

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ НАПЛАВНИХ ЗНОСОСТІЙКИХ СТАЛЕЙ РЕГУЛЮВАННЯМ ПЕРЕРОЗПОДІЛУ ТЕРМІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ

Багров В. А.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У роботі внаслідок проведеного дослідження теоретично обґрунтовано, що за температур 573...773 К і великих відношень радіусів тріщин до глибини їх залягання відповідальними за руйнування досліджуваних зносостійких сплавів є механічні та температурні напруження, зі збільшенням температури й зменшенням відношення радіуса тріщини до глибини її залягання, впливає нагромаджена пластична деформація.

Ключові слова: наплавні сплави, зносостійкість, термічні напруження, критерії руйнування.

Вступ

Проблема тертя та зношування є комплексною та ґрунтується на фундаментальних законах фізики, хімії, механіки суцільних середовищ, матеріалознавства.

Застосування принципів розрахунків за Герцом, Демкіним, Фепплю й Карасу дає компоненти поля напружень від навантаження й допомагає сформулювати висновки про напружений стан, чи матиме він пружну або пластичну характеристику, і про можливу перехідну властивість процесу, що ще не встановився.

Періодичні навантаження в трибологічній системі передбачають в обчисленні за методом механіки суцільних середовищ підхід, близький до аналогічного розгляду утоми масивного матеріалу.

Значний вплив на напружений стан у зоні контакту й на характер втомлюваного руйнування виявляє дотичне навантаження. За більших дотичних напружень утомлювана контактна міцність визначається поверхневими напруженнями, що впливають на утворення та розвиток основної причини зношування – тріщини.

Аналіз публікацій

Критичне значення кількості дефектів, що утворюються, унаслідок досягнення яких відбувається руйнування, загалом залежить від властивостей матриці й типу небезпечних дефектів, тобто від природи матеріалу та його структури. Істотну роль у цьому відіграє вид напруженого стану. У разі позитивного кульового тензора збільшення напружень сприяє розкриттю тріщин і ніби підготовлює їх до розвитку.

За негативного кульового тензора під дією стискальних напружень тріщини закрива-

ються й слугують перешкодою на шляху розвитку ліній розподілу. Унаслідок пластичних деформацій напруження в місцях концентрації дефектів перерозподіляються. Оскільки величина пластичних зрушень залежить від рівня дотичних напружень, критична кількість внутрішніх розривів у матеріалі має збільшуватися зі зростанням інтенсивності напружень σ як величини, відповідальної за формування матеріалу [1, 2, 4].

Мета та постановка завдання

Метою є визначення критичних значень зовнішніх навантажень і кута початкового поширення тріщин (дефекти типу тріщин), за яких настане локальне або повне руйнування тіла.

Для розв'язання цього завдання необхідно сформулювати умови граничної рівноваги:

1) найбільший розмір пластичної ділянки у вершини тріщини малий порівняно з розмірами тріщини та з відстанню від вершини тріщини до границі тіла;

2) напрямок початкового поширення тріщини збігається із площиною, у якій основна частина розтягувальних напружень $\sigma\varphi$ досягає максимального значення.

Методика дослідження

Наплавлення зносостійкими сплавами систем Cr-Mn-Ti-Si та Cr-Mn-Mo-Ti-Si проводилось на зразки зі сталі 50ХНМ за схемою «гірка» порошковим дротом.

Твердість та інші механічні властивості сплавів, що досліджувались, визначалися за нормальних і підвищених температур (470...1070 К) з використанням як серійного обладнання, так і спеціалізованого.

Вплив температури на міцність та зносостійкість сплавів досліджувався за підвище-

них температур в умовах об'ємного напруженого стану з використанням розрахункових критеріальних рівнянь механіки руйнування [3, 4].

Обчислення проводились з використанням програмного забезпечення *Mathcad*.

