

PACS numbers: 46.50.+a, 62.20.fk, 62.20.fq, 62.20.M-, 62.20.mj, 62.20.mm, 62.20.mt

## Механічна стабільність і крихкість металів і сплавів. Ч. 3. Фізико-механічна концепція міцності та руйнування металів і сплавів

Ю. Я. Мешков, Г. П. Зіміна

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

В роботі запропоновано основи нового підходу до розгляду природи міцності та руйнування металевих матеріалів в умовах напружено-деформованого стану (НДС) загального виду, що виникає у локальних зонах неоднорідних силових полів під дією концентраторів напружень (КН). Розглянуто основи фізико-механічної концепції конструкційної міцності ( $\sigma_{NF}$ ) металів і сплавів на основі порівняння запропонованого параметра резерву міцності (РМ) в паралельних вимірах —  $\Delta S$  для однорідних силових полів (ОСП) і  $\Delta\sigma_N$  для неоднорідних (НСП) з НДС в зоні КН. Вичерпання кожного з видів РМ означає перехід до крихкого руйнування, що для РМ у НСП проявляється в катастрофічному падінні конструкційної міцності:  $\sigma_{NF} < \sigma_{0.2}$ . Причиною вичерпання резервів міцності  $\Delta S$  і  $\Delta\sigma_N$  можуть бути як фізичні чинники (структура стопу, температурні умови), так і суто механічні чинники (вид НДС, КН), що спричиняють окрихчення металів. Запропоновано спеціальну механічну характеристику металів — зламостійкість  $b_r$  (базову для однорідного НДС) і  $b_{rN}$  (конструкційну для неоднорідного НДС), співвідношення між якими регулює закономірності впливу міцності  $\sigma_{0.2}$  (умовна межа плинності) та резерву міцності  $\Delta S$  на такі прояви крихкості металів, як холодноламкість із пониженням температури або «механоламкість» під дією КН за кімнатної температури  $T_R$ . Наведено приклади застосування параметрів  $\Delta S$ ,  $\Delta\sigma_N$  і  $b_r$ ,  $b_{rN}$  для аналізу експериментальних даних різних авторів опублікованих

Corresponding author: Halyna Petrivna Zimina  
E-mail: [zimingal28@gmail.com](mailto:zimingal28@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 and H. P. Zimina, Mechanical Stability and Brittleness of Metals and Alloys. Pt 3. Physical-Mechanical Concept of Strength and Destruction of Metals and Alloys, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **46**, No. 10: 1031–1050 (2024) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.46.10.1031](https://doi.org/10.15407/mfint.46.10.1031)

наукових джерел. Зроблено висновок про ефективність використання параметрів конструкційної міцності в дослідженнях природи крихкості й окрихчення металевих стопів, спричинених надмірним зміцненням їх, пониженням температури чи то дією КН (тріщин тощо).

**Ключові слова:** криця, міцність, резерв міцності, зламостійкість, крихке руйнування, холодостійкість, конструкційна міцність, механостійкість, однорідні та неоднорідні силові поля.

This work offers the fundamentals of a new approach to the nature of strength and failure of metallic materials under the conditions of stress-strain state (SSS) of a general type, which occurs within the local zones of non-uniform force fields (NFF) due to the stress raisers (SR). Basic foundation of the physical and mechanical concept of structural strength of metals and alloys,  $\sigma_{NF}$ , is considered based on the comparison of the proposed strength margin (SM) parameter for two cases:  $\Delta S$  for uniform force fields (UFF) and  $\Delta\sigma_N$  for non-uniform force fields (NFF) near the SR. Exhaustion of each type of SM means a transition to brittle fracture, which, for SM at NFF, manifests itself in a steep fall in structural strength:  $\sigma_{NF} < \sigma_{0.2}$ . Exhaustion of strength margins  $\Delta S$  and  $\Delta\sigma_N$  may occur due to both physical (alloy structure, temperature conditions) factors and purely mechanical ones (type of SSS, SR), which cause embrittlement of metals. A special mechanical characteristic is proposed—break resistance  $b_r$  (basic one for the uniform SSS) and  $b_{rN}$  (structural one for the non-uniform SSS), the ratio between which governs the regularities of influence of strength  $\sigma_{0.2}$  (conditional yield strength) and strength margin  $\Delta S$  on such manifestations of brittleness of metals as cold brittleness, when the temperature is decreased, or ‘mechanical brittleness’ due to the SR at room temperature  $T_R$ . Examples of the application of parameters  $\Delta S$ ,  $\Delta\sigma_N$  and  $b_r$ ,  $b_{rN}$  are given for the analysis of experimental evidence published by various authors. A conclusion is made about the effectiveness of using structural strength parameters in investigation of the nature of brittleness and embrittlement of metal alloys caused by their extra hardening, the temperature decrease, or the SR effect (cracks, *etc.*).

**Key words:** steel, strength, strength margin, break resistance, brittle fracture, cold resistance, structural strength, mechanical stability, uniform and non-uniform force fields (UFF, NFF).

(Отримано 27 березня 2024 р.; остаточн. варіант — 6 травня 2024 р.)

## 1. ВСТУП. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У попередніх частинах 1 і 2 [1, 2] даного циклу робіт про механічну стабільність міцності металів і її зв’язок із крихкістю, що виникає у зразках з концентраторами напружень (КН), було встановлено закономірності впливу показників міцності  $\sigma_{0.2}$  (межа плинності) та  $S_K$  (істинне напруження руйнування зразка), представлених у вигляді параметра  $B_r = S_K/\sigma_{0.2}$ , на ефективність окрихчувальної дії КН для зразків з різними концентраторами напружень [3]. Виявле-

но, що за окрихчення криць під дією КН серед показників механічних властивостей найбільших змін зазнає показник міцності руйнування зразка з КН  $\sigma_{NF}$  (номінальне середнє напруження руйнування в нетто-перерізі зразка). Величина  $\sigma_{NF}$  у порівнянні з показником міцності руйнування  $S_K$  гладкого зразка в залежності від виду КН і міцності криці  $\sigma_{0,2}$  може впасти нижче рівня межі пластичності стопу  $\sigma_{0,2}$ . Співвідношення  $\sigma_{NF} < \sigma_{0,2}$  свідчить про катастрофічну втрату конструкційної міцності  $\sigma_{NF}$  тіла з КН, що означає нестабільність міцності металу в умовах неоднорідності напружено-деформованого стану (НДС).

Причини механічної нестабільності міцності зумовлено специфікою зародження та розвитку процесу руйнування в зоні локальної пластичності КН. За останні десятиріччя дослідження в цьому напрямі досягли значного розмаху в рамках так званого «локального підходу» до руйнування металів в умовах загального виду НДС [4–6]. Проте це не виключає можливості досліджувати закономірності впливу показників механічних властивостей металу у їхньому номінальному (середньому) вимірі та чинників НДС на кінцевий результат прояву їх у показнику номінальної міцності руйнування тіла з КН — в конструкційній міцності  $\sigma_{NF}$ . Такий підхід було розвинуто в низці робіт, присвячених розгляду процесів окрихчення криць і титанових стопів під дією концентраторів напружень [7–10] та ін. У підсумковому циклі робіт [1, 2] дійшли висновку, що з фізичного погляду у металевих стопах крихкості не буває за визначенням, але крихка механічна поведінка цілком можлива, що проявляється лише у вигляді механічної нестабільності номінальної міцності руйнування  $\sigma_{NF}$  у неоднорідних силових полях ( $\sigma_{NF} < \sigma_{0,2}$ ) навіть за наявності достатньо великої пластичності стопу ( $\psi_K \cong 80\%$ ). Було з'ясовано, що не пластичність ( $\psi_K$ ), а параметер деформаційного перенапруження  $B_r = S_K / \sigma_{0,2}$ , який відображає деформаційний резерв міцності  $\sigma_{0,2}$  в однорідному НДС, повністю контролює перехід до крихкості зразків з КН. Встановлення закономірностей у впливі параметрів резерву міцності на втрату стабільності міцності у крицях конструкційного призначення є задачею даної роботи.

