

## SCOPE OF PAPER IN ENGLISH

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

## Крихкість металів і стопів як нестабільність властивостей міцності

Ю. Я. Мешков, Г. П. Зіміна

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

В статті проблему крихкості металів та стопів і, зокрема, виробів з них, розглянуто як проблему впливу суттєвих неоднорідностей напружень у зразку з концентратором напружень (КН) (тріщин) на стійкість збереження базової міцності металу ( $\sigma_{0,2}$  — межа плинності) у граничній міцності руйнування зразка з КН ( $\sigma_{NF}$ ). Умова стабільності міцності зразка з КН —  $\sigma_{NF} > \sigma_{0,2}$ , нестабільності —  $\sigma_{NF} < \sigma_{0,2}$ . Проаналізовано літературні експериментальні результати випробувань зразків з тріщиною на згин зі сталей в широкому інтервалі показників міцності ( $\sigma_{0,2} = 200\text{--}2200$  МПа) і пластичності ( $\psi_K = 10\text{--}85\%$ ). Запропоновано методика визначення критичних параметрів пластичності, які забезпечують стабільність міцності руйнування зразків з КН ( $\sigma_{NF}$ ) за кімнатних температур ( $\sigma_{NF} > \sigma_{0,2}$ ) у зазначеному інтервалі міцності випробуваних сталей. Зроблено висновок, що для атестації сталей на можливість їхнього крихкого руйнування достатньо визначити міру стабільності міцності за реальної температури експлуатації виробу без необхідності визначення критичної температури крихкості сталі  $T_C$  на зразках з КН (тріщиною).

**Ключові слова:** міцність, гранична міцність, пластичність, стабільність міцності, концентратор напружень.

In the manuscript the problem of brittleness of metals and alloys, and in particular products from them, is considered as a problem of the effect of essen-

---

Corresponding author: Galyna Petrivna Zimina  
E-mail: [zimingal28@gmail.ua](mailto:zimingal28@gmail.ua)

*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 G. P. Zimina, Brittleness of Metals and Alloys as Instability of Strength Properties, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 2: 273–288 (2022) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.44.02.0273](https://doi.org/10.15407/mfint.44.02.0273)

tial inhomogeneities of stresses in a specimen with the stress raiser (cracks) on stability of saving of basic strength of metal ( $\sigma_{0.2}$ —yield strength) in the ultimate strength of specimen with stress raiser ( $\sigma_{NF}$ ). The condition of stability of the strength of specimen with stress raiser is  $\sigma_{NF} > \sigma_{0.2}$ , of instability— $\sigma_{NF} < \sigma_{0.2}$ . The literature experimental results of bending tests of specimens with a crack made of steels in a wide range of strength ( $\sigma_{0.2} = 200\text{--}2200$  MPa) and ductility ( $\psi_K = 10\text{--}85\%$ ) characteristics are analysed. A technique for determining the critical parameters of ductility is suggested, which ensure the stability of fracture strength of specimens with stress raisers ( $\sigma_{NF}$ ) at room temperatures ( $\sigma_{NF} > \sigma_{0.2}$ ) in the specified strength range of tested steels. It is concluded that to certify steels for the possibility of their brittle fracture, it is sufficient to ascertain the degree of the strength stability at the actual operating temperature of product without the need to determine the critical brittleness temperature of steel,  $T_c$ , on specimens with the stress raiser (crack).

**Key words:** strength, ultimate strength, ductility, strength stability, stress raiser.

*(Отримано 5 листопада 2021 р.)*

## 1. ВСТУП

Крихкість будь-якого металевого ступу або виробу з нього є вкрай небажаним явищем у техніці, саме через ненадійність їх властивості міцності —  $\sigma_{0.2}$  (межа плинності матеріалу), яка в умовах крихкості набуває різко вираженої чутливості до будь-якої неоднорідності напруженого стану (перекосу або концентрації напружень (КН)). Якщо стан крихкості розглядати з боку особливостей механічної поведінки металу чи виробу, то головною ознакою крихкості слід вважати не відсутність пластичності об'єкту, а втрату стабільного відтворення базової міцності металу  $\sigma_{0.2}$  у граничній міцності виробу  $\sigma_{NF}$  в момент його руйнування, коли  $\sigma_{NF} < \sigma_{0.2}$ . Особливо виразно ненадійність міцності крихкого виробу проявляється під дією ударних навантажень (скло, граніт, тощо).

Тому цілком доречно поставити задачу щодо визначення такого показника механічних властивостей, який би визначав ступінь надійності міцності як параметр, що відображає здатність металу протидіяти факторам локального порушення однорідного напружено-деформованого стану (НДС) в зонах дії концентраторів напружень (тріщин, надрізів, отворів, гвинтової нарізки тощо). Для металів з високим рівнем пластичності  $\psi_K$  (відносно звуження у разі розриву зразка в «шийці») більшість таких збуджень однорідності НДС лишаються непомітними для міцності виробів, тому їх взагалі не приймають до уваги, але для сталей з високою міцністю ( $\sigma_{0.2} > 1000$  МПа) або за наявності великих тріщин у виробі втрата міцності  $\sigma_{NF}$  може бути відчутною.

Отже, дослідження закономірностей, що пов'язують між собою базову міцність металу  $\sigma_{0,2}$  і граничну міцність тестового зразка з певним КН (тріщиною) у контексті впливу фактора пластичності металу ( $\psi_K$ ) на цей зв'язок може становити не лише суто науковий, але й практично важливий інтерес, наприклад, для таких виробів як високоміцні прогоничні з'єднання в техніці машинобудування або будівництві.