Вплив температурних напружень на граничні значення зовнішнього навантаження

Граничне значення зовнішнього навантаження σ^* обчислювали на підставі критеріального рівняння для завдань теорії тріщиноутворення [4, 5].

$$K_1^2(\sigma_*, \varphi_*) = 0,2K_{1c}^2 f^{-1}(\alpha_*) f_0(\eta_0) \times [1 - \tau_\alpha(\alpha_*) \cdot \tau_s^{-1}], \quad (1)$$

де K_1 – коефіцієнт інтенсивності напруження;
 K_{1c} – величина тріщиностійкості матеріалу;

τ_s – границя текучості в процесі зрушення;
 α_* – значення кута для найбільшої ширини пластичної зони, тобто кут нахилу смуг пластичного ковзання поблизу кінця тріщини;

$f_0(\eta_0)$ – величина, що визначає руйнування матеріалу за умови складного напруженого стану.

Границя текучості в процесі зрушення прийнята за теорією інтенсивності дотичних напружень (умова плинності Мора) [6]:

$$\tau_s = \sigma_m \cdot (\sqrt{3})^{-1}. \quad (2)$$

Дотичні напруження для кута нахилу смуг пластичного ковзання визначали за виразом [6]:

$$\tau_\alpha(\alpha) = 0,5(\sigma_z - \sigma_x) \sin 2\alpha, \quad (3)$$

де σ_z, σ_x – основні нормальні напруження (глибинні напруження), обчислені на підставі експериментальних показників за умови вдавлення індентора в інтервалі температур 293...873 К за виразом [4]:

$$\sigma_x = \sigma_y = -P_0[(1 + \nu) - 0,5 \times [1 + (z \cdot a^{-1})^{(2-1)} - (1 + \nu)z \cdot a^{-1} \times \arctg(a \cdot z^{-1})], \quad (4)$$

$$\sigma_z = -P_0(1 + (z \cdot a^{-1})^{2-1}) \quad (5)$$

де P_0 – максимальний тиск у центрі площі контакту;

ν – коефіцієнт Пуассона в процесі розрахунків на місцевий стиск прийнято 0,25;

a – радіус площі контакту;

z – координата глибинних майданчиків.

Особливість зміни глибинних напружень від температури зображено на рис. 1.

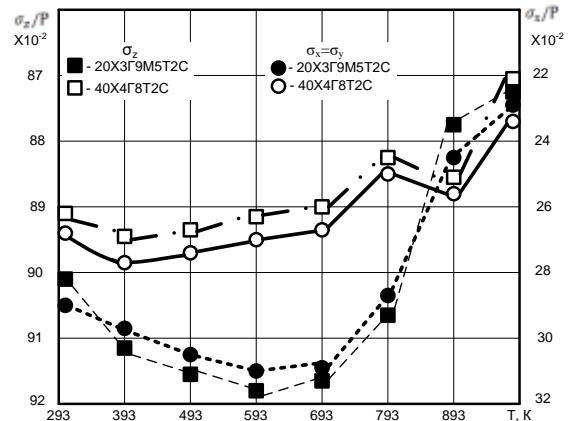


Рис. 1. Вплив температури на напруження в досліджуваних сплавах за глибиною наплавленого металу

Кут нахилу смуг пластичного ковзання поблизу кінця тріщини визначали за виразом [4, 7]

$$\alpha_* = 71^\circ - \eta \cdot 26^\circ \quad (5)$$

де η – параметр, що залежить від співвідношення основних нормальних напружень (σ_x, σ_z) і максимальних дотичних напружень (τ_s):

$$\eta = 0,5(\sigma_z - \sigma_x) \cdot \tau_s^{-1}. \quad (6)$$

Величина $f_0(\eta_0) \approx 1$, якщо приблизно прийняти, що $\varepsilon_k(\eta_0) \approx \varepsilon_k$, де ε_k – величина деформації руйнування матеріалу внаслідок одноосового розтягування. Визначали експериментально за методикою [8].

