PHYSICS OF STRENGTH AND PLASTICITY

PACS numbers: 62.20.F-, 62.20.mt, 81.20.Vj, 81.40.Jj, 81.70.Bt

Про вплив наплавлення на міцність тіл з поверхневими дефектами

І. П. Шацький, В. В. Перепічка, Л. Я. Роп'як*

*Івано-Франківський відділ Інституту прикладних проблем механіки
і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України,
вул. Микитинецька, 3,
76002 Івано-Франківськ, Україна*

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15,
76019 Івано-Франківськ, Україна*

Розвинуто інженерну методику розрахунку утримувальної здатності твердих тіл з поверхневими тріщиноподібними дефектами, залікованими шляхом наплавлення неконтрастного шару. У аналітичній формі встановлено кількісні залежності ефективності наплавлення від товщини нанесеного шару, від глибини заповнення тріщини та від тріщинотривкості використовуваного матеріалу.

Ключові слова: поверхнева тріщина, наплавлення, гранична рівновага.

The engineering method of calculating the retention capacity of solids with superficial crack-like defects recovered by surfacing non-contrast layer is developed. In the analytical form, quantitative dependences of the surfacing efficiency on the thickness of the renovation layer, on the depth of feeling of the crack and on crack growth resistance of the using material are determined.

Corresponding author: Lubomyr Yaroslavovych Ropyak
E-mail: l_ropjak@ukr.net

*Ivano-Frankivsk Department of the Pidstryhach Institute for Applied Problems
of Mechanics and Mathematics, N.A.S. of Ukraine,
3 Mykitynets'ka Str., UA-76002 Ivano-Frankivsk, Ukraine
*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,
15 Karpatska Str., UA-76019 Ivano-Frankivsk, Ukraine*

Citation: I. P. Shatskyi, V. V. Perepichka, and L. Ya. Ropyak, On the Influence of Facing on Strength of Solids with Surface Defects, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 1: 69–76 (2020) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.42.01.0069](https://doi.org/10.15407/mfint.42.01.0069).

Key words: superficial crack, surfacing, limiting equilibrium.

Развита инженерная методика расчёта несущей способности твёрдых тел с поверхностными трещиноподобными дефектами, залеченными путём наплавки неконтрастного слоя. В аналитической форме установлены количественные зависимости эффективности наплавки от толщины нанесённого слоя, от глубины заполнения трещины и от трещиностойкости используемого материала.

Ключевые слова: поверхностная трещина, наплавка, предельное равновесие.

(Отримано 2 березня 2019 р.)

1. ВСТУП

Сучасні технології заліковування дефектів є продуктивним засобом подовження ресурсу конструкцій тривалого вжитку. Зокрема, операції наплавлення, напилення, осадження застосовують у різних галузях промисловості як для зміцнення нових деталей машин і конструкцій під час їхнього виготовлення, так і для відновлення зношених робочих поверхонь із набутими дефектами [1–3]. Однак у випадках часткового відновлення суцільності пошкоджених тіл залишається актуальною проблема оцінювання значної концентрації напружень поблизу дефектів і визначення граничної міцності композицій, отриманих у результаті відновлення. Про методи розрахунку залишкового ресурсу деталей із внутрішніми дефектами, повністю залікованими за ін'єкційними технологіями, йдеться, наприклад, у працях [4, 5]. Метою цієї роботи є розробка інженерної методики для оцінювання ефективності відновлювання тіл з поверхневими дефектами, яке здійснюють шляхом нанесення на деталь додаткового шару з подібними до основного матеріалу пружними властивостями. У ході дослідження розвинуто запропонований раніше підхід до оцінки граничної рівноваги тіл з тріщинами, частково заповненими неконтрастним матеріалом [6].

2. ТЕОРЕТИЧНА МЕТОДИКА

У межах припущень плоскої задачі теорії пружності розглянемо півплощину з крайовою тріщиною нормального відриву завдовжки l_0 як початкову конфігурацію (рис. 1, а). Тріщину в деформованому тілі розуміють як поверхню розриву переміщень. У результаті наплавлення поверхневого шару отримуємо нову конфігурацію (рис. 1, б). Межа півплощини зміщується на висоту H , і внаслідок проникнення розплавленого матеріалу відбувається часткове заліковування тріщини на глибину h . Вважаємо, що пружні властивос-

ті матеріалів наплавлення та основного тіла не відрізняються між собою, однак питома поверхнева енергія γ_*^h або тріщинотривкість K_{1c}^h матеріалу на залікованій ділянці на загал є іншими, ніж відповідні величини γ_*^0 або K_{1c}^0 для основного матеріалу.

