

5. ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ГАЛУЗІ

УДК 631.33.024.2

*Проф. В.М. Палаш¹, канд. техн. наук; доц. І.Б. Назар¹,
канд. техн. наук; доц. В.О. Дубовик², канд. техн. наук*

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ У ТОНКОЛИСТОВИХ ДИСКОВИХ ДЕТАЛЯХ З КОЛОВИМ ЗВАРНИМ ШВОМ

Запропоновано математичну модель для визначення компонентів напруженого стану у зварних з'єднаннях дискових деталей з коловим швом. Метод базується на розв'язуванні обернених задач механіки деформованих тіл із власними напруженнями та використанні доступної експериментальної інформації.

Ключові слова: Напруження, математична модель, зварне з'єднання, дискова деталь.

Prof. V.M. Palash¹; assoc. prof. I.B. Nazar¹; assoc. prof. V.O. Dubobik²

Mathematical model for the determination of the tense and deformed state in the thin-sheet disk details with the circular stitch

The work offers a mathematical model for the determination of components of the tense state in the welded connections of disk details with a circular stitch. The method is based on the resolution of reverse tasks of the mechanics of deformed bodies with own tensions and on the use of accessible experimental information.

Keywords: Tension, mathematical model, welded connection, disk detail.

Вступ. Серед широкої номенклатури деталей машинобудівної та аграрної промисловості України значну частину становлять деталі дискового типу (диски розпилювачів, диски турбомашин, муфти, кулачки, різальні леза, диски сільськогосподарських машин, фрези тощо). Зазвичай вони експлуатуються при досить жорстких робочих навантаженнях (тертя, удари, циклічні навантаження тощо) і потребують ремонту чи відновлення своїх початкових розмірів. Серед поширених способів відновлення вихідних геометричних параметрів дискових деталей чільне місце обіймає зварювання. Фактором, який характеризує працездатність відновленого зварюванням дискового елемента, є залишковий напружено-деформований стан в околі зварного, у даному випадку колового, шва.

Постановка проблеми. Особливістю колового з'єднання є наявність замкнутого шва. У такому випадку деформації поперечного укорочення колового шва не можуть бути компенсовані переміщенням зварювальних деталей, і тому зазвичай, переважають поздовжні деформації. Внаслідок, усадка при утворенні такого колового з'єднання супроводжується виникненням додаткових напружень першого роду. Сукупна дія залишкових напружень першого та другого роду, що виникають при утворенні колового з'єднання у дискових дета-

¹ НУ "Львівська політехніка" (NU "L'viv's'ka Politekhnikha")

² Кіровоградський національний технічний університет (The Kirovograd National Technical University)

лях, має визначальний вплив на ресурс його роботи. Власне через це, знання напружено-деформованого стану зварного з'єднання дискової деталі з коловим швом є дуже важливим елементом комплексної оцінки міцності та ресурсу.

Постановка задачі. Великий інтерес представляє застосування методів математичного моделювання для визначення розподілу та концентрації напружень у конструкціях, які при зварюванні з'єднуються коловими швами. Важливість таких розрахунків диктується ще й тим, що залишкові зварювальні напруження, які носять місцевий характер, досягають межі плинності матеріалу і переважно є значно більшими, за діючі у конструкції робочі напруження. Для достовірної оцінки напруженого стану використовують також експериментальні методи (руйнівні та неруйнівні) [1]. Неруйнівні фізичні методи не дають можливості визначити повну картину розподілу напружень, а руйнівні, через їх високу вартість, важко зреалізувати. Задача ускладнюється, якщо маємо дискові деталі зі сталей, які схильні до структурних перетворень, серед них – відновлювані диски сошників зернових сівалок (рис. 1), виготовлені зі сталі 65Г [2]. Оскільки на даний час відсутній прямий неруйнівний метод визначення напружень у коловому з'єднанні при зварюванні сталей, схильних до структурних перетворень, для його визначення запропоновано експериментально-розрахунковий метод [3, 4], який у даній роботі адаптований до фізико-механічних властивостей та конструктивних елементів тонколистових дискових деталей.