## 2. ПАРАМЕТРИ СТАБІЛЬНОСТІ МІЦНОСТІ

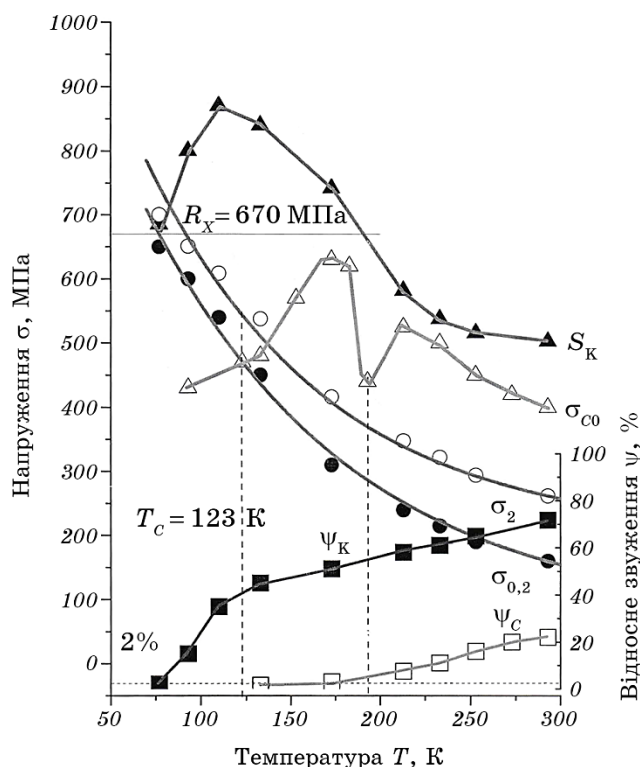
Міцність, як властивість металу, визначається умовною межею плинності  $\sigma_{0,2}$  у разі розтягування гладкого зразка за умов однорідного розподілу напружень не лише по робочому перерізу, а й по усьому об'єму навантаженого зразка. Тобто  $\sigma_{0,2}$  є механічною властивістю даного металу з наявною структурою і за температури дослідження, тому будемо вважати  $\sigma_{0,2}$  базовою характеристикою міцності матеріалу. У реальному виробі, що має складну форму з отворами, переходами, нарізкою, тощо, такої однорідності НДС не буває. І тому характеристику межі плинності не визначають, оскільки плинність в об'єкті локалізується в зонах концентрації напружень і саме в цих зонах формується джерело подальшого руйнування виробу. Тому для виробу визначають здебільшого кінцевий показник міцності — граничну міцність руйнування  $\sigma_{NF}$  (при розтягуванні зразка) або  $\sigma_{CO}$  (при згині) як умовне середнє значення номінального напруження в місці розлому.

Зазвичай  $\sigma_{NF} (\sigma_{CO}) > \sigma_{0,2}$ , тобто міцність руйнування виробу перевищує межу плинності матеріалу, що свідчить про стабільність відтворення базової міцності  $\sigma_{0,2}$  матеріалу у міцності виробу  $\sigma_{NF}$ . Але у випадку, коли пластичності металу не вистачає для погашення руйнівної дії КН у зоні локальної пластичності виробу, то можливо передчасне руйнування виробу за номінального напруження, нижчого за межу плинності матеріалу  $\sigma_{NF} < \sigma_{0,2}$ . Це сприймається як ознака крихкої поведінки матеріалу у виробі з КН, але по суті такого роду крихкість металу означає нестабільність у відтворенні у виробі базової міцності матеріалу  $\sigma_{0,2}$ , а в кінцевому рахунку проявляється у нестабільності міцності самого виробу  $\sigma_{NF} (\sigma_{CO})$ , яка надто різко змінюється під дією КН (рис. 1).

З фізичної точки зору, нестабільність міцності  $\sigma_{NF}$  є макроскопічним проявом гріфітської нестабільності на кінчику атомно-гострої нанотріщини за умови локального досягнення теоретичної міцності  $\sigma_{th}$  для крайнього найбільш перенапруженого ряду атомних зв'язків кристалу. Але для того потрібно, щоб загальний рівень напружень  $\sigma_N$  в металі був достатньо високим, щоб локальна пікова добавка напружень від КН у сумі з  $\sigma_N$  змогла перевищити критичний рівень  $\sigma_{rp}$  для переходу до нестабільності напружень. Саме тому

стан нестабільності міцності від присутності КН можливий лише для високоміцних металів і стопів, або за низьких температур для ОЦК-металів, водночас як для низькоміцних металів, таких як алюміній, мідь, свинець тощо, відсутня якась чутливість до тріщин чи інших КН, тому що вони руйнуються шляхом перерізу (тобто пластично) за  $\tau_s \ll \sigma_{гр}$  задовго до того, як буде досягнута силова умова  $\sigma_{max} = \sigma_{th}$ .

З цього припущення випливає, що для певного виду КН з однако-



**Рис. 1.** Вплив температури на міцність зразка з тріщиною  $\sigma_{c0}$ , для низько-вуглецевої сталі 3сп за навантаження на триточковий згин (за даними роботи [1]):  $S_K$  — міцність руйнування гладкого зразка (гранична міцність);  $\sigma_{0,2}$  і  $\sigma_2$  — межа плинності (міцність) сталі за деформацій  $e = 0,2\%$  та  $e = 2\%$  відповідно;  $\psi_K$  і  $\psi_N$  — пластичність гладкого зразка та зразка з тріщиною відповідно (за даними роботи [1]).

**Fig. 1.** Effect of temperature on strength of specimen with a crack,  $\sigma_{c0}$ , for low-carbon steel 3sp under a three-point bend loading (according to [1]):  $S_K$  — fracture strength of smooth (unnotched) specimen (ultimate strength);  $\sigma_{0,2}$  and  $\sigma_2$  — yield strength of steel at strains  $e = 0.2\%$  and  $e = 2\%$ , respectively;  $\psi_K$  and  $\psi_N$  — ductility of the smooth specimen and the specimen with a crack, respectively (according to [1]).

вим рівнем концентрації напружень для різних стопів з приблизно однаковою схильністю до деформаційного зміцнення перехід до нестійкого стану міцності має відбуватися за однакового критичного рівня міцності стопу  $\sigma_{0,2C} \approx \text{const}$ , незважаючи на різний рівень початкової (вихідної) міцності  $\sigma_{0,2}$  за кімнатної температури  $T_K = 293 \text{ K}$  [1].