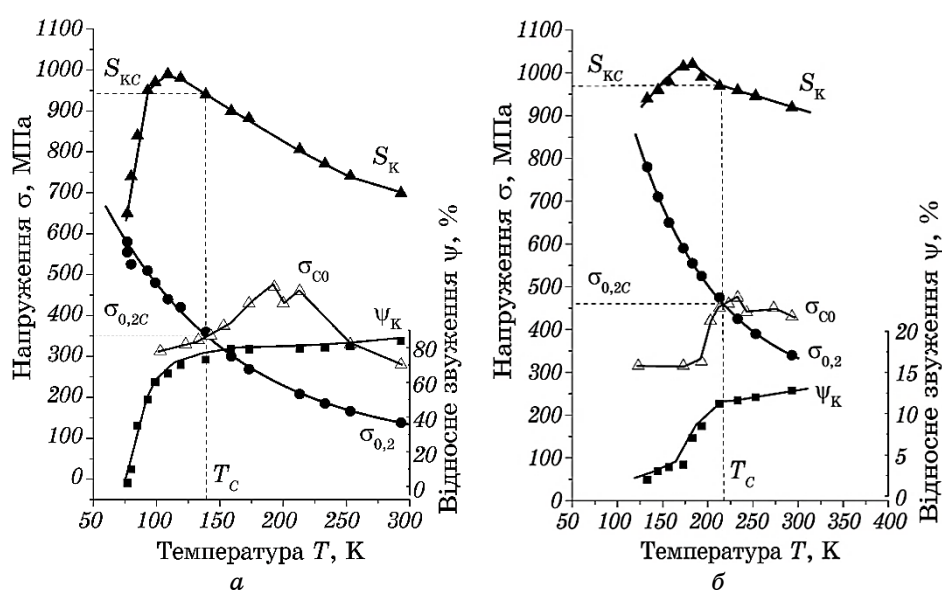
## 2. ФІЗИКО-МЕХАНІЧНА КОНЦЕПЦІЯ КОНСТРУКЦІЙНОЇ МІЦНОСТІ МЕТАЛЕВИХ СТОПІВ

Концепція будується на основі показників міцності стопів у їхніх середніх (номінальних) величинах, прийнятих для використання у практичній інженерно-конструкторській роботі, —  $\sigma_{0,2}$  (умовна межа пластичності),  $S_K$  (істинне напруження руйнування зразка в «шийці»),  $\sigma_{NF}$  (номінальне напруження руйнування зразка з кільцевим надрізом за розтягування),  $\sigma_{C0}$  (номінальне напруження руй-

нування зразка з тріщиною за вигину). На основі вказаних характеристик міцності будуються допоміжні параметри, що відображають резерви міцності  $\Delta S = S_K - \sigma_{0,2}$  для зразків в однорідному НДС і  $\Delta \sigma_N = \sigma_{NF} - \sigma_{0,2}$  в неоднорідному НДС (вигин, кручення, КН, тріщини тощо).

Резерви міцності  $\Delta S$  і  $\Delta \sigma_N$  відображають в собі ефективність деформаційного зміцнення металу вище межі плинності  $\sigma_{0,2}$ , що автоматично враховує вплив пластичності металу на його напруження руйнування ( $S_K, \sigma_{NF}$ ).

Між параметрами  $\Delta S$  і  $\Delta \sigma_N$  є складний взаємозв'язок, що регулюється чинниками природи та структури стопу, температурою та динамікою навантаження для  $\Delta S$  і виключно видом НДС і мірою його неоднорідності для  $\Delta \sigma_N$ , що, власне, є задачею даного дослідження.



**Рис. 1.** Температурні залежності механічних властивостей  $\alpha$ -Fe (а) і криці У8 (б) в умовах триточкового вигину зразка з тріщиною втоми ( $\sigma_{0,2}$  — границя плинності гладкого зразка,  $S_K$  — істинне напруження руйнування,  $\sigma_{0,2c}$  — значення міцності за критичної температури  $T_c$ ,  $\sigma_{c0}$  — середнє номінальне напруження у місці руйнування зразка,  $\psi_K$  — пластичність гладкого зразка [11]).

**Fig. 1.** Temperature dependence of the mechanical properties of  $\alpha$ -Fe (a) and steel U8 (b) under conditions of three-point bending of a specimen with a fatigue crack ( $\sigma_{0,2}$  is the yield strength of unnotched specimen,  $S_K$  is the true fracture stress,  $\sigma_{0,2c}$  is the strength value at the critical temperature  $T_c$ ,  $\sigma_{c0}$  is the average nominal stress at the point of failure of specimen,  $\psi_K$  is the ductility of unnotched specimen [11]).

Температурне зростання базової міцності  $\sigma_{0,2}$  супроводжується менш інтенсивним зростанням міцності руйнування  $S_K$  (рис. 1 згідно з [11]), а отже, і зменшенням абсолютної величини резерву міцності  $\Delta S$ , що означає окрихчення стопу. Більш інтенсивно понижується резерв міцності в неоднорідному полі напружень  $\Delta\sigma_N = \sigma_N - \sigma_{0,2}$ , який за певної критичної температури  $T_C$  переходить позначку  $\Delta\sigma_N = 0$  і далі взагалі стає негативною величиною  $\Delta\sigma_N < 0$ , коли конструкційна міцність  $\sigma_{NF}$  зразка з КН падає нижче базової міцності  $\sigma_{0,2}$ . Така ситуація означає катастрофічне руйнування елемента конструкції (ЕК) і є неприпустимою в реальній експлуатації виробу.

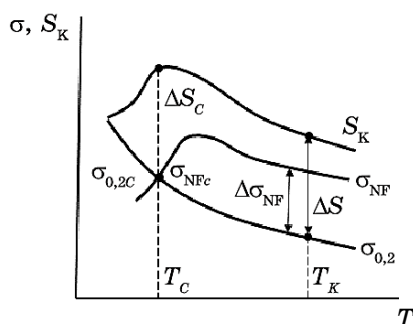
Отже, задачею конструктора є не допускати надкритичного пониження резерву міцності металу  $\Delta S > \Delta S_C(T_C)$  в межах робочих температур виробу. Але для стопів різних класів міцності абсолютна величина  $\Delta S$  відіграє різну захисну роль від окрихчення; тому раціонально перейти до нормованої величини  $\Delta S/\sigma_{0,2}$  (рис. 2):

$$b_r = \frac{\Delta S}{\sigma_{0,2}} \quad (1)$$

для однорідних НДС і

$$b_{rN} = \frac{\Delta\sigma_N}{\sigma_{0,2}} \quad (2)$$

для зразків з КН.



**Рис. 2.** Базові (для  $T_K = 293$  К) і критичні (для  $T_C$ ) механічні характеристики та параметри металу за низькотемпературного окрихчення під дією КН (схема). Для  $T_K$ :  $\sigma_{0,2}$ ,  $S_K$ ,  $\Delta S = S_K - \sigma_{0,2}$ ,  $\Delta\sigma_N = \sigma_{NF} - \sigma_{0,2}$ ; для  $T_C$ :  $\sigma_{0,2C}$ ,  $S_{KC}$ ,  $\Delta S_C = S_{KC} - \sigma_{0,2C}$ ,  $\Delta\sigma_N = 0$ .

