

PACS numbers: 62.20.fk, 62.20.fq, 62.20.M-, 62.20.mj, 62.20.mm, 62.20.mt, 81.40.Np

## Механічна стабільність і крихкість металів і сплавів.

### Ч. 4. Механізм руйнівальної дії концентраторів напружень

Ю. Я. Мешков, Г. П. Зіміна, К. Ф. Сорока, Т. В. Мельниченко

*Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,  
бульв. Академіка Вернадського, 36,  
03142 Київ, Україна*

В циклі робіт «Механічна стабільність і крихкість металів і сплавів» (частини 1–3) представлено систематичний розгляд проблеми руйнування металевих матеріалів в умовах окрихчення їх під дією концентраторів напружень (КН). В основу моделю руйнування закладено уявлення про руйнування як втрату механічної стабільності (МС) твердого тіла (ТТ), що знаходиться під дією прикладених сил. В заключній, 4-й частині циклу викладено основи уявлень про особливості механізму руйнування металевих тіл в умовах неоднорідних силових полів у зонах дії КН або за вигину навантажених зразків. Розглядається оригінальний енергосиловий модель руйнування металевих матеріалів, у яких завдяки пластичності з'являється особлива механічна властивість — резерв механічної стабільності (РМС) (або «зламостійкість»)  $B_r$ . Руйнівальна сила КН проявляється в локальному вичерпанні РМС ( $B_r$ ) у зоні пластичності КН, відповідно до величини ефективного коефіцієнта перенапружень  $\alpha_{ef}$ . Критична величина  $\alpha_{ef}^N$  визначається як руйнівальна сила КН, що повністю вичерпує РМС металу  $B_{rc}$  за критичної температури крихкості  $T_c$  в момент руйнування на межі плинності металу  $\sigma_{NF}$ . За визначенням  $\alpha_{ef}^N = B_{rc}$  для  $T = T_c$ . В роботі наведено приклади застосування вказаних параметрів моделю

Corresponding author: Yuriy Yakovych Meshkov  
E-mail: meshkov305@gmail.com

*G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,  
36 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

Citation: Yu. Ya. Meshkov, G. P. Zimina, K. F. Soroka, and T. V. Melnychenko, Mechanical Stability and Brittleness of Metals and Alloys. Pt. 4. Mechanism of Failure Action of Stress Concentrators, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **47**, No. 7: 753–768 (2025), DOI: [10.15407/mfint.47.07.0753](https://doi.org/10.15407/mfint.47.07.0753)

© Publisher PH “Akademperiodyka” of the NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0>)

$\alpha_{ef}^N$  і  $B_r$  на експериментальних даних з опублікованих робіт, які обіймають широкий спектр конструкційних криць ( $\sigma_{0,2} = 140\text{--}2200$  МПа,  $\psi_K = 10\text{--}85\%$ ) і різні види КН (тріщини, кільцеві надрізи).

**Ключові слова:** металеві стопи, резерв механічної стабільності, зламостійкість, ефективність руйнівальної дії КН, нормативна окрихчувальна сила концентраторів напружень.

The series of works ‘Mechanical Stability and Brittleness of Metals and Alloys’ (parts 1–3) presents a systematic review of the problem of failure of metal materials under conditions of their embrittlement due to the stress raisers (SRs). The failure model is based on the concept of fracture as the mechanical instability of a solid due to applied forces. The final, 4-th, part outlines the fundamentals of ideas concerning the specific features of the failure mechanism for metal solids under the non-uniform force fields inside the regions of SR action or during bending of loaded specimens. An original energy–force model of failure of metal materials is considered, in which, due to ductility, a special mechanical property manifests itself, namely, mechanical-stability margin (MSM) (so called ‘break resistance’)  $B_r$ . The SR destructive force manifests itself in local ‘exhaustion’ of MSM ( $B_r$ ) within the SR plasticity zone according to the value of the effective stress-raising coefficient  $\alpha_{ef}$ . The critical value of  $\alpha_{ef}^N$  is defined as the SR destructive force, which completely ‘exhausts’ the MSM of metal,  $B_{rc}$ , at the critical brittleness temperature  $T_c$  at the moment of fracture at the yield point of the metal  $\sigma_{0,2}$ . By definition,  $\alpha_{ef}^N = B_{rc}$  at  $T = T_c$ . This work provides examples of application of the specified model parameters,  $\alpha_{ef}^N$  and  $B_r$ , to experimental evidence from published works covering a wide range of structural steels ( $\sigma_{0,2} = 140\text{--}2200$  МПа,  $\psi_K = 10\text{--}85\%$ ) and various types of CF (cracks, annular notches).

**Key words:** metal alloys, mechanical-stability margin, break resistance, destructive force of stress raiser, normative embrittlement force of stress raiser.

(Отримано 21 січня 2025 р.; остаточн. варіант — 7 квітня 2025 р.)

## 1. ВСТУП. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Шкідлива роль різного роду концентраторів напружень (КН), — надрізів, тріщин тощо, — для міцності елементів конструкцій і деталей машин є загальновідомою. Для оцінки міри руйнівальної дії КН у ідеально крихких матеріалах (скло, ґраніт тощо) є численні довідники стосовно коефіцієнтів концентрації напружень  $\alpha_\sigma$  для КН різної конфігурації та гостроти [1, 2]. Для металевих матеріалів з притаманною їм пластичністю коефіцієнти  $\alpha_\sigma$  втрачають свою придатність через зміну чисто пружного напружено-деформованого стану (НДС) матеріалу на змішаний пружньо-пластичний. Але під дією КН металеві вироби, особливо з високоміцного класу стопів, не лише виявляють певні ознаки окрихчення в місцях зламу зразків, але нерідко втрачають міцність виробу  $\sigma_{NF}$

до рівня нижче межі плинності ( $\sigma_{0,2}$ ) металу, що свідчить про те, що присутність КН може призвести до крихкості виробу навіть з достатньо пластичного металевго стопу. Звідси виникла потреба визначати критичні параметри в'язко-крихкого переходу в металевих стопах шляхом руйнування спеціальних зразків з надрізами (типу *KCV*, *KCU*) в області низьких температур, де визначається критична температура в'язко-крихкого переходу  $T_c$  за умовним критерієм критичного показника роботи руйнування зразка — ударної в'язкості [3]. Параметр  $T_c$  достатньо простий і зручний для практичного інженерного застосування і тому впродовж кількох десятиліть успішно використовується в методиках атестації металевих стопів на крихкість. Але надати параметру  $T_c$  обґрунтоване фізичне трактування в моделю механізму руйнівальної дії КН з відомим фактором  $\alpha_\sigma$  через зв'язок з механічними властивостями металу ( $\sigma_{0,2}$  — міцність,  $\psi_K$  — пластичність) є достатньо проблематичною справою.

