

УДК 621.891

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.040723.29.981

## ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЕКОНОМНОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

ГЛУШКОВА Д. Б.<sup>1\*</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,БАГРОВ В. А.<sup>2</sup>, *канд. техн. наук, доц.*,ВОЛЧУК В. М.<sup>3</sup>, *докт. техн. наук, проф.*

<sup>1\*</sup>Кафедра металів та матеріалознавства, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, 61002, Харків, Україна, тел. +38 (057) 707-37-29, e-mail: [diana@khadi.kharkov.ua](mailto:diana@khadi.kharkov.ua), ORCID ID: 0000-0001-8612-6584

<sup>2</sup>Кафедра металів та матеріалознавства, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, 61002, Харків, Україна, тел. +38 (057) 707-37-29, e-mail: [diana@khadi.kharkov.ua](mailto:diana@khadi.kharkov.ua), ORCID ID: 0000-0003-0728-1290

<sup>3</sup>Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [volchuky@gmail.com](mailto:volchuky@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

**Анотація. Постановка проблеми.** Досліджено вплив зносу на утворення «білої смуги» у метастабільних аустенітних, мартенситно-аустенітних та вториннотвердіючих сталях системи Cr–Mn–Ti, що додатково леговані Mo, V, Nb. Показано вплив структури та фазового складу на зносостійкість економічнолегованих метастабільних та вториннотвердіючих сталей. **Виклад основного матеріалу.** Наплавлення досліджуваних матеріалів проводилося в мідні форми з різною швидкістю примусового охолодження. Досліджувалися метастабільні аустенітні, мартенситно-аустенітні та вториннотвердіючі сталі системи Cr–Mn–Ti, додатково леговані Mo, V, Nb. Додаткове легування цих сталей титаном у кількості 2...5 % сприяло запобіганню сколам по зоні сплавлення. Поблизу лінії сплаву міститься зона основного металу шириною 7...15 мкм. Після випробування за об'ємної температури робочої частини зразка  $T_v = 553...573$  К контактних об'ємах наплавленого металу типу 30X2B8Ф виявлено розширення меж зерен, лінії зсуву, більш дрібне порівняно з нижчими шарами зерно. Поза зоною пластичної деформації величина зерен відповідає їх розмірам до початку випробувань, межі зерен відносно тонкі. Кількість та розташування спостерігаються за збільшень X430, X800 карбідів також аналогічні структурним характеристикам наплавленого металу типу 30X2B8Ф. За близьких значень контактного тиску в парі тертя – час утворення тріщини критичної довжини зростає із збільшенням ефективної поверхневої енергії  $\gamma_e$  (що включає енергію пластичної деформації). Таким чином, показники тріщиностійкості (КС,  $j$ -інтеграл,  $\delta_c$ ) а, отже, й опір зношуванню, мартенситностаріючих сталей вищі, ніж метастабільних та інструментальних сталей. **Висновки.** Проведені дослідження підтверджують можливість утворення «білої смуги» як у сплавах, що мають високу концентрацію елементів – аустенізаторів (Mn, C, Ni), так і за легування карбідотвірними елементами з відносно невисокою спорідненістю до вуглецю (V, Mo). Показники тріщиностійкості (КС,  $j$ -інтеграл,  $\delta_c$ ) а, отже, й опір зношуванню, мартенситностаріючих сталей вищі, ніж метастабільних та інструментальних сталей.

**Ключові слова:** метал; легування; структура; пластична деформація; твердість; тріщиностійкість

## IMPROVING THE WEAR RESISTANCE OF ECONOMICALLY ALLOYED STEELS

HLUSHKOVA D.B.<sup>1\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,BAGROV V.A.<sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,VOLCHUK V.M.<sup>3</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

<sup>1\*</sup>Department of Technology of Metals and Materials Science, Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo St., Kharkiv, 61002, Ukraine, tel. +38 (057) 707-37-29, e-mail: [diana@khadi.kharkov.ua](mailto:diana@khadi.kharkov.ua), ORCID ID: 0000-0001-8612-6584

<sup>2</sup>Department of Technology of Metals and Materials Science, Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo St., Kharkiv, 61002, Ukraine, tel. +38 (057) 707-37-29, e-mail: [diana@khadi.kharkov.ua](mailto:diana@khadi.kharkov.ua), ORCID ID: 0000-0003-0728-1290

<sup>3</sup>Department of Materials Science and Treatment of Materials, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: [volchuky@gmail.com](mailto:volchuky@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-7199-192X

**Abstract. Problem statement.** The influence of wear on the formation of a “white band” in metastable austenitic, martensitic-austenitic and secondary hardening steels of the Cr–Mn–Ti system, additionally alloyed with Mo, B, V, is studied. The influence of structure and phase composition on the wear resistance of economically alloyed metastable and secondary hardening steels is shown. **Results.** Surfacing of the studied materials was conducted in copper molds with different rates of forced cooling. Metastable austenitic, martensitic-austenitic and secondary hardening steels of the Cr–Mn–Ti system additionally alloyed with Mo, B, V are studied. Additional alloying of these steels with titanium in an amount of 2...5 % contributed to the prevention of spalling along the fusion zone. Near the fusion line there is a base metal zone with a width of 7...15  $\mu\text{m}$ . After testing at the volume temperature of the working part of the specimen  $T_V = 553...573 \text{ K}$  in the contact volumes for deposited metal of the 30Cr2W8V type, broadening of the grain boundaries, shear lines, finer grains compared to the underlying layers are revealed. Outside the zone of plastic deformation, the size of the grains corresponds to their sizes before the start of testing, the grain boundaries are relatively thin. The number and location of carbides observed at X430, X800 magnifications are also similar to the structural characteristics for deposited metal of the 30Cr2W8V. At close values of the contact pressure in the friction pair, the time of formation of a crack of critical length increases with an increase in the effective surface energy  $\gamma_e$  (including the energy of plastic deformation). Thus, the crack resistance indices (CR, j-integral,  $\delta_c$ ) and, consequently, the wear resistance of maraging steels are higher than those of metastable and tool steels. **Conclusions.** The conducted studies confirm the possibility of the formation of a “white band” both in alloys with a high concentration of elements – austenitizers (Mn, C, Ni), and when alloyed with carbide-forming elements with a relatively low affinity for carbon (V, Mo). The crack resistance indices (CR, j-integral,  $\delta_c$ ) and, consequently, the wear resistance of maraging steels is higher than those of metastable and tool steels.

