питаннями попередніх тем дисципліни.

Контрольні питання до теми 8

1. Назвіть типи смуг Чернова-Людерса, які утворюються при зварюванні.
2. Перелічіть механізми утворення мікропластичної деформації при зварюванні.
3. В яких зонах зварного з'єднання пластична деформація відбувається за механізмами зсувних, дифузійних та приграничних

процесів?

4. На які зони поділяється зона пластичних деформацій у зварному з'єднанні?
5. Яким методом можна виявити макропластичні деформації при зварюванні?
6. Як пластична деформація впливає на структуру та фізико-хімічні властивості зварних з'єднань?
7. Чи впливає пластична деформація при зварюванні на схильність до утворення тріщин?
8. Назвіть механізмами мікропластичної деформації у високо температурній зоні з'єднання.
9. Поясніть сутність утворення пластичної деформації за механізмом дифузійної пластичності.
10. Як впливають різні конструктивні концентратори на розвиток пластичної деформації у зварних з'єднаннях?

Тема 9. Вплив напружень, деформацій та переміщень при зварюванні на властивості зварних конструкцій

Поняття про в'язке та крихке руйнування металу. Вплив тимчасових напружень та деформацій при зварюванні на технологічну міцність зварних швів . Роль залишкових напружень та пластичної деформації у крихкому руйнуванні зварних конструкцій. Критерії крихкого руйнування металу. Відмінність задач теорії тріщин у зварних конструкціях від класичних задач. Можливі підходи до оцінки впливу залишкових напружень на крихку міцність з кількісної сторони. Вплив залишкових напружень та деформацій на міцність зварних з'єднань у корозійному середовищі. Вплив переміщень при зварюванні на

технологічність та експлуатаційні властивості зварних конструкцій. Вплив залишкових напружень на стійкість конструктивних елементів зварних конструкцій. Вплив залишкових напружень на міцність при змінних навантаженнях.

Методичні вказівки до теми 9

При вивченні даної теми рекомендується головну увагу приділити питанню впливу зварювальних напружень на працездатність конструкцій у особливих умовах експлуатації (знижені температури, динамічні навантаження, агресивне середовище тощо). Необхідно вірно зрозуміти фізичну сутність процесів, які відбуваються поблизу концентраторів напружень і які ведуть до втрати несучої здатності конструкції при відносно невеликих навантаженнях або навіть при їх відсутності. Важливо засвоїти сутність енергетичного, силового та деформаційного критеріїв руйнування металу, критеріальні параметри, способи їх розрахунку у зварних з'єднаннях, поняття про тріщиностійкість, експериментальні методи її визначення.

Контрольні питання до теми 9

1. Чим відрізняється в'язке руйнування від крихкого?
2. Як тимчасові напруження та деформації впливають на технологічну міцність швів?
3. Чому залишкові напруження впливають на міцність при крихкому руйнуванні і не впливають при в'язкому?
4. Сутність критеріїв Гріффітса, Ірвіна та Панасюка-Дагдейла?
5. Що таке тріщиностійкість?
7. Як визначається коефіцієнт інтенсивності напружень біля вершини тріщини?

7. Чому коефіцієнт інтенсивності напружень може розглядатись як критерій руйнування?
8. Як впливають залишкові напруження на міцність зварних конструкцій у агресивних середовищах?
9. Як впливають переміщення при зварюванні на технологічність зварних конструкцій?

Тема 10. Зменшення залишкових напружень та переміщень при зварюванні

Необхідність зменшення залишкових напружень та переміщень при зварюванні. Загальні принципи . Зменшення залишкових напружень (попередній і супутній підігрів, проковка та прокатка зварних швів та зони залишкових пластичних деформацій скорочення, попередній розтяг, високий відпал у печі, місцевий відпал, вібраційна обробка, вибухова обробка). Зменшення переміщень при зварюванні (способи до зварювання, при зварюванні, після зварювання). Застосування складально-зварювальної оснастки. Термічна правка переміщень місцевим нагрівом, оптимізація тепло вкладення при зварюванні.

Методичні вказівки до теми 10

Основну увагу рекомендується приділити способу зменшення залишкових напружень високим відпуском. Також необхідно добре опрацювати питання термічної правки одномірних конструкцій рухомим зосередженим нагрівом визначених у поперечному перерізі місць. Важливо також зрозуміти загальні принципи зменшення залишкових напружень при зварюванні.

Контрольні питання до теми 10

1. З якою метою необхідно зменшувати зварювальні напруження та переміщення?
2. В чому полягають загальні принципи зменшення залишкових напружень та переміщень?
3. В чому сутність впливу складально-зварювальної оснастки на зменшення залишкових напружень та переміщень?
4. Як впливає схема напруженого стану на характер та величину зменшення залишкових напружень при високому відпуску?
5. Чому при високому відпуску зменшуються залишкові напруження?
6. З яких міркувань обирається температура високого відпуску для зменшення залишкових напружень?
7. Чому попередній підігрів або розтяг приводять до зменшення залишкових напружень при зварюванні?
8. В чому полягає раціональне конструювання для зменшення залишкових переміщень при зварюванні?
9. В чому полягає сутність зменшення переміщень при термічній правці зварних конструкцій?
10. Яким чином визначається тривалість високого відпуску для зменшення залишкових напружень у зварних конструкціях?