Значення $f(\alpha_*)$ обчислювали за виразом [13]:

$$f(\alpha) = 0,0583 \sin \alpha [1 - \cos(3\alpha - 30^\circ)]^2 \times (1,0043 \sin \alpha + 0,2136 \sin 2\alpha + 0,1564 \sin 3\alpha) \quad (7)$$

Унаслідок обчислень з огляду на рекомендації [4–6] і на вирази (3)–(7) і після підставлення отриманих значень у вираз (1) для можливої робочої температури штампів гарячого деформування знаходимо:

$$673 \text{ K}: K_1(\sigma_*, \varphi_*) = 0,9302K_{1c}, \quad (8)$$

$$773 \text{ K}: K_1(\sigma_*, \varphi_*) = 0,9244K_{1c}, \quad (9)$$

$$893 \text{ K}: K_1(\sigma_*, \varphi_*) = 0,9005K_{1c}. \quad (10)$$

Отже, використовуючи рівняння (1), (8)–(10), знайдемо граничне значення зовнішнього навантаження σ^* :

а) за температури $T = 693 \text{ K}$:

$$\sigma_* = 0,8244 \times K_{1c} \cdot \left\{ \left[\varepsilon K(\varphi_*) + 1,1001 \cdot \eta \cdot K_m(\varphi_*) \right] \varepsilon^2 \cdot \sqrt{a} \right\}^{-1}; \quad (11)$$

б) за температури $T = 793 \text{ K}$:

$$\sigma_* = 0,8192 \cdot K_{1c} \cdot \left\{ \left[\varepsilon K(\varphi_*) + 1,1001 \cdot \eta \cdot K_m(\varphi_*) \right] \varepsilon^2 \cdot \sqrt{a} \right\}^{-1}; \quad (12)$$

в) за температури $T = 893 \text{ K}$:

$$\sigma_* = 0,7980 \cdot K_{1c} \cdot \left\{ \left[\varepsilon K(\varphi_*) + 1,1001 \cdot \eta \cdot K_m(\varphi_*) \right] \varepsilon^2 \cdot \sqrt{a} \right\}^{-1}. \quad (13)$$

Результати розрахунків граничного зовнішнього навантаження й напрямку кута поширення тріщини наведені в табл. 1–3.

Таблиця 1 – Вихідні показники до розрахунків визначення граничного значення зовнішнього навантаження й кута поширення тріщини за температури 673 К

	σ	φ
0	$1,5798713 \cdot 10^3$	106,48758
1	$1,204891 \cdot 10^3$	86,2396046
2	$1,1992216 \cdot 10^3$	84,8291433
3	$1,1992349 \cdot 10^3$	84,1538906
4	$1,2010708 \cdot 10^3$	83,495772
5	$1,204679 \cdot 10^3$	82,8529648
6	$1,2100139 \cdot 10^3$	82,2238544
7	$1,2170348 \cdot 10^3$	81,6070035
8	$1,2257057 \cdot 10^3$	81,0011277
9	$1,6037773 \cdot 10^3$	68,1266362

Таблиця 2 – Вихідні показники до розрахунків визначення граничного значення зовнішнього навантаження й кута поширення тріщини за температури 773 К

	σ	φ
0	$1,392102 \cdot 10^3$	101,2038994
1	$1,2664497 \cdot 10^3$	93,2488292
2	$1,2423656 \cdot 10^3$	91,2296461
3	$1,2282248 \cdot 10^3$	89,4249755
4	$1,2233408 \cdot 10^3$	87,7870439
5	$1,2234201 \cdot 10^3$	87,4752574
6	$1,223841 \cdot 10^3$	87,1682369
7	$1,2245992 \cdot 10^3$	86,8657523
8	$1,227111 \cdot 10^3$	86,2735362
9	$1,4080732 \cdot 10^3$	78,6490829

Таблиця 3 – Вихідні показники до розрахунків визначення граничного значення зовнішнього навантаження й кута поширення тріщини за температури 873 К

	σ	φ
0	$1,2418552 \cdot 10^3$	106,1471179
1	$1,2355877 \cdot 10^3$	104,8145549
2	$1,2185873 \cdot 10^3$	102,2191672
3	$1,1880631 \cdot 10^3$	98,4833428
4	$1,1553378 \cdot 10^3$	93,3050031
5	$1,1542494 \cdot 10^3$	92,8782407
6	$1,1535492 \cdot 10^3$	92,4625174
7	$1,1533433 \cdot 10^3$	92,2585872
8	$1,1537333 \cdot 10^3$	91,2752295
9	$1,2544576 \cdot 10^3$	84,203695

Порівняльний аналіз впливу температури на граничне зовнішнє навантаження й напрямку кута розвитку тріщини поданий у табл. 4.

