

УДК. 531.374; 539.213

М.Михайлишин, канд.фіз.-мат.наук; І.Капаціла

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛІВ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ ТА ДЕФОРМАЦІЙ, ЩО ВИНИКАЮТЬ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТОНКИХ КІЛЬЦЕВИХ ПЛАСТИН КОЛОВИМ ШВОМ

На основі деформаційної теорії пластичності, узагальненої на випадок розвантаження з врахуванням появи повторних пластичних деформацій, змодельовано процес зварювання тонких кільцевих пластин коловим швом. Поверхня деформування при розвантаженні з розвитком повторних пластичних деформацій будується на основі принципу Мазінга або у вигляді трансформованої поверхні початкового деформування Ю.М.Шевченка. Розроблено алгоритми розв'язування задачі з використанням методів змінних параметрів пружності та додаткових деформацій. Знайдено та проаналізовано числові результати.

Зварювання є найпоширенішим технологічним процесом виготовлення і ремонту різноманітних конструкцій. Однією з найважливіших проблем є залишкові напруження та деформації, що виникають внаслідок зварювання. Їхня присутність часто приводить до руйнування конструкцій або до порушення їх функціональних властивостей. Не дивлячись на значні успіхи, які досягнуті у вивченні даної проблеми, багато питань потребують подальших досліджень. Особливо важливим є вдосконалення методів оцінки кінетики зварних напружень і деформацій. Тільки маючи надійний інструмент для визначення полів залишкових зварювальних напружень та деформацій, можна надіятися на успіх в розробці ефективних методів їхнього пониження до оптимального рівня. Найбільш точних результатів при моделюванні зварювальних процесів можна досягти на основі теорії пластичного течіння [1]. Шляхи навантаження при зварюванні, як правило, утворюють ламані лінії, що складаються з прямих, що відповідають ділянкам простого навантаження. Злами траєкторії навантаження відповідають в основному моментам початку пластичного деформування, початку розвантаження і початку повторного пластичного деформування при розвантаженні. Відомо, що достатньо точні результати в таких випадках можуть бути досягнуті на основі набагато простішої деформаційної теорії пластичності, якщо тільки узагальнити її на врахування розвантаження і передбачити при цьому можливість появи повторних пластичних деформацій. Такі узагальнення для ізотермічних процесів розглядалися в роботах В.В.Москвітін [2], а для неізотермічних – в роботах Ю.М.Шевченка [3]. В даній роботі ці ідеї використовуються для моделювання процесів зварювання.

Розглянемо дві тонкі кільцеві пластинки однакової товщини h , серединні площини яких в полярній системі координат займають області $r_0 \leq r \leq r_1$ і $r_1 \leq r \leq R$, $\varphi \in [0, 2\pi]$. Пластини зварюються коловим швом, радіус якого r_1 . Вважаємо, що пластини виконані з однакового матеріалу і зварювання здійснюється одночасно по всій довжині шва, причому забезпечуються умови рівномірного розподілу по товщині пластин напружень, деформацій та переміщень.

Нагрівання в області зварювання здійснюється протягом часу τ_n з допомогою внутрішніх джерел, потужність яких рівномірно розподілена по області $|r - r_1| \leq \delta$ і по всій товщині пластин і рівна заданій величині w_0 . В момент часу $\tau = \tau_n$ джерела відк-

лючаються. Пластини вільні від закріплення і можуть знаходитися під дією осесиметричного навантаження на контурах $r = r_0$ і $r = R$.

Знаходження температурного поля зварювання в припущенні про конвективний теплообмін із зовнішнім середовищем поверхонь $z = \pm h/2$, контурів пластин $r = r_0$ і $r = R$ та симетрії процесу відносно серединної площини зводиться до такої задачі [4]

$$\frac{\partial^2 T^*}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T^*}{\partial r} - \frac{1}{a} \frac{\partial T^*}{\partial \tau} = \frac{2\alpha}{\lambda h} T^* - \frac{1}{\lambda} W, \quad (1)$$

$$T^* = 0 \quad \text{при} \quad \tau = 0 \quad (2)$$

$$-\frac{\partial T^*}{\partial r} + \frac{\alpha}{\lambda} T^* = 0 \quad \text{при} \quad r = r_0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial T^*}{\partial r} + \frac{\alpha}{\lambda} T^* = 0 \quad \text{при} \quad r = R,$$

де $T^* = T - t_c$, $T = \frac{1}{h} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} t(r, z, \tau) dz$, $W = \frac{1}{h} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} w(r, z, \tau) dz$ - середні по товщині пластин

температура і густина інтенсивності джерел, λ - коефіцієнт теплопровідності, a – коефіцієнт температуропровідності матеріалу пластин, α - коефіцієнт тепловіддачі, t_c - температура зовнішнього середовища. Задача (1)-(3) розв'язується числовим методом, що базується на схемі Кранка-Ніколсона та використанні методу дискретної ортогоналізації Годунова [5].

