

PACS numbers: 46.32.+x, 46.50.+a, 62.20.fk, 62.20.mj, 62.20.mm, 62.20.mt, 81.40.Np

Механічна стабільність і крихкість металів і сплавів. Ч. 2. Роль механічних властивостей

Ю. Я. Мешков, Г. П. Зіміна

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

Встановлено закономірності впливу міцності та пластичності криць на ефективність окрихчувальної дії концентраторів напружень (КН) у вигляді тріщин втомі у стандартних зразках для визначення тріщиностійкості металів і сплавів. Для аналізу застосовували спеціальні показники, яких було запропоновано в Ч. 1 цього повідомлення, а саме: резерв міцності B_r і ефективний коефіцієнт концентрації напружень КН α_{ef} . Показано, що умовою втрати механічної стабільності металу (крихкості) під дією КН є перевищення α_{ef} над B_r , що означає руйнування зразка з КН за середнього напруження, яке не перевищує границю плинності $\sigma_{0,2}$ металу. Встановлено закономірності впливу міцності $\sigma_{0,2}$ на показники резерву міцності B_r і величину ефективного коефіцієнта концентрації напружень α_{ef} , спричиненого зростанням міцності криць у межах $\sigma_{0,2} = 140\text{--}500$ МПа (в результаті пониження температури) і $\sigma_{0,2} = 140\text{--}2200$ МПа за кімнатної температури (в результаті зміни хемічного складу криці та термооброблення). Встановлено, що руйнівальна ефективність КН α_{ef} регулюється безпосередньо величиною резерву міцності B_r , який, в свою чергу, пов'язаний з характеристикою міцності $\sigma_{0,2}$. Таким чином, пластичність нівелює окрихчувальну ефективність КН (α_{ef}) не сама по собі, а на фоні показників міцності ($\sigma_{0,2}$): більш виразно для низькоміцних і менш ефективно для високоміцних криць.

Ключові слова: міцність, резерв міцності, механічна стабільність, крих-

Corresponding author: Halyna Petrivna Zimina
E-mail: 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 G. P. Zimina, Mechanical Stability and Brittleness of Metals and Alloys. Pt. 2. The Role of Mechanical Properties, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 46, No. 4: 355–369 (2024) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.46.04.0355](https://doi.org/10.15407/mfint.46.04.0355)

кість, концентратор напружень.

Regularities of the influence of strength and ductility of steels on the embrittlement effect of stress raisers (SR) as fatigue cracks in standard specimens for determining the fracture toughness of metals and alloys are ascertained. Special indices proposed in Pt. 1 of this report are used for this analysis, namely: strength margin, B_r , and the effective coefficient of stress raise, α_{ef} . As shown, an excess of α_{ef} over B_r is the condition for mechanical instability of metal (brittleness) under the SR influence; this means fracture of the specimen with SR at the average stress that does not exceed the yield strength of metal, $\sigma_{0.2}$. Regularities are found for the effect of strength, $\sigma_{0.2}$, on indices of strength margin, B_r , and the value of the effective stress raise coefficient, α_{ef} , due to an increase in strength of steels, $\sigma_{0.2}$, within the range 140–500 MPa (as a result of decrease in temperature) and within the range 140–2200 MPa at room temperature (as a result of changing the chemical composition of steel and heat treatment). As established, the SR destructive effect, α_{ef} , is governed directly by the value of strength margin, B_r , which, in turn, is related to the strength characteristic, $\sigma_{0.2}$. Thus, ductility reduces SR embrittlement effect, α_{ef} , not by itself, but against the background of yield strength, $\sigma_{0.2}$, more strongly for low-strength steels and less strongly for high-strength steels.

Key words: strength, strength margin, mechanical stability, brittleness, stresses' raiser.

(Отримано 11 липня 2023 р.; остаточн. варіант — 15 липня 2023 р.)

1. ВСТУП. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У Ч. 1 даної роботи [1] було показано, що стан крихкості будь-якого твердого тіла означає нестабільність його міцності, яка залежить не стільки від природи матеріялу, скільки від способу його навантаження й особливо від ступеня неоднорідності напруженого стану, спричиненої концентраторами напружень (КН). У металевих матеріялів завдяки наявності у них пластичності є природній захист від цього виду нестабільності у вигляді РСМ — резерву стабільної міцності (або зламостійкості) B_r [2–5], що поглинає неоднорідність поля напружень, чим істотно пом'якшує руйнівальну силу КН:

$$B_r = \frac{S_K}{\sigma_{0,2}}, \quad (1)$$

де S_K — істинне напруження руйнування, $\sigma_{0,2}$ — умовна границя плинності. Але це можливе лише за умови, якщо розмах амплітуди неоднорідності НДС не перевищує величину B_r .