ЗАВДАННЯ НА КОНТРОЛЬНУ РОБОТУ

ВАРІАНТ 1

1. Розподіл залишкових напружень в основних перерізах типових зварних з'єднань (стикового симетричного та несиметричного для плоского напруженого стану; стикового симетричного з товстого металу і багатопрохідним швом; штаби з малим спротивом до

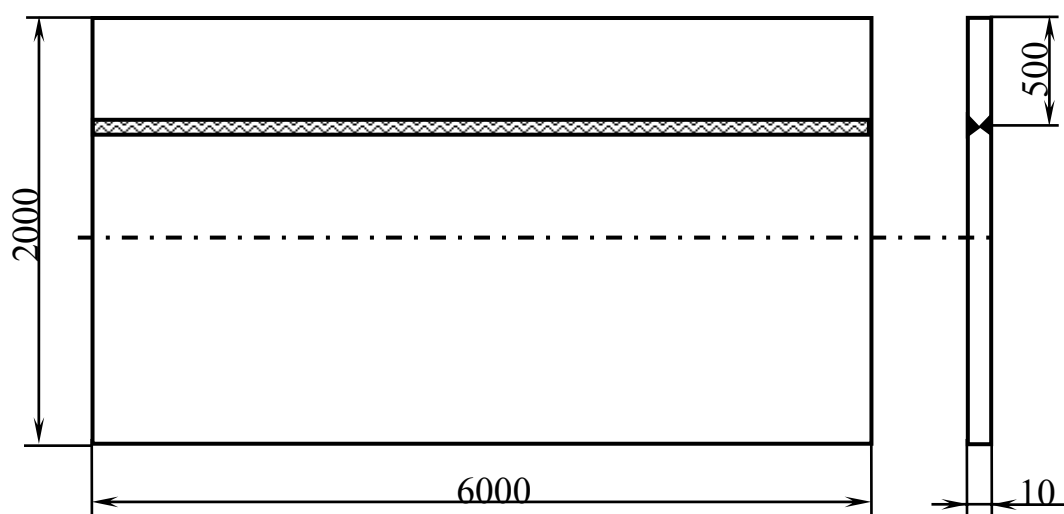
утворення поздовжнього прогину при нагріванні однієї поздовжньої крайки; одномірних жорстких проти поздовжнього вигину стержнів симетричних таврових та двотаврових поперечних перерізів; тонкостінних труб з поздовжніми та кільцевими швами; стикових з'єднань з круговими швами у площині відносно тонкого листа; вирізаних з листового прокату газокисневим різанням тонкостінних кругових дисків).

2. Переміщення у площині листів при зварюванні симетричних та несиметричних стикових швів, нагріванні поздовжньої крайки штаби при термічному різанні або наплавленні штаби.

3. Базові інваріанти напруженого стану у точці суцільного деформівного середовища.

Задача 1.1

Показане на рисунку полотнище із сталі ВСт.3сп з межею текучості 250 МПа зварене з двох частин різної ширини на режимі: $I = 800$ А; $U = 36$ В; $v = 36$ м/год; $\eta = 0,8$. Визначити максимальний прогин поздовжньої осі полотнища у серединній площині по товщині листів.



Задача 1.2

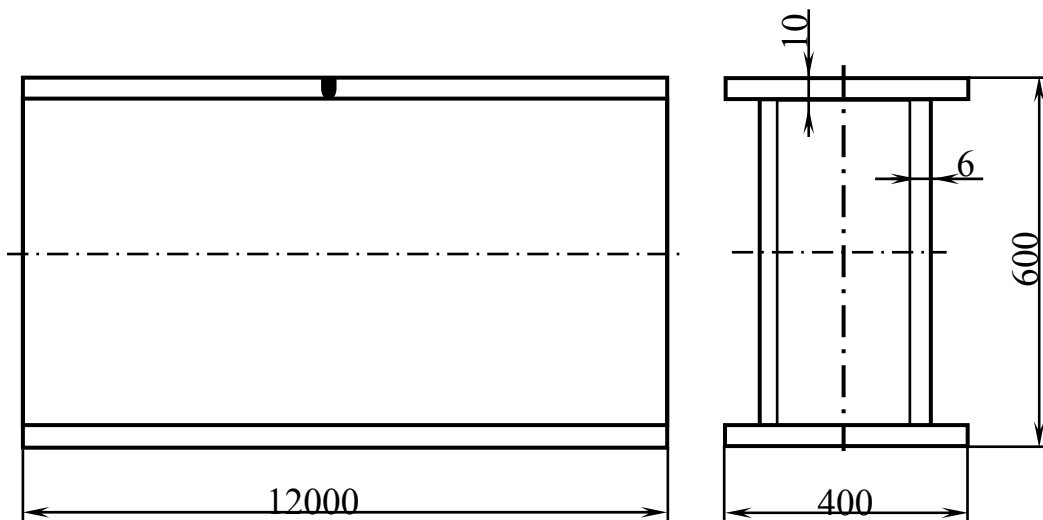
Побудуйте схематично термомеханічну діаграму розвитку всіх складових повної деформації у сталій пластині з прорізами при $F_{сер} < F_{кр}$ для випадку рівномірного нагрівання і охолодження середньої полоси від $0^{\circ}C$ до $T < 500^{\circ}C$.

ВАРІАНТ 2

1. Механізм та причини утворення напружень при зварюванні.
2. Переміщення з площини листів при зварюванні.
3. Напруження на площадці з довільною орієнтацією у просторі.