В роботах [4–6] окрихчення та крихкість металів розглядалися з позицій концепції механічної стабільності, в якій для аналізу умов руйнування використовується спеціальний параметр механічних властивостей — пластичний резерв механічної стабільності (РМС)  $B_r = S_K / \sigma_{0,2}$  ( $S_K$  — істинне напруження руйнування в шийці зразка), названий авторами зламостійкістю.

Зламостійкість  $B_r$  об'єднує в собі дію чинників пластичності та деформаційного зміцнення, тобто комплексно відображає роль пластичності в процесі руйнування металу, причому не в форматі показників пластичності ( $\psi_K$ ), а в форматі показників міцності —  $S_K$  і  $\sigma_{0,2}$ , що уможливорює розвинути принципово новий підхід до аналізу явища руйнування металів у рамках застосування нових параметрів дослідження.

Тому в заключній частині вказаного циклу робіт [4–6] поставлено задачу розглянути механізм руйнівальної дії концентратора напружень у конкретному зв'язку з руйнівною силою КН для крихких матеріалів  $\alpha_\sigma$ . Слід відмітити, що поставлену задачу буде розглянуто в рамках феноменологічного підходу з використанням лише глобальних макроскопічних (інженерних) показників механічних властивостей ( $\sigma_{0,2}$ ,  $S_K$ ,  $\sigma_{NF}$ ), не вдаючись до аналізу локальних показників НДС в зоні дії КН.

## 2. ПАРАМЕТРИ ВИМІРУ ОКРИХЧУВАЛЬНОЇ ДІЇ КОНЦЕНТРАТОРА НАПРУЖЕНЬ

Окрихчення металу під дією КН полягає в зменшенні вимірюваної пластичності зразка з КН —  $\psi_N$  у порівнянні з пластичністю гладкого зразка  $\psi_K$  (рис. 1).

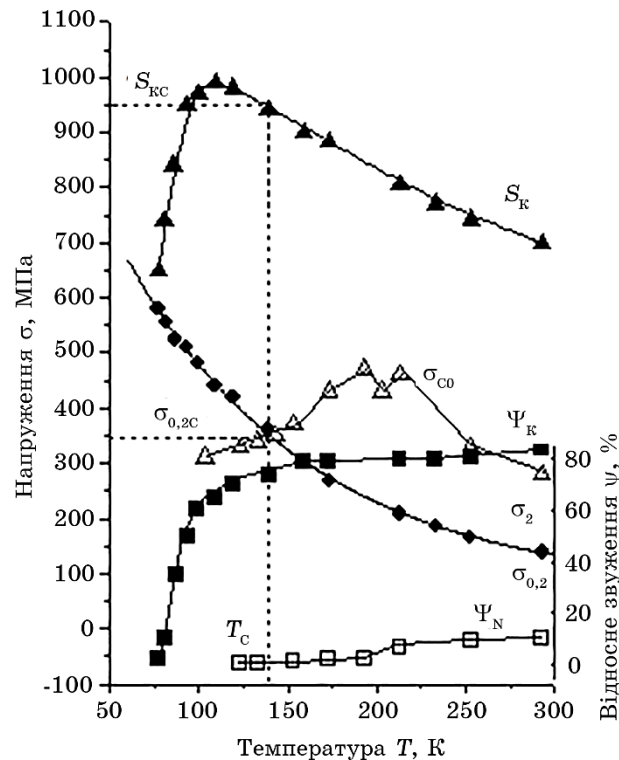
Крихкість гладкого зразка означає  $\psi_K \rightarrow 0$ , що збігається зі збігом

напруження руйнування  $S_K$  з початком плинності металу  $\sigma_{0,2}$  за температури  $T_{br}$  (рис. 1):

$$\sigma_{0,2} \approx S_K = R_{br}; \quad (1)$$

$R_{br}$  — крихка міцність металу за температури крихкості за умови (1).

Збільшення температури  $T$  приводить до появи пластичності  $\psi_K > 0$ , що супроводжується розділенням напружень межі плинності  $\sigma_{0,2}$  і руйнування  $S_K$  з появою стабільного пластичного деформаційного процесу в металі з утворенням силового інтервалу розміром



**Рис. 1.** Температурні залежності механічних властивостей  $\alpha$ -Fe для гладких зразків ( $\sigma_{0,2}$  — межа плинності,  $S_K$  — істинне напруження руйнування,  $\psi_K$  — відносне звуження під час розриву в шийці) та зразків з тріщиною втоми під час триточкового вигину ( $\sigma_{c0}$  — середнє номінальне напруження руйнування,  $\psi_N$  — відносне звуження в нетто перерізі зразка) [4].

**Fig. 1.** Temperature dependence of the mechanical properties of  $\alpha$ -Fe for unnotched specimens ( $\sigma_{0,2}$  is yield strength,  $S_K$  is true fracture stress,  $\psi_K$  is reduction in area, when breaking) and specimens with a fatigue crack under three-point loading ( $\sigma_{c0}$  is the average nominal fracture stress of specimen,  $\psi_N$  is reduction in area of the specimen net cross-section) by [4].

$\Delta S$ , який можна назвати пластичним резервом механічної стабільності (РМС):

$$\Delta S = S_K - \sigma_{0,2}. \quad (2)$$

Тобто феноменологічно сутність руйнування за напруження  $S_K$  полягає в тому, що металевий матеріал у принципі не має жодної можливості дійти до стану руйнування, як не здолати інтервал пластичного РМС  $\Delta S$  хоча б у мінімальному розмірі  $\Delta S \rightarrow 0$  за  $T = T_{br}$  (рис. 1).

У зразках з КН у зоні локальної пластичності інтервал  $\Delta S \gg 0$  долається за номінального (середнього) напруження руйнування  $\sigma_{NF} > \sigma_{0,2}$  або  $\sigma_{NF} < \sigma_{0,2}$ , причому умова

$$\sigma_{NF} = \sigma_{0,2} \quad (3)$$

означає критичний стан крихкості зразка з КН, аналогічної умові (1); тому її позначають як  $\sigma_{NFc} = \sigma_{0,2c}$  (рис. 2).

В роботах [5–7] резерв механічної стабільності (2) визначався у вигляді безрозмірного коефіцієнта  $B_r$ :

$$B_r = \frac{S_K}{\sigma_{0,2}}, \quad (4)$$

який відображає міру особливої механічної властивості металу та названий у [4–6] зламостійкістю металу  $B_r$ .

Аналогічно, для зразка з КН маємо:

$$B_{rN} = \frac{\sigma_{NF}}{\sigma_{0,2}}, \quad (5)$$

$B_{rN}$  — показник залишкової зламостійкості зразка з КН\*.