Перехід металу від стану стабільного прояву його базової міцності до крихкого нестійкого можна простежити за результатами випробувань зразків з КН у широкому інтервалі температур, нижчих за кімнатну  $T_K$ , взятих з роботи А. В. Шияна [1], у якій досліджували закономірності окрихчування конструкційних сталей під дією КН різного типу (рис. 1).

На відміну від традиційної методики визначення критичної температури крихкості металу  $T_C$  за величиною ударної в'язкості [2–4], у роботі [1] за критерій крихкості за  $T_C$  приймали умову

$$\sigma_{NF} = \sigma_{0,2} \quad (1)$$

у разі розтягування зразка з надрізом (тріщиною), або

$$\sigma_{C0} = \sigma_{0,2} \quad (2)$$

у випадку триточкового згину зразка з тріщиною.

За такою метою умова крихкості співпадає з умовою втрати стабільності міцності металу для зразка з КН, що власне є задачею даної роботи.

З рисунку 1 видно, що граничну міцність металу  $S_K$  для зразка з однорідним НДС (без КН) можна виразити через дві самостійні складові — базову (пружну) міцність  $\sigma_{0,2}$  і додатковий пружно-пластичний або деформаційний резерв міцності  $B_r$ :

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

де

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

Параметр  $B_r$  відіграє визначальну роль у забезпеченні металу можливості супротиву передчасному (крихкому) руйнуванню в умовах неоднорідних НДС, названий нами показником зламостійкості [5, 6], виявив свою ефективність саме в роботах, де аналізували окрихчувальну дію різних концентраторів напружень [5–9].

Оскільки  $S_K > \sigma_{0,2}$ , то  $B_r > 1$ , тобто в однорідних силових полях (ОСП) для всіх конструкційних сталей стабільність базової міцності  $\sigma_{0,2}$  забезпечена беззаперечно і може бути порушена лише в діапазо-

ні криогенних температур ( $< 77 \text{ K}$ ) (де міцність сталей значно зростає) і лише за наявності перекошу зразка у разі одновісного розтягання або у разі згину. Тобто крихкість як фізичне явище металам в ОСП не властиве в принципі.

Але в неоднорідних силових полях, наприклад, у разі згину зразка або за наявності КН, коли резерв міцності поглинається у зоні локальної пластичності, гранична міцність зразка з КН  $\sigma_{\text{NF}}$  (або  $\sigma_{\text{C0}}$ ) може виявитися нижчою за  $\sigma_{0,2}$  через вплив множника  $B_{\text{rNF}}$ :

$$\sigma_{\text{NF}} = \sigma_{0,2} B_{\text{rNF}}, \quad (5)$$

де

$$B_{\text{rNF}} = \frac{\sigma_{\text{NF}}}{\sigma_{0,2}}. \quad (6)$$

Якщо  $\sigma_{\text{NF}} < \sigma_{0,2}$ , маємо втрату стабільності міцності  $\sigma_{\text{NF}}$ , тобто  $B_{\text{rNF}} \ll 1$ .

З таблиці 1, взятої з даних роботи [1], видно, що для сталей з невеликою вихідною міцністю (п.п. 1–4) критична міцність  $\sigma_{0,2\text{C}} \approx 350\text{--}450 \text{ МПа}$ , тобто відрізняється на 100 МПа (приблизно на 25%), до того ж їхня вихідна міцність  $\sigma_{0,2}$  має більший, ніж дворазовий розбіг ( $\approx 200\%$ ).

Оскільки міцність руйнування  $S_{\text{KC}}$  у критичному стані за  $\sigma_{\text{C0}} \approx \sigma_{0,2\text{C}}$  цих сталей відрізняється не більше, ніж на 25%, то результати аналізу не суперечать ідеї про те, що втрати макроскопічної стабільності міцності  $\sigma_{\text{C0}}$  за напруження  $\sigma_{0,2\text{C}}$  пов'язана з досягненням певного критичного рівня міцності на піку КН, у даному випадку близького до  $S_{\text{KC}} \approx 800\text{--}1000 \text{ МПа}$ . Отже, нестабільність міцності в умовах КН може трактувати як втрату стабільності гріффітсової нанотріщини на кінчику КН, що контролюється, насамперед, рівнем критичного напруження ( $S_{\text{KC}}$ ), яке складається з суми базової міцності

**ТАБЛИЦЯ. 1.** Критичні параметри крихкості сталей  $\sigma_{0,2\text{C}}$  і  $S_{\text{KC}}$  у разі руйнування зразків з тріщиною в умовах триточкового згинання за критерієм  $\sigma_{\text{C0}} \approx \sigma_{0,2\text{C}}$  (за даними [1]).

**TABLE. 1.** Critical parameters of steel brittleness  $\sigma_{0,2}$  and  $S_{\text{KC}}$  at fracture of specimens with crack under three-point bend by the criterion  $\sigma_{\text{C0}} \approx \sigma_{0,2\text{C}}$  (according to [1]).

№ п/п	Сталь, обробка	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{0,2\text{C}}$ , МПа	$S_{\text{KC}}$ , МПа	$\psi_{\text{K}}$ , %
1	$\alpha$ -Fe	140	350	970	84
2	Ст. Зсп	160	400	800	72
3	10ХСНД	310	420	1050	72
4	48 (відпал)	340	450	970	12

$\sigma_{0,2C}$  і локального піка напружень від КН. За даними з табл. 1 для нестабільної міцності  $\sigma_{0,2C}$  цей пік складає величину близько  $S_{KC}$  —  $\sigma_{0,2C} \approx 400\text{--}600$  МПа і мало залежить від пластичності сталей (див. пункти 3, 4 табл. 1).

Навпаки, якщо  $B_{rNF}(B_{rc0}) > 1$  маємо  $\sigma_{NF}(\sigma_{C0}) > \sigma_{0,2}$ , тобто стабілізацію міцності  $\sigma_{0,2}$  у виробі з КН. Отже, параметр  $B_{rNF}(B_{rc0})$  слугує показником, що регулює конструкційну міцність виробу  $\sigma_{NF}(\sigma_{C0})$  і тому особливості впливу конкретних механічних властивостей матеріалу ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\psi_K$ ,  $B_r$ ) на цю важливу механічну характеристику виробу із заданим видом КН потребують ретельного дослідження. Певною мірою цю задачу було розроблено у циклі робіт А. В. Шияна [1, 5–9], результати яких дозволяють здійснити аналіз всієї проблеми окрихчування сталей під дією КН під кутом зору, збереження або втрати стабільності міцності  $\sigma_{NF}$ , міра чого, зокрема, відображена параметром  $B_{rNF}(B_{rc0})$ .