Для природньо крихких металів, що руйнуються в умовах чисто пружних деформацій, руйнівальна ефективність КН визначається Нейберовим коефіцієнтом концентрації напружень α_σ [6, 7]. У ме-

талів наявність резерву міцності B_r частково або цілком спотворює руйнівальну силу КН, закладену в суто геометричних параметрах концентратора α_σ , тому що в зоні локальної пластичності КН формується специфічна зона локального перенапруження металу над рівнем границі плинності $\sigma_{0,2}$. Якщо критичний рівень цього перенапруження повністю поглинає резерв стабільності міцності B_r , це викликає нестабільність граничної міцності металу S_K і призводить до крихкої поведінки металу під дією КН. Отже, у пластичному металі концентратор діє як ефективний дестабілізатор міцності за рахунок створеного ним локального перенапруження. Мірою ефективності перенапруження може слугувати співвідношення двох граничних міцностей самого металу (S_K) і металевого тіла з КН — σ_{NF} (σ_{CO}) (σ_{NF} — середнє номінальне напруження руйнування зразка з КН за розтягування, σ_{CO} — за згинання зразка):

$$\alpha_{ef} = S_K / \sigma_{NF} . \quad (2)$$

Параметр α_{ef} можна назвати, на відміну від коефіцієнта концентрації напружень α_σ , показником руйнівальної ефективності концентратора напружень (ЕКН); між ними є очевидне співвідношення: $\alpha_{ef} < \alpha_\sigma$.

Слід зауважити, що ЕКН α_{ef} є особливим параметром концепції механічної стабільності металів, оскільки залежить не лише від геометричних параметрів КН або від параметрів НДС в зоні пластичності КН, але й від механічних властивостей металу. Вплив основних механічних властивостей криць $\sigma_{0,2}$ і B_r на α_{ef} становить задачу даної статті; роль чинника НДС буде розглянуто в «Ч. 3».

2. МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ПАРАМЕТРИ МЕХАНІЧНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ КРИЦЬ B_r І α_{ef}

В роботі [1] було показано, що збільшення резерву стабільності міцності B_r криці на зразках з КН не обов'язково супроводжується зростанням критичного значення РСМ під час в'язко-крихкого переходу B_{rc} при T_c , коли номінальне напруження руйнування зразка з КН σ_{NF} збігається з границею плинності криці $\sigma_{0,2}$ (рис. 1):

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

Умова (3) з урахуванням (1) і (2) означає, що критерій крихкості для зразка з КН (3) у більш узагальненому вигляді буде:

$$\alpha_{ef} = B_r . \quad (4)$$

Критичні значення параметрів ЕКН і РСМ при T_c відповідно бу-

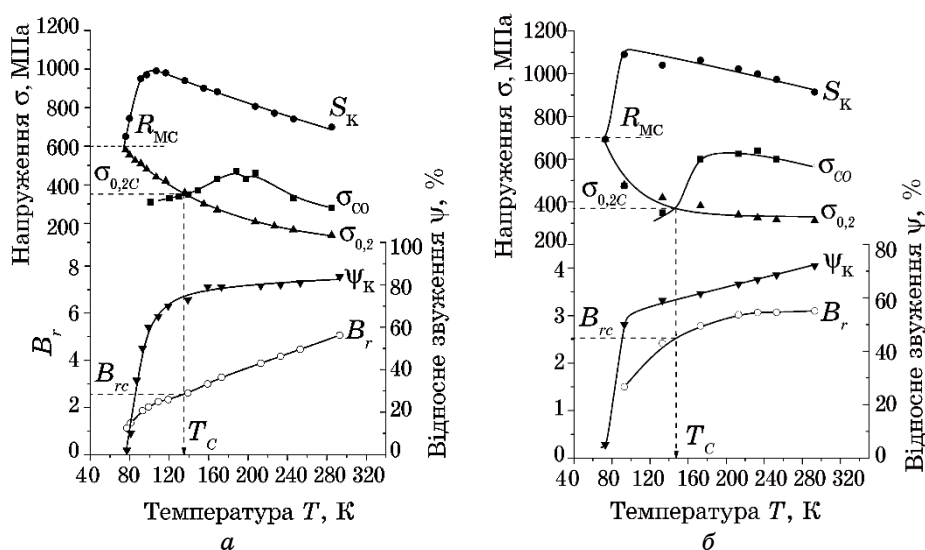


Рис. 1. Температурні залежності механічних характеристик заліза α -Fe (а) і криці 10XCHD (б) за даними [8]. $\sigma_{0,2}$ — границя плинності, S_K — істинне напруження руйнування, ψ_K — відносне звуження під час розриву, B_r — резерв міцності, σ_{co} — номінальне напруження руйнування зразка з тріщиною.

Fig. 1. Temperature dependences of the mechanical characteristics of α -Fe (a) and steel 10XCHD (б) according to [8]. $\sigma_{0,2}$ is yield strength, S_K is true fracture stress, ψ_K is reduction in area when breaking, B_r is strength margin, σ_{co} is nominal fracture stress of specimen with a crack.

дуть $\alpha_{efc} = B_{rc}$.

В [1] встановлено лише загальну тенденцію щодо зростання показників α_{efc} і B_{rc} з підвищенням B_r , але на цю закономірність істотно впливає рівень міцності криці $\sigma_{0,2}$ і особливо НДС в зоні дії КН.

Нижче більш детально буде розглянуто роль показника міцності $\sigma_{0,2}$ у його впливі на ефективність окрихчувальної дії КН (α_{ef}) і на критерій крихкості через показник $\alpha_{efc} = B_{rc}$. Будемо розрізняти два способи підвищення міцності $\sigma_{0,2}$ криць — від пониження температури («температурний» спосіб), від виду термооброблення та хемічного складу криці («структурний» спосіб), тому що від способу зміцнення залежить інтенсивність впливу границі плинності $\sigma_{0,2}$ на показники резервів міцності: K_B (стабільність крихкої міцності R_{MC}) [9] і B_r (стабільність в'язкої міцності S_K) [10]. Це наводить на думку про те, що не сама температура T , а спричинений нею збільшений рівень границі плинності криці $\sigma_{0,2}$ викликає пониження показників K_B і B_r . Було показано [2], що «температурний» спосіб зміцнення криць, коли з пониженням температури зростає лише

границя плинності $\sigma_{0,2}$, а крихка міцність R_{MC} не змінюється [9], призводить до пришвидшеного зменшення показника резерву стабільності — крихкої міцності K_B [3]:

$$K_B = \frac{R_{MC}}{\sigma_{0,2}}. \quad (5)$$

За «структурного» способу зміцнення криць разом з границею плинності $\sigma_{0,2}$, як правило, зростають одночасно крихка (R_{MC}) і в'язка (S_K) граничні міцності; отже, темпи пониження показників резервів міцності обох видів, як крихкої (K_B), так і в'язкої (B_r), істотно зменшуються, а тому критичні показники критерію крихкості криць (3) зміщуються до більш високих значень $\sigma_{0,2C}$.

На рисунку 1 представлено одержані в роботі [10] температурні залежності механічних властивостей армко-заліза (α -Fe) та криці 10ХСНД на гладких зразках ($\sigma_{0,2}$, S_K) і на зразках з тріщиною втоми за згинання (σ_{CO} — номінальне напруження руйнування), яких достатньо, щоб оцінити потрібні параметри B_r по (1) і α_{ef} по (2).

На рисунку 2 наведено результати обрахунку параметрів P_{CM} і E_{KH} для досліджених в [10] трьох металів — α -Fe, криць 10ХСНД і

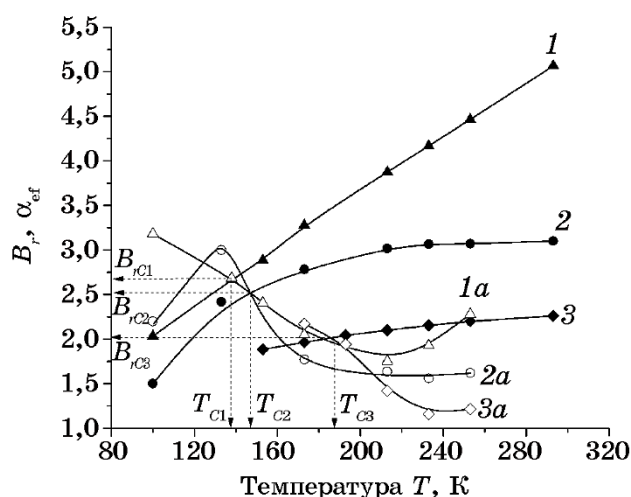


Рис. 2. Температурні залежності резерву міцності (зламостійкості) B_r (криві 1–3) і коефіцієнта ефективності напруження α_{ef} (криві 1а–3а) для криць: 1 — залізо (α -Fe), 2 — 10ХСНД, 3 — АК-35 (за даними роботи [10]). B_r — для гладких зразків; α_{ef} — для зразків з тріщиною втоми.