Відзначимо критичні значення параметрів зламостійкості  $B_r$  і  $B_{rN}$  під час в'язко-крихкого переходу в руйнуванні зразка з КН (3) ( $T = T_c$ ; рис. 2) для гладкого зразка

$$B_{rc} = \frac{S_{Kc}}{\sigma_{0,2c}} \quad (6)$$

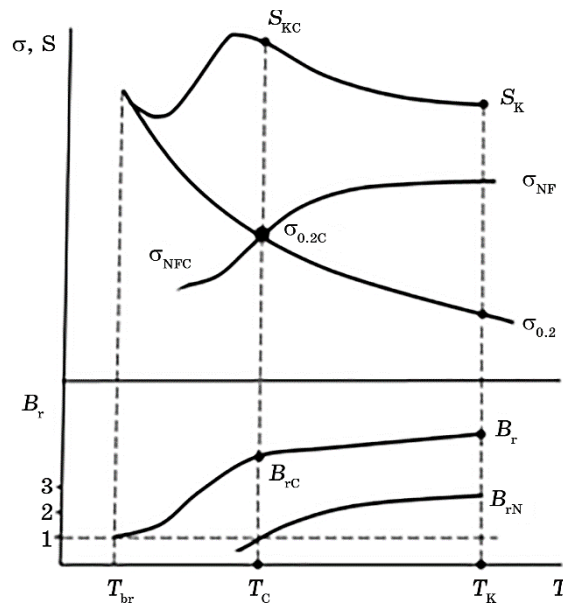
і для зразка з КН

$$B_{rNc} = \frac{\sigma_{NFc}}{\sigma_{0,2c}} = 1. \quad (7)$$

Співвідношення параметрів  $B_r$  і  $B_{rc}$  відображає температурну від-

---

\*Примітка: В роботі [6] для параметрів зламостійкості використовувався показник  $b_r$  на одиницю менше:  $b_r = B_r - 1$ , що відображав *нормований* резерв міцності  $b_r = \Delta S / \sigma_{0,2}$ .



**Рис. 2.** Температурна залежність базових механічних характеристик  $\sigma_{0.2}$ ,  $S_K$  і зламостійкостей для гладких зразків ( $B_r$ ) і зразків з КН ( $B_{rN}$ ) (схема).

**Fig. 2.** Temperature dependence of basic mechanical characteristics  $\sigma_{0.2}$ ,  $S_K$  and break resistances for smooth specimens ( $B_r$ ) and specimens with SR ( $B_{rN}$ ) (scheme).

даленість зразка з КН від переходу у крихкий стан безпосередньо у показниках механічної властивості зламостійкості, а величина  $B_{rN}$  кількісно відображає міру захисту від крихкості ( $B_{rN} > 1$ ) або, навпаки, міру переокрихчення ( $B_{rN} < 1$ ) даного металу в умовах дії КН.

Друге важливе співвідношення параметрів  $B_r$  (4) і  $B_{rN}$  (5) відображає ефективність руйнувальної дії КН  $\alpha_{ef}$  як співвідношення напружень руйнування гладкого зразка ( $S_K$ ) і зразка з КН ( $\sigma_{NF}$ ):

$$\alpha_{ef} = \frac{B_r}{B_{rN}} = \frac{S_K}{\sigma_{NF}} \quad (8)$$

і, відповідно, критичну (нормовану) ефективність  $\alpha_{ef}^N$  за  $T_c$ :

$$\alpha_{ef}^N = \frac{B_{rc}}{B_{rNc}} = \frac{S_{Kc}}{\sigma_{0.2c}} = B_{rN}, \quad (9)$$

оскільки  $B_{rNc}$  за  $T_c$  дорівнює 1 згідно з (7).

Саме такі співвідношення запропонованих параметрів було використано в роботах [6, 7] для кількісної аналізи окрихчувальної дії КН у конструкційних металевих стопах.

### 3. МЕХАНІЗМ РУЙНУВАЛЬНОЇ ДІЇ КОНЦЕНТРАТОРІВ

В зразках з КН захисний від руйнування резерв механічної стабільності  $\Delta S$  (або зона зламостійкості  $B_r$ ; рис. 1, 2) вичерпується локально повністю або частково в зоні пластичності (ЗП), що виникає біля вістря КН, в якій формується локальне перенапруження з певною величиною коефіцієнта перенапруження  $K_\sigma$ :

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{0,2c}}. \quad (10)$$

Хоча істинне значення величини локального напруження  $\sigma_{loc}$  залишається невідомим, проте в макроскопічному вимірі для *критичного* руйнування за  $T = T_c$  достовірно відомо, що в момент руйнування за середнього напруження  $\sigma_{Nfc}$  в зоні дії КН притаманний металу РМС ( $\Delta S$ ) було так чи інакше вичерпано; тому у виразі (10) замість  $\sigma_{loc}$  можна використати відому величину  $S_{Kc}$  (рис. 2), а отже, і критичне значення зламостійкості  $B_{rc}$  по (6). Тобто виключно для руйнування за  $T_c$  в умовах співвідношення (3)  $\sigma_{Nfc} = \sigma_{0,2c}$  фактичне фізичне співвідношення для  $K_\sigma$  по (8) можна еквівалентно відобразити певним ефективним параметром  $\alpha_{ef}^N$  як ефективним коефіцієнтом локального перенапруження (КЛП) в зоні пластичності КН. Очевидно, що

$$\alpha_{ef}^N = B_{rc}. \quad (11)$$

Локальне перенапруження  $K_\sigma$  над межею пластичності  $\sigma_{0,2}$  по (10) може складатися з двох незалежних чинників.

Перший чинник деформаційного зміцнення —  $\sigma_e/\sigma_{0,2}$ , який за Холомоном [8] визначається для деформації  $e$ , як

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_{0,2}} = \left( \frac{e}{e_{0,2}} \right)^n, \quad (12)$$

де  $e_{0,2} = 0,002$  (0,2%) — остаточна деформація на умовній межі плинності  $\sigma_{0,2}$ ,  $n$  — показник деформаційного зміцнення ( $n \ll 1$ ). Введемо коефіцієнт *деформаційного* перенапруження  $B_e$ :

$$B_e = \frac{\sigma_e}{\sigma_{0,2}}. \quad (13)$$

З (12) і (13) матимемо

$$B_e = (500e)^n. \quad (14)$$

Другий чинник перенапруження в зоні дії КН — пружне перена-

пруження над межею плинності  $\sigma_{0,2}$ , що виникає за рахунок жорсткості НДС в умовах тривісного розтягу ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > 0$ , гідростатичне розтягнення, складний вид НДС (СНС)). Коефіцієнт пружнього перенапруження  $j$  [9] —

$$j = \frac{\sigma_1}{\sigma_{0,2}}. \quad (15)$$

В умовах лінійного розтягу (з простим типом НДС (ПНС))  $j = 1$ ; в умовах СНС  $j > 1$ . В зоні пластичності КН тип НДС змінюється від контуру надрізу у глибину металу так, що на кінчику тріщини має місце практично простий тип НДС (ПНС), де  $j \approx 1,15$ , який у тонкостінних пластинах залишається таким для всієї зони пластичності. В товстих пластинах (брусах) внаслідок ефекту стиснення плинності в зоні пластичності поступово формується локальна зона СНС, де коефіцієнт  $j$  сягає максимальної величини порядку 2,7–3,0 [9].

