

УДК: 539.3

Григорій Габрусєв, к.ф.-м.н., доц.; Ірина Габрусєва, к.т.н., доц.;

Борис Шелестовський, к.ф.-м.н., доц.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ОЦІНЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ПЛАСТИНІ ПРИ ЛОКАЛЬНОМУ НАГРІВАННІ ПІД ЧАС ЗВАРЮВАННЯ

Анотація. У роботі розглянуто аналітичний підхід до оцінювання залишкових напружень у пластині при локальному нагріванні під час зварювання. Запропоновано модель пружного ізотропного шару з полем залишкових пластичних деформацій, що дозволяє визначати радіальні, кільцеві, нормальні та дотичні напруження. Проведено чисельний аналіз розподілу напружень залежно від товщини пластини та параметрів зони нагрівання. Показано, що для тонких пластин результати тривимірної та двовимірної теорій добре узгоджуються, тоді як зі збільшенням товщини суттєво проявляється об'ємний характер напруженого стану.

Ключові слова: залишкові напруження, локальне нагрівання, зварювання, пластичні деформації, напружений стан, пружний шар.

Hryhorii Habrusiev; Iryna Habrusieva; Borys Shelestovskyi.

ASSESSMENT AND PREDICTION OF RESIDUAL STRESSES IN A PLATE UNDER LOCALIZED HEATING DURING WELDING

Abstract. The paper presents an analytical approach for assessing residual stresses in a plate under localized heating during welding. The proposed model enables determination of radial, hoop, normal and shear stresses and reveals the influence of plate thickness on the three-dimensional stress state.

Keywords: residual stresses, welding, localized heating, stress state, plastic strains

Зварювання є одним із найбільш поширених способів з'єднання елементів конструкцій у машинобудуванні, енергетиці, транспортній та авіакосмічній галузях. Воно широко застосовується під час виготовлення корпусних конструкцій, трубопроводів, резервуарів, елементів силових установок та інших відповідальних деталей, що працюють в умовах значних механічних і температурних навантажень. Однією з основних проблем під час виконання зварних з'єднань є виникнення залишкових напружень, спричинених нерівномірним нагріванням і охолодженням матеріалу. Такі напруження можуть призводити до локальних деформацій, втрати геометричної точності конструкцій, появи тріщин та зниження втомної міцності елементів. При цьому характерним є складний просторовий напружено-деформований стан, що суттєво ускладнює прогнозування залишкових напружень та оцінювання довговічності конструкцій. У зв'язку з цим розроблення аналітичних моделей, які дозволяють оперативно оцінювати вплив параметрів зварювання та геометричних характеристик конструкції на розподіл залишкових напружень, є актуальною науково-прикладною задачею. У проведеному дослідженні пластина моделюється як пружний ізотропний шар товщиною h . Циліндричну систему координат r, φ, z обрано з початком на верхній поверхні пластини. Базові співвідношення для складових тензорів напружень і переміщень отримано вираженням тензора повної деформації ε_{ij} у вигляді суми тензора пружної деформації ε_{ij}^e та тензора вільної (пластичної) деформації ε_{ij}^0 .

Аналітично поле залишкових пластичних деформацій, що виникає в пластині за рахунок локалізованого нагрівання при зварюванні, можна описати наступним чином:

$$\varepsilon_{rr}^0 = -\varepsilon_0^* (1 - \omega p^2 r^2) e^{-p^2 r^2}, \quad \varepsilon_{\varphi\varphi}^0 = -\varepsilon_0^* (1 + \omega p^2 r^2) e^{-p^2 r^2}, \quad \varepsilon_{zz}^0 = -(\varepsilon_{rr}^0 + \varepsilon_{\varphi\varphi}^0), \quad (1)$$

параметри ε_0^* , ω , p – отримується експериментально [1].

Для опису напружено-деформованого стану використано рівняння тривимірної теорії пружності та осесиметричні припущення. Це дозволило отримати аналітичні вирази для визначення радіальних, кільцевих, нормальних і дотичних напружень, а також різниці головних напружень за товщиною пластини.

Проведено чисельний аналіз з використанням експериментально визначених параметрів поля залишкової пластичної деформації $\varepsilon_0^* = 1.2\%$, $p^2 = 0.4$, $\omega = 2/3$, $\omega = 5/3$ та коефіцієнта Пуассона $\nu = 0.3$. На Рис. 1 показано розподіл пластичних деформацій уздовж радіальної координати.