**Fig. 2.** Basic (at  $T_K = 293$  K) and critical (at  $T_C$ ) mechanical characteristics and parameters of metal during low-temperature embrittlement due to the SR (scheme). At  $T_K$ :  $\sigma_{0,2}$ ,  $S_K$ ,  $\Delta S = S_K - \sigma_{0,2}$ ,  $\Delta\sigma_N = \sigma_{NF} - \sigma_{0,2}$ ; at  $T_C$ :  $\sigma_{0,2C}$ ,  $S_{KC}$ ,  $\Delta S_C = S_{KC} - \sigma_{0,2C}$ ,  $\Delta\sigma_N = 0$ .

Безрозмірний показник нормального резерву міцності  $b_r$  по (1) можна взяти як показник особливої механічної властивості — зламостійкості металу ( $b_r$ —break resistance), яка поєднує властивості пластичності ( $\psi_K$ ) і деформаційного зміцнення  $B_r$ :

$$B_r = \frac{S_K}{\sigma_{0,2}}. \quad (3)$$

Коефіцієнт деформаційного зміцнення  $B_r$  відображається Холломоновою аналітичною залежністю [12]:

$$S_K = \sigma_{0,2} \left( \frac{e_K}{e_{0,2}} \right)^n, \quad (4)$$

де  $e_K = \ln(1/(1 - \psi_K))$ ,  $n$  — показник деформаційного зміцнення. Між показниками  $b_r$  і  $B_r$  є очевидне співвідношення:

$$b_r = B_r - 1. \quad (5)$$

Аналогічним чином з формули (2) випливає, що нормований показник резерву міцності для зразків з КН

$$b_{rN} = \frac{\Delta\sigma_N}{\sigma_{0,2}} = \frac{\sigma_{NF}}{\sigma_{0,2}} - 1 = B_{rN} - 1. \quad (6)$$

Величину  $b_{rN}$  можна умовно назвати показником «конструкційної» зламостійкості металу.

Аналізу експериментальних даних доцільно робити з показниками зламостійкості  $b_r$  і  $b_{rN}$  з доступних джерел, в яких представлено потрібні вихідні характеристики досліджуваних стопів —  $\sigma_{0,2}$ ,  $S_K$ ,  $\sigma_{NF}$  ( $\sigma_{C0}$ ) [11].

Предметом дослідження є взаємозв'язок між  $b_r$  як «фізичним» (тобто структурним) резервом міцності самого металу і  $b_{rN}$  як «конструкційним» показником залишкового резерву міцності (що залишився в металі на момент руйнування зразка з КН).

Можливі два варіанти порівняння ефективності впливу КН (неоднорідності НДС) на величину  $b_{rN}$ .

Порівняння між собою двох «фізичних» (тобто одержаних в однорідному НДС) нормованих резервів міцності:  $b_r$  за кімнатної температури  $T_K = 293 \text{ K}$  і  $b_{rc} = S_{KC}/\sigma_{0,2C}$  за температури переходу до нестійкості міцності  $T_C$  (умовної крижкості), коли виникають умови (рис. 1):

$$\sigma_{NF} = \sigma_{0,2C}(T_C), \quad (7)$$

або

$$\Delta\sigma_N = 0, \quad (8)$$

і, відповідно,

$$b_{rN} = 0. \quad (9)$$

В такому випадку співвідношення  $b_{rc}$  і  $b_r$  можна трактувати як коефіцієнт холодноламкості (cold fragility)  $K_{cf}$ :

$$K_{cf} = \frac{b_{rc}}{b_r}, \quad (10)$$

а обернене співвідношення

$$K_{cr} = \frac{b_r}{b_{rc}}, \quad (11)$$

як коефіцієнт холодостійкості (cold resistance).

Другий варіант визначення ефективності окрихчувальної дії КН полягає в співставленні показників  $b_{rN}$  і  $b_r$  за кімнатної температури  $T_K = 293 \text{ K}$  (або за температури експлуатації виробу  $T$ ). В такому разі ми визначаємо коефіцієнт конструкційної стабільності (design stability) або «механостійкості» металу з даним видом КН:

$$K_{ds} = \frac{b_{rN}}{b_r}. \quad (12)$$

З формул (1) і (2) видно, що  $K_{ds} = \Delta\sigma_N / \Delta S$ , тобто  $K_{ds}$  відображає ступінь втрати конструкційного резерву міцності  $\Delta\sigma_N$  у порівнянні з фізичним, початковим резервом міцності (РМ)  $\Delta S$  або міру залишку конструкційної стабільності металу після окрихчення під дією КН.

Оскільки  $\Delta\sigma_N$  може набувати як позитивних, так і негативних значень, а, відповідно,  $b_{rN} \leq 0$ , то  $K_{ds} > 0$  означає міру конструкційної стабільності, а  $K_{ds} < 0$  — міру конструкційної нестабільності металу в умовах неоднорідності НДС, створеної даним КН.

В формулах (10)–(12) представлено основні параметри розглянутої вище фізико-механічної концепції конструкційної міцності металевих стопів ( $K_{cf}$ ,  $K_{cr}$  і  $K_{ds}$ ), необхідні для подальшої аналізи результатів експериментів, наведених у наступних розділах статті.

### 3. ЗАЛЕЖНІСТЬ ПОКАЗНИКІВ ХОЛДНОЛАМКОСТІ КРИЦЬ ВІД БАЗОВОЇ ЗЛАМОСТІЙКОСТІ $b_r$ ДЛЯ РІЗНИХ ВИДІВ НДС

Раніше в роботі [13] було показано, що критичний показник перенапруження  $B_{rc}$  по (3) з переходом до крихкості зразка з КН від по-

ниження температури знаходиться в стійкій кореляційній залежності від базового показника перенапруження  $B_r$  різних криць:

$$\frac{b_r}{b_{rc}} = 0,806 + 0,194B_r \quad (13)$$

з коефіцієнтом кореляції  $R \cong 0,71-0,99$  для двох видів КН — кільцевого надрізу та тріщини [13].

Оскільки, згідно з (5),  $b_r = B_r - 1$ , то подібну ступінь кореляції можна очікувати і для співвідношення критичної  $b_{rc}$  та базової зламостійкості  $b_r$ .

В частині 2 [2] даного циклу праць було встановлено, що показники  $B_r$  різних криць понижуються зі зростанням їхньої базової міцності  $\sigma_{0,2}$ , але стабілізуються на однаковому критичному рівні  $B_{rc} \approx 1,6$  (тобто  $b_{rc} \cong 0,6$ ) для криць високоміцного класу ( $\sigma_{0,2} > 1000$  МПа) незалежно від коефіцієнта концентрації напружень  $\alpha_\sigma$ .

Вказаний результат потребує більш детального розгляду ролі, яку відіграє вид НДС у ефективності окрихчувальної дії КН у крицях.