**Keywords:** metal; alloying; structure; plastic deformation; hardness; crack resistance

**Вступ.** Технологія наплавлення економнолегованих зносостійких сталей для інструменту гарячої обробки металу – важливе завдання сучасного матеріалознавства [1–5].

Дослідження, спрямовані на вдосконалення економнолегованих сталевих зносостійких сталей для наплавлення інструменту гарячої обробки металу, дуже актуальні [1–5].

Пластична деформація металів проводиться за високих температур [6–9] із застосуванням спеціальних інструментів. Для високопродуктивної роботи за тривалого температурного впливу ці інструменти повинні мати необхідну твердість, опір стиску, вигину, відповідати динамічним навантаженням, мати високий опір стиранню та відповідний ударно-абразивний знос, теплостійкість, мати добре оброблену поверхню робочих частин [10; 11].

Один із факторів, що впливають на довговічність інструменту гарячого деформування, – це температура [12–20].

Вплив температури пов'язаний з такими явищами, що відбуваються в поверхневому та підповерхневому шарах [21–28]:

- зміна показників механічних властивостей у разі зростання температури;
- відпуск та структурні зміни;
- поява вторинних деформацій та внутрішніх напружень, що виникають через нерівномірний розподіл температур.

Виходячи з вищесказаного, метою роботи стало дослідити вплив легування на структуру та відповідно зносостійкість економнолегованих сталей.

**Виклад основного матеріалу.** Додаткове легування сталей титаном у кількості 2...5 % сприяло запобіганню сколам по зоні сплавлення. Поблизу лінії сплаву міститься зона основного металу шириною 7...15  $\mu\text{m}$ , мікротвердість якої дещо нижча за мікротвердість основного металу, що свідчить про дифузійні процеси [4; 5]. Мікроструктура наплавленого хромомарганцевого металу з умістом титану до 4 % наведена на рисунку 1 а, б.

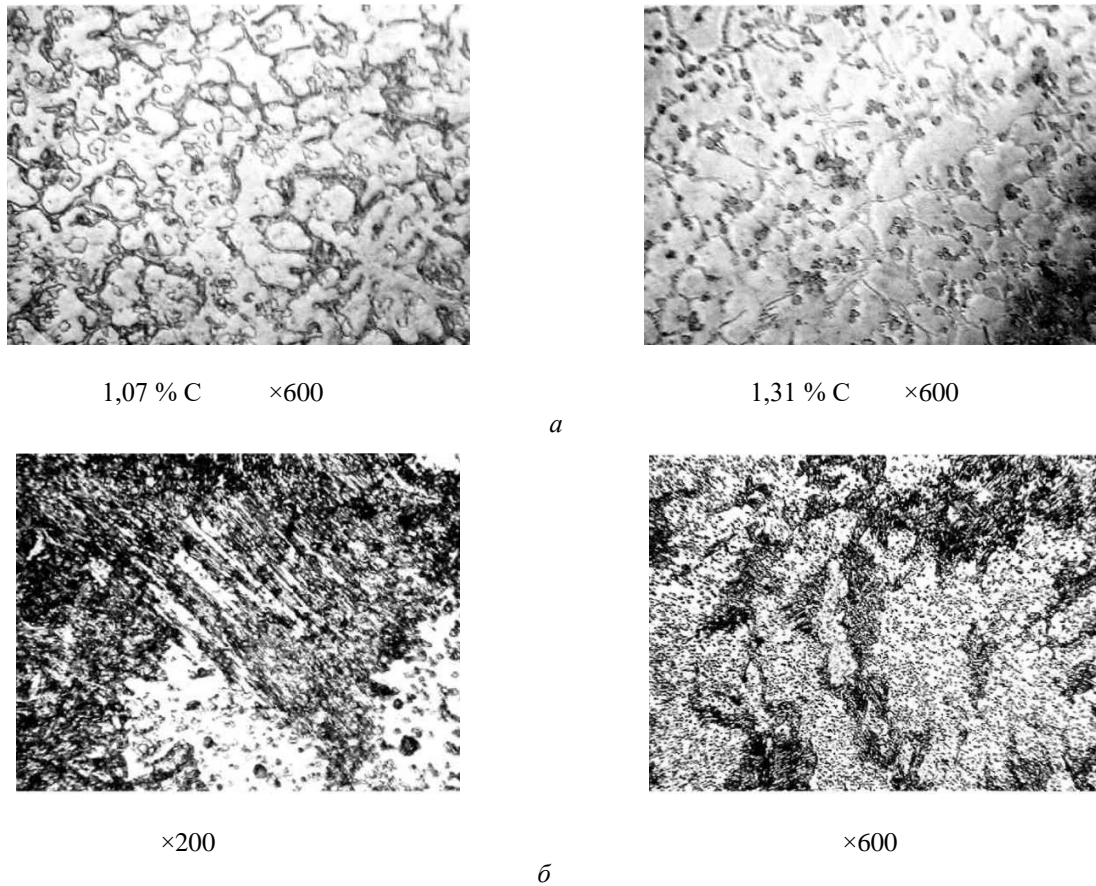


Рис. 1. Мікроструктура наплавленого хромомарганцевого металу з умістом титану до 4 %:  
 а – 9,51 Cr; 8,86 Mn; 1,87 % Si; б – 8,20 Cr; 7,54 Mn; 1,87 % Si

Легування наплавленого металу нікелем і марганцем знижує  $A_{C1}$ , а збільшення концентрацій хрому, вольфраму, молібдену, навпаки, підвищує зазначену температуру, що закономірно для термічних впливів із низьким рівнем напружень, які діють на метал.