Моделювання процесів термопружнопластичного деформування на етапах нагрівання і охолодження проводимо на основі деформаційної теорії пластичності, узагальненої на випадок розвантаження з врахуванням появи повторних пластичних деформацій при розвантаженні [2,3].

Рівняння рівноваги і геометричні співвідношення мають вигляд

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0, \quad (4)$$

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r}. \quad (5)$$

Компоненти повної деформації подаються у вигляді суми пружної і пластичної складових та температурної деформації

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{(e)} + \varepsilon_{ij}^{(p)} + \varepsilon^T, \quad \varepsilon^T = \alpha_t (T - T_0). \quad (6)$$

Зміна об'єму зв'язана з середнім напруженням такою ж залежністю, як і в пружності, а саме

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{K} + \varepsilon^T, \quad (7)$$

де $\sigma_0 = \frac{1}{3} \sigma_{ii}$, $\varepsilon_0 = \frac{1}{3} \varepsilon_{ii}$, $K = \frac{E}{1 - 2\nu}$.

Середня пластична деформація рівна нулю і компоненти пластичної деформації співпадають з компонентами девіатора пластичної деформації.

Співвідношення деформаційної теорії пластичності для етапу початкового навантаження з ненапруженого і недеформованого стану в тензорній формі виглядають так [2], [3], [6]:

$$e_{ij} = \frac{1}{2G^*} s_{ij} = \frac{\psi}{2G} s_{ij}, \quad (8)$$

де $e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \delta_{ij} \varepsilon_0$, $s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_0$, ψ - параметр пластичності, $G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$ - модуль зсуву.

Пружні складові зв'язані з напруженнями законом Гука

$$e_{ij}^{(e)} = \frac{1}{2G} s_{ij}, \quad \varepsilon_0^{(e)} = \frac{\sigma_0}{K}, \quad (9)$$

який для плоского напруженого стану і осьової симетрії має вигляд

$$\begin{aligned} \varepsilon_r^{(e)} &= \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu \sigma_\theta), \\ \varepsilon_\theta^{(e)} &= \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \nu \sigma_r), \\ \varepsilon_z^{(e)} &= -\frac{\nu}{E} (\sigma_r + \sigma_\theta). \end{aligned} \quad (10)$$

Співвідношення (8) також можна записати у вигляді закону Гука із змінними модулями пружності

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E^*} (\sigma_r - \nu^* \sigma_\theta) + \alpha_t T^*, \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{E^*} (\sigma_\theta - \nu^* \sigma_r) + \alpha_t T^*, \\ \varepsilon_z &= -\frac{\nu^*}{E^*} (\sigma_r + \sigma_\theta) + \alpha_t T^*, \end{aligned} \quad (11)$$

причому для цих модулів повинні виконуватися співвідношення [3], [5]:

$$E^* = \frac{3E}{2(1+\nu)\psi + 1 - 2\nu}, \quad \nu^* = \frac{(1+\nu)\psi - 1 + 2\nu}{2(1+\nu)\psi + 1 - 2\nu}, \quad G^* = \frac{E^*}{2(1+\nu^*)} = \frac{G}{\psi}. \quad (12)$$

Параметр пластичності на етапі початкового пластичного деформування визначається так:

$$\psi = 3G \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i}, \quad (13)$$

де σ_i і ε_i - інтенсивності напружень і деформацій, які в даному випадку визначаються за формулами:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_r^2 - \sigma_r \sigma_\theta + \sigma_\theta^2}, \quad \varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2}. \quad (14)$$

Отримаємо систему рівнянь для знаходження полів напружень, деформацій і переміщень в довільний момент часу для етапу початкового навантаження. Виключивши σ_θ на основі другої залежності (11) і підставивши його в рівняння рівноваги (4) і перше співвідношення (11), приходимо до системи рівнянь:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{1}{r} \left[E^* \left(\frac{u}{r} - \alpha_t T^* \right) + (\nu^* - 1) \sigma_r \right], \quad (15)$$

$$\frac{du}{dr} = \frac{1 - \nu^{*2}}{E^*} \sigma_r - \nu^* \frac{u}{r} + \alpha_t (1 + \nu^*) T^*,$$

$$\sigma_\theta = \nu^* \sigma_r + E^* \left(\frac{u}{r} - \alpha_t T^* \right). \quad (16)$$

В загальному випадку контури $r = r_0$ і $r = R$ можуть бути навантажені осесиметричним силовим радіальним навантаженням інтенсивності p_0 і p_1 . Тоді повинні виконуватися граничні умови

$$\begin{aligned} \sigma_r &= p_0 & \text{при} & \quad r = r_0, \\ \sigma_r &= p_1 & \text{при} & \quad r = R. \end{aligned} \quad (17)$$

Для зручності на етапі початкового нагрівання будемо вважати, що маємо один суцільний диск з внутрішнім радіусом r_0 і зовнішнім R , який нагрівається джерелами вздовж радіуса $r = r_1$. Починаючи з деякого моменту часу вздовж контура $r = r_1$ утворюється ванна розплаву, в якій напруження відсутні. Очевидно, що тоді утворюється два незалежних диски, і поки існує ванна, потрібно було б розглядати окремо кожен з

дисків, вважаючи їх вільними від навантаження вздовж контурів, що прилягають до цієї ванни. Коли внаслідок охолодження температура у всіх точках розплаву зменшиться і відбудеться його кристалізація, почнеться деформування обох дисків як єдиного цілого. З метою уникнення особливостей при проведенні обчислень надалі наближено вважаємо, що протягом всього процесу зварювання диск залишається суцільним в усій області, але в області високих температур границя текучості матеріалу близька до нуля, так що матеріал практично не чинить опору деформуванню.