Тоді за розрахункову модель наплавленого дефектного тіла приймаємо півплощину із внутрішньою тріщиною завдовжки $2l$, розташовану на відрізку $[a, b]$ (рис. 1, *в*). Очевидними є співвідношення: $2l = l_0 - h$, $a = H + h$, $b = H + l_0$.

Введемо безрозмірні величини: $\psi = h/l_0 \in [0, 1)$ — міра заповнення тріщини, $t = H/l_0 \in [0, \infty)$ — ступінь наплавлення, $\eta = (\gamma_*^h/\gamma_*^0)^{0.5} = K_{1c}^h/K_{1c}^0$ — параметр якості заліковування.

Вирази для координат вершин новоутвореної внутрішньої тріщини запишуться так: $a = l_0(t + \psi)$, $b = l_0(t + 1)$. Розташування внутрішньої тріщини щодо краю півплощини будемо характеризувати безрозмірним параметром, який є відношенням півдовжини розрізу до глибини залягання його центра:

$$\lambda = \frac{(b-a)/2}{(b+a)/2} = \frac{1-\psi}{1+\psi+2t} \in [0, 1).$$

Чисельник цього виразу відповідає за укорочення тріщини, знаменник — за збільшення відстані від краю.

Шукану ефективність наплавлення розглядаємо як відношення граничних навантажень для конфігурацій, зображених на рис. 1, *в* та рис. 1, *а*:

$$\chi(\psi, t, \eta) = p_*^h/p_*^0.$$

Для розв'язання задачі скористаємось результатами для коефіцієнтів інтенсивності напружень у півплощині з розрізом [7–10] і ви-

Рис. 1. Півплощина з тріщиноподібним дефектом: *а* — початкова конфігурація, *б* — конфігурація з наплавленням, *в* — розрахункова модель.

Fig. 1. Half-plane with a crack-like defect: *a*—initial configuration, *б*—configuration with surfacing, *в*—calculation model.

значимо граничні навантаження для розглянутих конфігурацій. У початковій конфігурації

$$k_1 = 1,1215 p \sqrt{\pi l_0} .$$

За критерієм Гріффітса

$$k_1 = K_{1c}^0 = \sqrt{2E\gamma_*^0}$$

отримуємо граничне навантаження для півплощини з крайовою тріщиною:

$$p_*^0 = \frac{1}{1,1215} \frac{K_{1c}^0}{\sqrt{\pi l_0}} = \frac{1}{1,1215} \sqrt{\frac{2E\gamma_*^0}{\pi l_0}} . \quad (1)$$

Тут E — модуль Юнга матеріалу.

Для конфігурації з наплавленням:

$$k_1(a) = pF^-(\lambda)\sqrt{\pi l} ,$$

$$k_1(b) = pF^+(\lambda)\sqrt{\pi l} ,$$

де $F^\pm(\lambda)$ — відомі функції [9, 10], їхні графіки побудовано на рис. 2 за результатами числового розв'язання інтегрального рівняння за-

Рис. 2. Вплив краю на коефіцієнти інтенсивності напружень.

Fig. 2. Influence of the edge on the stress intensity factors.

дачі для півплощини з розрізом.

Для малих λ має місце апроксимація [7, 10]:

$$F^{\pm}(\lambda) = 1 + 0,25\lambda^2 \mp 0,125\lambda^3 + 0,1328\lambda^4 \mp 0,0781\lambda^5 + \\ + 0,0967\lambda^6 \mp 0,0671\lambda^7 + O(\lambda^8).$$

Для $\lambda \rightarrow 1$ [11, 12]:

$$F^{-}(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon} \ln \varepsilon} \left(1 + \frac{1}{\ln \varepsilon} + O\left(\frac{1}{\ln^2 \varepsilon}\right) \right), \\ F^{+}(\lambda) = 1 + \frac{1}{\ln \varepsilon} + O\left(\frac{1}{\ln^2 \varepsilon}\right),$$

де $\varepsilon = (1 - \lambda)/(1 + \lambda)$.

Граничне навантаження у випадку наплавлення буде:

$$p_*^h = \min \left\{ \frac{K_{1c}^h}{F^{-}(\lambda)\sqrt{\pi l}}, \frac{K_{1c}^0}{F^{+}(\lambda)\sqrt{\pi l}} \right\} \quad (2)$$

Порівнюючи вирази (1) і (2), у кінцевому підсумку для ефективності наплавлення дістанемо формулу:

$$\chi(\eta, \psi, t) = 1,1215 \sqrt{\frac{2}{1 - \psi}} \min \left\{ \frac{\eta}{F^{-}\left(\frac{1 - \psi}{1 + \psi + 2t}\right)}, \frac{1}{F^{+}\left(\frac{1 - \psi}{1 + \psi + 2t}\right)} \right\}. \quad (3)$$

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Результати підрахунку ефективності заліковування за формулою (3) для різних значень параметра η подано на рис. 3 та 4. До уваги слід брати тільки значення $\chi > 1$, за яких досягається позитивний ефект підкріплення.