З підвищенням температури стрижня тертя до  $T_{ст} = 823$  К мікротвердість металу контактних об'ємів помітно знизилася (рис. 2). Для граничного шару характерна структура «білої зони» після високого відпуску.

В окремих зразках із хромомолібденового наплавленого металу виявлено порушення суцільності за межами зерен.

Структура відпущеного металу «білої смуги» наплавлення 50X5M2B2H1Ф змінюється біля поверхні зношування продуктами відпуску з ділянками аустеніту у разі підвищення температури стрижня тертя від 823 К до 973 К.

Під час додаткового легування хромистого сплаву 3...4 % вольфраму і молібдену знижується кількість аустеніту з подальшим підвищенням концентрації зазначених елементів. Характер їх впливу на температуру  $A_{C1}$ , ймовірно, аналогічний хрому. Зниженню температури  $\alpha \rightarrow \gamma$  перетворення сприяє зміна частки залишкового аустеніту, пов'язана зі збільшенням вмісту вуглецю, марганцю, нікелю, та відповідне зменшення ефекту об'ємного перетворення  $\Delta V_{\alpha \rightarrow \gamma} / V_{\alpha}$ .

Формування ділянки «білої смуги» спостерігалось за об'ємної температури металу зразків, що змінюється у відносно широкому діапазоні (рис. 2), однак підвищення температури стрижня тертя спричинило істотне зменшення мікротвердості і навіть відсутність (після випробувань) зазначеної структури біля фронту зносу.

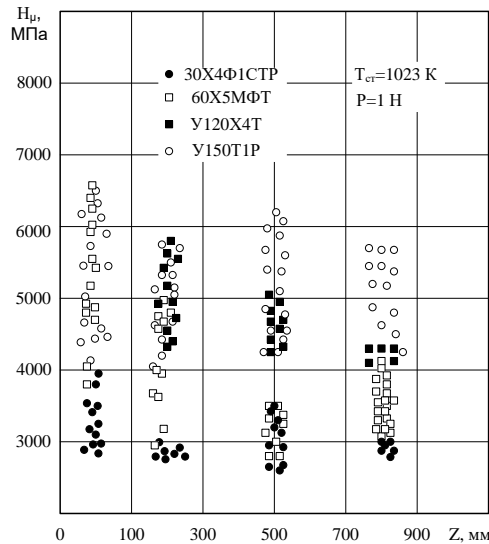


Рис. 2. Вплив складу наплавленого металу на мікротвердість після випробувань на зношування

Легування хромовольфрамового наплавленого шару 4–5 % нікелю збільшило частку залишкового аустеніту, знизилася температура АС1, проте подібна з «білою смугою» структура після зношування не зафіксована, хоча максимальні значення мікротвердості приблизно такі самі, як у сплаву 30X2В8Ф. Висока мікротвердість металу контактного шару та відсутність структури «білої смуги» характерні і для наплавних сталей систем С–Cr–Mn–Ti {при  $Mn \leq 2...3 \%$ ,  $Cr \leq 6...7 \%$ ,  $Ti = 0,8...3,0 \%$ }, які піддавалися зношуванню за умов тертя об стрижні з температурою  $\sim 823...1023 \text{ K}$ .

Таким чином, результати проведених експериментів та літературні дані підтверджують можливість утворення «білої смуги» як у сплавах, що мають високу концентрацію елементів–аустенізаторів (Mn, С, Ni), так і за легування карбідотвірними елементами з відносно невисокою спорідненістю до вуглецю (V, Mo). Виникнення зазначеної структури за зношення сталей, що містять 8 ... 10 % W, спостерігалось для широкого інтервалу фактичних тисків і об'ємних температур. Зменшення концентрації вольфраму полегшує запобігання утворенню «білої смуги».

Вплив «білої смуги» на зносостійкість можна пов'язувати зі структурними змінами у процесі її формування, температурним та часовим інтервалами, напруженнями, що діють на неї.

Утворення «білої смуги» внаслідок диспергування та деформаційного зміцнення мартенситу або бейнітно-мартенситної матриці за температур нижчих за температуру зворотного мартенситного перетворення АН зумовлює низький рівень запасу пластичності металу контактного шару.

Формування матеріалу «білої смуги» з аустеніту тертя А<sub>Тр</sub> можливе і після утворення останнього внаслідок зворотного мартенситного перетворення. Оскільки ферит в інтервалі бейнітного перетворення утворюється з аустеніту за мартенситним механізмом, процес  $B + M + K \rightarrow A_{Tr} + K$  з наступною дифузійною гомогенізацією – фази ймовірний і для шарів, у яких переважною фазою вихідної структури був бейніт.

Мікротвердість поверхневих шарів наплавлених струмків та діапазон її розкиду близькі результатам лабораторних випробувань за  $T_{Ст} \sim 823 \text{ K}$  (рис. 3), тобто додатково підтверджується формування структури металу контактних об'ємів сукупною дією нагрівання, пластичної деформації, дифузії.

Коефіцієнт дифузії  $D_{П}$  в деформованому приповерхневому шарі завтовшки до кількох десятків мкм є однією з величин, що зумовлюють кінетику зростання зародкових тріщин та розвитку тріщин руйнування.