Таблиця 4 – Вплив температурних напружень на граничні значення зовнішнього навантаження

T, К	ε	φ^* , град.	σ^* , МПа	η
673	0,426	87,899	1333	0,3
793	0,432	87,541	1250	0,4
893	0,418	88,509	1200	0,45

Висновки

Аналіз результатів впливу температурних напружень на граничне зовнішнє навантаження показує:

– якщо $T=673 \text{ K}$, температурні напруження становлять 33 % від руйнівного навантаження;

– якщо $T=793$ К, температурні напруження становлять 44 % від руйнівного навантаження;

– якщо $T=893$ К, температурні напруження становлять 50 % від руйнівного навантаження.

Теоретично обґрунтовано, що за температур 673...873 К і великих відношень радіусів тріщин до глибини їх залягання відповідальними за руйнування досліджуваних зносостійких сплавів є механічні та температурні напруження, зі збільшенням температури та зменшенням відношення радіуса тріщини до глибини її залягання фактором, що впливає на їх руйнування, є нагромаджена пластична деформація.

Література

1. Study of wear of the building-up zone of martensite-austenitic and secondary hardening steels of the Cr-Mn-Ti system / D. B. Hlushkova, V. A. Bagrov, V. A. Saenko, V. M. Volchuk, A. V. Kalinin, N. E. Kalinina. Питання атомної науки та техніки. 2023. № 2 (144). P. 105–109. <https://doi.org/10.468413/2023-144-105>
2. Багров В. А. Вплив структури і фазового складу на зносостійкість економнолегованих метастабільних і вториннотвердіючих сталей системи Cr-Mn-Ti. Вісник ХНАДУ. 2021. № 94. С. 136–141. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2021.94.0>
3. Havar S., Paul C.P., Jain N. K. Causes of failure and repairing options for dies and molds: A review. Engineering Failure Analysis. 2013. 34, 519–535.
4. Панасюк В. В., Остах О. П. Механіка руйнування та міцність матеріалів: довідн. посіб. Т. 15: Структура матеріалів і втомна довговічність елементів конструкцій / за ред. В. В. Панасюка. Львів: СПОЛОМ, 2015. 312 с.
5. Холявко В. В. Фізичні основи міцності та руйнування: конспект лекцій з дисципліни для студентів напряму підготовки 6.050403 «Інженерне матеріалознавство» спеціальності 8(7).05040303 – «Композиційні та порошкові матеріали, покриття» денної та заочної форм навчання / уклад.: В. В. Холявко. Київ: НТУУ «КПІ», 2015. 100 с.
6. Маборода В. С., Бобіна М. М., Лоскутова Т. В., Мініцька Н. В. Основи механіки руйнування: навч. посіб. Київ: НТУУ «КПІ», 2010. 124 с.
7. Крутий Ю. С., Сур'янінов М. Г., Шиляєв О. С. Механіка руйнування. Одеса: ОДАБА, 2018. 100 с.
8. Shao C., Cui H., Lu F., Li Z. Quantitative relationship between weld defect characteristic and fatigue crack initiation life for high-cycle fatigue property. Int. J. of Fatigue. 2019. 123, 238–247.