Фактори  $B_e$  по (14) і  $j$  по (15) діють синергійно, підсилюючи один одного; тому  $\alpha_{ef}^N$  по (11) виражається добутком

$$\alpha_{ef}^N = jB_e. \quad (16)$$

Фактори перезміцнення  $j$  і  $B_e$  змінюються по полю зони пластичності невідомим для нашої аналізи чином, але якщо у певній точці ЗП локальне напруження  $\sigma_{loc}$  по (10) досягне рівня енергетичної нестійкості даної деградованої пластичністю структури металу, то звідси почнеться процес автокаталітичного визволення пружної енергії за Гріффітом [10], тобто процес руйнування твердого тіла (ТТ) за номінального напруження  $\sigma_{NF} \ll \sigma_{loc}$ .

Подія руйнування ТТ макроскопічно фіксується за температури  $T$  з відповідною величиною  $B_r$  ( $B_{rc}$  по (11)), яка відображає руйнівальну силу КН в термінах чисто *деформаційного* показника  $B_e$  (16), відомого з умов лінійного розтягування зразка металу як зламостійкість  $B_r$  (4).

Отже, кожне руйнування зразка з КН знаходиться під контролем показників  $\sigma_{0,2}$  і  $S_K$  (тобто  $B_r$  по (4)) від базових (стандартних) випробувань механічних властивостей металу, що, власне, й складало основу задачі даної роботи.

Далі буде показано приклади застосування показників зламостійкості  $B_r$  у дослідженнях закономірностей окрихчувальної та руйнівальної дії різних типів КН і типів НДС.

#### 4. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ АНАЛІЗИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

Аналізуємо вплив типу НДС і гостроти КН на руйнівальну силу концентратора напружень. В опублікованих раніше роботах [5–8,



12] параметер зламостійкості  $B_r$  по (4) було практично застосовано в аналізі експериментальних даних з руйнування зразків із КН на широкому наборі конструкційних криць з міцністю  $\sigma_{0,2} = 140\text{--}2200$  МПа і пластичністю  $\psi_K \cong 10\text{--}87\%$ . Набутих результатів експерименту достатньо для ілюстрації механізму руйнівальної дії КН в металах і стопах, представленою в розд. 3.

В роботі [4] виконувалися систематичні дослідження руйнування зразків з надрізами різної геометричної конфігурації, а також тріщинами втоми на тонких пластинах (в умовах ПНС в зоні пластичності) та зразків з кільцевими надрізами різної гостроти (в умовах СНС в зоні пластичності КН), а також на брусках товщиною у 18 мм з наведеною тріщиною втоми. Визначалися показники  $\sigma_{0,2}$ ,  $S_K$ ,  $\psi_K$  на гладких зразках і  $\sigma_{NF}$  на зразках з КН для двох модельних матеріалів — високопластичного армко-заліза ( $\alpha\text{-Fe}$ ,  $\sigma_{0,2} = 140$  МПа,  $\psi_K = 85\%$ ) (рис. 1) і низькопластичної відпаленої криці У8 ( $\sigma_{0,2} = 340$  МПа,  $\psi_K = 13\%$ ), а також криць кількох конструкційних марок. Дослідження проводилися в широкому інтервалі температур  $300\text{--}77$  К з визначенням критичної температури  $T_c$  за умовою  $\sigma_{NF} = \sigma_{0,2}$ .

Наявні експериментальні дані з роботи [4] дали змогу визначити потрібні для даної аналізи показники зламостійкості  $B_r$  (для  $T_c = 293$  К) і  $B_{rc}$  для відповідних температур  $T_c$  з метою узагальнення результатів експерименту. Нагадаємо, що головна задача нашої роботи полягала в тому, щоб перевести аналіз ефективності руйнівальної дії КН з температурного відліку через показники  $T_c$  до відповідних показників механічної властивості зламостійкості ( $B_r$ ,  $B_{rc}$ ), що уособлює собою антикрихчувальну роль пластичності в умовах дії КН у вигляді коефіцієнта *холодостійкості*  $K_{cr}$  (табл. 1):

$$K_{cr} = \frac{B_r}{B_{rc}}. \quad (17)$$

На підсумковому графіку рис. 3 представлено зміну ефективного коефіцієнта перенапруження  $\alpha_{ef}^N$  по (9) для різних типів КН в умовах ПНС (тонкі пластини) і СНС (брус товщиною у 18 мм і кільцеві надрізи різної гостроти; див. табл. 1) в залежності від початкової зламостійкості металу  $B_r$  для  $T = 293$  К за даними роботи [4], в якій, окрім вказаних модельних матеріалів ( $\alpha\text{-Fe}$  і криці У8) досліджувалися низка різноманітних конструкційних криць і зразки, вирізані зі зварних швів на товстих брусах (18 мм) з наведеною тріщиною втоми (табл. 2). Додатково в табл. 2 було використано експериментальні дані довідникового характеру з роботи [13], в якій досліджувалися зразки з кільцевими надрізами (СНС) переважно з конструкційних загартовано-відпущених криць.

На рисунку 3 діагональна лінія  $B_r = B_{rc}(\alpha_{ef}^N)$  розділяє поле рисунка на дві половини, з яких нижня частина (А) містить точки за умовою  $B_r > B_{rc}$ , а верхня (В) —  $B_r < B_{rc}$ . Тобто поле А означає, що руйну-

**ТАБЛИЦЯ 1.** Вплив сили КН ( $\alpha_\sigma$ ) і типу НДС (ПНС, тонкі пластини, СНС, кільцеві надрізи, тріщини) на критичні показники руйнування для  $T_c$  модельних стопів  $\alpha$ -Fe ( $\sigma_{0,2} = 140$  МПа,  $B_r = 4,0$ ) та евтектоїдної криці У8 ( $\sigma_{0,2} = 340$  МПа,  $B_r = 1,7$ ) ( $K_{cr}$  для  $T = 293$  К);  $\alpha_\sigma$  — Нейберів коефіцієнт концентрації напружень [12].