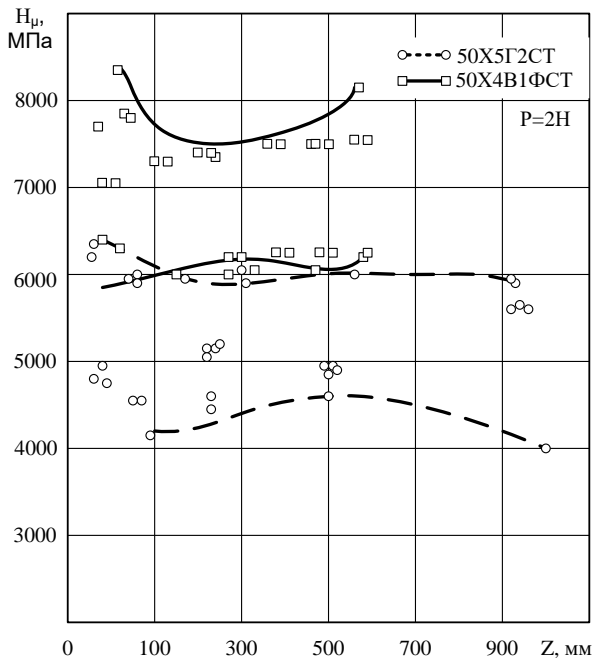


Рис. 3. Мікротвердість поверхневих шарів наплавлених валків після експлуатації

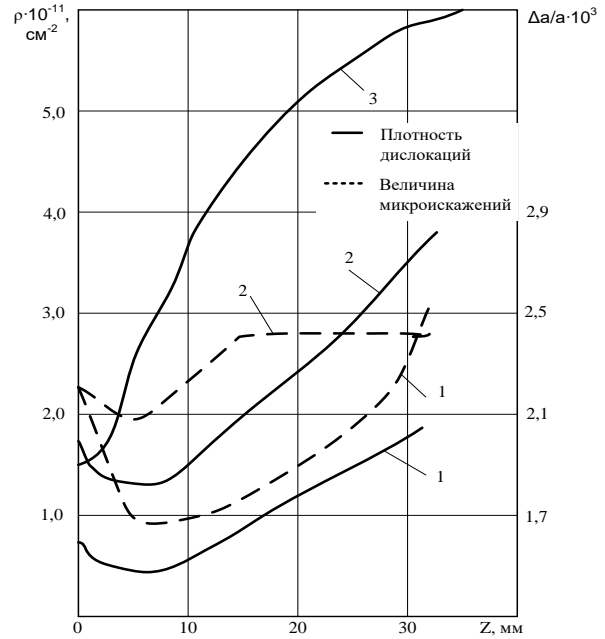


Рис. 4. Щільність дислокацій  $\rho$  та мікроспотворення  $\Delta a/a$  наплавленого металу з карбідним та інтерметалідним зміцненням після випробування на зношування ( $\tau = 1$  Ч,  $P = 20$  МПа,  $V_B.P.P. = 18,8$  см/с,  $TSM \sim 923$  До). 1 – 0X3M5B8K10Ф; 2 – 0X3M5B8K15Ф; 3 – 70X4M3BФ (виконано спільно з А. С. Крижановським)

Справді, критична довжина зародкової тріщини за дії її нормальної площини напружень визначається рівнянням:

$$l_x \approx \frac{2E\gamma_e}{\pi(1-\mu^2)\sigma^2}, l_k \approx (D_{II} \cdot \tau)^{0,5}, \quad (1)$$

де  $\gamma_e = \gamma_0 + \gamma_p$  – ефективна поверхнева енергія.

Мінімальна товщина пелюсток зношення  $h$  та мінімальна відстань між тріщинами  $S_{min}$  визначаються відповідно як:

$$h = \frac{G_e}{4\pi(1-\mu)\sigma_f} \quad (2)$$

$$S_{min} = 2\rho \cdot b \cdot \frac{c^2 \cdot l_f^2}{V_r^2}, \quad (3)$$

де  $G$ ,  $b$  – модуль зсуву і вектор Бюргерса металу, що руйнується;  $\sigma_f$  – напруги тертя дислокацій;  $\rho$  – щільність дислокацій;  $C$  – швидкість поширення пружних поперечних хвиль у матеріалі;  $l_f$  – довжина джерела

Франка – Ріда;  $V_r$  – швидкість зростання тріщин;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона.

Приймаючи для малих швидкостей ковзання:

$$V_r = 2Cl_f \sqrt{\frac{2\pi(1-\mu)\sigma_f \rho}{G}}. \quad (4)$$

З (1) випливає, що час утворення тріщини:

$$\tau \approx \frac{4E^2 \gamma_1^2}{\pi^2 (1-\mu^2)^2 \sigma^4 D_{II}}. \quad (5)$$

Значення  $h$  обчислене з урахуванням оцінних розрахунків, а тріщина утворюється внаслідок циклічної деформації під час поєднання зсуву і відриву, тобто в умовах, що відрізняються від передбачених рівнянням (1).

Інтенсивність зношування  $I \sim f(A, E, \sqrt{\rho})$ , де  $A$ ,  $E$ ,  $\rho$  – відповідно робота тертя, модуль пружності, щільність дислокацій. Роботу тертя можна вважати величиною, яка залежить від зміни щільності дислокацій на поверхнях тертя у припущенні її відповідності внутрішній роботі зміни

дислокаційної структури. За зазначеної передумови силу тертя можна виразити такою формулою:

$$F_{Tp} \approx P \frac{\sigma_T}{G} \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_0}}, \quad (6)$$

де  $\rho_0$ ,  $\rho_1$  – вихідна і виникла внаслідок тертя щільність дислокацій;  $P$  – нормальне навантаження.

Тертя супроводжується складним комплексом фізико-хімічних процесів, розсіювання енергії навіть приблизно не можна зводити до дислокаційних процесів, проте їх роль у руйнуванні металів доведена численними дослідженнями вітчизняних та зарубіжних учених.

Зіставлення щільності дислокацій поверхневого шару наплавленого металу з карбідним та інтерметалідним зміцненням показало, що безпосередньо біля поверхні зношування щільність дислокацій та величина мікроспотворень дещо нижча, ніж на віддаленні 20–40 мкм (рис. 4). Характер залежностей  $\rho = f(Z)$  близький до всіх зазначених на рисунку 4 сплавів, тому однією з причин утворення зони зі

зниженою щільністю дислокацій вважатимуться повернення. Рекристалізація затруднена гальмуванням дисперсними частинками зміцнювальних фаз і відносно невисокою температурою.