В роботі [11] представлено результати дослідження низькотемпературного окрихчення зразків високопластичного  $\alpha$ -заліза ( $\sigma_{0,2} = 140$  МПа,  $\psi_K = 85\%$ ,  $b_r = 4$ ) і малопластичної відпаленої евтектоїдної криці У8 ( $\sigma_{0,2} = 340$  МПа,  $\psi_K = 13\%$ ,  $b_r = 1,7$ ). В роботі наведено показники  $\sigma_{0,2}$ ,  $S_K$  для гладких зразків і  $\sigma_{NF}$  ( $\sigma_{C0}$ ) для зразків з КН в інтервалі температур 293–77 К, з яких нами було розраховано необхідні параметри  $b_r$ ,  $b_{rc}$  і  $b_{rN}$  та ін. (табл. 1). Концентратори різної сили  $\alpha_\sigma$  наносилися на зразках у вигляді тонких пластин ( $t = 1$  мм,  $H = 40$  мм) для реалізації простого напруженого стану (ПНС):  $\sigma_1 > 0$ ,  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$  і на циліндричних зразках (діаметер  $d = 8$  мм) з кільцевими надрізами різної гостроти, а також на зразках призматичного виду з нанесеною тріщиною втоми для руйнування за триточкового вигину в умовах складного напруженого стану (СНС) в зоні КН:  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > 0$ .

Аналіза параметрів зламостійкості  $b_r$ ,  $b_{rc}(T_C)$  і  $b_{rN}(T_K = 293 \text{ К})$  показує, що на тонких пластинах різні КН по-різному впливають у зразках  $\alpha$ -Fe і криці У8 на критичну температуру  $T_C$ , але для кожного виду КН реалізується своя відповідна критична зламостійкість  $b_{rc}$ , однакова для двох істотно різних матеріалів (поз. 1–2, 3–4, 5–6 табл. 1). Це означає, що в умовах ПНС за відсутності жорсткості НДС окрихчення реалізується за рахунок лише чинника деформаційного перенапруження по (4) з відповідним для кожного КН піком пластичної деформації  $e_{\max}$  (див.  $b_{rc}$  для поз. 1–2, 3–4, 5–6 у табл. 1).

Але в умовах СНС (поз. 7–12), де ступінь деформаційного перенапруження зменшується через стиснення пластичності, критичні показники  $b_{rc}$  зменшуються, причому ефект більш відчутний для



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

**TABLE 1.** The effect of SR type ( $\alpha_\sigma$ ) and the type of stress-strain state (simple stress state (SSS), biaxial-thin plates, complicated stress state (CSS), 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 У8 ( $\sigma_{0,2} = 340$  МПа,  $b_r = 1.7$ ) ( $K_{ds}$  for  $T_c = 293$  К),  $\alpha_\sigma$  is the Neuber stress-raising coefficient [12].

№	Криця	КН ( $\alpha_\sigma$ )	$T_c$ , К	$\sigma_{0,2C}$ , МПа	$b_{rc}$ ( $\Delta S_C / \sigma_{0,2C}$ )	$b_{rN}$ ( $\Delta \sigma_N / \sigma_{0,2}$ )	$K_{cf}$ ( $b_{rc} / b_r$ )	$K_{ds}$ ( $b_{rN} / b_r$ )
Вид НДС: ПНС (тонкі пластини)								
1	$\alpha$ -Fe	К3	100	500	0,9	0,2	0,22	0,05
2	У8	(2,2)	200	500	1,0	0,2	0,59	0,12
3	$\alpha$ -Fe	К4	100	445	1,2	0,3	0,3	0,07
4	У8	(2,8)	240	440	1,2	0,4	0,7	0,23
5	$\alpha$ -Fe	тріщина	130	350	1,7	0,2	0,42	0,05
6	У8		293	340	1,7	0	1,00	0
Вид НДС: СНС (поз. 7–10 — кільцеві надрізи, поз. 11–12 — тріщини втоми)								
7	$\alpha$ -Fe	К3	140	470	1,0	2,7	0,25	0,67
8	У8	(2,8)	125	825	0,1	0,8	0,06	0,47
9	$\alpha$ -Fe	К4	120	420	1,3	4,3	0,32	1,20
10	У8	(3,9)	150	550	0,5	0,86	0,29	0,50
11	$\alpha$ -Fe	тріщина	140	370	1,7	0,8	0,42	0,20
12	У8		220	460	1,2	0,14	0,62	0,08

малопластичної криці У8, аніж для  $\alpha$ -Fe. В результаті цього виникає дещо парадоксальний ефект: в умовах ПНС зменшення пластичності матеріялу більш відчутно змінює холодноламкість стопу (див.  $K_{cf}$  поз. 1–2, 2–3, 5–6), аніж у більш жорстких умовах НДС (поз. 7–8, 9–10, 11–12). Отже, поява в зоні КН чинника жорсткості НДС [14]

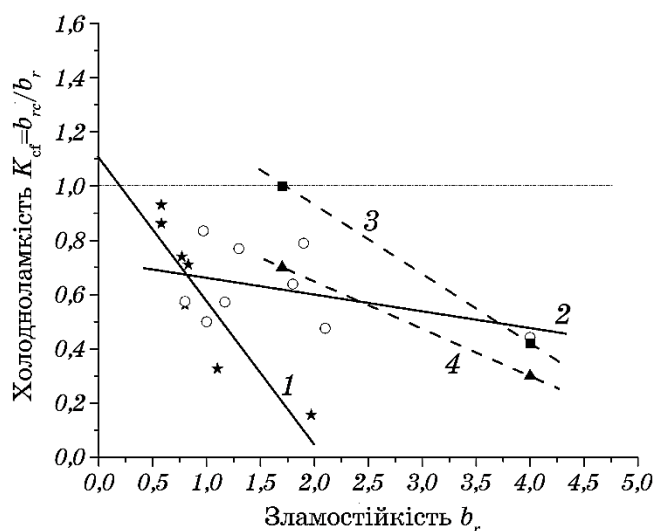
$$j = \frac{\sigma_1}{\sigma_i}, \quad (14)$$

де  $\sigma_i$  — інтенсивність напружень [15], яка сама слугує власним

джерелом перенапруження в зоні дії КН в умовах СНС, через стиснення пластичності металу настільки зменшує ефективність деформаційного зміцнення, що в цілому критичний рівень зламостійкості  $b_{rc}$  і відповідно коефіцієнт холодноламкості  $K_{cf}$  (табл. 1) для криці У8 в ПНС зменшується більш відчутно, ніж в СНС.

На рисунку 3 представлено вплив зламостійкості  $b_r$  на закономірності зростання під дією КН показника  $K_{cf}$  для зразків в умовах СНС (лінії 1, 2) і ПНС (тонкі пластини, лінії 3, 4). Чітко видно, що в тонких пластинах холодноламкість ( $K_{cf}$ ) спостерігається для більш пластичних криць ( $b_r > 2,0$ – $2,3$ ), ніж для масивних циліндричних чи призматичних зразків (СНС). Звідси висновок: тонколистові вироби (труби тощо) з низькоміцних криць ( $\sigma_{0,2} < 300$ – $400$  МПа) більш чутливі до дії КН, аніж масивні, для яких холодноламкість стає загрозливою лише за невеликих показників  $b_r$  ( $1,5$ – $2,0$ ). Показники  $K_{cf}$  для рис. 3 одержано з даних табл. 2, які були нами розраховані з експериментальних результатів, наведених у [16] і [11].

З результатів, наведених у табл. 1 і 2, випливає загальний висновок про те, що холодноламкість конструкційних криць ( $K_{cf}$ ) однозначно регулюється величиною показника зламостійкості  $b_r$  криці,



**Рис. 3.** Залежність холодноламкості  $K_{cf}$  криць на зразках з КН (1 — кільцевий надріз, 2 — тріщина втоми) від параметра зламостійкості  $b_r$ : 1–2 масивні зразки в умовах СНС, 3–4 тонкі пластини в умовах ПНС (табл. 1, 2) (за даними [12, 16]).