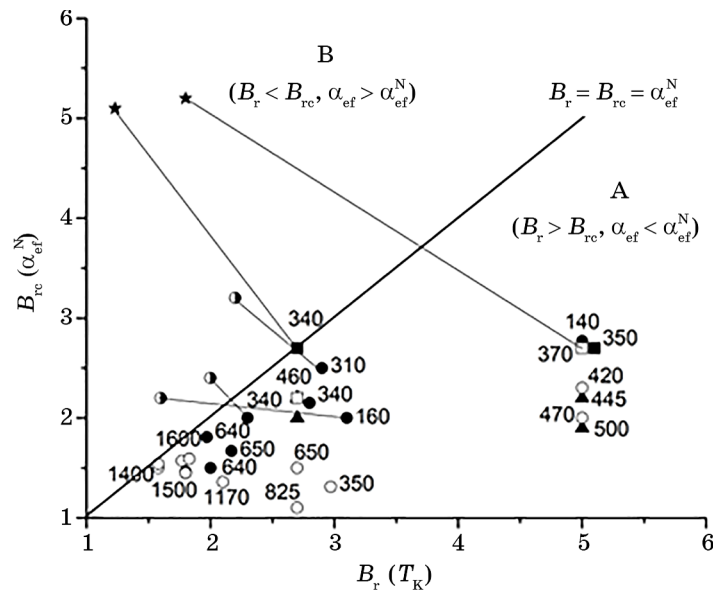
**TABLE 1.** The effect of SR type ( $\alpha_\sigma$ ) and the type of SSS (biaxial thin plates, triaxial annular notches, cracks) at  $T_c$  on the critical characteristics of fracture of model  $\alpha$ -Fe alloys ( $\sigma_{0,2} = 140$  МПа,  $B_r = 4.0$ ) and eutectoid steel U8 ( $\sigma_{0,2} = 340$  МПа,  $B_r = 1.7$ ) ( $K_{cr}$  for  $T = 293$  К);  $\alpha_\sigma$  is the Neiber's stress-raising coefficient [12].

| №                                                                       | Криця        | КН<br>( <i>r</i> , мм) | $\alpha_\sigma$ | $\sigma_{0.2}$ ,<br>МПа | $\psi_K$ ,<br>% | $T_c$ ,<br>К | $\sigma_{0.2c}$ ,<br>МПа | $B_{rc}(\alpha_{ef}^N)$ | $K_{cr}$ ,<br>$B_r/B_{rc}$ |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------|------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|--------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Вид НДС: ПНС (тонкі пластини)                                           |              |                        |                 |                         |                 |              |                          |                         |                            |
| 1                                                                       | $\alpha$ -Fe | К3                     | 2,8             | 140                     | 83              | 100          | 500                      | 1,9                     | 2,63                       |
| 2                                                                       | У8           | (0,25)                 |                 | 350                     | 13              | 200          | 500                      | 2,0                     | 1,35                       |
| 3                                                                       | $\alpha$ -Fe | К4                     | 5,3             | 140                     | 83              | 100          | 445                      | 2,2                     | 2,27                       |
| 4                                                                       | У8           | (0,05)                 |                 | 350                     | 13              | 240          | 440                      | 2,2                     | 1,23                       |
| 5                                                                       | $\alpha$ -Fe | К1                     | 10,1            | 140                     | 83              | 130          | 350                      | 2,7                     | 1,85                       |
| 6                                                                       | У8           | (тріщина)              |                 | 350                     | 13              | 293          | 340                      | 2,7                     | 1,00                       |
| Вид НДС: СНС (п.п. 7–10 — кільцеві надрізи, п.п. 11–12 — тріщини втоми) |              |                        |                 |                         |                 |              |                          |                         |                            |
| 7                                                                       | $\alpha$ -Fe | К3                     | 2,8             | 140                     | 83              | 110          | 470                      | 2,0                     | 2,5                        |
| 8                                                                       | У8           | (0,25)                 |                 | 350                     | 13              | 125          | 825                      | 1,1                     | 2,45                       |
| 9                                                                       | $\alpha$ -Fe | К4                     | 3,9             | 140                     | 83              | 120          | 420                      | 2,3                     | 2,17                       |
| 10                                                                      | У8           | (0,05)                 |                 | 350                     | 13              | 150          | 650                      | 1,5                     | 1,8                        |
| 11                                                                      | $\alpha$ -Fe | К1                     | 10,1            | 140                     | 83              | 140          | 370                      | 2,7                     | 1,85                       |
| 12                                                                      | У8           | (тріщина)              |                 | 350                     | 13              | 220          | 460                      | 2,2                     | 1,23                       |

вання за  $T_c$  відбувається в умовах надлишкової пластичності (точніше — зламостійкості  $B_r$ ) і, отже, це — руйнування в'язкого типу, де КН не здолав опір окрихченню даного стопу, а в полі В, навпаки, руйнівальна дія КН ( $\alpha_{ef}^N$ ) перевищила опір окрихченню  $B_r$  і руйнування під дією КН крихке, оскільки  $\sigma_{NF} < \sigma_{0,2}$ .

В таблиці 1 представлено дані лише для двох модельних стопів:  $\alpha$ -Fe ( $\sigma_{0,2} = 140$  МПа,  $\psi_K = 83\%$ ,  $B_r = 5,0$ ) і криці У8 ( $\sigma_{0,2} = 340$  МПа,  $\psi_K = 13\%$ ,  $B_r = 2,7$ ). Досліджувалися зразки з КН у простому НДС (тонкі пластини,  $t = 1$  мм — ПНС, поз. 1–6) і у СНС (кільцеві надрізи, поз. 7–10, брус,  $t = 18$  мм з тріщиною втоми,  $l = 20$  мм з руйнуванням за триточковому вигині, поз. 11–12). Показники концентрації напружень  $\alpha_\sigma$  визначалися для зразків з надрізами відомої гостроти (поз. 1–4, 7–10)  $r = 0,05$  мм і  $r = 0,25$  мм) згідно з довідником [2]. Для зразків з тріщиною (поз. 5–6, 11–12)  $\alpha_\sigma$  не визначається.

З позицій 1–6 (ПНС, табл. 1) видно, що показник критичних температур  $T_c$  істотно залежить від пластичності  $\psi_K$  стопу, тоді як критичні значення зламостійкості  $B_{rc}$  зростають зі збільшенням



**Рис. 3.** Залежність ефективного коефіцієнта перенапружень  $\alpha_{ef}^N$  різних видів КН від резерву механічної стабільності  $B_r$  криць ( $\alpha_{ef}^N = B_{rc}$  для температури  $T_c$ ):  $\blacktriangle$  — тонкостінні пластини з надрізами (ПНС) (табл. 1, поз. 1–4);  $\blacksquare$  — тонкостінні пластини з тріщинами (ПНС) (табл. 1, поз. 5–6);  $\square$  — тріщина втоми (ЧНС) (табл. 1, поз. 11–12);  $\circ$  — кільцеві надрізи (ЧНС) (табл. 2, поз. 1–7, табл. 1, поз. 7–10);  $\bullet$  — брус (18 мм) з тріщиною, вигин (ЧНС) (табл. 2, поз. 8–16);  $\Delta$  —  $\alpha_{ef}$  для відповідних криць за  $T < T_c$ . Цифри біля точок — критична міцність криць  $\sigma_{0,2c}$  для  $T_c$  (табл. 1, 2).