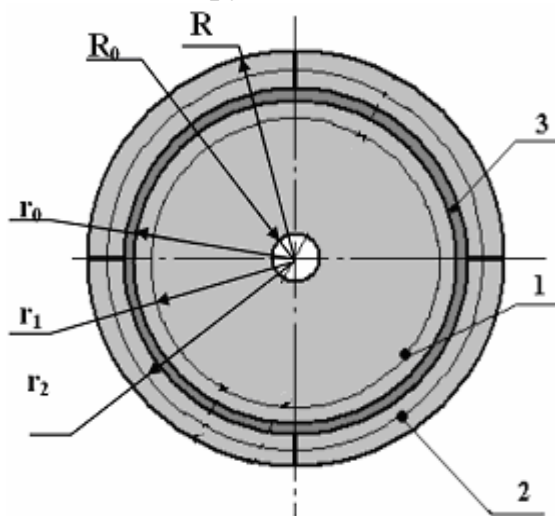


*Рис. 1. Геометричні розміри диска:
1 – базова деталь, 2 – сектор
ремонтного кільця, 3 – зварний шов*

Виклад основного матеріалу. Математична модель методу визначення величини та характеру розподілу залишкових напружень у зварному з'єднанні коловим швом з урахуванням краєвих умов, базується на використанні рівнянь теорії тонких пластин з власними напруженнями, а також інформації, отриманої за допомогою експериментальних методів – методу координатних сіток, магнітопружної тензометрії, ультразвукової дефектоскопії тощо [5, 7].

Розглянемо випадок накладання зварного шва на круглу тонкостінну деталь з метою отримання стикового зварного з'єднання. Вважаючи, що напружений стан у коловому зварному шві диска є плоский, попередньо приймаємо умову осової симетрії, і головними напрямками у випадку формування колового шва будуть радіальний та коловий. Відповідно головними компонентами тензора напружень будуть дві компоненти σ_{rr} та $\sigma_{\theta\theta}$, а тензора деформацій – компоненти ε_{rr} та $\varepsilon_{\theta\theta}$. Тоді, записавши умову рівноваги у вигляді [7]:

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{d}{dr}(r\sigma_{rr}), \quad (1)$$

та враховуючи геометричні співвідношення

$$\varepsilon_{rr} = \frac{dU}{dr}; \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{U}{r}; \quad \varepsilon_{rr} = \frac{d}{dr}(r\varepsilon_{\theta\theta}); \quad (2)$$

де: r – координата в радіальному напрямку; $U(r)$ – радіальне переміщення, згідно з методом умовних пластичних деформацій [5], отримаємо

$$\varepsilon_{rr} = \frac{1}{E}(\sigma_{rr} - \mu\sigma_{\theta\theta}) + \varepsilon_{rr}^0, \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{E}(\sigma_{\theta\theta} - \mu\sigma_{rr}) + \varepsilon_{\theta\theta}^0, \quad (3)$$

де: ε_{rr}^0 , $\varepsilon_{\theta\theta}^0$ – умовні пластичні деформації, що зумовлюють залишкові напруження; μ – коефіцієнт Пуасона; E – модуль Юнга.

Значення деформацій ε_{rr}^0 і $\varepsilon_{\theta\theta}^0$ після побудови відповідних розв'язків визначаються із умов узгодження між відповідними та розрахунковими експериментальними даними. На основі співвідношень (2) і (3) отримуємо:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= \frac{E}{1-\mu^2} \left[\frac{dU}{dr} + \mu \cdot \frac{U}{r} - (\varepsilon_{rr}^0 + \mu \cdot \varepsilon_{\theta\theta}^0) \right], \\ \sigma_{\theta\theta} &= \frac{E}{1-\mu^2} \left[\frac{U}{r} + \mu \cdot \frac{dU}{dr} - (\varepsilon_{\theta\theta}^0 + \mu \cdot \varepsilon_{rr}^0) \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Підставивши співвідношення (4) в умови рівноваги (1), отримаємо ключове рівняння для визначення переміщень $U(r)$

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr}(r \cdot U) \right] = \frac{d}{dr} (\varepsilon_{rr}^0 + \mu \cdot \varepsilon_{\theta\theta}^0) + \frac{1-\mu}{r} \cdot (\varepsilon_{rr}^0 - \varepsilon_{\theta\theta}^0). \quad (5)$$

Розглянемо задачу про визначення залишкових напружень у відновленому шляхом приварювання ремонтних кілець диску із центральним технологічним отвором радіусом R_0 , та зовнішнім радіусом R (рис. 1). Тут r_0 – вісь зварного шва, r_1 , r_2 – межі зони пластичних деформацій. Загальний розв'язок рівняння (5) у цьому випадку можна зобразити у вигляді

$$U(r) = \frac{1+\mu}{2r} \int_{R_0}^r [\varepsilon_{rr}^0(\xi) + \varepsilon_{\theta\theta}^0(\xi)] \xi d\xi + \frac{r(1-\mu)}{2} \int_r^R \frac{\varepsilon_{\theta\theta}^0(\xi) - \varepsilon_{rr}^0(\xi)}{\xi} d\xi + C_1 r + \frac{C_2}{r}. \quad (6)$$

де C_1 і C_2 – сталі інтегрування, які визначаються із граничних умов.