Задача 2.1

Показаний на рисунку верхній пояс балки коробчастого перерізу із сталі 20 з межею текучості 230 МПа зварений з двох частин поперечним швом на режимі: $I = 700$ А; $U = 34$ В; $v = 28$ м/ч; $\eta = 0,8$. Визначити максимальний прогин балки від зварювання даного поперечного шва за умови рівності нулю деформації пластичного видовження на стадії охолодження у поперечному до шва напрямку.



Задача 2.2

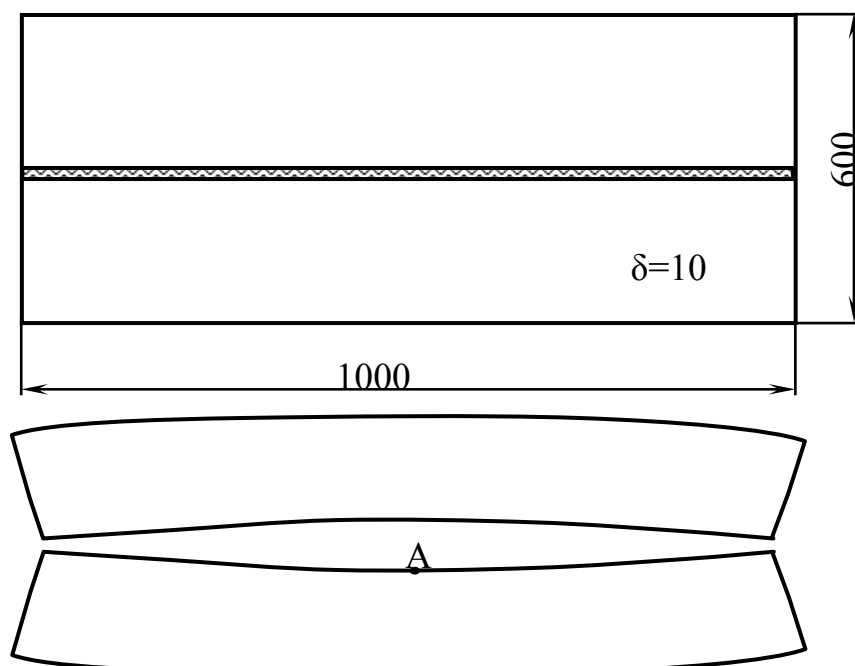
Побудуйте схематично термомеханічну діаграму розвитку всіх складових повної деформації у жорстко закріпленому сталюму стержні при його рівномірному нагріванні і охолодженні від 0°C до $T > 600^{\circ}\text{C}$.

ВАРІАНТ 3

1. Визначення ширини зони пластичних деформацій скорочення за методом Трочуна.
2. Переміщення одномірних зварних конструкцій від зварювання поздовжніх швів.
3. Головні нормальні та максимальні дотичні напруження у точці суцільного деформівного середовища.

Задача 3.1

Побудуйте схематично термомеханічну діаграму розвитку всіх складових повної деформації у сталій пластині з прорізами при $F_{\text{сер}} < F_{\text{кр}}$ для випадку рівномірного нагрівання і охолодження середньої полоси від 0°C до $500^{\circ}\text{C} < T < 600^{\circ}\text{C}$.



Задача 3.2

Показане на рисунку стикове з'єднання із сталі 09Г2ДТ з межею текучості 300 МПа заварене на режимі $I = 1000$ А; $U = 30$ В; $v = 32$ м/год; $\eta = 0,75$ і після зварювання розрізане на дві частини по осі шва. Визначити максимальний прогин поздовжньої осі кожної половини та залишкові поздовжні напруження у точці А.

ВАРІАНТ 4

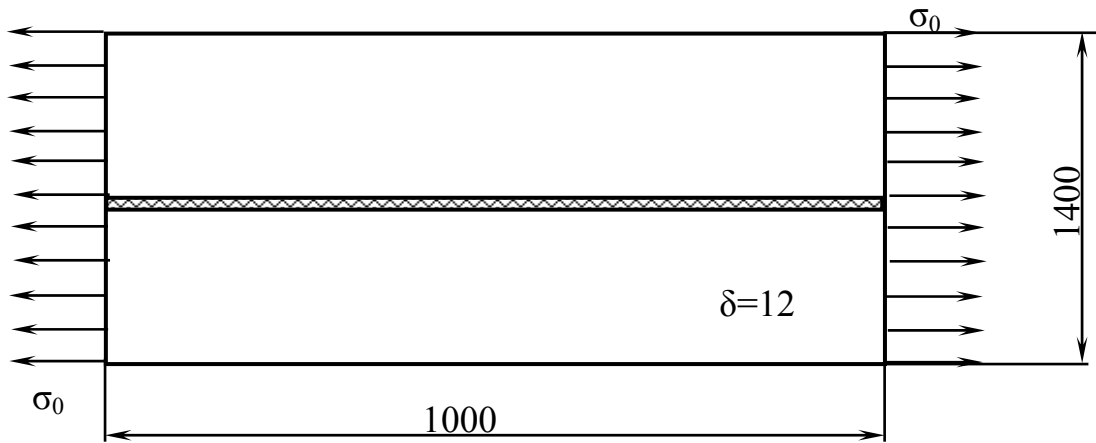
1. Розрахунковий метод Ніколаєва.
2. Переміщення одномірних зварних конструкцій від зварювання поперечних швів.
3. Тензор напружень у точці суцільного деформівного середовища.

Задача 4.1

Побудуйте схематично термомеханічну діаграму розвитку всіх складових повної деформації у жорстко закріпленому сталевому стержні при його рівномірному нагріванні і охолодженні від 0°C до $500^\circ\text{C} < T < 600^\circ\text{C}$.