Вплив температури на в'язкість руйнування оцінювали за критерієм Дж. Малкіна та А. С. Тетельмана [1; 29–32]. Оскільки для умов молекулярно-механічного зношування коефіцієнт зносостійкості КІ~КС [1; 31; 32], збільшення КС змінить співвідношення

$$K_{II} \approx j^2 \cdot (1 - \sigma_1' \sigma_B')^2, \quad (7)$$

де  $j$  – межа тріщиностійкості;  $\sigma_1'$ ,  $\sigma_B'$  – відповідно максимальне головне напруження в зоні концентрації напружень і межі міцності.

За близьких значень контактного тиску в парі тертя–час утворення тріщини критичної довжини зростає зі збільшенням ефективної поверхневої енергії  $\gamma_e$  (що включає енергію пластичної деформації).

Вплив температури на в'язкість руйнування наведено на рисунку 5.

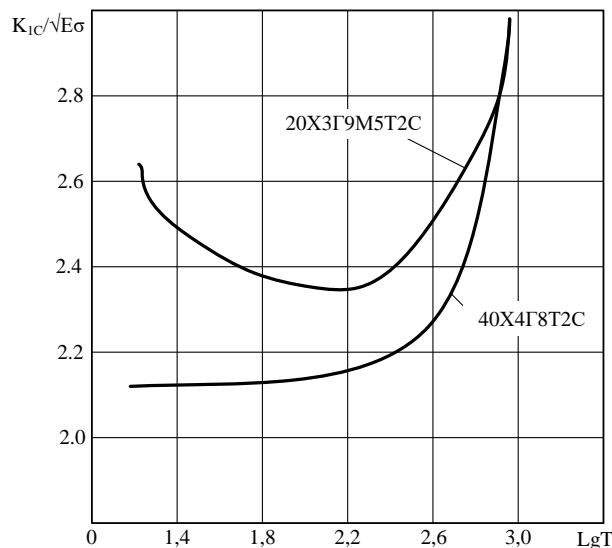


Рис. 5. Залежність розрахунково-експериментального критерію руйнування  $KIC = \sqrt{AEGT\epsilon\alpha\beta}$  від температури

Таким чином, показники тріщиностійкості (КС,  $j$ -інтеграл,  $\delta C$ ), а отже, й опір зношуванню, мартенситностаріючих сталей вищі, ніж метастабільних та інструментальних сталей.

## Висновки

1. Досліджена можливість утворення «білої смуги» у сплавах, що характеризуються високою концентрацією аустенізаторів – Mn, C, Ni, так і при легуванні карбідотвірними елементами з

відносно невисокою спорідненістю до  $\delta\epsilon$ ), а, відповідно, опір зношуванню для вуглецю (V, Mo) мартенситностаріючих сталей вищі, ніж

2. Установлено, що показники метастабільних та інструментальних сталей тріщиностійкості, такі як КС та  $j$ -інтеграл,

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Глушкова Д. Б. Зміцнення та відновлення деталей циліндро-поршневої групи. Харків, 2021. 200 с.
2. Hlushkova D., Kalinin V., Stepanyuk A., Hnatyuk A., Serzhenko I. Studying the properties of steel for sidewalls of chute conveyors. *International Science Group*. Boston : Primedia eLaunch, 2021. 758 p. URL: DOI-10.46299/ISG.2021.MONO.TECH.II
3. Глушкова Д. Б., Багров В. А. Застосування сучасних технологій для підвищення зносостійкості деталей об'ємного гідроприводу : колективна монографія. Sherman Oaks, California : GS Publishing Services, 2022. С. 171–178.
4. Глушкова Д. Б., Рижков Ю. В., Байдала В. Ю. Наукові та технологічні основи підвищення трибологічних характеристик деталей мехатронних систем. Харків, 2022. 119 с.
5. Глушкова Д. Б. Підвищення надійності робочих органів гідروفікованих машин спеціального призначення: монографія. Дніпро : Журфонд, 2023. 258 с.
6. Gluskova D., Volchuk V. Determination of the optimal parameters of laser boriding to improve the wear resistance of piston rings. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. № 2. 2022. С. 29–32.
7. Глушкова Д. Б., Калініна Н. Є., Демченко С. В., Носова Т. В. Підвищення корозійної стійкості зварних з'єднань в результаті термічної обробки. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2022. № 1. С. 21–28.
8. Калініна Н. Є., Глушкова Д. Б., Цокур Н. І., Носова Т. В., Багров В. А., Демченко С. В. Обґрунтування вибору скандію для мікролегування високоміцних алюмінієвих сплавів. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2022. № 4. Спецвип. 2 (182). С. 114–118.
9. Багров В. А., Глушкова Д. Б. Формування структури та фазового складу зносостійких сталей, легованих титаном. *Вісник ХНАДУ*. 2022. Вип. 97. С. 30–33.
10. Багров В. А., Глушкова Д. Б. Властивості зносостійких безнікелевих вториннотвердіючих сталей для наплавлення штампів гарячого оброблення металів. *Вісник ХНАДУ*. 2022. Вип. 97. С. 34–37.
11. Глушкова Д. Б., Багров В. А., Демченко С. В., Волчук В. М., Калінін О. В., Калініна Н. Є. Структура й властивості порошкових газоплазменних покриттів на основі нікелю. *Вісник ХНАДУ*. 2022. Вип. 97. С. 74–81.
12. Большаков В. І., Калінін О. В., Глушкова Д. Б., Тохтарь Г. І., Багров В. А., Гнатюк А. А. Способи отримання дисперсної структури та підвищення міцності кремній–марганцевистих сталей. *Вісник ХНАДУ*. 2021. № 94. С. 7–12.
13. Глушкова Д. Б., Багров В. А. Дослідження властивостей поверхневих шарів поршневих кілець після газотермічного напилення. *Вісник ХНАДУ*. 2021. № 94. С. 8–22.
14. Глушкова Д. Б., Багров В. А. Удосконалення технологічного процесу підвищення довговічності робочого інструмента гідромолотів детонаційним напиленням. *Вісник ХНАДУ*. 2021. № 94. С. 39–46.
15. Глушкова Д. Б., Аврун Г. А., Рижков Ю. В., Воронков О. І., Степанюк А. І., Гнатюк А. А. Підвищення зносостійкості вузлів об'ємного гідропривода. *Вісник ХНАДУ*. 2021. № 94. С. 80–84.
16. Kalinina N. E., Hlushkova D. B., Dzhur Y. O., Khodyrev S. Ya., Kalinin V. T. Influence of temperature of thermal processing on intercrystalline corrosion resistance of welding joints. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2020. № 28 (1). Pp. 34–41.
17. Kalinina N. E., Hlushkova D. B., Voronkov A. I., Sanin A. F., Kalinin V. T., Nosova T. V., Bondarenko O. V. Special features of the phase composition and structure of aluminum alloys modified by refractory nanocompositions. *Functional materials*. 2020. Vol. 27, № 3. Pp. 508–512.
18. Dudukalov Y., Ternyuk M., Hlushkova D. Synthesis of the fuel systems boron-containing metalized fuels for vehicles. *SAE Technical Paper*. 2020-01-2155. 2020. P. 6.
19. Leontiev D., Voronkov O., Korohodskiy V., Hlushkova D., Nikitchenko I. Mathematical modeling of operating processes in the pneumatic engine of the car. *SAE Technical Paper*. 2020-01-2222. 2020. P. 6.
20. Kalinina N. E., Glushkova D. B., Voronkov A. I., Kalinin V. T. Influence of nanomodification on structure formation of multicomponent nickel alloys. Fu 1. Corrosion resistance of reinforced layers of 15X11MФ steel steam turbine blades. *ВАИТ*. 2021. № 2 (132). С. 136–141.
21. Tarelnyk V., Hlushkova D., Martsynkovskyy V., Dumanchuk M., Antoszewski B., Kundera Cz., Konopiianchenko Ie., Tarelnik N., Hudkov S., Zahorulko A. Increasing fretting resistance of flexible element pack for rotary machine flexible machine flexible coupling. Part 1. Analysis of the reasons affecting fretting resistance of flexible elements from expansion coupling. *Journal of Physics : Conference Series*. 2021. № 1741. 11 p.