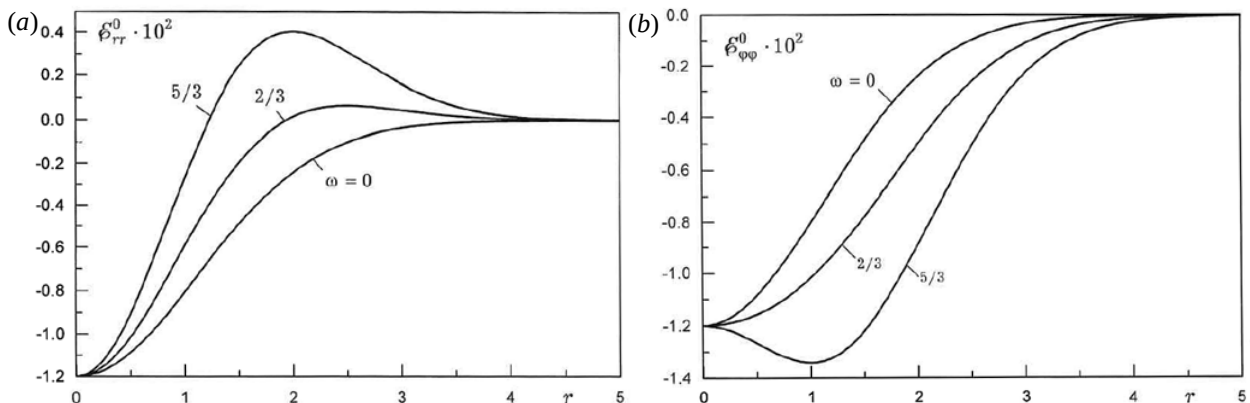


Рисунок 1. Розподіл (а) пластичних радіальних деформацій і (б) пластичних колових деформацій вздовж радіальної координати для різних значень параметра ω .

На Рис. 2-6 продемонстровано отримані розподіли залишкових напружень по радіальній координаті пластини та через її товщину для різних товщин пластини та параметрів поля пластичної деформації. Пунктирні лінії на Рис. 3 і 4 показують залежність радіальних та колових напружень, розрахованих за формулами, що відповідають розв'язанню задачі про тонку пластину за припущення нульових нормальних σ_{zz} і дотичних напружень σ_{rz} , тобто відповідно до плоского напруженого стану (ПНС). Графіки побудовані для безрозмірних напружень, нормалізованих за $G\varepsilon_0^*$ (позначених на малюнках 2-6 символом "~" над відповідним параметром).

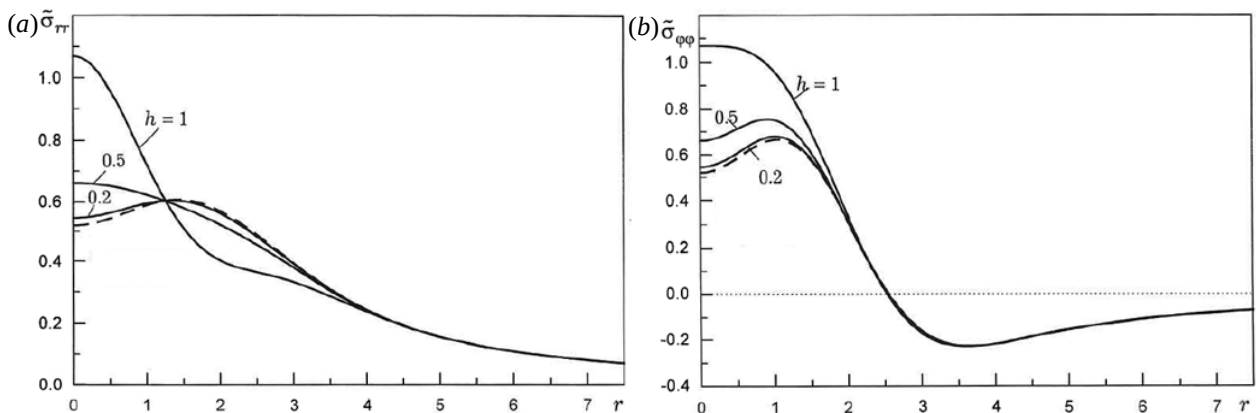


Рисунок 2. Залежність залишкових радіальних (а) і колових (б) напружень на поверхні пластини від радіальної координати для різних значень товщини пластини при $\omega = 2/3$.

Результати, показані на Рис. 2, свідчать про те, що залишкові напруження, викликані процесами зварювання для яких поле пластичної деформації можна описати виразами

(1), обчислені на основі тривимірної та двовимірної теорій пластин добре узгоджується для пластин товщиною близько 2 мм. Якісний характер варіації залишкових напружень уздовж радіальної координати, отриманий з обох теоретичних підходів, подібний до товщини приблизно 5 мм.