Задача 4.2

Показане на рисунку зварне стикове з'єднання перед зварюванням було розтягнуте до напружень $\sigma_0 = 1200$ кг/см, заварене на режимі: $I = 900$ А; $U = 30$ В; $v = 30$ м/год; $\eta = 0,8$ і охолоджене в розтягнутому стані. Визначити залишкові поздовжні напруження і побудувати їх епюру за методом Трочуна після повного охолодження і зняття розтягу.



ВАРІАНТ 5

1. Механічні експериментальні методи визначення залишкових напружень у зварних конструкціях.

2. Термічна правка залишкового прогину одномірних зварних конструкцій.

3. Умова пластичності Мізеса у точці суцільного деформівного середовища.

Задача 5.1

Визначити поздовжнє скорочення зварної балки від зварювання поздовжніх швів при таких даних: довжина балки – $L=10\text{м}$, площа поперечного перерізу балки – $F=100\text{ см}^2$, площа поперечного перерізу зони залишкових пластичних деформацій скорочення – $F_{\text{пл.}} = 40\text{ см}^2$, матеріал – сталь з межею текучості 300 МПа.

Задача 5.2

Побудуйте схематично термомеханічну діаграму розвитку всіх складових повної деформації у сталюму стержні, закріпленому з однієї сторони та вільним кінцем з протилежної сторони і зазором

$\Delta \neq 0$, при його рівномірному нагріванні і охолодженні від 0°C до $T < 500^\circ\text{C}$.

ВАРІАНТ 6

1. Методи зменшення залишкових напружень та деформацій у зварних конструкціях.
2. Усадочна сила при зварюванні та способи її визначення.
3. Тензор деформацій у точці суцільного деформівного середовища.

Задача 6.1

Від листа завтовшки 10 мм із сталі ВСтЗсп з межею текучості 280 МПа газокисневим різанням відрізана штаба завдовжки 2 м і завширшки 120 мм на режимі $q=7600$ Дж/с; $v_p=0,5$ см/с. Визначити максимальний прогин штаби.

Задача 6.2

Побудуйте схематично термомеханічну діаграму розвитку всіх складових повної деформації у сталевому стержні, закріпленому з однієї сторони і вільним кінцем з протилежної сторони, при його рівномірному нагріванні і охолодженні від 0°C до $500^\circ\text{C} < T < 600^\circ\text{C}$.

ВАРІАНТ 7

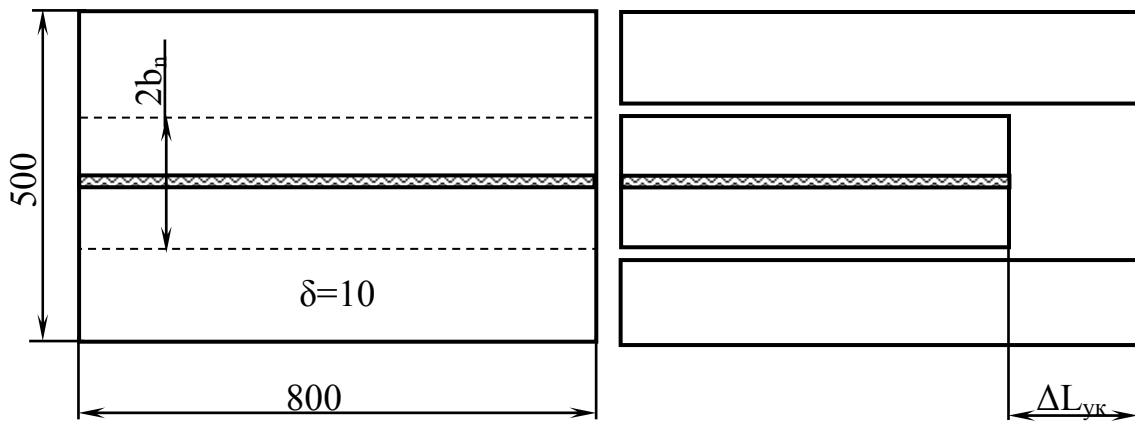
1. Аналіз розвитку деформацій у пластині з прорізами при нагріванні і охолодженні середньої полоси.
2. Фізичні експериментальні методи визначення залишкових напружень у зварних конструкціях.
3. Розклад тензора напружень на складові частини.

Задача 7.1

Побудувати термомеханічну діаграму для деформацій у сталевій пластині з прорізами при $F_{\text{сер}} > F_{\text{кр}}$ для випадку рівномірного нагрівання і охолодження середньої полоси від 0°C до $T > 500^\circ\text{C}$.

Задача 7.2

Показане на рисунку зварне стикове з'єднання із сталі 16ГС з межею текучості 350 МПа заварене на режимі: $I = 750 \text{ А}$; $U = 32 \text{ В}$; $v = 28 \text{ м/год}$; $\eta = 0,8$. Після охолодження розрізане з обох боків шва по межі зони залишкових пластичних деформацій скорочення на три частини. Визначити наскільки скоротиться середня частина з'єднання по відношенню до крайніх частин.