Fig. 2. Temperature dependences of the strength margin (break resistance) B_r (curves 1–3) and of the effective coefficient of stress raise α_{ef} (curves 1a–3a) for steels: 1—iron (α -Fe), 2—10XCHD, 3—AK-35 (according to [10]). B_r —for unnotched specimens; α_{ef} —for specimens with fatigue crack.

АК-35, які сильно відрізняються міцністю ($\sigma_{0,2} = 140, 310$ і 1027 МПа відповідно), за великих показників пластичності та міцності ($B_r = 5,3$ і $2,3$ для $T_k = 300$ К).

З рисунку 2 видно, що за «температурного» способу зміцнення криць має місце монотонне пониження резервів стабільності міцності B_r , але спостерігається зовсім немонотонний і дещо хаотичний характер зміни ефективності руйнівальної дії концентратора α_{ef} . В зонах стабільної міцності ($\sigma_{NF} > \sigma_{0,2}$ для $T > T_c$) показники α_{ef} різних за міцністю криць (п.п. 1а–3а на рис. 2) в цілому корелюють з відповідним рівнем B_r , так само як і критичні значення ЕКН α_{efc} для відповідних T_c . В даному випадку руйнівальна ефективність КН, яку представлено коефіцієнтом ефективності ЕКН α_{ef} , регулюється в більшій мірі величиною B_r , тобто резервом міцності, а не величиною самої міцності $\sigma_{0,2}$. Нагадаємо, що саме резерв міцності B_r відображає міру пластичності стопу в поєднанні з властивістю деформаційного зміцнення і тим самим надає йому особливу властивість — зламостійкість [2–5], яка забезпечує виробу з КН захист від крихкості. Отже, зламостійкість (B_r) відіграє свою захисну роль за рахунок властивості пластичності та відображає це у прямому кількісному вимірі B_r .

Більш виразно роль міцності в окрихчувальній ефективності КН

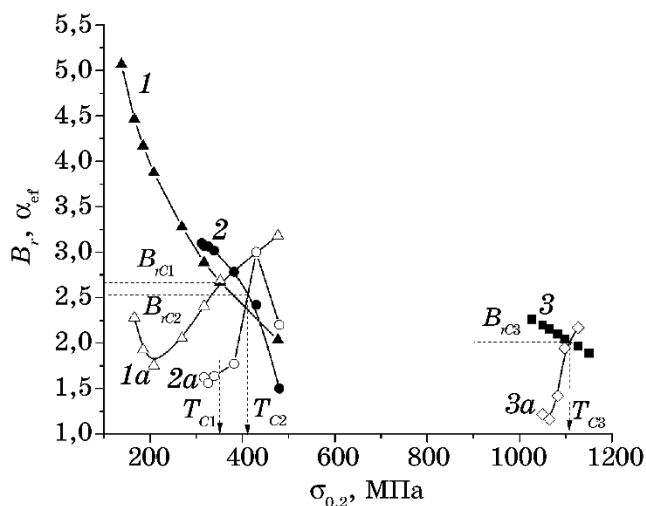


Рис. 3. Залежності параметрів B_r (криві 1, 2, 3) і α_{ef} (криві 1а, 2а, 3а) від міцності $\sigma_{0,2}$ криць: 1 — α -Fe, 2 — 10XCHD, 3 — АК-35 (за [10]). Параметер α_{ef} для зразків з тріщинами втоми.

Fig. 3. Dependences of the parameters B_r (curves 1, 2, 3) and α_{ef} (curves 1а, 2а, 3а) on yield strength $\sigma_{0,2}$ for steels: 1— α -Fe, 2—10XCHD, 3—AK-35 (by [10]). Parameter α_{ef} is for specimens with fatigue crack.