Пластичні складові деформацій на основі (6), (10) та (11) обчислюються за формулами:

$$\begin{aligned}\varepsilon_r^{(p)} &= \frac{1}{E^*} \left(1 - \frac{E^*}{E} \right) \left(\sigma_r - \frac{1}{2} \sigma_\theta \right), \\ \varepsilon_\theta^{(p)} &= \frac{1}{E^*} \left(1 - \frac{E^*}{E} \right) \left(\sigma_\theta - \frac{1}{2} \sigma_r \right), \\ \varepsilon_z^{(p)} &= -\frac{1}{E^*} \left(1 - \frac{E^*}{E} \right) \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2}.\end{aligned}\tag{18}$$

Поверхню початкового навантаження приймаємо у вигляді

$$\sigma_i = F(\varepsilon_i, T) = \begin{cases} 3G(T)\varepsilon_i, & \varepsilon_i \leq \varepsilon_T(T) = \frac{\sigma_T}{3G(T)}, \\ \sigma_T(T) \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_T} \right)^{\gamma(T)}, & \varepsilon_i > \varepsilon_T.\end{cases}\tag{19}$$

Процес обчислень згідно з методом змінних параметрів пружності здійснюється так. Весь процес нагрівання і охолодження розбивається на окремі етапи. Покладаючи початково у всіх точках конструкції $\psi = 1$, $E^* = E$, $\nu^* = \nu$, розв'язуємо пружну задачу і знаходимо ε_i і σ_i^* для кожної точки конструкції в першому наближенні. За знайденим значенням ε_i і заданою температурою T для даного етапу обчислюємо інтенсивність напружень σ_i за формулою (19) і знаходимо параметр пластичності ψ , згідно з формулою (13). Після цього уточнюються змінні параметри пружності за формулами (12) і знову розв'язується пружна задача для неоднорідного тіла. Процес послідовних наближень для кожного етапу навантаження закінчується тоді, коли у всіх точках конструкції виконується умова

$$\frac{|\sigma_i^* - \sigma_i|}{\sigma_i^*} < \varepsilon,\tag{20}$$

де ε - задана точність обчислень. Після завершення етапу для кожної точки обчислюється інтенсивність накопиченої пластичної деформації

$$\varepsilon_i^{(p)} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_r^{(p)2} + \varepsilon_\theta^{(p)} \varepsilon_r^{(p)} + \varepsilon_\theta^{(p)2}}.\tag{21}$$

Для кожного нового етапу в кожній точці конструкції обчислюється нове значення температури і на поверхні навантаження (19) знаходиться значення інтенсивності деформацій $\varepsilon_i^{(0)}$, яке відповідає даній температурі і накопиченій в даній точці пластичній деформації $\varepsilon_i^{(p)}$. Значення $\varepsilon_i^{(0)}$ використовується на новому етапі для визначення характеру деформування. Коли після завершення етапу у деяких частинах тіла виконуватиметься умова $\varepsilon_i < \varepsilon_i^{(0)}$, то там здійснюється розвантаження. В такому випадку необхідно повторити обчислення для цього етапу, передбачивши попередньо розвантаження в цих частинах тіла. Параметри E^* та ν^* для нового етапу в точках, де передбачається пластичне деформування, задаються рівними їхнім значенням для кінця попереднього етапу.

В точках, в яких здійснюється розвантаження і на момент його початку компоненти пластичної деформації рівні $\varepsilon_{ij}^{(p)1} = e_{ij}^{(p)1}$, фізичні співвідношення мають вигляд

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = e_{ij} - e_{ij}^{(p)1} = \frac{1}{2G^*} s_{ij} = \frac{\psi}{2G} s_{ij}. \quad (22)$$

Параметр пластичності ψ тепер знаходиться за формулою

$$\psi(\sigma_i, T) = 3G \frac{\bar{\varepsilon}_i}{\sigma_i}, \quad (23)$$

в якій позначено

$$\bar{\varepsilon}_i^p = \sqrt{\frac{2}{3} \left(e_{ij}^{(p)} - e_{ij}^{(p)1} \right) \left(e_{ij}^{(p)} - e_{ij}^{(p)1} \right)}. \quad (24)$$