References

1. Hlushkova, D. B., Bagrov, V. A., Saenko, V. A., Volchuk, V. M., Kalinin, A. V., Kalinin, N. E. (2023). Study of wear of the building-up zone of martensite-austenitic and secondary hardening steels of the Cr-Mn-Ti system. Питання атомної науки та техніки, 2 (144), 105–109. <https://doi.org/10.468413/2023-144-105>
2. Bahrov, V. A. (2021). Vplyv struktury i fazovoho skladu na znosostiikist ekonomnolegovanykh metastabilnykh i vtorynnotverdiuchykh stalei systemy Cr-Mn-Ti. Visnyk KhNADU, 94, 136–141 [in Ukrainian]. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2021.94.0.136
3. Havar, S., Paul, C.P., Jain, N. K. (2013). Causes of failure and repairing options for dies and molds: A review. Engineering Failure Analysis, 34, 519–535.
4. Panasiuk, V. V., Ostash, O. P. (2015). Mekhanika ruinovannia ta mitsnist materialiv : dovidn. posib. T. 15: Struktura materialiv i vtomna dovhovichnist elementiv konstruktсии. V. V. Panasiuk. (Ed.). Lviv: SPOLOM. [in Ukrainian].
5. Kholiavko, V. V. Fizychni osnovy mitsnosti ta ruinovannia: Konspekt lektсии z dystsypliny dlia studentiv napriamu pidhotovky 6.050403 „Inzhenerne materialoznavstvo” spetsialnosti 8(7).05040303 – „Kompozytsiini ta poroshkovi materialy, pokryttia” dennoi ta zaochnoi form navchannia / uklad.: V. V. Kholiavko. Kyiv: NTUU „KPI”, 2015. 100 s.
6. Maboroda, V. S., Bobina, M. M., Loskutova, T. V., Minitska, N. V. Osnovy mekhaniky ruinovannia. Kyiv: NTUU „KPI”, 2010. 124 s.
7. Krutii, Yu. S., Surianinov, M. H., Shyliaiev, O. S. Mekhanika ruinovannia. Odesa: ODABA, 2018. 100 s.
8. Shao, C., Cui, H., Lu, F., Li, Z. (2019). Quantitative relationship between weld defect characteristic and fatigue crack initiation life for high-cycle fatigue property. Int. J. of Fatigue, 123, 238–247

Багров Валерій Анатолійович, к. т. н, доцент, кафедра технології металів та матеріалознавства, тел. +38 063-420-84-07, havetabanca@ukr.net, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 6102, Україна,

Increasing the durability of soldering wear-resistant steel by regulating the redistribution of thermal stresses

Abstract. Problem. The tangential load has a significant influence on the stress state during pressure treatment of metals in the contact zone and on the nature of fatigue failure. As a result of plastic deformations, stresses are redistributed in places of concentration of defects. Since the amount of plastic displacements depends on the level of tangential stresses, the critical number of internal breaks in the material should increase with the increase in the

intensity of stresses σ , as the quantity responsible for the formation of the material. **Goal.** The purpose of the work is to determine the critical values of external loads and the angle of initial propagation of cracks (crack-type defects) at which local or complete destruction of the body will occur. **Methodology.** Brazing with wear-resistant alloys of the Cr-Mn-Ti-Si and Cr-Mn-Mo-Ti-Si systems was carried out on samples made of 50HNM steel according to the "slide" scheme with flux-cored wire. The effect of temperature on the strength and wear resistance of alloys was studied at elevated temperatures under the conditions of a volumetric stress state using the calculated criterion equations of fracture mechanics. Calculations were made using Mathcad software. **Originality.** It is theoretically substantiated that at temperatures of 673...873 K and large ratios of crack radii to their depth, mechanical and thermal stresses are responsible for the destruction of the investigated wear-resistant alloys, with an increase in temperature and a decrease in the ratio of the crack radius to

its depth, a factor that affects their destruction, there is accumulated plastic deformation. **Practical value.** Analysis of the results of the influence of temperature stresses on the ultimate external load shows:

- at $T=673$ K, the temperature stresses are 33% of the destructive load;
- at $T=793$ K, the temperature stresses are 44% of the destructive load;
- at $T=893$ K, temperature stresses are 50% of the destructive load.

Keywords: surfacing alloys, wear resistance, thermal stress, failure criteria.

Bagrov Valery, Ph.D., Assoc. Prof., chair of technology of metals and materials technology, <https://orcid.org/0000-0003-0728-1290>, havetabanca@ukr.net, Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.