Видно, що зростання глибини заліковування тріщини (ψ) та товщини наплавленого шару (t) призводить до підвищення утримувальної здатності дефектного тіла тим більше, що більше тріщинотривкість матеріалу наплавлення. Однак, при $t = H/l_0 > 0,5$ подальше нарощування товщини наплавлення уже не дає відчутних змін параметра χ .

При $\eta \leq 1$ для усіх ψ та t небезпечною є ближча до краю вершина тріщини:

$$\min \left\{ \frac{\eta}{F^{-}(\lambda)}, \frac{1}{F^{+}(\lambda)} \right\} = \frac{\eta}{F^{-}(\lambda)},$$

Рис. 3. Вплив глибини заліковування тріщини на утримувальну здатність тіла: 1 — $t = 0$; 2 — $t = 0,25$; 3 — $t = 0,5$; 4 — $t = 1$; 5 — $t = 10$.

Fig. 3. Influence of the depth of the crack recapture on the body's bearing capacity: 1 — $t = 0$; 2 — $t = 0.25$; 3 — $t = 0.5$; 4 — $t = 1$; 5 — $t = 10$.

натомість при $\eta > 1$ для невеликих ψ та t під час наплавлення міцнішим матеріалом небезпечною стає віддалена від краю вершина:

$$\min \left\{ \frac{\eta}{F^-(\lambda)}, \frac{1}{F^+(\lambda)} \right\} = \frac{1}{F^+(\lambda)}.$$

За умови

$$\frac{\eta}{F^-(\lambda)} = \frac{1}{F^+(\lambda)},$$

Рис. 4. Вплив товщини наплавлення на утримувальну здатність тіла з тріщиною: 1 — $\psi = 0$; 2 — $\psi = 0,1$; 3 — $\psi = 0,3$; 4 — $\psi = 0,5$; 5 — $\psi = 0,7$.

Fig. 4. Effect of the thickness of surfacing on the retaining ability of the body with crack: 1 — $\psi = 0$; 2 — $\psi = 0.1$; 3 — $\psi = 0.3$; 4 — $\psi = 0.5$; 5 — $\psi = 0.7$.

яка реалізується при $\eta > 1$ для малих ψ та t , відбувається зміна механізму руйнування (перехід з одної вершини тріщини на другу). Про це, зокрема, свідчать злами кривих I на рис. 3, 4.

4. ВИСНОВКИ

У роботі розвинуто модель заліковування тріщини неконтрастним матеріалом стосовно задачі дослідження впливу наплавлення на міцність тіл з поверхневими тріщиноподібними дефектами. В аналітичній формі встановлено кількісні оцінки ефективності наплавлення, залежної від трьох параметрів: ступеня наплавлення, глибини заповнення тріщини, тріщиностійкості напавленого матеріалу. Показано, що збільшення величин кожного з цих трьох чинників призводить до підвищення утримувальної здатності реставрованої деталі.

Схожі задачі про вплив торцевого наплавлення на граничну рівновагу пластин з крайовими контактними тріщинами за умов згину чи згину з розтягом можуть бути розглянуті на підставі моделі контакту берегів тріщини вздовж лінії [13–16] та розв’язків задач згину напівнескінчених пластин з дефектами [17–20].