Для уточнення параметра ψ за формулою (23) потрібно мати залежність $\bar{\sigma}_i(\bar{\varepsilon}_i, T)$, ($\bar{\sigma}_i = \sigma_i$) при розвантаженні. Одним із можливих варіантів запису цієї залежності можна зробити на основі принципу Мазінга [2] або використати так звану трансформовану функцію початкового деформування, запропоновану в роботах Ю.М.Шевченка [3]. Якщо, наприклад, початок системи координат $\bar{\varepsilon}_i, \bar{\sigma}_i$ вибрати в точці з координатами $\varepsilon_i^{(p)1}, \theta$ в системі координат ε_i, σ_i і направити осі $\bar{\varepsilon}_i, \bar{\sigma}_i$ в протилежному напрямку до напрямку осей ε_i, σ_i , то рівняння трансформованої функції запишеться так [3,7]

$$\bar{\sigma}_i = \begin{cases} 3G\bar{\varepsilon}_i, & \bar{\varepsilon}_i \leq \bar{\varepsilon}_T = \varepsilon_i^{(p)1} - \varepsilon_i^{(1)} + 2\varepsilon_T, \\ \sigma_T - \sigma_i^{(1)} + \sigma_T \left(\frac{\bar{\varepsilon}_i - \bar{\varepsilon}_T + \varepsilon_T}{\varepsilon_T} \right)^\gamma, & \bar{\varepsilon}_i > \bar{\varepsilon}_T, \end{cases} \quad (25)$$

де через $\varepsilon_i^{(1)}, \sigma_i^{(1)}$ позначено інтенсивності деформацій і напружень в момент початку розвантаження. Визначення цих величин здійснюється так, як це описано в [7].

Співвідношення (22) в нашому випадку запишуться так:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E^*} (\sigma_r - \nu^* \sigma_\theta) + \alpha_t T^* + \varepsilon_r^{(p)1}, \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{E^*} (\sigma_\theta - \nu^* \sigma_r) + \alpha_t T^* + \varepsilon_\theta^{(p)1}, \\ \varepsilon_z &= -\frac{\nu^*}{E^*} (\sigma_r + \sigma_\theta) + \alpha_t T^* - (\varepsilon_r^{(p)1} + \varepsilon_\theta^{(p)1}), \end{aligned} \quad (26)$$

і система рівнянь (15) і (16) при розвантаженні прийме вигляд:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{1}{r} \left[E^* \left(\frac{u}{r} - \alpha_t T^* - \varepsilon_\theta^{(p)1} \right) + (\nu^* - 1) \sigma_r \right], \quad (27)$$

$$\frac{du}{dr} = \frac{1 - \nu^{*2}}{E^*} \sigma_r - \nu^* \frac{u}{r} + \alpha_t (1 + \nu^*) T^* + \varepsilon_r^{(p)1} + \nu^* \varepsilon_\theta^{(p)1},$$

$$\sigma_\theta = \nu^* \sigma_r + E^* \left(\frac{u}{r} - \alpha_t T^* - \varepsilon_\theta^{(p)1} \right). \quad (28)$$

Для компонент пластичної деформації на основі (6) і (26) знайдемо

$$\begin{aligned} \varepsilon_r^{(p)} &= \frac{1}{E^*} \left(1 - \frac{E^*}{E} \right) \left(\sigma_r - \frac{1}{2} \sigma_\theta \right) + \varepsilon_r^{(p)1}, \\ \varepsilon_\theta^{(p)} &= \frac{1}{E^*} \left(1 - \frac{E^*}{E} \right) \left(\sigma_\theta - \frac{1}{2} \sigma_r \right) + \varepsilon_\theta^{(p)1}, \\ \varepsilon_z^{(p)} &= -\frac{1}{E^*} \left(1 - \frac{E^*}{E} \right) \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} - (\varepsilon_r^{(p)1} + \varepsilon_\theta^{(p)1}). \end{aligned} \quad (30)$$

Обчислення проводились для випадку зварювання пластин із сталі 3 товщиною 3мм при $r_0 = 0.1\text{м}$, $r_1 = 0.18\text{м}$ і $R = 0.5\text{м}$. Густина потужності джерел задавалася рівною $w_0 = 0.54 \cdot 10^{10} \text{Вт/м}^3$ і зосередженою в області $|r - r_1| \leq 0.0025\text{м}$ протягом $\tau_n = 4\text{с}$. Залежності модулів матеріалу від температури приведені в роботі [7]. Результати обчислень при $p_0 = p_1 = 0$ приведені на рис.1-5. Напруження на графіках віднесені до границі текучості матеріалу $\sigma_T = 280\text{МПа}$ при $T = 20^\circ\text{C}$.