**Fig. 3.** Dependence of the effective overstress coefficient  $\alpha_{ef}^N$  for different SR types on the mechanical-stability margin  $B_r$  of steels ( $\alpha_{ef}^N = B_{rc}$  at  $T_c$ ):  $\blacktriangle$  are thin-walled plates with notches (biaxial stress state) (Table 1, rows 1–4);  $\blacksquare$  are thin-walled plates with cracks (biaxial stress state) (Table 1, rows 5–6);  $\square$  are fatigue crack (triaxial stress state) (Table 1, rows 11–12);  $\circ$  are annular notches (triaxial stress state) (Table 2, rows 1–7, Table 1, rows 7–10);  $\bullet$  is beam (18 mm) with crack, bending (triaxial stress state) (Table 2, rows 8–16);  $\Delta$  —  $\alpha_{ef}$  for the corresponding steels at  $T < T_c$ . Numbers near the points are critical strength of steels,  $\sigma_{0,2c}$ , at  $T_c$  (Tables 1, 2).

гостроти надрізу, але є однаковими для даного виду КН.

Цей результат приводить до важливого висновку, що чинник пластичності металу ( $\psi_K$  і  $B_r$ ) впливає на критичну температуру крихкості  $T_c$ , але не впливає на руйнівальну силу КН у вимірі критичної зламостійкості  $B_{rc}$  (поз. 1–2, 3–4, 5–6), яка залежить від гостроти надрізу  $r$ , тобто від  $\alpha_\sigma$ . Це означає, що руйнівальна сила КН у вигляді нормованого ефективного коефіцієнта концентрації перенапружень  $\alpha_{ef}^N$  для критичного руйнування за  $\sigma_{NF} = \sigma_{0,2}$  має своє стає, нормативне значення, але різне для кожного виду КН в за-

лежності від  $\alpha_\sigma$ , дещо зростаючи з гостротою надрізу (поз. 1–6, в умовах ПНС).

Такий факт можна трактувати, як доказ того, що в умовах ПНС (тонкі пластини), де відсутнє стиснення  $j$  в зоні пластичності КН; вся руйнівальна сила КН зосереджена в факторі деформаційного перезміцнення  $B_e$  по (13), тобто  $K_\sigma = B_e$ . Більш того, є певне обмеження можливої ефективності  $\alpha_{ef}^N(B_{rc})$  для кожного КН даної сили  $\alpha_\sigma$ ; так, для  $r = 0,25$  мм  $B_{rc} \cong 2,0$ , для  $r = 0,05$  мм  $B_{rc} = 2,2$ ; для тріщини  $B_{rc} = 2,7$  незалежно від рівня пластичності металу ( $\psi_K = 13\text{--}83\%$ ). Але для надмірно високих зламостійкостей металу (наприклад,  $B_r = 5,0$  у  $\alpha\text{-Fe}$ ) руйнівальна сила тріщини  $\alpha_{ef}^N(B_{rc}) = 2,7$  є недостатньою для локального вичерпання всієї зламостійкості  $B_r = 5$ ; тому надлишок  $B_r$  відпрацьовується за рахунок загальної плинності по всій довжині тонкої пластини.

В умовах СНС (поз. 7–12) у величину  $B_{rc}$  додається фактор пружного перезміцнення  $j$ , який локально піднімає рівень межі плинності, чим локально зменшує ресурс зламостійкості  $B_e$ , потрібний для чисто деформаційного вичерпання резерву механічної стабільності, в результаті чого знижується доля деформаційного перезміцнення в акті руйнування, що відзначається зменшенням критичного резерву міцності  $B_{rc}$  і, отже, й пониженням  $T_c$  в порівнянні з КН такої ж гостроти в умовах ПНС (по поз. 2, 4, 5 з поз. 8, 10, 12 для криць У8; табл. 1). Але це можливе лише для стопів з порівняно невисокою пластичністю; для високопластичного армко-заліза ( $\alpha\text{-Fe}$ ) фактор жорсткості  $j$  через свою обмеженість величиною  $j \leq 3,0$  [9] не здатний обмежити повноцінний прояв руйнівальної дії деформаційного перезміцнення  $B_e$ , і тому навіть в умовах СНС такі стопи зберігають такі ж критичні показники  $B_{rc}(\alpha_{ef}^N)$ , які властиві для відповідного КН в умовах ПНС (див. поз. 1–7, 3–9, 5–11).

В полі В рисунку 3 знаходяться фігуративні точки для руйнування у переокрихченому стані для  $T < T_c$  ( $\sigma_{NF} < \sigma_{0,2}$ ) зразків з КН для досліджених в роботі [4] криць марок ст. Зсп, 10ХСНД, АК-35 (табл. 2), звідки видно, що за низькотемпературного руйнування зразків з тріщинами втоми наявного рівня РМС  $B_r$  у стопів недостатньо для повного вичерпання руйнівальної сили КН; тому цей дефіцит доповнюється за рахунок пружної частини базової міцності металу нижче  $\sigma_{0,2}$ , від чого напруження руйнування тіла з КН  $\sigma_{NF}$  катастрофічно спадає:  $\sigma_{NF} \ll \sigma_{0,2}$ , що свідчить про конструкційну ненадійність або непридатність стопу для застосування за  $T < T_c$ . В полі В рисунку 3 ефективна руйнівальна сила КН  $\alpha_{ef}$  перевищує критичний нормативний показник  $\alpha_{ef}^N$  відповідно до величини  $\sigma_{NF} < \sigma_{0,2}$ .

На рисунку 3 відображено також дані дослідження руйнування криць в інтервалі температур на зразках з кільцевими надрізами (СНС), оброблені нами з результатів роботи [13] (табл. 2).

**ТАБЛИЦЯ 2.** Критичні параметри крихкості криць  $B_{rc}$  і  $K_{cr}$  для КН різного типу: група 1 — надріз ( $D = 8$  мм) [13], група 2 — тріщина втоми [4] в залежності від базової зламостійкості  $B_r$ .