### 3. ВПЛИВ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛУ НА МІРУ СТАБІЛЬНОСТІ МІЦНОСТІ

Згідно формули (5) конструкційна міцність зразка з КН ( $\sigma_{NF}$ ) побудована на основі базової міцності  $\sigma_{0,2}$  з участю множника  $B_{rNF}$ , від величини якого залежить буде чи не буде відтворена базова міцність  $\sigma_{0,2}$  у міцності виробу  $\sigma_{NF}$ . У роботі [9] наведено результати обробки експериментальних даних з руйнування зразків з різними типами КН для широкого масиву сталей в діапазоні міцностей від 200 до 2200 МПа і пластичностей в інтервалі  $\psi_K = 10\text{--}85\%$ ,  $B_r = 1,5\text{--}5$ . Встановлено наявність чітких закономірностей у зв'язку між показниками  $B_r$  сталей і величинами  $B_{rNF}(B_{rc0})$  на зразках з надрізами і тріщинами як на розтяг, так і на згин. Проте, вплив інших механічних властивостей сталей ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\psi_K$ ) на  $B_{rNF}(B_{rc0})$  в роботі [9] не досліджено, що дає нам змогу зробити це в даній роботі.

В таблиці 2 наведено результати з роботи [9] для зразків з тріщинами, призначених для визначення стандартного показника тріщиностійкості  $K_{1C}$ .

Зв'язок між базовими механічними характеристиками ( $\sigma_{0,2}$ ,  $S_K$  та  $\psi_K$ ) представлено на рис. 2, з якого видно, що зі збільшенням міцності сталей  $\sigma_{0,2}$  гранична міцність  $S_K$  зростає дещо повільніше, а пластичність  $\psi_K$  має виразну тенденцію до зниження, але розбіг величини  $\psi_K$  зростає для високоміцних сталей залежно від класу їхньої конструкційної якості і призначення. Міцність  $\sigma_{C0}$  для зразків з тріщиною (рис. 3) з підвищенням  $\sigma_{0,2}$  зростає спочатку в зоні стабільності  $\sigma_{0,2}$ , але після максимуму  $\sigma_{C0}^{\max}$  за  $\sigma_{0,2} = 800\text{--}1000$  МПа переходить границю стабільності ( $\sigma_{C0} = \sigma_{0,2}$ ) і далі вже не перевищує  $\sigma_{0,2}$ .

Перехід через границю стабільності  $\sigma_{C0} = \sigma_{0,2}$  має залежати від пластичності металу і, щоб визначити кількісні параметри цього

переходу, потрібна залежність  $B_{rc0}$  від  $\psi_K$  (табл. 2). Перед цим звернімо увагу на ту обставину, що коефіцієнт конструкційної стабільності міцності  $B_{rNF}$  у виразах (6) своєю величиною регулює тримку здатність виробу з КН —  $\sigma_{NF}$ ; при  $\sigma_{NF} > \sigma_{0,2}$  —  $B_{rNF} > 1$ , при  $\sigma_{NF} < \sigma_{0,2}$  —  $B_{rNF} < 1$ . Але з практичного інженерного боку більший інтерес представляє обернена величина  $B_{rNF}$ , тобто  $(B_{rNF})^{-1}$ :

$$k_s = \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_{NF}(\sigma_{C0})}, \quad (7)$$

де  $k_s$  — коефіцієнт безпечного навантаження виробу з КН, по формі подібний до відомого інженерного коефіцієнта запасу міцності  $K_{зм}$  [10]

**ТАБЛИЦЯ. 2.** Механічні властивості сталей і зразків з тріщиною у разі згину.

**TABLE. 2.** Mechanical properties of steels and specimens with crack at bending.

№ п/п	КС	Обробка	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\psi_K$ , %	$S_K$ , МПа	$B_r$	$\sigma_{C0}$ , МПа	$B_{rc0}$	$k_s$
1	АК-35 [2]	Стан поставки	1027	75,0	2321	2,26	1820	1,83	0,55
2	$\alpha$ -Fe [2]	Г 1323 К, 2 год ПО	138	83,8	700	5,07	290	2,10	0,48
3	10ХСНД [2]	Г 1373 К, 2 год ПО	312	72,0	920	2,95	590	1,88	0,53
4	Ст. Зсп [2]	Г 1373 К, 2,75 год ПО Г 1373 К, 1 год + ВП	160	71,7	502	3,14	307	1,92	0,52
5	10Х15Н27Т3В2 МР [3]	1023 К, 16 год; 923 К, 10 год Г 1373 К, 1 год + ВП	870	23,0	1583	1,82	1220	1,40	0,71
6		1023 К, 16 год; 923 К, 10 год + Н <sub>2</sub>	880	10,0	1443	1,64	713	0,81	1,23
7	15Х12Н2МФАВ [4]	Г 1393 К, 1 год + ВП 953 К, 2 год 1273 К, 1 год;	940	62,0	1983	2,11	1580	1,68	0,60
8	03Х12Н10МТ [4]	1023 К, 2 год + ВП 773 К, 2 год Г 1373 К, 15 хв;	940	79,0	2670	2,84	1740	1,85	0,54
9	03Х12Н10МТ [4]	1023 К, 2 год + ВП 773 К, 2 год	930	76,0	2325	2,50	1655	1,78	0,56
10		ПД-АНЗО, 1 шар	430	67,5	1360	3,16	2830	1,92	0,52
11	СШ Х75 [2]	ПД-АНЗО, 2 шари	361	60,7	1444	3,17	700	1,94	0,51
12		ПД-АНЗО, 3 шари	404	51,9	1252	3,10	776	1,92	0,52
13		КФ 48-АНК-54, ВП = 0,0	622	59,9	1244	2,00	970	1,56	0,64
14	СШ	те ж, ВП = 0,001	623	55,6	1160	1,86	890	1,43	0,70
15	12ХН2МДФ [2]	те ж, ВП = 0,0022	628	68,1	1281	2,04	1005	1,60	0,63
16		те ж, ВП = 0,004	642	67,9	1400	2,18	1117	1,74	0,57
17	20Х [5]	ВП 473 К	1150	53,9	1932	1,68	1276	1,11	0,9



Продовження таблиці 2.