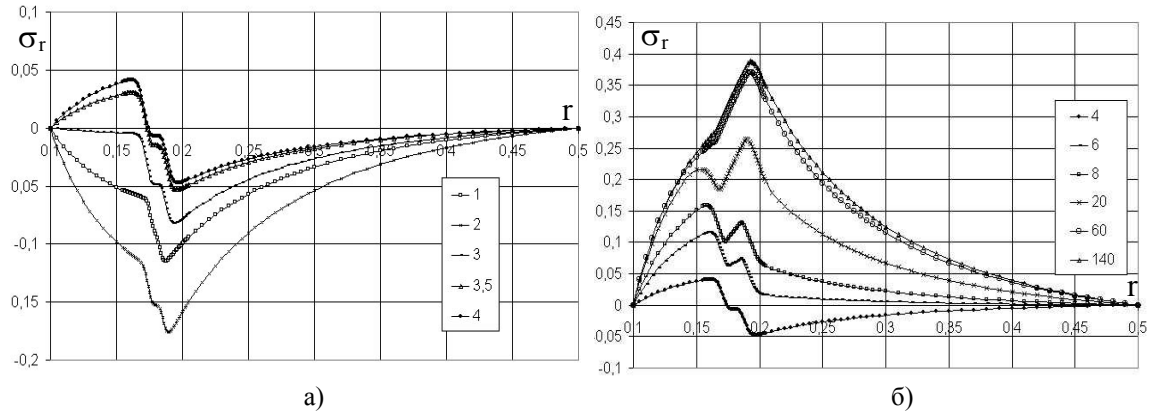


Рис.1 Розподіл радіальних напружень для різних моментів часу

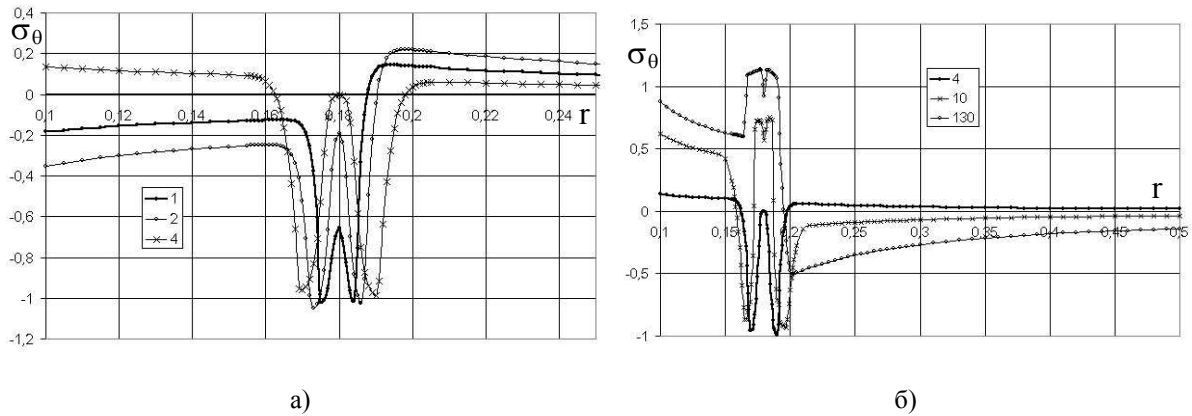


Рис. 2 Розподіл кільцевих напружень для різних моментів часу

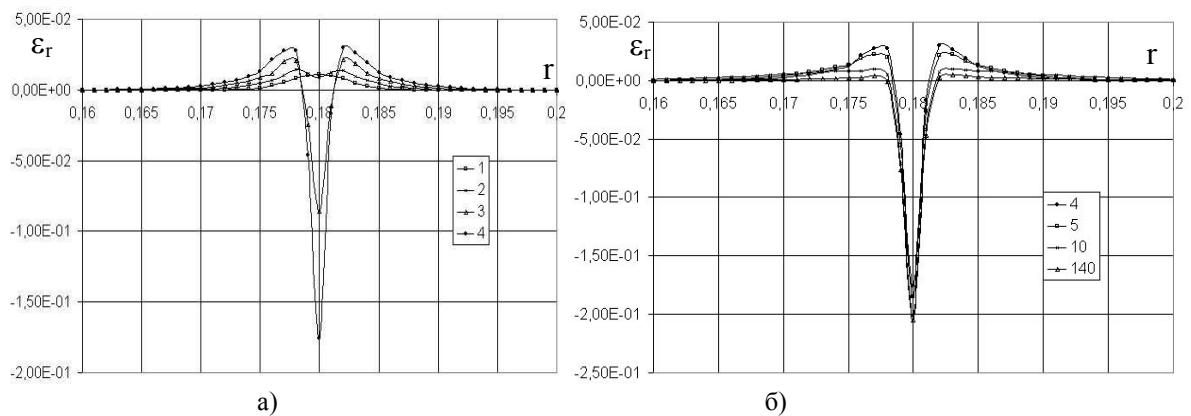


Рис. 3 Розподіл радіальних деформацій в області шва для різних моментів часу

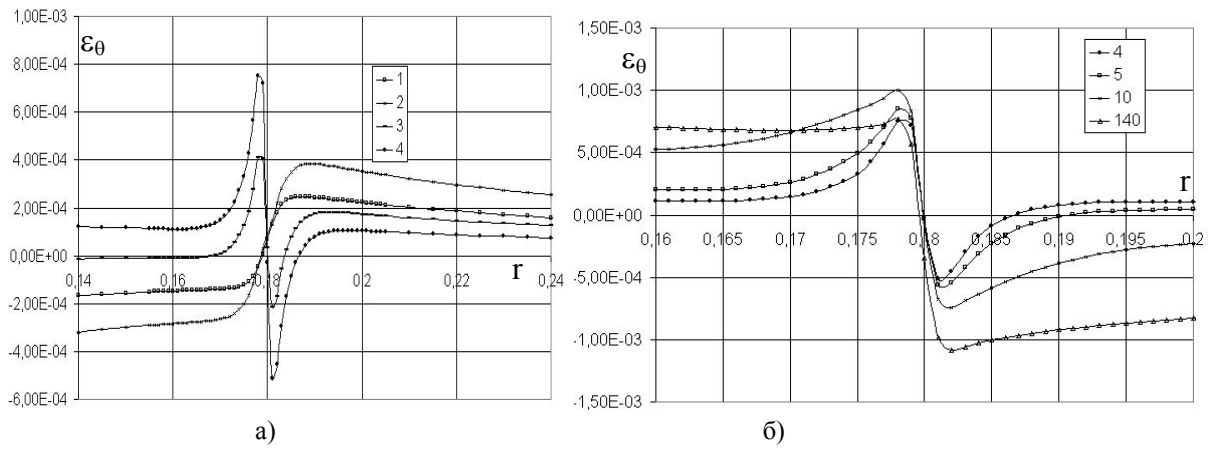


Рис. 4 Розподіл кільцевих деформацій в області шва для різних моментів часу

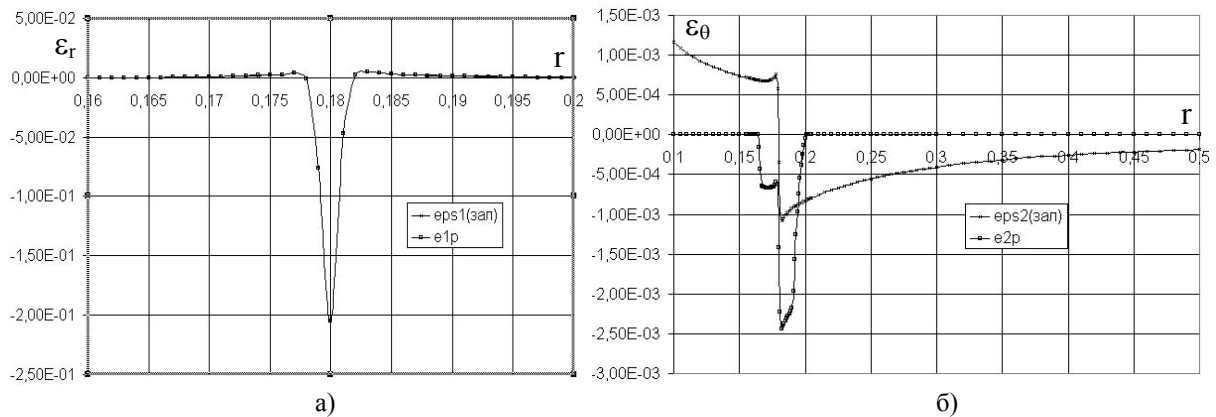


Рис. 5 Розподіл повних і пластичних залишкових деформацій:
а) радіальних; б) кільцевих