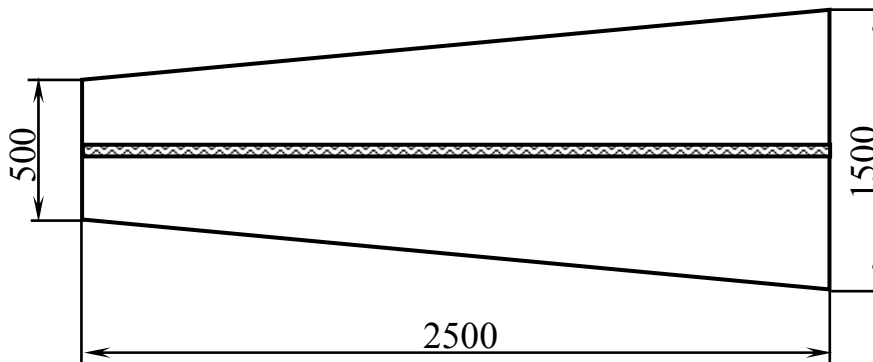
ВАРІАНТ 8

1. Вплив залишкових напружень на міцність конструкцій.
2. Розрахунок поздовжнього та поперечного скорочення при зварюванні симетричних зварних з'єднань.
3. Октаедричні напруження у точці деформівного середовища.

Задача 8.1

Визначити за методом Трочуна поздовжнє скорочення стикового з'єднання, показаного на рисунку, із сталі 16ГС з межею текучості

280 МПа, звареного на режимі: $I = 800 \text{ A}$; $U = 30 \text{ В}$; $v = 28 \text{ м/год}$; $\eta = 0,7$. Ширина зони пластичних деформацій має різну ширину по довжині з'єднання і змінюється за лінійним законом.



Задача 8.2

Побудуйте схематично термомеханічну діаграму розвитку всіх складових повної деформації у сталевому стержні, закріпленому з однієї сторони і вільним кінцем з протилежної сторони, при його рівномірному нагріванні і охолодженні від 0°C до $T > 600^\circ\text{C}$.

ВАРІАНТ 9

1. Макро- та мікро пластичні деформації при зварюванні.
2. Термічна правка залишкового прогину однорічних зварних конструкцій.
3. Сутність «плоскої задачі» про напружено-деформований стан суцільного деформівного середовища.

Задача 9.1

Визначити кутову деформацію при зварюванні таврового з'єднання з однієї сторони на режимі: $I = 650 \text{ A}$; $U = 32 \text{ В}$; $v = 30 \text{ м/год}$;

$\eta=0,7$. Матеріал - сталь ВСт. Зсп з межею текучості 240 МПа. Товщина пояса – 12 мм, ребра – 8 мм. Умовно вважати, що ребро зафіксоване від переміщень в сторони.

Задача 9.2

Побудуйте схематично термомеханічну діаграму розвитку всіх складових повної деформації у жорстко закріпленому сталюму стержні при його рівномірному нагріванні і охолодженні від 0°C до $T < 500^{\circ}\text{C}$.

ВАРІАНТ 10

1. Причини утворення залишкового напружено-деформованого стану при зварюванні.

2. Методика експериментального визначення залишкових поздовжніх пластичних деформацій скорочення при зварюванні за методом «гребінця».

3. Характеристика сімейства ізоліній та ізотропних точок напружено-деформованого стану у «плоскій задачі».

Задача 10.1

Дайте опис механізм пружно-пластичного деформування при нагріванні поздовжньої окрайки штаби, методики визначення залишкового прогину $f_{зал}$, запишіть кінцеву формулу для залишкового прогину і наведіть необхідні пояснення щодо позначень у формулі.

Задача 10.2

Побудуйте схематично термомеханічну діаграму розвитку всіх складових повної деформації у сталюму стержні, закріпленому з однієї сторони та вільним кінцем з протилежної сторони і зазором

$\Delta=0$, при його рівномірному нагріванні і охолодженні від 0°C до $T < 500^{\circ}\text{C}$.

ВАРІАНТ 11

1. Опишіть основні закономірності розвитку поздовжніх температурних, пружних, пластичних і повних деформацій у симетричному стиковому зварному з'єднанні на стадіях нагрівання і охолодження при зварюванні і вкажіть головну причину утворення залишкового напружено-деформованого стану.

2. Викладіть зміст подвійних індексів у позначенні компонентів тензорів напружень та деформацій у точці суцільного деформівного середовища у довільній декартовій системі координат.

3. Викладіть сутність деформаційного критерію руйнування металу.

Задача 11.1

Визначити залишкове скорочення симетричного стикового з'єднання завдовжки 6 метрів з поперечним перерізом $1,0 \times 0,01$ м. Матеріал – сталь, межа текучості – 300 МПа, модуль пружності – $2 \cdot 10^5$ МПа. Поперечний переріз зони пластичних деформацій – 10 см^2 .

Задача 11.2

Визначити величину усадочної сили в пластині з прорізами із сталі з межею текучості 240 МПа і модулем пружності $2 \cdot 10^5$ МПа при $F_{сер} / F_{кр} = 0,5$. Середня полоса нагрівалась і охолоджувалась від 0°C до 450°C . Площа поперечного перерізу середньої полоси – 10 см^2 .

ВАРІАНТ 12

1. Виведіть залежності від компонентів тензора напружень у точці для складових вектора повних напружень p_v в осях довільної системи координат на площадці з довільною орієнтацією у просторі, тобто для p_{vx} , p_{vy} , p_{vz} .

2. Викладіть сутність механічних методів експериментального визначення залишкових напружень і запишіть фізичні залежності для лінійного та плоского напруженого стану.

3. Викладіть сутність силового критерію крихкого руйнування металу.