Continuation of Table 2.

18		Г 1113 К + ВП 423 К, 2 год	1860	16,5	3050	1,64	930	1,50	2,07
19	50Х [5]	Г 1113 К + ВП 473 К, 2 год	1920	46,7	3150	1,64	1152	0,60	1,67
20		Г 1113 К + ВП 673 К, 2 год	1560	48,6	2530	1,64	1248	0,80	1,25
21		Г 1113 К + ВП 773 К, 2 год	1200	57,2	1980	1,65	1080	0,90	1,11
22	40С2Х [5]	ВТМО + ВП 473 К	1760	53,0	2870	1,63	774	0,44	2,27
23		ВТМО + ВП 573 К	1690	55,0	2770	1,65	900	0,53	1,90
24	60С2Х [5]	ВТМО + ВП 573 К	2205	38,0	3594	1,63	433	0,21	4,76
25		ВТМО + ВП 773 К	1570	40,0	2575	1,64	723	0,46	2,17
26	ШХ15 [5]	З 1133 К + ВП 473 К	2120	3,6	3460	1,63	1502	0,07	14,3
27	24ХН0МФА [5]	Г 1153 К + ВП 913 К, 15 год	765	73,5	1920	2,51	1362	1,78	0,56
28	65Ф [5]	Стан поставки	700	28,0	1183	1,69	800	1,14	0,88
29	10ХСНД [6]	Уздовж прокату	419	69,7	1223	2,92	1020	2,43	0,41
30	10ХСНД [6]	Поперек прокату	445	73,7	1400	3,15	1175	2,64	0,38
31	12Г2МФТ [6]	Уздовж прокату	571	65,6	1290	2,26	1050	1,84	0,54
32		Поперек прокату	602	58,4	1282	2,03	975	1,62	0,62
33	15ХСНД [7]	Стан поставки	328	68,0	1046	3,19	880	2,68	0,37

*Примітки:* Г — гартування; ПО — пічне охолодження; ВП — відпуск; Н<sub>2</sub> — водневе середовище; ЗШ — зварний шов; ПД — порошковий дріт; КФ — керамічний флюс; В — вміст бору; ВТМО — високотемпературна термічна обробка.

$$K_{зм} = \frac{\sigma_{0,2}}{[\sigma]}, \quad (8)$$

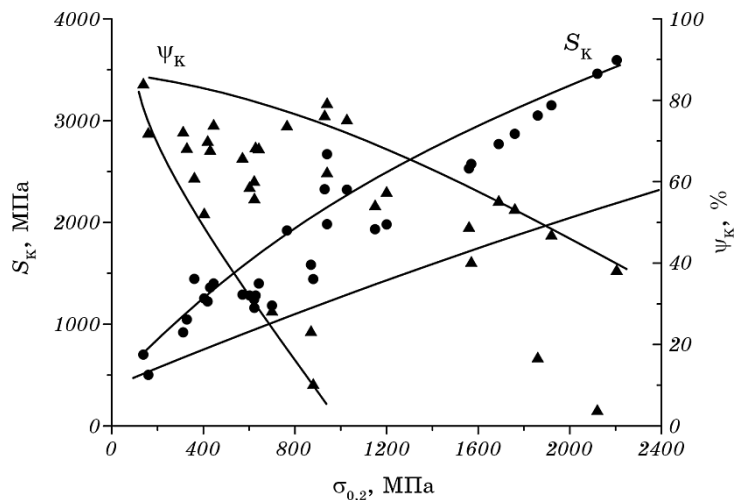
де  $[\sigma]$  — допустиме розрахункове напруження.

Оскільки  $[\sigma] < \sigma_{NF}(\sigma_{C0})$ , то  $k_s < K_{зм}$ , але за умови  $k_s > 1$   $k_s$  може лише теоретично бути (найменшим) гранично допустимим коефіцієнтом запасу для нестабільної міцності, насправді непридатним для практичного застосування.

Відомо, що  $[\sigma] < \sigma_{0,2}$ , оскільки  $K_{зм} > 1$ , водночас, як для стабільних станів міцності завжди  $k_s < 1$ , що хоч і не має ніякого інженерного сенсу як показника запасу міцності, але для виміру величини нестабільності міцності, якщо  $k_s > 1$  для стопів з невеликим запасом пластичності  $\psi_K$ , коефіцієнт  $k_s < 1$  однозначно може бути виражений показником ступеню окрихчуваності  $k_1$  стопу під дією КН.

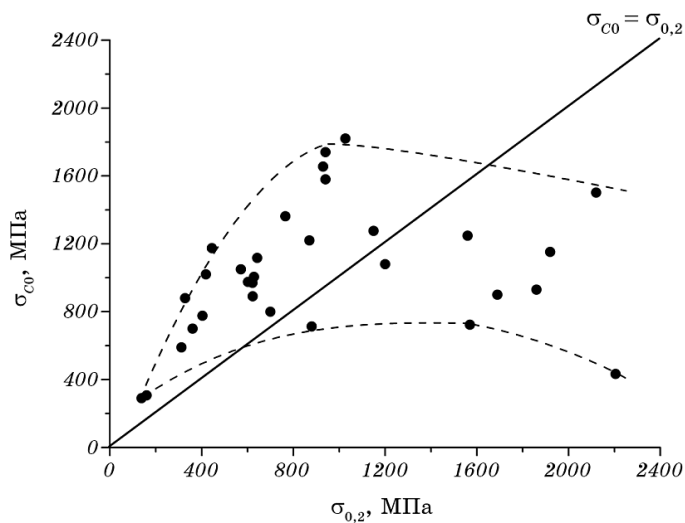
Тому в таблиці 1 наведено колонку з показником  $k_s$ , а на рис. 4 подається залежність  $k_s$  від  $\psi_K$ , з якого видно, що всі сталі можна розділити на два класи — низької міцності  $\sigma_{0,2} < 1000$  МПа і високої міц-

ності  $\sigma_{0,2} > 1000$  МПа, які зберігають свою базову міцність  $\sigma_{0,2}$  у виробках з КН (тріщиною) ( $k_s < 1$ ) при  $\psi_K > 20\%$  і  $\psi_K > 50\%$  відповідно.