Для моментів часу, що перевищують 140с. не спостерігаються зміни кривих на графіках для цього моменту часу, і можна стверджувати, що вони виражають розподіл залишкових величин після повного охолодження деталі. Порівняння теоретично отриманих залишкових напружень і деформацій із знайденими експериментально [8] показує на їх добре співпадання, що свідчить про адекватність запропонованого методу.

Приведемо також криві деформування окремих точок диску в просторі σ_i, ϵ_i на етапі початкового деформування і в просторі $\bar{\sigma}_i, \bar{\epsilon}_i$ на етапі розвантаження (рис.6-8).

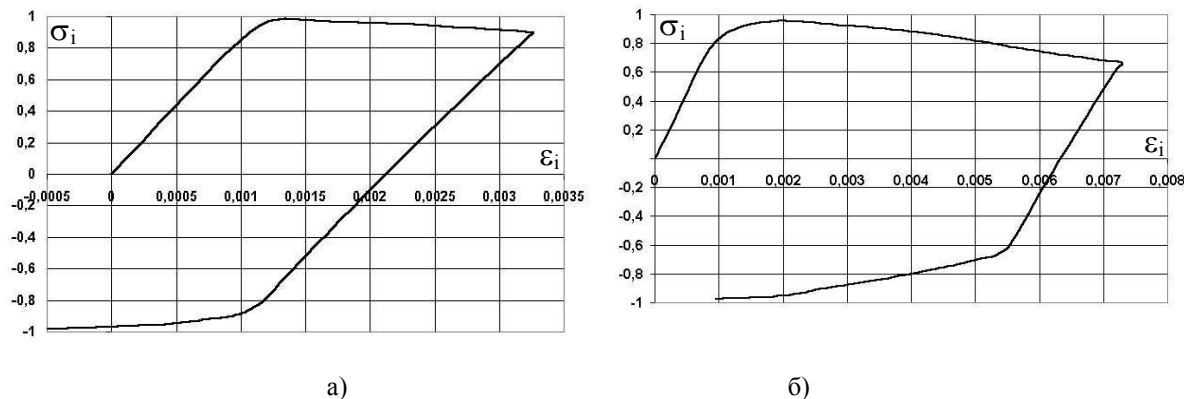


Рис.6. Діаграми деформування в просторі $\sigma_i, \epsilon_i, (\bar{\sigma}_i, \bar{\epsilon}_i)$ точок
а) - $r = 0.17$; б) - $r = 0.186$