Задача 12.1

Визначити прогин сталюї полоси завдовжки 2 м з поперечним перерізом 200 × 10 мм із наплавленою поздовжньою крайкою. Площа поперечного перерізу зони пластичних деформацій скорочення складає 2 см². Модуль текучості сталі – 400 МПа, модуль пружності – 2·10⁵ МПа.

Задача 12.2

Визначити ширину зони чисто пластичних поздовжніх деформацій скорочення при зварюванні двох сталюих пластин завтовшки 10 мм на режимі: зварювальний струм – 600 А, напруга на дузі – 30 В, к. к. д. дуги – 0,52, швидкість зварювання – 0,484 см/с. Об'ємна теплоємність сталі – 5,2 Дж/(см³·°С).

ВАРІАНТ 13

1. Сутність розрахункового методу Трочуна для визначення залишкових напружень одномірного напружено-деформованого стану при зварюванні.

2. Сутність енергетичного критерію руйнування металу.

3. Запишіть формулу для визначення залишкового поздовжнього скорочення стикового зварного з'єднання через усадочну силу P_{yc} і наведіть необхідне обґрунтування її справедливості за умови відповідності повних залишкових поздовжніх деформацій гіпотезі плоских перерізів.

Задача 13.1

Площа поперечного перерізу зони пластичних деформацій скорочення від зварювання поздовжніх швів зварної балки двотаврового поперечного перерізу складає 0,1 від загальної площі поперечного перерізу балки. Межа текучості матеріалу балки – 300 МПа. Визначити залишкові реактивні напруження за умови, що вони розподілені рівномірно, а всі шви зварювались одномоментно.

Задача 13.2

За методом Трочуна визначити в загальному вигляді скорочення зони пластичних деформацій по відношенню до іншої частини симетричного стикового з'єднання після його розрізування по межі зони пластичних деформацій з обох боків шва на три частини.

ВАРІАНТ 14

1. Перерахуйте сімейство ліній та типи ізотропних точок у плоскій задачі, які характеризують напружено-деформований стан і дайте їм характеристику.

2. Опишіть сутність теплової правки залишкового прогину зварних балок від зварювання поздовжніх швів.

3. Викладіть сутність розрахункового методу Ніколаєва, запишіть визначальну систему рівнянь для стадії нагрівання при наплавленні крайки штаби з поперечним перерізом $B \times \delta$ та вкажіть невідомі, які будуть визначені після розв'язання даної системи рівнянь.

Задача 14.1

Визначити залишкове поздовжнє скорочення сталюї пластики з прорізами завдовжки 1000 см при $F_{\text{сер}}/F_{\text{кр}}$, середня полоса якої нагрівалась від 0°C до $T \geq \varepsilon_T F / (\alpha F_{\text{кр}})^\circ\text{C}$.

Задача 14.2

Визначити за методом Трочуна ширину зони поздовжніх пружно-пластичних деформацій скорочення при зварюванні двох сталюих пластин з поперечним перерізом 215×10 мм кожна на режимі: зварювальний струм – 600 А, напруга на дузі – 30 В, к. к. д. дуги – 0,52, швидкість зварювання – 0,484 см/с. Об'ємна теплоємність сталі – $5,2 \text{ Дж}/(\text{см}^3 \cdot ^\circ\text{C})$, коефіцієнт $k_2 = 0,1$.

ВАРІАНТ 15

1. Виведіть залежності для нормального $\sigma_{\text{окт}}$ і дотичного $\tau_{\text{окт}}$ октаедричних напружень у точці суцільного деформівного середовища від головних нормальних напружень $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$.

2. Опишіть методику поетапного експериментального визначення залишкових зварювальних поздовжніх пластичних деформацій скорочення за методом « гребінця » у стиковому зварному з'єднанні відносно невеликої товщини.

3. Опишіть послідовність визначення поздовжнього залишкового скорочення та прогину одномірних конструкцій симетричного перерізу від зварювання поздовжніх швів, запишіть основні формули.

Задача 15.1

У стиковому симетричному з'єднанні розмірами $2000 \times 400 \times 10$ мм із сталі з межею текучості 400 МПа і модулем пружності $2 \cdot 10^5$ МПа при зварюванні під флюсом в напрямку довшої сторони утворилась зона пластичних деформацій скорочення завширшки 200 мм. Визначити залишкове поздовжнє скорочення зварного з'єднання.

Задача 15.2

Визначити усадочну силу у симетричному стиковому з'єднанні із сталі з модулем пружності $2 \cdot 10^5$ МПа, завдовжки 100 см, з поперечним перерізом 500 мм^2 у поздовжнім скороченням 1,0 мм.

ВАРІАНТ 16

1. Виведіть залежності від компонентів тензора напружень для складових вектора повних напружень p_v в осях довільної системи координат на довільній площадці, тобто для p_{vx} , p_{vy} , p_{vz} .

2. Перелічіть і дайте опис сутності основних методів зменшення залишкових напружень у зварних конструкціях.

3. Опишіть механізм деформування двох частин симетричного зварного стикового з'єднання, які утворюються після його розрізування в залишковому стані по осі шва, покажіть необхідний рисунок характеру деформації кожної з частин з'єднання, наведіть формули

для визначення деформацій поздовжнього скорочення та максимального прогину кожної частини.

Задача 16.1

В рамках розрахункового методу Трочуна визначити максимальний прогин сталюї штаби завдовжки 2000 мм з площею поперечного перерізу 100 × 43 мм, на одну із зношених поверхонь якої розмірами 2000 × 100 мм наплавлений шар металу з такої ж сталі завтовшки 7 мм. Розповсюдження зони пластичних деформацій скорочення в глибину штаби від поверхні до виконання наплавки дорівнює 3 мм. Межа текучості – 400 МПа, модуль пружності - $2 \cdot 10^5$ МПа.