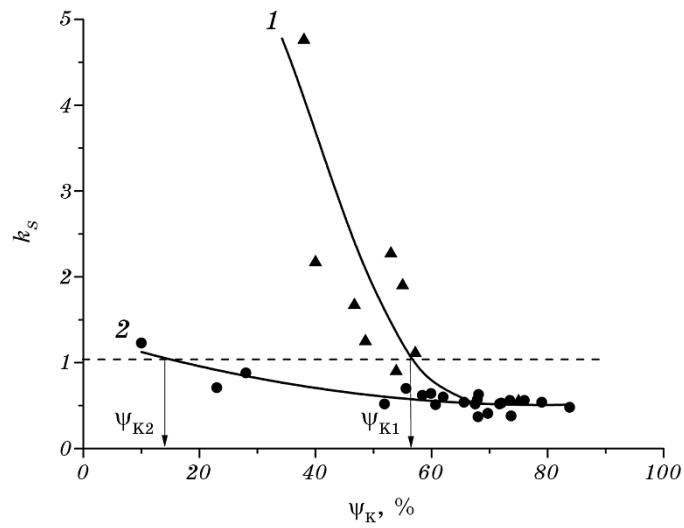
**Рис. 2.** Взаємозв'язок міцності ( $\sigma_{0,2}$ ), пластичності ( $\psi_K$ ) та граничної міцності ( $S_K$ ) сталей (табл. 2) у разі випробувань гладких зразків на розтяг [9].

**Fig. 2.** Relationship between strength ( $\sigma_{0,2}$ ), ductility ( $\psi_K$ ) and ultimate strength ( $S_K$ ) of steels (Table 2) when tensile testing smooth specimens [9].



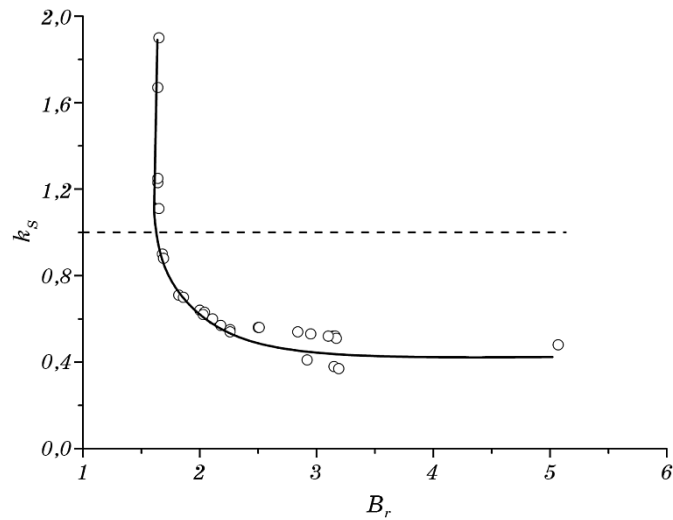
**Рис. 3.** Залежність міцності зразків з тріщиною у разі триточкового згину  $\sigma_{c0}$  від міцності сталей (за даними табл. 2) [9].

**Fig. 3.** Dependence of the strength of specimens with a crack at three-point bending  $\sigma_{c0}$  on the strength of steels (according to Table 2) [9].



**Рис. 4.** Залежність мінімально необхідного запасу міцності  $k_s$  (коефіцієнт безпечного навантаження) від пластичності  $\psi_K$  для сталей двох класів міцності: 1 —  $\sigma_{0.2} > 1000$  МПа; 2 —  $\sigma_{0.2} < 1000$  МПа.

**Fig. 4.** Dependence of the minimum required safety margin  $k_s$  (safe load factor) on the ductility  $\psi_K$  for steels of two strength classes: 1 —  $\sigma_{0.2} > 1000$  MPa; 2 —  $\sigma_{0.2} < 1000$  MPa.



**Рис. 5.** Залежність коефіцієнта  $k_s$  від зламостійкості сталей  $B_r$ , незалежно від класу міцності  $\sigma_{0.2}$ .

**Fig. 5.** Dependence of the coefficient  $k_s$  on the break resistance of steels  $B_r$ , regardless of the strength class  $\sigma_{0.2}$ .

Такий розподіл сталей на класи міцності обумовлений тим, що міцнішим сталям притаманна менша деформаційна зміцнюваність, а низькоміцним — навпаки, більш високий показник деформаційного зміцнення Холомона  $n$  [11].

Оскільки, фактор  $n$  присутній у деформаційному резерві міцності  $B_r$  згідно (4), то залежність  $k_s$  від  $B_r$  демонструє єдину закономірність для сталей всіх рівнів міцності (рис. 5). Критичний рівень  $B_r$  для переходу від стабільної до нестабільної  $\sigma_{NF}$  ( $\sigma_{C0}$ ) виробу з тріщиною становив однозначно величину  $B_{rc} = 1,63$ . Для інших зразків з кільцевим надрізом у разі розтягу критичний рівень переходу становить  $B_{rc} = 2$  [9]. Фізична природа критичного рівня показника зламостійкості  $B_{rc}$  у разі руйнування зразків чи виробів з КН потребує окремого розгляду.

#### 4. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Підсумовуючи наведені вище результати аналізу дослідження комплексу механічних властивостей сталей на зразках в однорідних силових полях (ОСП) і в неоднорідних силових полях (НСП) на зразках з КН за даними авторських та інших опублікованих робіт, що використані авторами [9], можна зробити певні узагальнені висновки щодо ролі пластичності в запобіганні крихкості виробів з КН під кутом зору втрати стабільності міцності.