**Fig. 3.** Dependence of the cold fragility  $K_{cf}$  of steels (specimens with SR, 1 is annular notch, 2 is fatigue crack) on the break-resistance parameter  $b_r$ : 1–2 are bulk specimens under the triaxial-stress state, 3–4 are thin plates under the biaxial-stress state (Tables 1, 2) (according to data [12, 16]).

**ТАБЛИЦЯ 2.** Критичні параметри крихкості криць ( $b_{rc}$ ,  $K_{cf}$ ,  $K_{ds}$ ) для КН різного виду (група 1 — надріз із  $D = 8$  мм [16], група 2 — тріщина втоми [12]) в залежності від базової зламостійкості  $b_r$ .

**TABLE 2.** Critical parameters of brittleness of steels ( $b_{rc}$ ,  $K_{cf}$ ,  $K_{ds}$ ) for SR of different types (group 1 corresponds to notch with  $D = 8$  mm [16], group 2 is fatigue crack [12]) depending on the basic break resistance  $b_r$ .

№	Криця, оброблення	Тип КН	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{0,2c}$ , МПа	$b_r$	$b_{rc}$	$K_{cf}$ ( $b_{rc}/b_r$ )	$K_{ds}$ ( $b_{rN}/b_r$ )
1	Ст.30	Група 1. К1 [16] кільцевий надріз розтягнення	350	800	1,97	0,31	0,16	–
2	30ХГСА (з.в., 200°C)		1400	1600	0,58	0,5	0,87	1,13
3	30ХГСА (ізот.з., 300°C)		1500	1600	0,8	0,45	0,57	1,25
4	30ХГСНА (ізот.з., 200°C)		1450	1700	0,77	0,57	0,75	1,85
5	30ХГСНА (ізот.з., 300°C)		1170	1400	1,1	0,36	0,33	0,7
6	10Х2СВА		1600	1700	0,83	0,59	0,71	–
7	У8 (з.а., 400°C)		1180	1300	0,58	0,54	0,93	–0,2
8	$\alpha$ -Fe		140	350	4,0	1,77	0,44	0,28
9	У8 (відпал)	Група 2. К2 [12] вигин з тріщиною	340	450	1,8	1,15	0,64	0,16
10	Ст.3сп		160	400	2,1	1	0,47	0,51
11	10ХСНД		310	420	1,9	1,5	0,79	0,45
12	АК35		1027	1100	1,3	1	0,77	0,75
13	ЗШ 12ХН2МДФ (легування Бором $B = 0,0$ )		640	700	0,97	0,81	0,83	0,66
14	ЗШ 12ХН2МДФ ( $B = 0,001$ )		640	820	0,8	0,46	0,57	1,2
15	ЗШ 12ХН2МДФ ( $B = 0,0022$ )		640	977	1,0	0,5	0,5	1,0
16	ЗШ 12ХН2МДФ ( $B = 0,004$ )		650	968	1,17	0,67	0,57	0,9

але по-різному для тонкостінних і масивних виробів.

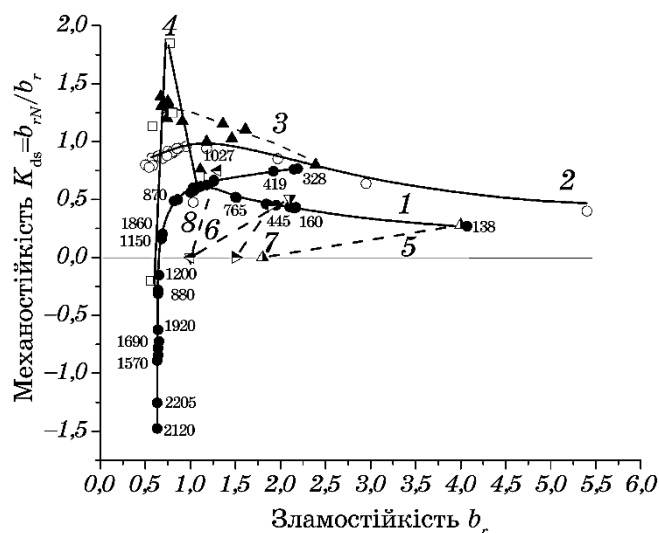
#### 4. ВПЛИВ ПОКАЗНИКА ЗЛАМОСТІЙКОСТІ $b_r$ НА ТРИВКУ МІЦНІСТЬ (МЕХАНОСТІЙКІСТЬ) ЗРАЗКІВ З КН ЗА СТАЛОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Відомо, що ефективність окрихчувальної дії КН залежить не тільки від сили концентратора ( $\alpha_\sigma$ ), але (в більшій мірі) й від властивостей стопу [1–3]. Але проблема полягає в тому, що жоден з традиційних

показників механічних властивостей —  $\sigma_{0,2}$ ,  $\psi_K$ ,  $KCV$  та ін. не має свого власного порогового значення, перехід за який означав би втрату стабільності міцності, тобто крихкість зразка з даним видом КН, оскільки всі властивості проявляють себе в тісній пов'язаності між собою. Тому доводиться визначати для кожного ступу свої власні критичні показники переходу до крихкості ( $\sigma_{0,2c}$ ,  $\psi_c$ ,  $KCV_c$  та ін.).

Нормований на міцність показник резерву міцності — зламостійкість  $b_r$  по (1) вже враховує вплив властивості міцності  $\sigma_{0,2}$ ; тому можна сподіватися, що для  $b_r$  критичний перехід до крихкості може мати ознаки певної порогової величини, принаймні, для певного виду регламентованого типу надрізу чи тріщини на зразках із КН.

На рисунку 4 наведено кілька прикладів залежності конструкційного резерву міцності ( $\Delta\sigma_N$ ), закладеного в показник «механос-



**Рис. 4.** Залежність коефіцієнта конструкційної стабільності  $K_{ds}$  («механостійкості») від базової зламостійкості для  $T_K$ . 1 — зразки з тріщиною на вигин [3]; 2 — кільцевий надріз ( $r = 0,1$  мм,  $D = 10$  мм,  $\beta = 600$ ) [12]; 3 — кільцевий надріз ( $r = 0,25$  мм,  $D = 8$  мм,  $\beta = 450$ ) [17]; 4 — кільцевий надріз ( $r = 0,1$  мм,  $D = 6$  мм,  $\beta = 600$ ) [16]; 5–8 — низькотемпературне окрихчення за  $T_c$ : [12], 6 — У8 [12], 7 — Ст3сп [12], 8 — АК-35 [12].

**Fig. 4.** Dependence of the coefficient of design stability  $K_{ds}$  ('mechanical stability') on the basic break resistance at  $T_K$ . 1 are cracked specimens, bending tests [3]; 2 is annular notch ( $r = 0.1$  mm,  $D = 10$  mm,  $\beta = 600$ ) [12]; 3 is annular notch ( $r = 0.25$  mm,  $D = 8$  mm,  $\beta = 450$ ) [17]; 4 is annular notch ( $r = 0.1$  mm,  $D = 6$  mm,  $\beta = 600$ ) [16]; 5–8 is low-temperature embrittlement at  $T_c$ : [12], 6—У8 [12], 7—Ст3сп [12], 8—АК-35 [12].

тійкості»  $K_{ds}$  по (6) і (12), від зламостійкості металу  $b_r$  за експериментальними даними стосовно показників  $\sigma_{NF}$  ( $\sigma_{CO}$ ) для різних криць за руйнування на триточковий вигин призматичних зразків з наведеною тріщиною [3] (табл. 3) та на розтяг зразків з кільцевими надрізами [12, 16, 17] (табл. 4). Зазначимо, що всі експериментальні дані було одержано у випробуваннях зразків за кімнатної температури  $T_K = 293$  К.