Задача 16.2

Визначити реактивні стискаючі напруження у зварній двотавровій балці, складеній із трьох однакових полос з поперечним перерізом 250 × 10 мм і з'єднаних між собою кутовими швами. Площа поперечного перерізу зони пластичних деформацій скорочення – 20 см², межа текучості сталі – 400 МПа, Вважати, що всі шви заварювались одночасно, а реактивні напруження розподілені рівномірно.

ВАРІАНТ 17

1. Розкрийте сутність « плоскої задачі » про напружено-деформований стан і запишіть тензори напружень σ_{ij} та деформацій ε_{ij} для плоского напруженого та плоского деформованого станів.

2. Викладіть сутність теплової правки залишкового прогину однорічних зварних конструкцій з поздовжніми швами.

3. Виведіть формулу для визначення усадочної сили P_{yc} при зварюванні «тонких» пластин при відомій залежності для поздовжніх пластичних деформацій скорочення $\epsilon_{пл}(y)$, ширині зони згаданих деформацій $2b_n$ та модулі пружності матеріалу з'єднання E .

Задача 17.1

Довжина зварного стикового з'єднання 1000 мм, ширина 400 мм. В результаті зварювання поздовжнє скорочення дорівнює 1 мм. Межа текучості матеріалу 300 МПа, модуль пружності $2 \cdot 10^5$ МПа. Визначити ширину зони пластичних деформацій скорочення.

Задача 17.2

Для заданого тензора напружень $\sigma_{ij} = \begin{vmatrix} 8 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{vmatrix}$ обчислити доти-

чне октаедричне напруження та величину вектора повних напружень на октаедричній площадці.

ВАРІАНТ 18

1. Запишіть в рамках метода Трочуна формулу для визначення поздовжнього скорочення стикового зварного з'єднання через реактивні напруження σ_p і наведіть обґрунтування її справедливості.

2. Покажіть на рисунках геометричне зображення деформування елементарного об'єму тіла у точці для різних компонентів зсувних деформацій, які входять до складу тензора деформацій у загальному випадку об'ємного деформованого стану і довільних осей координат.

3. Викладіть сутність механічних методів експериментального визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях і запишіть фізичні залежності для об'ємного напруженого стану.

Задача 18.1

Визначити величину усадочної сили у зварному стиковому з'єднанні, зварювання якого виконувалось в абсолютно жорсткій складально-зварювальній оснастці. Задачу розв'язати в загальному вигляді в рамках розрахункового методу Трочуна.

Задача 18.2

Для тензора напружень $\sigma_{ij} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 9 & 0 \\ 0 & 0 & 14 \end{vmatrix}$ обчислити дотичне окта-

едричне напруження та базові інваріанти напруженого стану.

ВАРІАНТ 19

1. Дайте класифікацію і відповідне пояснення стосовно видів переміщень конструктивних елементів зварних конструкцій або з'єднань при зварюванні.

2. Опишіть механізм деформування трьох частин зварного стикового з'єднання, які утворюються після його розрізування в залишковому стані по межах зони пластичних деформацій скорочення, покажіть необхідний рисунок характеру деформації кожної з частин з'єднання, запишіть формули для визначення деформацій.

3. Запишіть часткові випадки для тензорів напружень у точці суцільного деформівного середовища у довільній системі координат,

виходячи із загального вигляду тензора напружень для об'ємного напруженого стану і дайте необхідні пояснення.

Задача 19.1

Дві однакові прямокутні пластини перед зварюванням їх стиковим швом були закріплені зі сторони торців, перпендикулярних до шва, в жорстких неподатливих в'язях. Режим зварювання відомий. Визначити за методом Трочуна залишкову пластичну деформацію скорочення після повного охолодження з'єднання і звільнення з оснастки. Задачу розв'язати в загальному вигляді.

Задача 19.2

Для тензора напружень $\sigma_{ij} = \begin{vmatrix} 13 & 1 & 8 \\ 1 & 7 & 0 \\ 8 & 0 & -20 \end{vmatrix}$ визначити середнє

напруження у точці та обрахувати октаедричне дотичне напруження.

ВАРІАНТ 20

1. Використовуючи умову рівноваги внутрішніх сил у зварному з'єднанні з поперечним перерізом $F_{з'єд}$, виведіть в рамках розрахункового методу Трочуна формулу для визначення залишкових реактивних напружень σ_p при зварюванні в складально-зварювальній оснастці з поперечним перерізом $F_{осн}$, якщо поперечний переріз зони залишкових пластичних деформацій скорочення $F_{пл}$, а межа текучості матеріалу – σ_T .

2. Викладіть Ваші уявлення стосовно сутності поняття «плоскої задачі» про напружено-деформований стан у навантаженому тілі.

3. Викладіть принципові основи методів зменшення залишкових напружень у зварних конструкціях.

Задача 20.1

У зварній балці завдовжки 10 м коробчастого перерізу з двох швелерів № 30 з площею поперечного перерізу кожного 40 см^2 в результаті зварювання утворилась сумарна зона залишкових поздовжніх пластичних деформацій скорочення з площею поперечного перерізу 40 см^2 . Межа текучості матеріалу 400 МПа, модуль пружності $2 \cdot 10^5$ МПа. Визначити залишкове скорочення балки.