Механічні властивості металів і стопів в ОСП ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\psi_K$ ,  $S_K$ ) є базовими, які в реальних умовах НДС виробу (НСП) суттєво спотворюються через локалізацію процесів плинності в зонах КН або в місцях скупчення залишкових напружень та ін. Завдяки пластичності у цих зонах ідуть процеси, які з одного боку, знімають піки локальних напружень, а з іншого боку, внаслідок процесів деформаційного зміцнення металу ведуть до відновлення пружного стану цих піків. Для поглинання небажаного процесу локального зміцнення використовують деформаційний резерв міцності  $B_r = S_K / \sigma_{0,2}$ , що відстрочує зародження руйнування до більш високих рівнів навантаження виробу  $\sigma_{NF}$ . Але руйнування неминуче, коли резерв  $B_r$  вичерпається. Тому величина  $B_r$  (разом з  $\psi_K$ ) контролює коефіцієнт безпечного навантаження  $k_s$ , який за умови  $k_s < 1$  гарантує стабільне відтворення базової міцності  $\sigma_{0,2}$  у міцності виробу  $\sigma_{NF}$ . За недостатньої пластичності для даного типу КН величина параметра  $k_s > 1$  дозволяє гарантувати цілісність виробу за рахунок нормування рівня його навантаження згідно з величиною  $k_s$ .

У викладеній тут парадигмі стабільності міцності, як бачимо, зникає інша парадигма — крихкості як такої, тобто немає потреби визначати температуру крихкості металу  $T_C$  під дією КН (низьких температур), оскільки параметр  $T_C$  нічого не додає до трактування

$\sigma_{NF}$  чи  $\sigma_{c0}$  саме за температури  $T_K = 293$  К. Тобто важливіше мати міру стабільності міцності самого виробу за температури  $T = T_K$ , ніж температура  $T_C$ , за якої даний виріб буде крихким і непридатним для роботи, якщо  $T_C$  не є температурою експлуатації виробу. Звісно, і в концепції стабільності міцності залишається проблема переносу стабільності від зразка з КН до реального виробу, як і в концепції крихкості. Але у цьому є суттєва відмінність. Для перенесення міри стабільності  $B_{rNF}$  ( $B_{rc0}$ ) чи  $k_s$  від зразка з КН до виробу достатньо підібрати у зразку типовий концентратор напружень, який моделює градієнт напружень (деформацій) у зразку, близький до градієнта напружень (деформацій) у найбільш проблемному місці у виробі. Для цього лише потрібно детально дослідити характер НДС у виробі. Принципово така проблема доступна для вирішення в рамках сучасних можливостей механіки руйнування.

Корисно зауважити, що експериментальні дані в табл. 1 отримані на стандартних зразках з нормативною тріщиною, призначених для визначення показника тріщиностійкості  $K_{1C}$  згідно з стандартом [12]. Показник  $K_{1C}$  дозволяє визначити розмір тріщини, здатної до втрати своєї стабільності і привести до руйнування за відомого значення напруження  $\sigma_{c0}$ . Але з рис. 4 та 5 видно, що для всіх сталей зі стабільною міцністю ( $k_s < 1$ ) у даному зразку наявна тріщина не може втратити стабільність у межах пружного навантаження з номінальним напруженням  $\sigma_N < \sigma_{0,2}$ . Отже, на цих сталях з високою пластичністю показник  $K_{1C}$  не реалізується і необхідно застосовувати зразки з більшою товщиною, щоб створити умови для НДС плоскої деформації [13]. Водночас величина  $B_{rc0} > 1$  на стандартному зразку вже відображає кількісну міру стабільності наявної тріщини у даному матеріалі за температури  $T_K = 293$  К, що також може мати певну практичну значимість, але методично набагато простіше за визначення  $K_{1C}$ .

На основі концепції стабільності міцності можна суттєво спростити існуючу систему атестації металів на крихкість для виробів з КН. Загальний принцип визначення конструкційної придатності металу полягає в тому, що за рахунок пластичності  $\psi_K$  (а краще зламостійкості  $B_r$ ) не допустити у виробі з КН локального руйнування у зоні пластичності КН. Це можливо, якщо  $k_s < 1$ . У випадку недостатньої пластичності металу для даного виробу ( $k_s > 1$ ) слід знизити клас міцності металу або застосувати більший коефіцієнт запасу міцності для виробу  $K_{зм}$ , гранично високим значенням якого може бути величина  $k_s$ . Як бачимо, у такій схемі атестації немає необхідності використовувати показник критичної температури крихкості  $T_C$  для металу за критерієм ударної в'язкості.

Є підстави очікувати, що подібний підбір оптимальних показників міцності  $\sigma_{0,2}$  і пластичності  $\psi_K$  (або зламостійкості  $B_r$ ) виявиться корисним і ефективним у задачах забезпечення надійності конс-

трукційної міцності таких важливих елементів конструкції як прогоничні з'єднання з гвинтовою нарізкою на прогоничах, в яких застосування високоміцних сталей і стопів особливо ефективно, наприклад, у літакобудуванні.

## 5. ВИСНОВКИ

1. Головним наслідком для механічних властивостей металу чи виробу з неоднорідним видом НДС у стані крихкості є втрата стабільної міцності, а не втрата пластичності.

2. Міра стабільності міцності проявляється у співвідношенні міцності виробу  $\sigma_{NF}(\sigma_{C0})$  і металу  $\sigma_{0,2}$ : якщо  $\sigma_{NF}(\sigma_{C0}) > \sigma_{0,2}$ , міцність виробу стабільна, якщо  $\sigma_{NF}(\sigma_{C0}) < \sigma_{0,2}$  — нестабільна. Стабільність виражена у коефіцієнті  $B_r$  (метал) і в  $B_{rNF}(B_{rc0})$  (зразок з КН).

3. Для стабільної міцності виробу (зразка з КН)  $B_{rNF}(B_{rc0}) > 1$  ніякого розрахункового запасу міцності  $K_{зм}$  в принципі не потрібно ( $k_s < 1$ ). Для нестабільної міцності виробу коефіцієнт необхідної безпеки навантаження  $k_s > 1$  є орієнтовним гранично низьким коефіцієнтом запасу міцності  $K_{зм}$  для гарантованої безпеки навантаження виробу з КН.