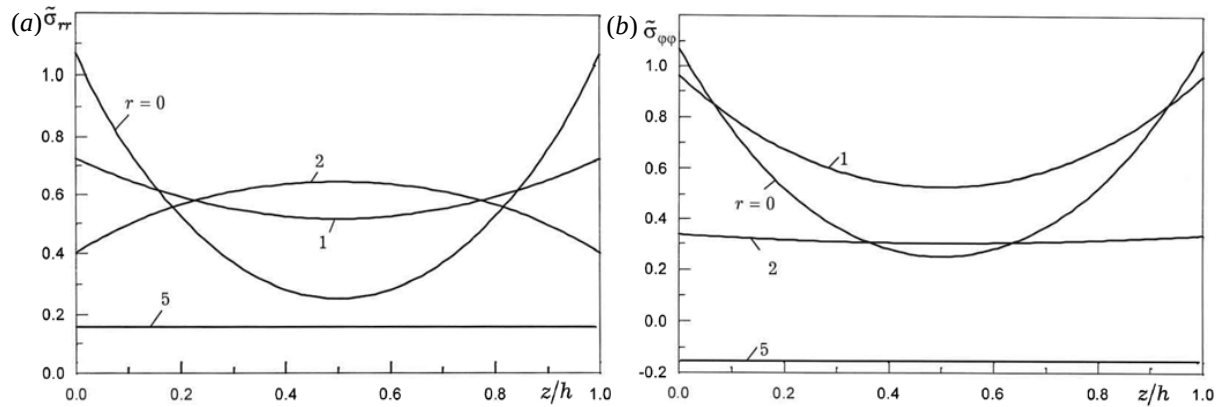


Рисунок 3. Залежність залишкових радіальних (a) та колових (b) напружень від нормалізованої координати товщини вздовж нормалі до поверхні пластини для різних значень радіальної координати.

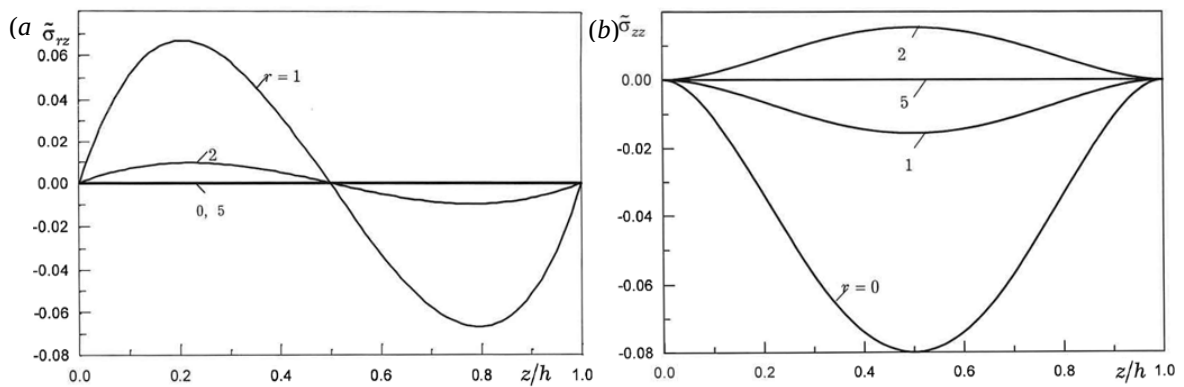


Рисунок 4. Залежність залишкових дотичних (a) та нормальних напружень (b) від нормалізованої координати товщини вздовж нормалі до поверхні пластини для різних значень радіальної координати.

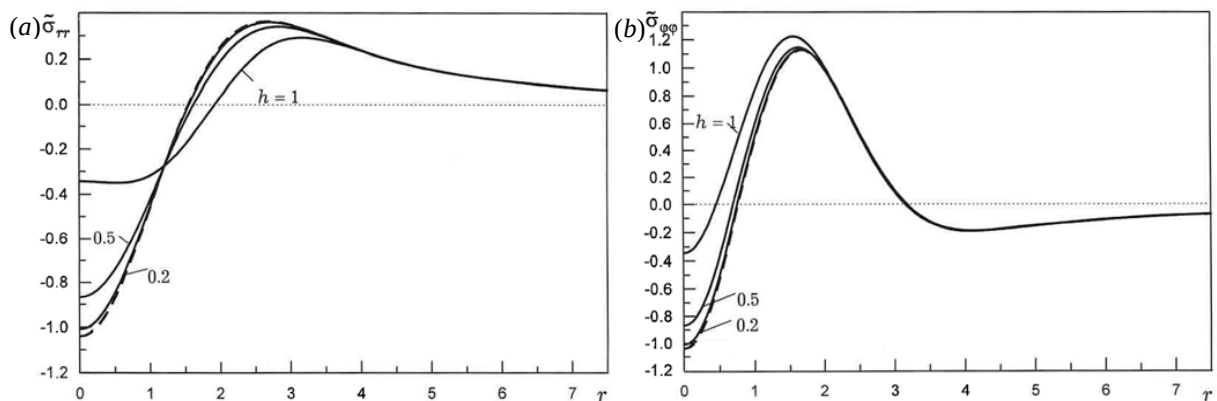


Рисунок 5. Залежність залишкових радіальних (a) і колових (b) напружень на поверхні пластини від радіальної координати для різних значень товщини пластини при $\omega = 5/3$.