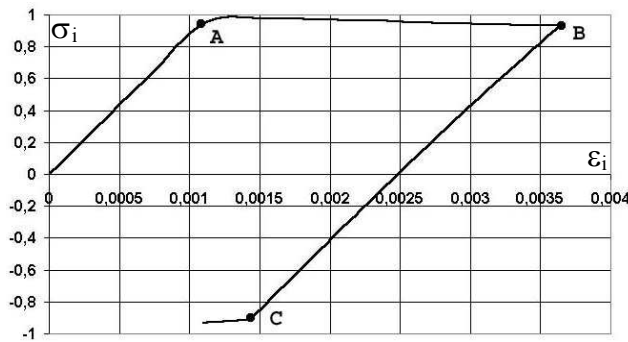


Рис.7. Діаграма деформування точки $r = 0.19$ в просторі $\sigma_i, \epsilon_i, (\bar{\sigma}_i, \bar{\epsilon}_i)$

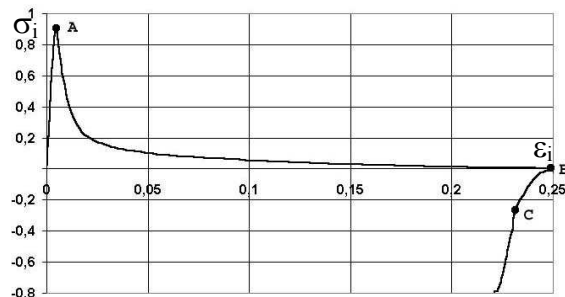


Рис.8. Діаграма деформування точки $r = 0.18$ в просторі $\sigma_i, \epsilon_i, (\bar{\sigma}_i, \bar{\epsilon}_i)$

З рисунків добре видно, що у всіх розглянутих точках розвантаження здійснюється з розвитком повторних пластичних деформацій.

Цікаво також прослідкувати траєкторію деформування окремих точок в п'ятимірному просторі деформацій Ільюшина [3]. В даному випадку відмінними від нуля є лише дві компоненти вектора деформації

$$\epsilon_1 = \sqrt{\frac{3}{2}} e_{11} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\epsilon_r - \frac{\epsilon_\theta + \epsilon_z}{2} \right); \quad \epsilon_2 = \sqrt{2} \left(\frac{e_{11}}{2} + e_{22} \right) = \frac{1}{\sqrt{2}} (\epsilon_\theta - \epsilon_z). \quad (31)$$

На рис.9 зображена траєкторія деформування точки $r = 0.19$ в просторі ϵ_1, ϵ_2 .

Діаграма деформування цієї ж точки показана на рис.7, причому точкам А, В і С на обох рисунках відповідають одні і ті ж моменти часу. З рисунків видно, що різка зміна напрямку траєкторії в точці В відповідає зміні активного пластичного деформування пружним розвантаженням, а в точці С - пружного розвантаження повторним пластичним деформуванням. Різка зміна напрямку деформування на початковій ділянці траєкторії відповідає пружній ділянці деформування і пов'язана з тим, що при цьому мало місце навантаження, розвантаження і знову навантаження.

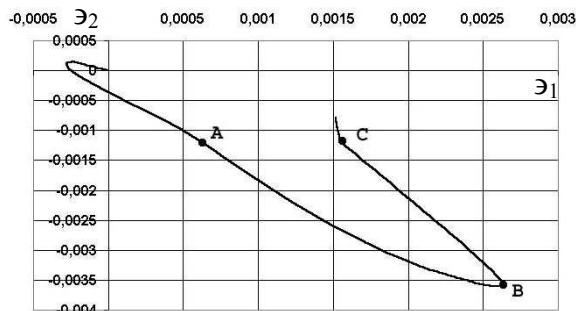


Рис.9. Траєкторія деформування точки $r = 0.19$.