Незалежно від типу КН, максимум механічної стабільності міц-

**ТАБЛИЦЯ 3.** Вплив механічних властивостей криць ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\psi_K$ ,  $b_r$ ) на тривку міцність ( $\sigma_{CO}$ ), конструкційну зламостійкість  $b_{rN}$  і механостійкість зразків з тріщиною за триточкового вигину [3].

**TABLE 3.** The effect of mechanical properties of steels ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\psi_K$ ,  $b_r$ ) on the bearing strength ( $\sigma_{CO}$ ), the structural break resistance  $b_{rN}$  and the design stability of specimens with a crack at three-point bending [3].

№	КК	Оброблення	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\psi_K$ , %	$b_r$	$\sigma_{CO}$ , МПа	$b_{rN}$	$K_{ds}$ ( $b_{rN}/b_r$ )
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	АК-35 [2]	Стан поставки	1027	75,0	1,26	1820	0,83	0,66
2	$\alpha$ -Fe [2]	Г 1323 К, 2 год ПО	138	83,8	4,07	290	1,10	0,27
3	10ХСНД [2]	Г 1373 К, 2 год ПО	312	72,0	1,95	590	0,88	0,45
4	Ст.3сп [2]	Г 1373 К, 2,75. ПО	160	71,7	2,14	307	0,92	0,43
5	10X15H27T3B2MP [3]	Г 1373 К, 1год+ВП 1023 К, 16 год; 923 К, 10 год	870	23,0	0,82	1220	0,40	0,49
6		Г 1373 К, 1год+ВП 1023 К, 16 год; 923 К, 10 год+H <sub>2</sub>	880	10,0	0,64	713	-0,19	-0,29
7	15X12H2MФAB [4]	Г 1393 К, 1год+ВП 953 К, 2 год	940	62,0	1,11	1580	0,68	0,61
8	03X12H10MT [4]	1273 К, 1 год, 1023 К, 2 год+ВП 773 К 2 год	940	79,0	1,84	1740	0,85	0,46
9	03X12H10MT [4]	Г 1373 К, 15 хв; 1023 К, 2 год+ВП 773 К, 2 год	930	76,0	1,50	1655	0,78	0,52
10		ПД-АНЗО, 1 шар	430	67,5	1,16	2830	0,92	0,79
11	СШ X75 [2]	ПД-АНЗО, 2 шари	361	60,7	1,17	700	0,94	0,80
12		ПД-АНЗО, 3 шари	404	51,9	2,10	776	0,92	0,44

Продовження ТАБЛИЦІ 3.

Continuation of TABLE 3.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
13		КФ 48-АНК-54, $B = 0$	622	59,9	1,00	970	0,56	0,56
14	СПШ 12ХН2МДФ [2]	те ж, $B = 0,001$	623	55,6	0,86	890	0,43	0,5
15		те ж, $B = 0,0022$	628	68,1	1,04	1005	0,60	0,58
16		те ж, $B = 0,004$	642	67,9	1,18	1117	0,74	0,63
17	20X [5]	ВП 473 К	1150	53,9	0,68	1276	0,11	0,16
18		Г 1113К+ВП 423 К, 2год	1860	16,5	0,64	930	1,50	2,34
19	50X [5]	Г 1113К+ВП 473 К, 2год	1920	46,7	0,64	1152	-0,40	-0,62
20		Г 1113К+ВП 673 К, 2год	1560	48,6	0,64	1248	-0,20	-0,31
21		Г 1113К+ВП 773 К, 2год	1200	57,2	0,65	1080	-0,10	-0,15
22	40С2Х [5]	ВТМО + ВП 473 К	1760	53,0	0,63	774	-0,56	-0,89
23		ВТМО + ВП 573 К	1690	55,0	0,65	900	-0,47	-0,72
24	60С2Х [5]	ВТМО + ВП 573 К	2205	38,0	0,63	433	-0,79	-1,25
25		ВТМО + ВП 773 К	1570	40,0	0,64	723	-0,54	-0,84
26	ШХ15 [5]	Г 1133 К + ВП 473 К	2120	3,6	0,63	1502	-0,93	-1,47
27	24ХНОМФА [5]	Г 1153К+ВП 913К, 15год	765	73,5	1,51	1362	0,78	0,51
28	65Ф [5]	стан поставки	700	28,0	0,69	800	0,14	0,20
29	10ХСНД [6]	уздовж прокату	419	69,7	1,92	1020	1,43	0,74
30	10ХСНД [6]	поперек прокату	445	73,7	2,15	1175	1,64	0,76
31	12Г2МФТ [6]	уздовж прокату	571	65,6	1,26	1050	0,84	0,67
32		поперек прокату	602	58,4	1,03	975	0,62	0,60
33	15ХСНД [7]	стан поставки	328	68,0	2,19	880	1,68	0,76

Примітки: Г — гартування; ПО — пічне охолодження; ВП — відпуск; Н<sub>2</sub> — водне-ве середовище; ЗШ — зварний шов; ПД — порошок дріт; КФ — керамічний флюс; В — вміст Бору; ВТМО — високотемпературне термічне оброблення. Цифри посилань у колонці КК наведено в роботі [11].

ности криць спостерігається в межах показника  $b_r \cong 1$  або для криць, у яких резерв міцності  $\Delta S$  близький за величиною до базової міцності  $\sigma_{0,2}$ :  $\Delta S \cong \sigma_{0,2}$  (див. (1)). Для криць з низькою зламостійкістю ( $b_r < 1,0$ ) спостерігається різке пониження конструкційної міцності  $\sigma_{NF}$  ( $\sigma_{C0}$ ), а на зразках з тріщиною (крива 1, рис. 3) «механостійкість»  $K_{ds} < 0$ , тобто  $\sigma_{C0} < \sigma_{0,2}$ , що є ознакою катастрофічного руйнування зразків з регламентованою тріщиною.

З таблиці 3 видно, що, незалежно від міцності  $\sigma_{0,2}$ , всі криці із

**ТАБЛИЦЯ 4.** Механостійкість зразків з кільцевим надрізом ( $D = 6$  мм,  $\beta = 450$ ) для  $T_K = 293$  К; розраховано з даних роботи [17].**TABLE 4.** Mechanical stability of specimens with annular notch ( $D = 6$  mm,  $\beta = 450$ ,  $T_K = 293$  K) (according to data [17]).

№	Криця	Оброблення	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$b_r$	$b_{rN}$	$K_{ds}$ ( $b_{rN}/b_r$ )
1		Н 880°C	530	1,18	1,18	1,0
2		Г* + ВП 560°C, 1 год,	620	1,61	1,78	1,16
3		Г* + ВП 380°C, 1 год,	785	1,36	1,57	1,15
4	Криця 40	Г* + ВП 400°C, 1 год,	657	1,46	1,50	1,03
5		В 880°C	373	2,39	1,91	0,80
6		ШТО + ВП 350°C	1165	0,75	1,01	1,33
7		ШТО + ВП 250°C	1381	0,68	0,89	1,125
8		Г* + ВП 300°C, 0,5 год,	1502	0,67	0,93	1,38
9		Н 920°C	729	1,11	0,84	0,76
10	30ХГСА	Г* + ВП 400°C, 1 год,	1260	0,74	0,89	1,20
11		Г* + ВП 520°C, 1 год,	970	0,91	1,07	1,18
12		ШТО + ВП 220°C	1480	0,77	1,0	1,30

*Примітки:* Н — нормалізація; Г\* — гартування; ВП — відпуск; В — відпал; ШТО — швидкісне термооброблення.