Зі збільшенням товщини об'ємний характер розподілу залишкової напруги стає більш помітним (Рис. 4). У цьому випадку нормальні напруження досягають максимальних значень в середній площині пластини (Рис. 4b), тоді як дотичні напруження максимальні на відстанях приблизно 0.2 товщини пластини від її поверхонь (Рис. 4a). Ці результати подібні до отриманих раніше за допомогою теорії тривимірної пластини з використанням додаткових припущень щодо розподілу напружень [1] при аналізі розподілу залишкових напружень поблизу зварного шва, а також до чисельних та експериментальних результатів [2].

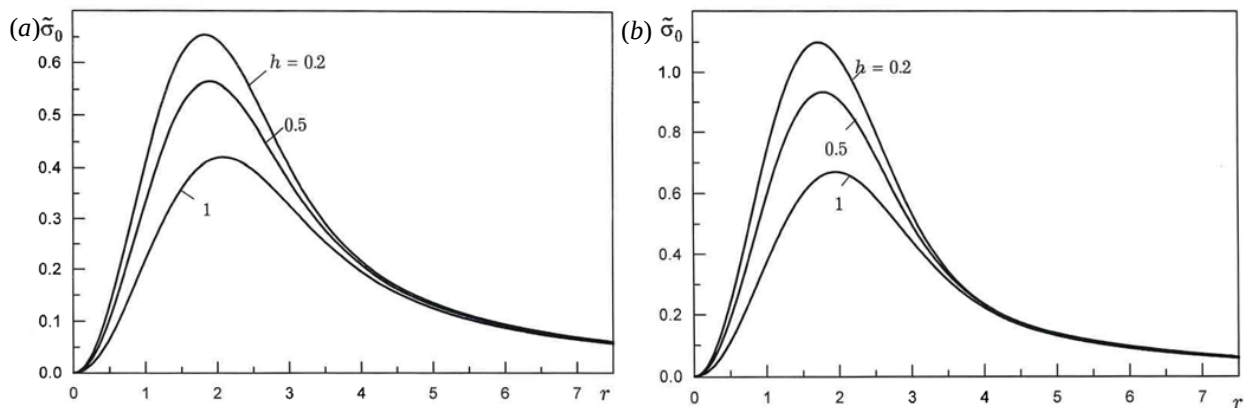


Рисунок 6. Розподіл усередненої по товщині різниці головних напружень уздовж радіальної координати для різних значень товщини пластини при $\omega = 2/3$ (a) та $\omega = 5/3$ (b).

Отримані результати підтверджують локалізований характер об'ємного напруженого стану поблизу зони зварювання та поступовий перехід до плоского напруженого стану на віддаленні від неї. Встановлено, що зі збільшенням товщини пластини суттєво зростає вплив просторового розподілу напружень, зокрема нормальних і дотичних компонент, які не враховуються у межах класичної плоскої моделі. Показано, що максимальні нормальні напруження локалізуються у серединній площині пластини, тоді як максимуми дотичних напружень зміщуються до поверхневих шарів матеріалу. Запропонований аналітичний підхід дозволяє виконувати оцінювання залишкових напружень без застосування складних чисельних методів, забезпечуючи при цьому достатню точність для інженерних розрахунків. Отримані залежності можуть бути використані для прогнозування напружено-деформованого стану зварних конструкцій, оптимізації режимів зварювання, вибору геометричних параметрів елементів та підвищення довговічності і надійності конструкцій, що працюють в умовах циклічних і термосилових навантажень.

Перелік посилань

1. Недосека А. Я. Основи розрахунку та діагностики зварних конструкцій. Київ : ІНДПРОМ, 2008. 816 с.
2. Лобанов Л. М., Махненко В. І., Труфяков В. І. Зварні будівельні конструкції. Київ : Наукова думка, 2005. 416 с.
3. Rosenthal D. The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments // Transactions of the ASME. 1946. Vol. 68. P. 849–866.
4. Шелестовський Б., Габрусев Г. Контактна взаємодія штампа з шаром, що містить залишкові деформації, спричинені кільцевим зварним швом // машинознавство. 2003. № 2. С. 9–12.
5. Habrusiev H. The effect of initial deformations of the thick plate on its contact interaction with the ring punch / Hryhorii Habrusiev, Iryna Habrusieva, Boris Shelestovs'kyi // Scientific Journal of TNTU. — Tern. : TNTU, 2018. — Vol 90. — No 2. — P. 50–59.