22. Hlushkova D., Voronkov A., Kalinina N., Kalinin V., Polonskyi L., Stepaniuk A. Structural and phase composition features of titanium and chromium nitride coatings obtained by ion-plasma deposition. *Functional Materials*. 2020. Vol. 27, no. 4. Pp. 710–715.
23. Hlushkova D. B., Kirichenko I. H., Bahrov V. A., Kalinina N. Ye., Nosova T. V. Use of detonation sputtering to increase the durability of hydraulic hammer critical parts. *PAST*. 2021. № 5 (135). Pp. 139–145.
24. Bolshakov V. I., Kalinin A. V., Hlushkova D. B., Ryzhkov Y. V., Bagrov V. A. Transformation of structure and properties of structural steel during nanomodification and strengthening treatment. *Functional Materials*. 2021. Vol. 28, № 3. Pp. 486–491.
25. Bolshakov V. I., Kalinin O. I., Kalinina N. E., Hlushkova D. B., Voronkov O. I., Ryzhkov Y. V., Stepanyuk A. I. Increasing the corrosion resistance of welded joints of heat-resistant nickel alloy with steel. *BAHT*. 2022. № 1 (37). Pp. 195–198.
26. Hlushkova D. B., Voronkov O. I., Ryzhkov Y. V., Kalinin N. E., Nosova T. V. Peculiarities of the formation of a hardened layer during laser boronizing of piston rings. *BAHT*. 2022. № 1(37). Pp. 199–201.
27. Vahrusheva V. S., Hlushkova D. B., Volchuk V. M., Nosova T. V., Mamhur S. I., Tsokur N. I., Bagrov V. A., Demchenko S. V., Ryzhkov Y. V., Scrypnikov V. O. Increasing the corrosion resistance of heat-resistant alloys for parts of power equipment. *BAHT*. 2022. № 4 (140). Pp. 137–140.
28. Hlushkova D. B., Bagrov V. A., Demchenko S. V., Volchuk V. M., Kalinin O. V., Kalinina N. E. Structure and properties of powder gas-plasma coatings based on nickel. *BAHT*. 2022. № 4 (140). Pp. 125–130.
29. Тарельник В. Б., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Тарельник Н. В., Думанчук М. Ю., Пирогов В. О., Волошко Т. П., Глушкова Д. Б. Розробка системи спрямованого вибору найбільш ефективної технології підвищення якості бабітових покриттів підшипників ковзання. Ч. 2. Математична модель зносу бабітових покриттів. Критерії вибору технології нанесення бабітових покриттів. *Metallophysics and Advanced Technologies* 2022. Вип. 44, № 12. Pp. 1643–1659.
30. Hlushkova D. B., Bagrov V. A., Volchuk V. M., Murzakhmetova U. A. Influence of structure and phase composition on wear resistance of sparingly alloyed alloys. *Functional Materials*. 2023. Vol. 30, № 1. Pp. 74–78. URL: <https://doi.org/10.15407/fm30.01.74>
31. Hlushkova D. B., Bagrov V. A., Saenko V. A., Volchuk V. M., Kalinin A. V., Kalinina N. E. 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*. 2023. № 2 (144). Pp. 105–109.
32. Hlushkova D. B., Kalinin A. V., Kalinina N. E., Volchuk V. M., Saenko V. A., Efimenko A. A. Study of nanomodification of nickel alloy GS3 with titanium carbide. *Питання атомної науки та техніки*. 2023. № 2 (144). Pp. 126–129.