**TABLE 2.** Critical parameters of brittleness of steels  $B_{rc}$  and  $K_{cr}$  for SR of different types (group 1 is notch  $D = 8$  mm [13], group 2 is fatigue crack [4]) depending on the basic break resistance  $B_r$ .

| №  | Криця, оброблення                         | Тип КН                                              | $\sigma_{0.2}$ , МПа | $\sigma_{0.2c}$ , МПа | $B_r$ | $\frac{B_{rc}}{(\alpha_{ef}^N)}$ | $K_{cr}$ |
|----|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------|-----------------------|-------|----------------------------------|----------|
| 1  | Ст.30                                     | Група 1. К1 [16]<br>кільцевий надріз<br>розтягнення | 350                  | 800                   | 2,97  | 1,31                             | 2,27     |
| 2  | 30ХГСА (з.в., 200°C)                      |                                                     | 1400                 | 1600                  | 1,58  | 1,5                              | 1,05     |
| 3  | 30ХГСА (ізот.з., 300°C)                   |                                                     | 1500                 | 1600                  | 1,8   | 1,45                             | 1,24     |
| 4  | 30ХГСНА (ізот.з., 200°C)                  |                                                     | 1450                 | 1700                  | 1,77  | 1,57                             | 1,13     |
| 5  | 30ХГСНА (ізот.з., 300°C)                  |                                                     | 1170                 | 1400                  | 2,1   | 1,36                             | 1,54     |
| 6  | 10Х2СВА                                   |                                                     | 1600                 | 1700                  | 1,83  | 1,59                             | 1,15     |
| 7  | У8 (з.а., 400°C)                          |                                                     | 1180                 | 1300                  | 1,58  | 1,54                             | 1,03     |
| 8  | $\alpha$ -Fe                              | Група 2. К2 [12]<br>вигин з тріщиною                | 140                  | 350                   | 5,0   | 2,77                             | 1,85     |
| 9  | У8 (відпал)                               |                                                     | 340                  | 450                   | 2,8   | 2,15                             | 1,30     |
| 10 | ст. 3сп                                   |                                                     | 160                  | 400                   | 3,1   | 2                                | 1,55     |
| 11 | 10ХСНД                                    |                                                     | 310                  | 420                   | 2,9   | 2,5                              | 1,16     |
| 12 | АК35                                      |                                                     | 1027                 | 1100                  | 2,3   | 2                                | 1,15     |
| 13 | ЗШ 12ХН2МДФ<br>(легув. Бором, $B = 0,0$ ) |                                                     | 640                  | 700                   | 1,97  | 1,81                             | 1,09     |
| 14 | ЗШ 12ХН2МДФ<br>( $B = 0,001$ )            |                                                     | 640                  | 820                   | 1,8   | 1,46                             | 1,23     |
| 15 | ЗШ 12ХН2МДФ<br>( $B = 0,0022$ )           |                                                     | 640                  | 977                   | 2,0   | 1,5                              | 1,33     |
| 16 | ЗШ 12ХН2МДФ<br>( $B = 0,004$ )            |                                                     | 650                  | 968                   | 2,17  | 1,67                             | 1,30     |

З даних на рисунку 3 випливає загальний висновок про те, що будь-яке руйнування в умовах дії КН може бути однозначно описано в рамках двох показників зламостійкості — початкового  $B_r$  (який відповідає за ресурс опору окрихченню власне металу) і критичного  $B_{rc}$  (що характеризує окрихчувальну силу КН — ефективний коефіцієнт концентрації перенапружень у пружньо-пластичній області НДС  $\alpha_{ef}^N$ ). Умова  $B_r = B_{rc}$  є критичною для переходу від в'язкого до крихкого руйнування за  $T = T_c$  ( $\sigma_{NF} = \sigma_{0.2}$ ), що відповідає умові, коли під час руйнування весь наявний резерв міцності  $B_r$  без залишку повністю вичерпується в локальній зоні пластичності КН. Тому ефективний показник  $\alpha_{ef}^N$  для  $B_r = B_{rc}$  можна назвати нормативним  $\alpha_{ef}^N$  для даного виду КН, який відмічає норму резерву міцності  $B_r$ , необхідну й достатню для даного КН, щоб перевести вид

руйнування від надкритичного (в'язкого,  $\sigma_{NF} > \sigma_{0,2}$ ) до субкритичного (крихкого,  $\sigma_{NF} < \sigma_{0,2}$ ).

Нормативний  $\alpha_{ef}^N$  відіграє для руйнування пластичних матеріалів під дією КН роль, подібну до Нейберового коефіцієнта концентрації  $\alpha_\sigma$  у ідеально крихких ТТ, оскільки відчутно змінюється від конфігурації надрізу (довжини тріщини  $l$ ) і малочутливий до величини  $B_r$  у надкритичній (в'язкій) області руйнування А (рис. 3).

Руйнування у в'язкій зоні А означає, що нормативної руйнувальної дії сили КН  $\alpha_{ef}^N$ , забезпеченою двома факторами перезміцнення  $j$  і  $B_e$ , по (16) недостатньо для повного вичерпання всього резерву міцності металу  $B_r$  в локальній зоні пластичності КН, і для руйнування потрібне додаткове деформаційне зміцнення від загальної плинності зразка, що є ознакою ґарантованої конструкційної надійності металу для даного виду КН, тому що  $\sigma_{NF} > \sigma_{0,2}$ .

В зоні В нормативний показник КН перевищує обмежені захисні можливості пластичності через малу величину  $B_r$  ( $\alpha_{ef}^N > B_r$ ); тому локальна нестача пружнього чинника в зоні дії КН компенсується за рахунок базової пружності металу нижче  $\sigma_{0,2}$  в результаті субкритичного руйнування за  $\sigma_{NF} < \sigma_{0,2}$  для  $T < T_c$ , коли  $B_{rc} < \alpha_{ef}^N$  (рис. 1).

Власне в цьому полягає специфічний механізм руйнувальної дії КН у пластичних металевих стопах на відміну від руйнування крихких ТТ, де в зонах дії КН енергетична нестабільність НДС повністю забезпечується локальною концентрацією напружень  $\alpha_\sigma$  [1, 2].

В цілому, експериментальні дані на рис. 3 приводять до принципово важливого фундаментального висновку про те, що в критичних умовах для  $T_c$  в'язко-крихкого переходу криць під дією КН лише наявний запас пластичності криць (виражений через показник РМС  $B_{rc}$ ), незалежно від марки, виду та міцності ( $\sigma_{0,2}$ ) криці, регулює критичний параметер переходу  $B_{rc}$  у відповідності з силою руйнувальної дії КН, закладеною в геометричних параметрах КН через  $\alpha_\sigma$  і проявленою у відповідній величині  $\alpha_{ef}^N$ . Тобто головну (провідну) роль у руйнуванні металевих тіл з КН відіграє ресурс пластичності матеріалу (через РМС  $B_{rc}$ ) у співставленні з локальними параметрами НДС ( $K_\sigma$  по (10),  $j$  по (15)), що формують ефективний коефіцієнт перенапружень КН  $\alpha_{ef}^N$  по (16). Отже, силова надійність виробів і деталей машин з КН забезпечується достатнім резервом механічної стабільності стопу  $B_r > \alpha_{ef}^N$ .

## 5. ЗАКІНЧЕННЯ

Властивість пластичності надає металам і стопам здатність чинити силовий опір швидкому руйнуванню, якого немає у природньо крихких матеріалів (скло, ґраніт тощо). Силовий опір пластичності формується в результаті ефекту деформаційного зміцнення ме-

талу, який за Холомоном [9] має вимір у коефіцієнті зміцнення  $B_e$  (14). Тим самим властивість пластичності закладає в металі резерв механічної пластичності  $B_r$  (4), що забезпечує йому зламостійкість — властивість, що є мірою сили опору руйнуванню, тобто захисний ресурс пластичності.