4. Міцність зразка з тріщиною [12] у разі згину  $\sigma_{C0}$  є стабільною для всіх сталей з резервом міцності  $B_r > 1,63$ , або з нормативом пластичності  $\psi_K > 20\%$  (для  $\sigma_{0,2} < 1000$  МПа) і  $\psi_K > 50\%$  (для  $\sigma_{0,2} > 1000$  МПа).

5. Подальша конкретизація нормативів стабільної міцності для зразків з різними типами КН потребує відповідних досліджень або системного аналізу експериментальних даних, опублікованих в літературі.

Автори висловлюють щире подяку академікам НАН України Фірстову Сергію Олексійовичу і Котречку Сергію Олексійовичу за корисні зауваження, інтерес і плідні дискусії під час обговорення проблем крихкості металів і виробів для розробки концепції стабільності міцності.

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. А. В. Шиян, *Физическая природа локального напряжения хрупкого разрушения сталей и сварных швов* (Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук) (Київ: 1990).
2. *ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах* (Москва: Издательство стандартов: 1978).
3. В. М. Чернов, Г. Н. Ермолаев, М. В. Леонтьева-Смирнова, *Журнал технической физики*, **80**, вып. 7 (2010).
4. V. M. Chernov, M. V. Leonteva-Smirnova, M. M. Potapenko, N. I. Budylnin,

- Yu. N. Devyatko, A. G. Ioltoukhovskiy, E. G. Mironova, A. K. Shikov, A. B. Sivak, G. N. Yermolaev, A. N. Kalashnikov, B. V. Kuteev, A. I. Blokhin, N. I. Loginov, V. A. Romanov, V. A. Belyakov, I. R. Kirillov, T. M. Bulanova, V. N. Golovanov, V. K. Shamardin, Yu. S. Strebkov, A. N. Tyumentsev, B. K. Kardashev, O. V. Mishin, and B. A. Vasiliev, *Nuclear Fusion*, **47**: 839 (2007).
5. В. Н. Грищенко, Ю. Я. Мешков, Ю. А. Полушкин, А. В. Шиян, *Металлофиз. новейшие технол.*, **37**, № 7: 961 (2015).
  6. Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, *Механика машин, механизмов и материалов*, **38**, № 1: 79 (2017).
  7. Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, *Сталь*, № 14: 46 (2018).
  8. Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, *Сталь*, № 3: 59 (2020).
  9. А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков, Ю. А. Полушкин, *Сталь*, № 6: 39 (2019).
  10. *Сопротивление материалов* (Ред. Г. С. Писаренко) (Киев: Вища школа: 1979).
  11. J. H. Hollomon, *Trans. AIME, Iron Steel Div.*, **162**: 268 (1945).
  12. *ГОСТ 25.505-85. Расчеты на прочность и пластичность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении* (Москва: Издательство стандартов: 1985).
  13. *Механика разрушения и прочность материалов* (Ред. В. В. Панасюк) (Киев: Наук думка: 1988), т. 3.

## REFERENCES

1. 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 Dissert. for PhD Phys.-Math. Sci.) (Kyiv: 1990) (in Russian).
2. *ГОСТ 9454-78. Металлы. Методы Испытания на Ударный Изгиб при Пониженных, Комнатной и Повышенных Температурах* [Metals. Impact Test Method at Low, Room and High Temperatures] (Moscow: Izdatel'stvo Standartov: 1978) (in Russian).
3. V. M. Chernov, G. N. Ermolayev, and M. V. Leontyeva-Smirnova, *Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki*, **80**, Iss. 7 (2010) (in Russian).
4. V. M. Chernov, M. V. Leonteva-Smirnova, M. M. Potapenko, N. I. Budylnin, Yu. N. Devyatko, A. G. Ioltoukhovskiy, E. G. Mironova, A. K. Shikov, A. B. Sivak, G. N. Yermolaev, A. N. Kalashnikov, B. V. Kuteev, A. I. Blokhin, N. I. Loginov, V. A. Romanov, V. A. Belyakov, I. R. Kirillov, T. M. Bulanova, V. N. Golovanov, V. K. Shamardin, Yu. S. Strebkov, A. N. Tyumentsev, B. K. Kardashev, O. V. Mishin, and B. A. Vasiliev, *Nuclear Fusion*, **47**: 839 (2007).
5. V. N. Gryshchenko, Yu. Ya. Meshkov, Yu. A. Polushkin, and A. V. Shiyan, *Металлофиз. Новейшие Технол.*, **37**, No. 7: 961 (2015) (in Russian).
6. Yu. Ya. Meshkov and A. V. Shiyan, *Mechanika Machine, Mekhanizmov i Materialov*, **38**, No. 1: 79 (2017) (in Russian).
7. Yu. Ya. Meshkov and A. V. Shiyan, *Stal'*, No. 14: 46 (2018) (in Russian).
8. Yu. Ya. Meshkov and A. V. Shiyan, *Stal'*, No. 3: 59 (2020) (in Russian).

9. A. V. Shiyan, Yu. Ya. Meshkov, and Yu. A. Polushkin, *Stal'*, No. 6: 39 (2019) (in Russian).
10. *Soprotivlenie Materialov* (Ed. G. S. Pisarenko) (Kyiv: Vyshcha Shkola: 1979) (in Russian).
11. J. H. Hollomon, *Trans. AIME, Iron Steel Div.*, **162**: 268 (1945).
12. *Gost 25.505-85. Raschety na Prochnost' i Plastichnost'. Metody Mekhanicheskikh Ispytaniy Metallov. Opredelenie Kharakteristik Treshchinostoykosti (Vyazkosti Razrusheniya) pri Sticheskom Nagrushenii* (Moscow: Izdatel'stvo Standartov: 1985) (in Russian).
13. *Mekhanika Razrusheniya i Prochnost' Materialov* (Ed. V. V. Panasyuk) (Kyiv: Naukova Dumka: 1988), vol. 3 (in Russian).