Якщо внутрішній отвір і зовнішній край диска вільні від напружень, то повинні виконуватись умови:

$$\sigma_{rr}(r) = 0, r = R_0, \quad \sigma_{rr}(r) = 0, r = R. \quad (7)$$

Підставивши тепер вираз (6) у співвідношення (4) та виконавши певні математичні перетворення, отримуємо вирази для розрахунку залишкових напружень у будь-якій точці тонколистової дискової деталі із технологічним отвором – R_0 та обмеженим радіусом R .

$$\sigma_{rr}(r) = \frac{E}{2} \left[\int_r^R \frac{\varepsilon_{\theta\theta}^0(\xi) - \varepsilon_{rr}^0(\xi)}{\xi} d\xi - \frac{1}{r^2} \int_{R_0}^r [\varepsilon_{rr}^0(\xi) + \varepsilon_{\theta\theta}^0(\xi)] \xi d\xi + \frac{2}{1-\mu} \cdot C_1 - \frac{2}{(1+\mu) \cdot r^2} \cdot C_2 \right]$$

$$\sigma_{\theta\theta}(r) = \frac{E}{2} \left[\int_r^R \frac{\varepsilon_{\theta\theta}^0(\xi) - \varepsilon_{rr}^0(\xi)}{\xi} d\xi + \frac{1}{r^2} \int_{R_0}^r [\varepsilon_{rr}^0(\xi) + \varepsilon_{\theta\theta}^0(\xi)] \xi d\xi - 2\varepsilon_{\theta\theta}^0(r) + \right.$$

$$\left. + \frac{2}{1-\mu} \cdot C_1 + \frac{2}{(1+\mu) \cdot r^2} \right]. \quad (8)$$

Ввівши позначення

$$C = \frac{2}{1-\mu} \cdot C_1, \quad B = \frac{2}{1+\mu} \cdot C_2 \quad (9)$$

і підставивши вирази (8) в (7), отримаємо:

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{\varepsilon_{\theta\theta}^0(\xi) - \varepsilon_{rr}^0(\xi)}{\xi} d\xi - C - \frac{B}{R_0^2} = 0, \quad \text{при } r = R_0,$$

$$-\frac{1}{R^2} \int_{r_1}^{r_2} (\varepsilon_{\theta\theta}^0(\xi) + \varepsilon_{rr}^0(\xi)) \xi d\xi - C - \frac{B}{R^2} = 0, \quad \text{при } r = R. \quad (10)$$

Розв'язавши систему, отримаємо вирази для визначення шуканих значень B і C

$$B = \frac{R_0^2 R^2}{R^2 - R_0^2} \cdot (\hat{\sigma}_1 - \hat{\sigma}_2), \quad C = \frac{R^2}{R^2 - R_0^2} \cdot (\hat{\sigma}_1 - \hat{\sigma}_2) - \hat{\sigma}_1, \quad (11)$$

$$\text{де } \hat{\sigma}_1 = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\varepsilon_{\theta\theta}^0(\xi) - \varepsilon_{rr}^0(\xi)}{\xi} d\xi \quad \text{і} \quad \hat{\sigma}_2 = -\frac{1}{R^2} \int_{r_1}^{r_2} (\varepsilon_{\theta\theta}^0(\xi) + \varepsilon_{rr}^0(\xi)) \xi d\xi.$$

Якщо розподіл деформації e_{rr}^0 і $e_{\theta\theta}^0$ описати виразами ..., то для обчислення залишкових зварювальних напружень, залежно від ділянок диска, зображаємо наступними співвідношеннями:

- ділянка $R_0 \leq r \leq r_1$

$$\sigma_{rr}(r) = -\frac{E\varepsilon_0^*}{2} \left[(1-k) \int_{r_1}^{r_2} \frac{\varphi(\xi)}{\xi} d\xi + \hat{C} - \frac{\hat{B}}{r^2} \right],$$

$$\sigma_{\theta\theta}(r) = -\frac{E\varepsilon_0^*}{2} \left[(1-k) \int_{r_1}^{r_2} \frac{\varphi(\xi)}{\xi} d\xi + \hat{C} + \frac{\hat{B}}{r^2} \right], \quad (12)$$

- ділянка $r_1 \leq r \leq r_2$

$$\sigma_{rr}(r) = -\frac{E\varepsilon_0^*}{2} \left[(1-k) \int_r^{r_2} \frac{\varphi(\xi)}{\xi} d\xi - \frac{1+k}{r^2} \int_{r_1}^r \varphi(\xi) \xi d\xi + \hat{C} - \frac{\hat{B}}{r^2} \right],$$

$$\sigma_{\theta\theta}(r) = -\frac{E\varepsilon_0^*}{2} \left[(1-k) \int_r^{r_2} \frac{\varphi(\xi)}{\xi} d\xi + \frac{1+k}{r^2} \int_{r_1}^r \varphi(\xi) \xi d\xi - 2\varphi(r) + \hat{C} + \frac{\hat{B}}{r^2} \right], \quad (13)$$

- третя ділянка $r_2 \leq r \leq R$

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}(r) &= -\frac{E\varepsilon_0^*}{2} \left[-\frac{1+k}{r^2} \int_{r_1}^r \varphi(\xi) \xi d\xi + \hat{C} - \frac{\hat{B}}{r^2} \right] \\ \sigma_{\theta\theta}(r) &= -\frac{E\varepsilon_0^*}{2} \left[\frac{1+k}{r^2} \int_{r_1}^r \varphi(\xi) \xi d\xi + \hat{C} + \frac{\hat{B}}{r^2} \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

$$\text{Тут } \hat{C} = \frac{C}{\varepsilon_0^*}, \quad \hat{B} = \frac{B}{\varepsilon_0^*}.$$

Для знаходження невідомих параметрів поля залишкових пластичних деформацій (ε_0^* , r_1 , r_2 , k) використовується експериментальна інформація про величину компонентів поля напружень і будується спеціальний функціонал, мінімізація якого забезпечує мінімальне відхилення теоретично обчислених від експериментальних характеристик полів напружень [6]. Після знаходження параметрів поля можна обчислити напруження у довільній точці диска.

Висновок. Таким чином, отримано формули для експериментально – розрахункового визначення розподілу напружень у зварному стиковому з'єднанні з коловим швом дискової деталі, обмеженої радіусом R . З метою адаптації його до визначення залишкових напружень у диску, необхідно побудувати та охарактеризувати функцію $\varphi(r)$, що описує поле пластичних деформацій при зварюванні сталей схильних до гартування (відновлений диск із сталі 65Г) швом із структурою аустеніту. Ця частина роботи буде представлена у наступних наукових працях.

Література

1. Прохоров Н.Н. Технологическая прочность сварных швов в процессе кристаллизации. – М.: Металлургия, 1977. – 288 с.
2. Назар І.Б. Технологічне забезпечення відновлення дисків сошників зернових сівалок: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11/ Тернопільський ДТУ ім. І. Пулюя. – Тернопіль: ТДТУ, 2005. – 21 с.
3. Подстригач Я.С., Осадчук В.А., Марголин А.М., Остаточные напряжения, длительная прочность и надежность стеклоконструкций. – К.: Наук. думка, 1991. – 296 с.
4. Осадчук В.А., Кушнір Р.М., Прокопович І.Б., Чекурін В.Ф. Розв'язувальні рівняння механіки тіл з власними напруженнями// Доп. НАН України. – 1993, № 2. – С. 60-64.
5. Экспериментальные методы исследования деформации и напряжений. Справочное пособие/ Касаткин Б.С., Кедрин А.Б., Лобанов Х.М. и др. – К.: Наук. думка, 1981. – 584 с.
6. Осадчук В., Большаков М., Палаш В. Неруйнівний метод визначення залишкових напружень у зварних оболонках// Машинознавство, 1997. – С. 5-9.
7. Сварные строительные конструкции: в 3-х т./ Под ред. Л.М. Лобанова. – К.: Наук. думка, 1993. – Т.1: Основы проектирования конструкций/ Л.М. Лобанов, В.И. Махненко, В.И. Труфяков и др. – 416 с.