зламостійкістю  $b_r = 0,63-0,65$  (поз. 6, 18–26) на зразках з тріщиною показують негативну величину конструкційного резерву міцності  $\sigma_{NF} < 0$ , а отже, і  $b_{rN} < 0$  і  $K_{ds} < 0$ , тому що у цих криць  $\sigma_{C0} < \sigma_{0,2}$ .

Такий самий результат показує і крива 4 на рис. 4 для зразка з кільцевим надрізом. На кривих 2 і 3 немає даних про крихке руйнування ( $\sigma_{NF} < \sigma_{0,2}$ ) зразків з КН, але найменше значення зламостійкості  $b_r$  для кривої 2 складає 0,5, що відрізняється від порога у 0,63 в межах можливої похибки експерименту. В цілому результати на рис. 3 можна вважати як попередньо оціночні. Для точного визначення порогового значення критичної зламостійкості  $b_{rc}$  щодо досягнення крихкого стану від дії КН для  $T_K = 293$  К потрібні спеціальні експерименти з залученням стопів з малою зламостійкістю  $b_r < 0,5$ .

Наведених вище даних цілком достатньо, щоб дійти висновку про те, що конструкційні криці з рівнем зламостійкості  $b_r > 0,65$  для  $T_K$  взагалі не мають схильності до окрихчення за будь-якого концентратора напружень (навіть із тріщиною втомі стандартного типу [18]). Для криць з  $b_r > 1$  тривка міцність зразків з КН  $\sigma_{NF}$  ( $\sigma_{C0}$ ) в

основному залежить від рівня  $b_r$  і, в меншій мірі, від сили концентратора ( $\alpha_\sigma$ ) та виду НДС (ПНС, СНС). Проте конкретне значення конструкційної міцності ( $\sigma_{NF}$ ) в даному випадку є неістотним, оскільки руйнування відбувається завжди вище рівня плинності металу  $\sigma_{0,2}$ , явно вищого, ніж допустиме розрахункове напруження  $[\sigma]$ .

З іншого боку, для криць із  $b_r < 0,6-0,7$  рівень  $\sigma_{NF}$  перестає залежати від пластичності металу і цілком регулюється його базовою міцністю та силою КН ( $\alpha_\sigma$ ) (рис. 4).

## 5. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

З наведених у розділах 3 і 4 результатів аналізу експериментальних даних виникає можливість окреслити основні положення фізико-механічної концепції крихкого руйнування металевих стопів.

Всі металеві матеріали завдяки їхній пластичності наділені особливим доповненням до їхньої базової міцності  $\sigma_{0,2}$  — резервом міцності  $\Delta S = S_K - \sigma_{0,2}$ , який у нормованому вимірі  $b_r = \Delta S / \sigma_{0,2}$  трактується як показник властивості зламостійкості металу. Зламостійкість є наслідком властивостей пластичності ( $\psi_K$ ) і деформаційного зміцнення металу  $B_r = S_K / \sigma_{0,2} = (500 \text{ eK})$  (за Холломоном). Резерв міцності  $\Delta S$  і, відповідно,  $b_r$  слугують єдиним засобом захисту металів від окрихчення та крихкості. Зменшення  $\Delta S$  (а точніше  $b_r$ ) є ознакою наближення до крихкості, тобто окрихчення металу.

Стан умовної крихкості металу, а насправді стан втрати (або локального вичерпання під дією КН) резерву міцності  $\Delta S = 0$  ( $b_r = 0$ ), означає перехід до нестабільної міцності металу  $\sigma_{0,2}$ , коли руйнування настає раніше межі плинності  $\sigma_{NF} < \sigma_{0,2}$  внаслідок дії чинника неоднорідності НДС (вигин, КН).

Пониження величини  $\Delta S$  ( $b_r$ ) можливе від дії двох видів чинників — фізичних (структурних, температурних), коли  $\sigma_{0,2}$  зростає швидше, ніж  $S_K$ , і механічних (жорсткість НДС,  $j > 1$ ), коли  $\sigma_{0,2}$  зростає від стиснення пластичності. Отже, шлях до крихкості або окрихчення стопу може бути двох принципово різних видів — температурний без зміни початкової структури металу або механічний зі зміною структури металу від пластичної деформації. На практиці для пришвидшення стану крихкості в металах часто застосовують комбінацію цих двох способів.

Але спосіб окрихчення має принципове значення для визначення критичного порога зламостійкості  $b_{rc}$ ; тому для механічного порога для  $T_K = 293 \text{ K}$  маємо для всіх криць один поріг  $b_{rc} = 0,63-0,65$  (крива 1, рис. 3). На тому ж рисунку додатково нанесено критичні дані  $b_{rc}$  для температурного порога крихкості для  $T_C$  на зразках з тріщиною для криць із табл. 2:  $\alpha\text{-Fe}$   $b_{rc} = 1,8$  (поз. 8), Ст.3сп  $b_{rc} = 1,0$  (поз. 10), криця 10ХСНД  $b_{rc} = 1,5$  (поз. 11), криця АК35  $b_{rc} = 1,0$  (поз. 12) (рис. 3, лінії 5–8 відповідно).



Як бачимо, критичні рівні  $b_{rc}$  для температурного окрихчення для  $T_C$  явно вищі за  $b_{rc} \cong 0,63$  для  $T_K = 293 \text{ K}$ , і це цілком логічно, тому що за низьких температур метал з цією ж структурою має зовсім інші механічні властивості —  $\sigma_{0,2C}$ ,  $S_{KC}$ ,  $b_{rc}$ , тобто це — вже інший матеріал.

З'ясування конкретних причин зміни порогових значень  $b_{rc}$  за температурного ( $T_C$ ) і механічного ( $T_K$ ) способів окрихчення потребує розгляду певних деталей механізму окрихчення металів, що виходить за межі поставленого завдання.

## ВИСНОВКИ

1. Руйнування металевих стопів у неоднорідних силових полях (НСП) формується під дією чинників перенапруження ( $\sigma_1 > \sigma_{0,2}$ ) двох видів — деформаційного (умовно фізичного) і механічного (жорсткості НДС); тому природа конструкційної міцності може бути описаною в рамках об'єднаної фізико-механічної концепції руйнування металів.

2. Фізико-механічна концепція міцності та руйнування металів будується на визначенні понять резерву міцності  $\Delta S$  і нормованого резерву міцності  $b_r (\Delta S / \sigma_{0,2})$ , який відображає спеціальну механічну властивість — зламостійкість. Показник зламостійкості  $b_r$  за своєю природою по суті відображає властивість пластичності металу, але вираженої у формі додаткової міцності, доданої до базової міцності  $\sigma_{0,2}$ , тобто резерву міцності  $\Delta S$ , який виконує функцію захисту металу від крихкості в умовах НСП.

3. Саме в резерві міцності  $\Delta S$  частково або цілком поглинаються місцеві перенапруження в тілі з НСП, створені як деформаційним зміцненням, так і жорсткістю НДС в зоні КН. Залишок міцності у номінальному вимірі  $\sigma_{NF}$  являє собою так звану конструкційну міцність тіла в умовах НСП.

4. Критична величина зламостійкості  $b_{rc}$  в НСП виникає і в умовах повної втрати резерву міцності (в номінальному вимірі  $\Delta \sigma_N = 0$ ) за руйнування тіла на межі плинності металу:  $\sigma_{NF} = \sigma_{0,2}$ , що означає критичний стан в'язко-крихкого переходу під дією КН за температури  $T_C$ .