## REFERENCES

- Hlushkova D.B. *Zmitsnennya ta vidnovlennya detaley tsylindro-porshnevoyi hrupy* [Strengthening and restoration of cylinder-piston group parts]. Kharkiv, 2021, 200 p. (in Ukrainian)
- Hlushkova D., Kalinin V., Stepanyuk A., Hnatyuk A. and Serzhenko I. Studying the properties of steel for sidewalls of chute conveyors. International Science Group. Boston : Primedia eLaunch, 2021, 758 p. URL: DOI-10.46299/ISG.2021.MONO.TECH.II
- Hlushkova D.B. and Bagrov V.A. *Zastosuvannya suchasnykh tekhnolohiy dlya pidvyshchennya znosostiykosti detaley ob'yemnoho hidropryvodu* [Application of modern technologies to increase the wear resistance of parts of a volumetric hydraulic drive : collective monograph]. Sherman Oaks, California : GS Publishing Services, 2022, pp. 171–178. (in Ukrainian)
- Glushkova D.B., Ryzhkov Yu.V. and Baidala V.Yu. *Naukovi ta tekhnolohichni osnovy pidvyshchennya trybolohichnykh kharakterystyk detaley mekhatronnykh system* [Scientific and technological basis of improving the tribological characteristics of parts of mechatronic systems]. Kharkiv, 2022, 119 p. (in Ukrainian)
- Hlushkova D.B. *Pidvyshchennya nadiynosti robochykh orhaniv hidrofikovanykh mashyn spetsial'noho pryznachennya: monografiya* [Increasing the reliability of working bodies of special-purpose hydrofed machines: monograph]. Dnipro : Zhurfond Publ., 2023, 258 p. (in Ukrainian)
- Gluskova D. and Volchuk V. Determination of the optimal parameters of laser boriding to improve the wear resistance of piston rings. *Novi materialy i tekhnolohiyi v metalurhiyi ta mashynobuduvanni* [New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering]. 2022, no. 2, pp. 29–32.
- Glushkova D.B., Kalinina N.E., Demchenko S.V. and Nosova T.V. *Pidvyshchennya korozivnoyi stiykosti zvarnykh z'yednan' v rezul'tati termichnoyi obrobky* [Increasing the corrosion resistance of welded joints as a result of heat treatment]. *Metallovedenye y termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Thermal Treatment of Metals]. 2022, no. 1, pp. 21–28. (in Ukrainian)
- Kalinina N.E., Hlushkova D.B., Tsokur N.I., Nosova T.V., Bagrov V.A. and Demchenko S.V. *Obgruntuvannya vyboru skandiyu dlya mikrolehuvannya vysokomitsnykh alyuminiyevykh splaviv* [Justification of the choice of scandium for microalloying of high-strength aluminum alloys]. *Aviatsiyno-kosmichna tekhnika i tekhnolohiya* [Aviation and Space Technique and Technology]. 2022, no. 4, special iss. 2 (182), pp. 114–118. (in Ukrainian)