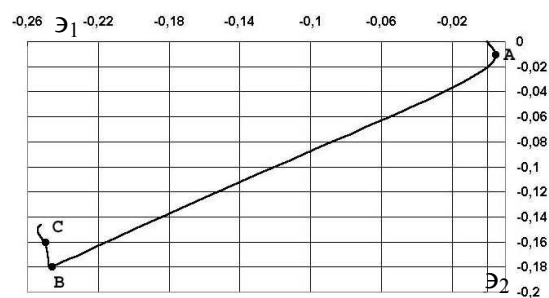
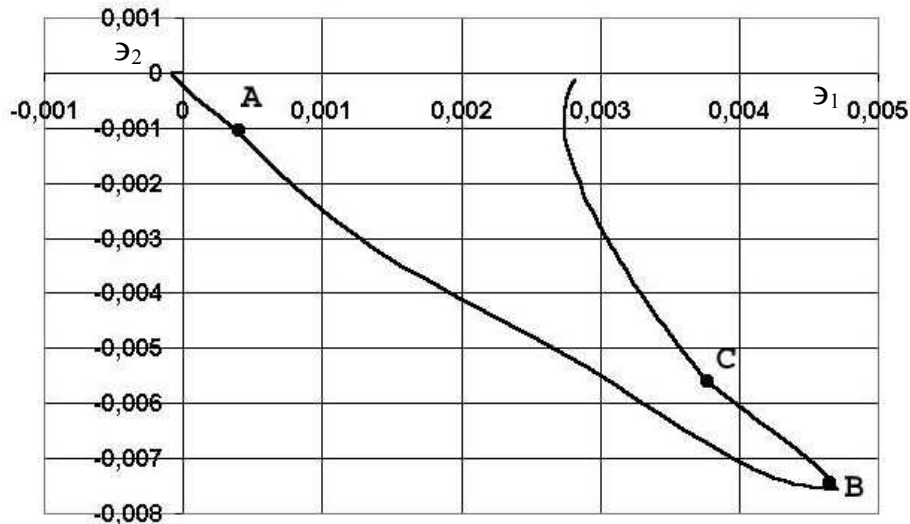


Рис.10. Траєкторія деформування точки $r = 0.18$.

Аналогічна траєкторія деформування для точки на осі шва ($r = 0.18$) показана на рис.10. Відповідна їй діаграма деформування приведена на рис. 8.

Зміну напрямку деформування на малій ділянці після точки А на рис.10 можна пояснити тим, що результати виводилися з кроком 0.5 секунди, і тому точка А на обох рисунках не відповідає точно моменту початку пластичного деформування.

Як видно з отриманих графіків, на етапі початкового пластичного деформування траєкторія деформування дуже близька до прямолінійної. На етапі повторного пластичного деформування її теж можна вважати близькою до прямолінійної. Для підтвердження цього приведемо траєкторію деформування точки $r = 0.186$, для якої спостерігалися значні повторні пластичні деформації при розвантаженні, що видно з рис.6, б).

Рис.11. Траекторія деформування точки $r = 0.186$.

Точки А, В і С відповідають моментам початку і закінчення початкового пластичного деформування і початку повторного пластичного деформування. Кінцева ділянка траекторії має криволінійний участок незначної кривини.

Отже, на основі аналізу числових результатів, отриманих з використанням запропонованого алгоритму, можна стверджувати про правильність викладених в статті теоретичних припущень для моделювання процесу зварювання тонких кільцевих пластин коловим швом. Отримані дані підтверджують ефективність використання деформаційної теорії пластичності, узагальненої на випадок розвантаження з врахуванням появи повторних пластичних деформацій при розвантаженні для отримання кінетики полів напружень і деформацій при зварюванні.

Надалі раціонально було б узагальнити цю методичку на випадок повторних навантажень та розвантажень, що важливо для знаходження додаткового оптимального силового та температурного навантаження зварної конструкції з метою пониження залишкових напружень.

The welding process of thin ring plates by a ring seam is simulated on the basis of deformation plastic theory, generalized for the case of unloading in taking into account repeated plastic deformation appear. The deformation surface at unloading with the development of repeated plastic deformations is constructed on the basis of Mazing principle, or as the transformed surface of initial deformation of J.M.Shevchenko. Algorithms of the problem decision using methods of replaceable parameters of elasticity and additional deformations are developed. Numerical results are received and analysed.

Література

1. Махненко В.И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций.-К.: Наук.думка,1976.-320 с.
2. Москвитин В.В. Пластичность при переменных нагружениях. Изд-во МГУ, М.,1965.-263 с.
3. Шевченко Ю.Н. Термопластичность при переменных нагружениях. –К.:Наукова думка, 1970.-287 с.
4. Подстригач Я.С., Швец Р.Н. Термоупругость тонких оболочек.–К.: Наукова думка, 1978.-344 с.
5. Михайлишин М. Про один числовий метод розв'язування осесиметричних задач теплопровідності тонких оболонок обертання // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль, 1999.- Том 4.- Число 1.-С.10-15.
6. Биргер И.А., Шорр Б.Ф. Термопрочность деталей машин.-М.:Машиностроение, 1975.- 455 с.
7. М. Михайлишин, І. Капаціла. Використання деформаційної теорії пластичності для моделювання процесів зварювання тонких елементів конструкцій // Вісник Тернопільського державного технічного університету. –Тернопіль,2002.- Том 7.- № 2. –С.11-23.
8. Шаблій О.Н., Михайлишин М.С., Беседина Л.П., Черный В. О снятии остаточных сварочных напряжений в тонких пластинках с кольцевыми сварными швами с помощью термообработки. Сб. “Математические методы и физико-механические поля”.-К.:Наукова думка,1976.- №3.

Одержано 25.11.2002 р.