Задача 20.2

Визначити нормальне напруження σ_v на площадці з довільною орієнтацією, якщо дотичне напруження $\tau_v = 50$ МПа, а проекції вектора повних напружень на координатні осі довільної системи координат XYZ мають значення: $p_{vx} = 30$ МПа, $p_{vy} = 40$ МПа, $p_{vz} = 50$ МПа.

ВАРІАНТ 21

1. Виходячи з відомої залежності для визначення усадочної сили P_{yc} при зварюванні « тонких » пластин, виведіть залежність для визначення усадочної сили в рамках метода Трочуна.

2. Шляхом побудови відповідної термомеханічної діаграми викладіть причину утворення залишкових напружень у сталюму закріпленому стержні при його рівномірному нагріванні і охолодженні від 0°C до $T > 600^\circ\text{C}$.

3. Виведіть залежності для октаедричних напружень у точці суцільного деформівного середовища.

Задача 21.1

Визначити величину усадочної сили у симетричному стиковому зварному з'єднанні завдовжки 100 см з площею поперечного перерізу 5000 см^2 і поздовжнім скороченням 1 мм. Модуль пружності дорівнює $2 \cdot 10^5$ МПа.

Задача 21.2

В деякій точці зварного з'єднання $\sigma_1 = 25$ МПа, $\sigma_2 = 10$ МПа, $\sigma_3 = 5$ МПа. Визначити чи виконується в даній точці умова пластичності Мізеса, якщо межа текучості матеріалу становить 300 МПа.

ВАРІАНТ 22

1. Дайте необхідні пояснення причин утворення кутових деформацій при зварюванні таврових з'єднань та опишіть методику їх визначення за Кузьміновим С.А..

2. Опишіть методику визначення механічними методами залишкових напружень у точках зварного з'єднання в межах зони залишкових поздовжніх пластичних деформацій скорочення

3. Визначення в довільних декартових осях координат компонентів вектора повних напружень у точці на площадці з довільною орієнтацією у просторі.

Задача 22.1

В результаті зварювання у зварному стиковому з'єднанні утворилась усадочна сила $8 \cdot 10^5$ Н та реактивні стискальні напруження 200 МПа. Визначити площу поперечного перерізу з'єднання.

Задача 22.2

Даний тензор напружень $\sigma_{ij} = \begin{vmatrix} 5 & 1 & 0 \\ 1 & 3 & 2 \\ 0 & 2 & -6 \end{vmatrix}$ розкласти на гідростатичну та девіаторну частини та визначити величину вектора повних напружень на октаедричній площадці.

ВАРІАНТ 23

1. Викладіть сутність розрахункового методу Ніколаєва, запишіть визначальну систему рівнянь для стадії нагрівання при зварюванні симетричного стикового з'єднання завширшки 2В та вкажіть невідомі, які будуть визначені після розв'язання даної системи рівнянь.

2. Дайте необхідні пояснення причин утворення кутових деформацій при зварюванні стикових багато прохідних зварних з'єднань та опишіть методику їх визначення за Кузьміновим С.А.

3. Базові інваріанти деформованого стану у точці суцільного деформівного середовища.

Задача 23.1

Визначити величину залишкового поздовжнього скорочення сталюї ($\epsilon_T = 0,002$) пластини з прорізами і полосами завдовжки 1000 мм при $F_{сер}/F_{кр}$, середня полоса якої нагрівалась від 0 до 600°C.

Задача 23.2

Скласти в загальному вигляді систему рівнянь для визначення ширини зони пластичних деформацій скорочення за методом Ніколаєва.

ВАРІАНТ 24

1. Назвіть і опишіть сутність найбільш уживаних критеріїв руйнування металу.
2. Опишіть сутність критерію пластичності Мізеса.
3. Виведіть формулу для визначення усадочної сили за методом Трочуна.

Задача 24.1

Визначити ширину зони чисто пластичних деформацій скорочення при зварюванні двох сталевих пластин завтовшки 10 мм на режимі: струм – 600 А, напруга на дузі – 30 В, к. к. д. дуги – 0,52, швидкість зварювання – 0,484 см/с. Об'ємна теплоємність металу – 5,2 Дж/(см³ · °С).

Задача 24.2

Стержень завдовжки 1000 мм закріплений одним кінцем в жорсткій опорі, а другим кінцем торкається правої жорсткої і неподатливої опорою. Визначити величину зазору Δ , який утвориться між правою опорою і стержнем після його нагрівання до температури 800°С і наступного охолодження до 0°С.

ВАРІАНТ 25

1. Викладіть сутність розрахункового методу Ніколаєва на прикладі зварювання двох пластин завширшки А і В.

2. Сутність основних фізичних методів експериментального визначення залишкових напружень у зварних конструкціях.

3. Опишіть методику визначення експериментальним шляхом величини усадочної сили у симетричному стиковому зварному з'єднанні.

Задача 25.1

Визначити величину усадочної сили у симетричному зварному стиковому з'єднанні, зварювання якого здійснювалось у абсолютно жорсткій складально-зварювальній оснастці. Задачу розв'язати в загальному вигляді в рамках методу Трочуна.

Задача 25.2

Визначити всі базові інваріанти та середнє напруження у точці

тіла при тензорі напружень в ній $\sigma_{ij} = \begin{vmatrix} 15 & 3 & 1 \\ 3 & 7 & 2 \\ 1 & 2 & 8 \end{vmatrix}$.