9. Bagrov V.A. and Glushkova D.B. *Formuvannya struktury ta fazovoho skladu znosostiykykh staley, lehovanykh tytanom* [Formation of the structure and phase composition of wear-resistant steels doped with titanium]. *Visnyk Khnadu* [KHNADU Bulletin]. 2022, vol. 97, pp. 30–33. (in Ukrainian)
10. Bagrov V.A. and Glushkova D.B. *Vlastyivosti znosostiykykh beznikelevykh vtorynnotverdiyuchykh staley dlya naplavlennya shampiv haryachoho obroblennya metaliv* [Properties of wear-resistant nickel-free secondary hardening steels for surfacing dies of hot metal processing]. *Visnyk Khnadu* [KHNADU Bulletin]. 2022, vol. 97, pp. 34–37. (in Ukrainian)
11. Glushkova D.B., Bagrov V.A., Demchenko S.V., Volchuk V.M., Kalinin O.V. and Kalinina N.E. *Struktura y vlastyivosti poroshkovykh hazoplazmennykh pokryttiv na osnovi nikelyu* [Structure and properties of powder gas plasma coatings based on nickel]. *Visnyk Khnadu* [KHNADU Bulletin]. 2022, vol. 97, pp. 74–81. (in Ukrainian)
12. Bolshakov V.I., Kalinin O.V., Glushkova D.B., Tokhtar G.I., Bagrov V.A. and Hnatyuk A.A. *Sposoby otrymannya dyspersnoyi struktury ta pidvyshchennya mitsnosti kremniy-marhantsevystykh staley* [Methods of obtaining a dispersed structure and increasing the strength of silicon-manganese steels]. *Visnyk Khnadu* [KHNADU Bulletin]. 2021, no. 94, pp. 7–12. (in Ukrainian)
13. Hlushkova D.B. and Bagrov V.A. *Doslidzhennya vlastyivostey poverkhnevyykh shariv porshnevyykh kilet' pislya hazotermichnogo napylennya* [Investigation of the properties of the surface layers of piston rings after gas-thermal spraying]. *Visnyk Khnadu* [KHNADU Bulletin]. 2021, no. 94, pp. 8–22. (in Ukrainian)
14. Hlushkova D.B. and Bagrov V.A. *Udoskonalennya tekhnolohichnogo protsesu pidvyshchennya dovhovichnosti robochoho instrumenta hidromolotov detonatsiynym napylennyam* [Improvement of the technological process of increasing the durability of the working tool of hydraulic hammers by detonation spraying]. *Visnyk Khnadu* [KHNADU Bulletin]. 2021, no. 94, pp. 39–46. (in Ukrainian)
15. Glushkova D.B., Avrunin G.A., Ryzhkov Yu.V., Voronkov O.I., Stepaniuk A.I. and Hnatiuk A.A. *Pidvyshchennya znosostiykosti vuzliv ob'yemnoho hidropryvoda* [Increasing the wear resistance of units of a volumetric hydraulic drive]. *Visnyk Khnadu* [KHNADU Bulletin]. 2021, no. 94, pp. 80–84. (in Ukrainian)
16. Kalinina N.E., Hlushkova D.B., Dzhur Y.O., Khodyrev S.Ya. and Kalinin V.T. Influence of temperature of thermal processing on intercrystalline corrosion resistance of welding joints. *Jornal of Chemistry and Technologies*. 2020, no. 28 (1), pp. 34–41.
17. Kalinina N.E., Hlushkova D.B., Voronkov A.I., Sanin A.F., Kalinin V.T., Nosova T.V. and Bondarenko O.V. Special features of the phase composition and structure of aluminum alloys modified by refractory nanocompositions. *Functional Materials*. 2020, vol. 27, no. 3, pp. 508–512.
18. Dudukalov Y., Ternyuk M. and Hlushkova D. Synthesis of the fuel systems boron-containing metalized fuels for vehicles. *SAE Technical Paper*. 2020-01-2155, 2020, p. 6.
19. Leontiev D., Voronkov O., Korohodskiy V., Hlushkova D. and Nikitchenko I. Mathematical modeling of operating processes in the pneumatic engine of the car. *SAE Technical Paper*. 2020-01-2222, 2020, p. 6.
20. Kalinina N.E., Glushkova D.B., Voronkov A.I. and Kalinin V.T. Influence of nanomodification on structure formation of multicomponent nickel alloys. Fu 1. Corrosion resistance of reinforced layers of 15X11MΦ steel steam turbine blades. *VANT*. 2021, no. 2 (132), pp. 136–141.
21. Tarelnyk V., Hlushkova D., Martsynkovskyy V., Dumanchuk M., Antoszewski B., Kundera Cz., Konopiianchenko Ie., Tarelnik N., Hudkov S. and Zahorulko A. Increasing fretting resistance of flexible element pack for rotary machine flexible machine flexible coupling. Part 1. Analysis of the reasons affecting fretting resistance of flexible elements from expansion coupling. *Jornal of Physics : Conference Series*. 2021, no. 1741, 11 p.
22. Hlushkova D., Voronkov A., Kalinina N., Kalinin V., Polonskyi L. and Stepaniuk A. Structural and phase composition features of titanium and chromium nitride coatings obtained by ion-plasma deposition. *Functional Materials*. 2020, vol. 27, no. 4, pp. 710–715.
23. Hlushkova D.B., Kirichenko I.H., Bahrov V.A., Kalinina N.Ye. and Nosova T.V. Use of detonation sputtering to increase the durability of hydraulic hammer critical parts. *PAST*. 2021, no. 5 (135), pp. 139–145.
24. Bolshakov V.I., Kalinin A.V., Hlushkova D.B., Ryzhkov Y.V. and Bagrov V.A. Transformation of structure and properties of structural steel during nanomodification and strengthening treatment. *Functional Materials*. 2021, vol. 28, no. 3, pp. 486–491.
25. Bolshakov V.I., Kalinin O.I., Kalinina N.E., Hlushkova D.B., Voronkov O.I., Ryzhkov Y.V. and Stepanyuk A.I. Increasing the corrosion resistance of welded joints of heat-resistant nickel alloy with steel. *VANT*. 2022, no. 1 (37), pp. 195–198.
26. Hlushkova D.B., Voronkov O.I., Ryzhkov Y.V., Kalinin N.E. and Nosova T.V. Peculiarities of the formation of a hardened layer during laser boronizing of piston rings. *VANT*. 2022, no. 1 (37), pp. 199–201.
27. Vahrusheva V.S., Hlushkova D.B., Volchuk V.M., Nosova T.V., Mamhur S.I., Tsokur N.I., Bagrov V.A., Demchenko S.V., Ryzhkov Y.V. and Scrypnikov V.O. Increasing the corrosion resistance of heat-resistant alloys for parts of power equipment. *VANT*. 2022, no. 4 (140), pp. 137–140.
28. Hlushkova D.B., Bagrov V.A., Demchenko S.V., Volchuk V.M., Kalinin O.V. and Kalinina N.E. Structure and properties of powder gas-plasma coatings based on nickel. *VANT*. 2022, no. 4 (140), pp. 125–130.

29. Tarelyk V.B., Gaponova O.P., Konoplyanchenko E.V., Tarelyk N.V., Dumanchuk M.Yu., Pirogov V.O., Voloshko T.P. and Glushkova D.B. *Rozrobka systemy spryamovanoho vyboru naybil'sh efektyvnoyi tekhnolohiyi pidvyshchennya yakosti babbitovykh pokryttivpidshypnykiv kovzannya. CH.2. Matematychnyy model' znosu babbitovykh pokryttiv. Kryteriyi vyboru tekhnolohiyi nanesennya babbitovykh pokryttiv* [Development of a system of targeted selection of the most effective technology for improving the quality of babbit coating of sliding bearings. Part 2. Mathematical model of wear of babbitt coatings. Criteria for choosing a technology for applying babbit coatings]. *Metallophysics and Advanced Technologies*. 2022, vol. 44, no. 12, pp. 1643–1659. (in Ukrainian)
30. Hlushkova D.B., Bagrov V.A., Volchuk V.M. and Murzakhmetova U.A. Influence of structure and phase composition on wear resistance of sparingly alloyed alloys. *Functional Materials*. 2023, vol. 30, no. 1, pp. 74–78. URL : <https://doi.org/10.15407/fm30.01.74>
31. Hlushkova D.B., Bagrov V.A., Saenko V.A., Volchuk V.M., Kalinin A.V. and Kalinina N.E. Study of wear of the building-up zone of martensite-austenitic and secondary hardening steels of the Cr–Mn–Ti system. *Pytannya atomnoyi nauky ta tekhniky* [Issues of Atomic Science and Technology]. 2023, no. 2 (144), pp. 105–109.
32. Hlushkova D.B., Kalinin A.V., Kalinina N.E., Volchuk V.M., Saenko V.A. and Efimenko A.A. Study of nanomodification of nickel alloy GS3 with titanium carbide. *Pytannya atomnoyi nauky ta tekhniky* [Issues of Atomic Science and Technology]. 2023, no. 2 (144), pp. 126–129.

Надійшла до редакції: 03.04.2023.