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. А. Хасуи, О. Моригаки, *Наплавка и напыление* (Москва: Машиностроение: 1985).
2. А. М. Сидоров, *Восстановление деталей машин напылением и наплавкой* (Москва: Машиностроение: 1987).
3. П. А. Тополянский, А. П. Тополянский, *Арматуростроение*, **73**, № 4: 79 (2011).
4. V. V. Panasyuk, V. I. Marukha, and V. P. Sylovanyuk, *Injection Technologies for the Repair of Damaged Concrete Structures* (New York, USA: Springer: 2014).
5. I. Shatskyi and I. Kurtash, *Procedia Structural Integrity*, **13**: 1482 (2018).
6. I. P. Shats'kyi, *Mater. Sci.*, **51**, Iss. 3: 322 (2015).
7. M. Isida, *J. Appl. Mech.*, **33**, No. 3: 674 (1966).
8. M. P. Savruk and A. P. Datsyshin, *Soviet Appl. Mech.*, **10**, Iss. 7: 755 (1974).
9. М. П. Саврук, *Двумерные задачи упругости для тел с трещинами* (Киев: Наукова думка: 1981).
10. М. П. Саврук, *Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами* (Киев: Наукова думка: 1988), т. 2.
11. C. Atkinson, *Int. J. Eng. Sci.*, **13**, Iss. 5: 489 (1975).
12. C. Atkinson and H. Javaherian, *J. Inst. Math. Appl.*, **26**, Iss. 3: 235 (1980).
13. I. P. Shatskii, *Soviet Mater. Sci.*, **25**, Iss. 2: 160 (1989).
14. M. J. Young and C. T. Sun, *Int. J. Fracture*, **55**, Iss. 1: 81 (1992).
15. I. P. Shatskii, *J. Math. Sci.*, **103**, Iss. 3: 357 (2001).
16. A. M. Khudnev and V. A. Kovtunencko, *Analysis of Cracks in Solids* (South-

ampton-Boston: WIT Press: 2000).

17. P. Shats'kyi and V. V. Perepichka, *Soviet Mater. Sci.*, **28**, Iss. 2: 154 (1993).
18. V. V. Perepichka, *J. Math. Sci.*, **90**, Iss. 2: 1978 (1998).
19. V. V. Perepichka and I. P. Shats'kyi, *J. Math. Sci.*, **109**, Iss. 1: 1290 (2002).
20. I. P. Shats'kyi and V. V. Perepichka, *Mater. Sci.*, **40**, Iss. 2: 240 (2004).

REFERENCES

1. A. Hasui and O. Morigaki, *Naplavka i Napylenie* [Surfacing and Spraying] (Moscow: Mashinostroenie: 1985) (in Russian).
2. A. M. Sidorov, *Vosstanovleniye Detaley Mashin Napyleniem i Naplavykoy* [Restoration of Machine Parts by Spraying and Surfacing] (Moscow: Mashinostroyeniye: 1987) (in Russian).
3. P. A. Topolyanskiy and A. P. Topolyanskiy, *Armaturostroenie*, **73**, No. 4: 79 (2011) (in Russian).
4. V. V. Panasyuk, V. I. Marukha, and V. P. Sylovanyuk, *Injection Technologies for the Repair of Damaged Concrete Structures* (New York, USA: Springer: 2014).
5. I. Shatskyi and I. Kurtash, *Procedia Structural Integrity*, **13**: 1482 (2018).
6. I. P. Shats'kyi, *Mater. Sci.*, **51**, Iss. 3: 322 (2015).
7. M. Isida, *J. Appl. Mech.*, **33**, No. 3: 674 (1966).
8. M. P. Savruk and A. P. Datsyshin, *Soviet Appl. Mech.*, **10**, Iss. 7: 755 (1974).
9. M. P. Savruk, *Dvumernyye Zadachi Uprugosti Dlya Tel s Treshchinami* [Twodimensional Problems of Elasticity for Cracked Bodies] (Kiev: Naukova Dumka: 1981) (in Russian).
10. M. P. Savruk, *Koeffitsienty Intensivnosti Napryazheniy v Telakh s Treshchinami* [Stress Intensity Factors in Cracked Bodies] (Kiev: Naukova Dumka: 1988), vol. 2 (in Russian).
11. C. Atkinson, *Int. J. Eng. Sci.*, **13**, Iss. 5: 489 (1975).
12. C. Atkinson and H. Javaherian, *J. Inst. Math. Appl.*, **26**, Iss. 3: 235 (1980).
13. I. P. Shatskii, *Soviet Mater. Sci.*, **25**, Iss. 2: 160 (1989).
14. M. J. Young and C. T. Sun, *Int. J. Fracture*, **55**, Iss. 1: 81 (1992).
15. I. P. Shatskii, *J. Math. Sci.*, **103**, Iss. 3: 357 (2001).
16. A. M. Khludnev and V. A. Kovtunenko, *Analysis of Cracks in Solids* (Southampton-Boston: WIT Press: 2000).
17. P. Shats'kyi and V. V. Perepichka, *Soviet Mater. Sci.*, **28**, Iss. 2: 154 (1993).
18. V. V. Perepichka, *J. Math. Sci.*, **90**, Iss. 2: 1978 (1998).
19. V. V. Perepichka and I. P. Shats'kyi, *J. Math. Sci.*, **109**, Iss. 1: 1290 (2002).
20. I. P. Shats'kyi and V. V. Perepichka, *Mater. Sci.*, **40**, Iss. 2: 240 (2004).