Таким чином, феноменологічно модель руйнування металу є примітивно простим — напруження навантаження ТТ  $\sigma$  має обов'язково досягнути рівня межі плинності  $\sigma_{0,2}$ , а за потреби — в тій чи іншій мірі перевищити  $\sigma_{0,2}$ , щоб здолати весь РМС ( $B_r$ ).

Механізм руйнування тіла з КН є точно таким же, але з єдиною особливістю, що деформаційне проходження РМС  $B_r$  відбувається локально в зоні пластичності КН за номінального напруження в ТТ  $\sigma_{NF} > \sigma_{0,2}$  або  $\sigma_{NF} < \sigma_{0,2}$ .

Особливе значення для характеристики руйнувальної сили КН має температура випробування  $T_c$ , за якої  $\sigma_{NF} = \sigma_{0,2}$ , де проявляється руйнувальна сила КН у чистому вимірі  $B_{rc}$ , без додаткового внеску фактора загальної пластичної деформації тіла чи фактора втрати частини базової міцності металу  $\sigma_{0,2}$ .

Критична зламостійкість  $B_{rc}$  для  $T = T_c$  є нормативним показником для виміру ефективності руйнувальної дії КН для пластичних матеріалів у вигляді ефективного коефіцієнта концентрації перенапруження  $\alpha_{ef}^N = B_{rc}$ , що є аналогом ідеального коефіцієнта концентрації напружень  $\alpha_\sigma$  для ідеально крихких тіл, але істотно меншим за свою величиною:  $\alpha_{ef}^N < \alpha_\sigma$ .

Вказане співвідношення ( $\alpha_{ef}^N < \alpha_\sigma$ ) виявляє причини, чому пластичні металеві матеріали значно менше чутливі до руйнувальної дії КН, тріщин і взагалі до будь-яких дефектів у структурі матеріалу чи в технічному виробі в порівнянні з природньо крихкими матеріалами.

Автори виносять щире подяку чл.-кор. НАН України С. Котречку за плідні дискусії і зауваження стосовно матеріалів даної роботи.

Роботу виконано за фінансової підтримки НАН України (реєстраційний номер теми 0121U107569).

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Р. Петерсон, *Коэффициенты концентрации напряжений* (Москва: Мир: 1977) (пер. з англ.).
2. Г. Н. Савин, В. И. Тульчин, *Справочник по концентрации напряжений* (Київ: Вища школа: 1976).
3. ГОСТ 9454-78. *Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах* (Москва: Издательство стандартов: 1978).
4. А. В. Шиян, *Физическая природа локального напряжения хрупкого разрушения сталей и сварных швов* (Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук) (Київ:

- Институт металлофизики АН УССР: 1990).
5. Ю. Я. Мешков, Г. П. Зіміна, *Металлофіз. новітні технол.*, **45**, № 8: 1029 (2023).
  6. Ю. Я. Мешков, Г. П. Зіміна, *Металлофіз. новітні технол.*, **46**, № 4: 355 (2024).
  7. Ю. Я. Мешков, Г. П. Зіміна, *Металлофіз. новітні технол.*, **46**, № 10: 1031 (2024).
  8. Ю. Я. Мешков, К. Ф. Сорока, *Металлофіз. новітні технол.*, **44**, № 10: 1377 (2022).
  9. J. H. Hollomon, *Trans. AIME. Iron Steel Div.*, **162**: 268 (1945).
  10. Л. А. Копельман, *Сопротивляемость сварных узлов хрупкому разрушению* (Ленинград: Машиностроение: 1978).
  11. A. A. Griffith, *Philosophical Transactions: Royal Society of London. Series A*, **221**: 163 (1920).
  12. A. V. Shiyan, Yu. Ya. Meshkov, and Yu. A. Polushkin, *Steel Transl.*, **49**, No. 6: 414 (2019).
  13. П. Ф. Кошелев, С. Е. Беляев, *Прочность и пластичность конструкционных материалов при низких температурах* (Москва: Машиностроение: 1967).

## REFERENCES

1. R. Peterson, *Koeffitsienty Kontsentratsii Napryazheniy* [Stress Concentration Factors] (Moskva: Mir: 1977) (Russian translation).
2. G.N. Savin and V.I. Tul'chin, *Spravochnik po Kontsentratsii Napryazheniy* [Handbook of Stress Concentration] (Kiev: Vyshcha Shkola: 1976) (in Russian).
3. GOST 9454-78. *Metally. Metody Ispytaniya na Udarnyy Izgib pri Ponizhen-nykh, Komnatnoy i Povyshennykh Temperaturakh* [Metals. Impact Test Method at Low, Room and High Temperatures] (Moskva: Izdatel'stvo Standartov: 1978) (in Russian).
4. A.V. Shiyan, *Fizicheskaya Priroda Lokal'nogo Napryazheniya Khrupkogo Razrusheniya Staley i Svarnykh Shvov* [The Physical Nature of the Local Stress of Brittle Fracture of Steels and Welds] (Thesis of Dissert. for Cand. Phys.-Math. Sci.) (Kiev: Institute for Metal Physics, Academy of Sciences of Ukr.SSR: 1990) (in Russian).
5. Yu. Ya. Meshkov and G. P. Zimina, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **45**, No. 8: 1029 (2023) (in Ukrainian).
6. Yu. Ya. Meshkov and G. P. Zimina, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **46**, No. 4: 355 (2024) (in Ukrainian).
7. Yu. Ya. Meshkov and G. P. Zimina, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **46**, No. 10: 1031 (2024) (in Ukrainian).
8. Yu. Ya. Meshkov and K. F. Soroka, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 10: 1377 (2022).
9. J. H. Hollomon, *Trans. AIME. Iron Steel Div.*, **162**: 268 (1945).
10. L. A. Kopel'man, *Soprotivlyaemost' Svarnykh Uzlov Khrupkomu Razrusheniyu* [Resistance of Welded Knots to Brittle Fracture] (Leningrad: Mashinostroenie: 1978) (in Russian).
11. A. A. Griffith, *Philosophical Transactions: Royal Society of London. Series A*, **221**: 163 (1920).
12. A. V. Shiyan, Yu. Ya. Meshkov, and Yu. A. Polushkin, *Steel Transl.*, **49**, No. 6: 414 (2019).
13. P. F. Koshelev and S. E. Belyaev, *Prochnost' i Plastichnost' Konstruktsionnykh*



*Materialov pri Nizkikh Temperaturakh* [Strength and Plasticity of Structural Materials at Low Temperatures] (Moskva: Mashinostroenie: 1967) (in Russian).