5. Співмірність величини РМ ( $\Delta S$ ) з базовою міцністю  $\sigma_{0,2}$  відіграє вирішальну роль для рівня конструкційної міцності  $\sigma_{NF}$ . Для найкращого прояву конструкційної міцності металу  $\sigma_{NF}$  для всіх видів КН, — від кільцевого надрізу до гострої тріщини, — в умовах окрихчення під дією КН за кімнатної температури  $T_K$  оптимальним є співвідношення  $\Delta S \cong \sigma_{0,2}$ , тобто  $b_r^{opt} \cong 1$ . Критичне значення зламостійкості для механічного окрихчення від КН для  $T_K$  є сталою величиною на рівні  $b_{rc} = 0,63-0,64$  для криць із міцністю  $\sigma_{0,2} > 800-1000$

МПа.

6. За низькотемпературного окрихчення криць критичні значення  $b_{rc}$  значно вищі й залежать від рівня  $b_r$  криці, типу КН ( $\alpha_\sigma$ ) і геометричних розмірів тіла з КН (виду НДС).

7. Критичні значення зламостійкості за низькотемпературного окрихчення кожного типу КН можуть бути прогнозовані відповідними кореляційними співвідношеннями з достатньою для інженерної практики точністю ( $R \cong 0,9-0,99$ ).

Автори виносять щиру подяку чл.-к. НАН України С. О. Котречку за плідні дискусії та зауваження стосовно матеріалів даної роботи.

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

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Ю. Я. Мешков, Г. П. Зіміна, *Металофіз. новітні технол.*, **45**, № 8: 1029 (2023).
2. Ю. Я. Мешков, Г. П. Зіміна, *Металофіз. новітні технол.*, **46**, № 4: 355 (2024).
3. A. V. Shiyon, Yu. Ya. Meshkov, and Yu. A. Polushkin, *Steel in Translation*, **49**, No. 6: 414 (2019).
4. F. M. Veremin, *Metallurgical Transection A*, **14**: 273 (1983).
5. A. Pineau, *Int. J. Fract.*, **138**: 139 (2006).
6. С. А. Котречко, *Проблеми прочності*, № 4: 14 (2003).
7. В. Н. Грищенко, Ю. Я. Мешков, Ю. А. Полушкин, А. В. Шиян, *Металлофіз. новітні технол.*, **37**, № 7: 961 (2015).
8. A. V. Shiyon, Yu. Ya. Meshkov, and G. P. Zimina, *Steel Transl.*, **48**, No. 6: 393 (2018).
9. А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков, *Металофіз. новітні технол.*, **41**, № 6: 775 (2019).
10. А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков, *Охрупчивание металлических сплавов в условиях концентрации напряжений. Конструкционные стали и титановые сплавы* (Саарбрюккен, ФРГ: LAP LAMBERT Acad. Publ.: 2015).
11. А. В. Шиян, *Физическая природа локального напряжения хрупкого разрушения сталей и сварных швов* (Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук) (Киев: Институт металлофизики АН УССР: 1990).
12. J. H. Hollomon, *Trans. AIME Iron Steel Div.*, **162**: 268 (1945).
13. Ю. Я. Мешков, К. Ф. Сорока, *Металофіз. новітні технол.*, **43**, № 6: 781 (2021).
14. Л. А. Копельман, *Сопротивляемость сварных узлов хрупкому разрушению* (Ленинград: Машиностроение: 1978).
15. Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев, *Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии* (Киев: Наукова думка: 1976).
16. П. Ф. Кошелев, С. Е. Беляев, *Прочность и пластичность конструкционных материалов при низких температурах* (Москва: Машиностроение: 1967).

17. Ю. Я. Мешков, А.В. Шиян, В.Н. Грищенко, *Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. трудов* (Днепропетровск: Изд. ПГАСА: 2016), т. 89, с. 112.
18. *ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении* (Москва: Изд-во стандартов: 1985).

## REFERENCES

1. Yu. Ya. Meshkov and G. P. Zimina, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **45**, No. 8: 1029 (2023) (in Ukrainian).
2. Yu. Ya. Meshkov and G. P. Zimina, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **46**, No. 4: 355 (2024) (in Ukrainian).
3. A. V. Shiyan, Yu. Ya. Meshkov, and Yu. A. Polushkin, *Steel Transl.*, **49**, No. 6: 414 (2019).
4. F. M. Beremin, *Metallurgical Transaction A*, **14**: 273 (1983).
5. A. Pineau, *Int. J. Fract.*, **138**: 139 (2006).
6. S. A. Kotrechko, *Problemy Prochnosti*, **4**: 14 (2003) (in Russian).
7. V. N. Grishchenko, Yu. Ya. Meshkov, Yu. A. Polushkin, and A. V. Shiyan, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **37**, No. 7: 961 (2015) (in Russian).
8. A. V. Shiyan, Yu. Ya. Meshkov, and G. P. Zimina, *Steel Transl.*, **48**, No. 6: 393 (2018).
9. A. V. Shiyan and Yu. Ya. Meshkov, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 6: 775 (2019) (in Russian).
10. A. V. Shiyan and Yu. Ya. Meshkov, *Okhrupchivanie Metallicheskih Splavov v Usloviyakh Kontsentratsii Napryazheniy. Konstruktsionnyye Stali i Titanovyye Splavy* [Embrittlement of Metal Alloys in the Conditions of Stress Concentration. Structural Steel and Titanium Alloys] (Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing: 2015) (in Russian).
11. A. V. Shiyan, *Fizicheskaya Priroda Lokal'nogo Napryazheniya Khrupkogo Razrusheniya Staley i Svarnykh Shvov* [Physical Nature of Local Stress of Brittle Fracture of Steels and Welds] (Thesis of Disser. for Cand. Phys.-Math. Sci.) (Kyiv: Institute for Metal Physics, Academy of Sciences of Ukr.SSR: 1990) (in Russian).
12. J. H. Hollomon, *Trans. AIME Iron Steel Div.*, **162**: 268 (1945).
13. Yu. Ya. Meshkov and K. F. Soroka, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 6: 781 (2021) (in Ukrainian).
14. L. A. Kopel'man, *Soprotivlyayemost' Svarnykh Uzlov Khrupkomu Razrusheniyu* [Resistance of Welded Knots to Brittle Fracture] (Leningrad: Mashinostroenie: 1978) (in Russian).
15. G. S. Pisarenko and A. A. Lebedev, *Deformirovanie i Prochnost' Materialov pri Slozhnom Napryazhennom Sostoyanii* (Kiev: Naukova Dumka: 1976) (in Russian).
16. 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).
17. Yu. Ya. Meshkov, A. V. Shiyan, and V. N. Grishchenko, *Stroitelstvo, Materi-*

- alovedenie, Mashinostroenie: Sbornik Nauchnykh Trudov* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering: Collection of Scientific Proceedings] (Dnepropetrovsk: Izd. PGASA: 2016), vol. **89**, p. 112 (in Russian).
18. *GOST 25.506-85. Raschety i Ispytaniya na Prochnost. Metody Mekhanicheskikh Ispytaniy Metallov. Opredelenie Kharakteristik Treshchinostoykosti (Vyazkosti Razrusheniya) pri Sticheskom Nagruzhении* [Calculations and Strength Tests. Methods of Mechanical Testing of Metals. Determination of Fracture Toughness Characteristics (Fracture Toughness) under Static Loading] (Moskva: Publishing Standards: 1985) (in Russian).