за двох способів підвищення показника міцності криці $\sigma_{0,2}$ виявляється, якщо зміну параметра α_{ef} продемонструвати в координатах « $\alpha_{ef}-\sigma_{0,2}$ » (рис. 3). Чітко видно, що високоміцна криця АК-35 ($\sigma_{0,2} = 1027$ МПа) мало відрізняється від криці 10ХСНД ($\sigma_{0,2} = 310$ МПа) критичним значенням α_{efc} , тому що B_r для них складає величини 2,5 і 2,0 відповідно, причому критичне значення міцності $\sigma_{0,2c}$ для T_c різняться дуже сильно — 1100 і 420 МПа (рис. 3). Отже, роль міцності в окрихченні криці не є прямою, а опосередкованою — через резерв міцності B_r .

Для порівняння на рис. 4 наведено аналогічні залежності параметрів B_r і α_{ef} за «структурного» способу зміцнення криць за кімнатних температур T_k . Необхідні для цього величини B_r і α_{ef} були розраховані нами для криць різних видів класів міцності (включаючи і зварні шви), зведених в оглядовій роботі [11] за даними експериментальних досліджень різних авторів (табл. 1). В згаданій роботі [11] використовувалися дані з цитованих робіт, де були наведені необхідні для наступної аналізи показники міцності $\sigma_{0,2}$, S_k і напруження руйнування σ_{co} на зразках з тріщиною, призначених для визначення показників тріщиностійкості K_{Ic} [12].

Результати розрахунку величини B_r і α_{ef} для криць різної міцності наведено в табл. 1, запозиченій з роботи [11], де були розраховані

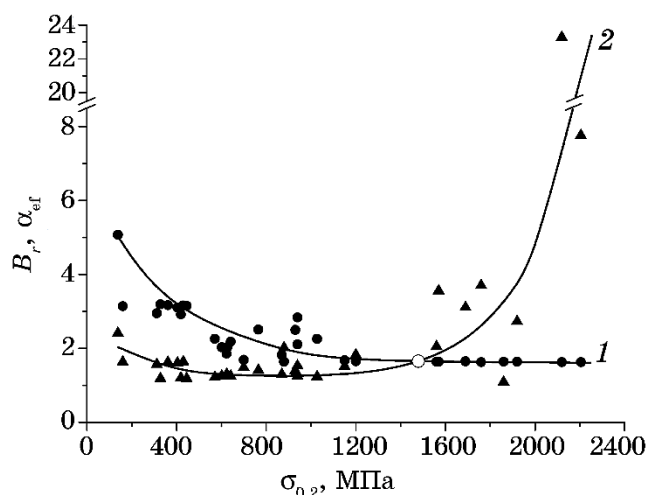


Рис. 4. Залежність параметрів B_r (1) і α_{ef} (2) від міцності $\sigma_{0,2}$ для $T_k = 300$ К для криць різного складу та різних видів термооброблення за даними роботи [11]: 1 — гладкі зразки, 2 — зразки з тріщиною втоми.

Fig. 4. Dependences of B_r (1) and α_{ef} (2) on yield strength $\sigma_{0,2}$ at $T_k = 300$ K for steels of different composition and for different types of heat treatment (according to [11]): 1—for unnotched specimens, 2— for specimens with fatigue crack.

ТАБЛИЦЯ 1. Механічні властивості криць і зразків з тріщиною за згину [11].

TABLE 1. Mechanical properties of steels and specimens with crack at bending.

№ п/п	КС	Оброблення	$\sigma_{0.2}$, МПа	ψ_K , %	S_K , МПа	B_r	σ_{CO} , МПа	B_{rCO}	α_{ef}
1	АК-35 [2]	Стан поставки	1027	75,0	2321	2,26	1820	1,83	1,23
2	α -Fe [2]	Г 1323 К, 2 год. ПО	138	83,8	700	5,07	290	2,10	2,41
3	10ХСНД [2]	Г 1373 К, 2 год. ПО	312	72,0	920	2,95	590	1,88	1,56
4	Ст. 3 сп. [2]	Г 1373 К, 2,75. ПО	160	71,7	502	3,14	307	1,92	1,63
5	10X15H27T3B2MP [3]	Г 1373 К, 1 год. + ВП 1023 К, 16 год.; 923 К, 10 год.	870	23,0	1583	1,82	1220	1,40	1,3
6		Г 1373 К, 1 год. + ВП 1023 К, 16 год.; 923 К, 10 год. + Н ₂	880	10,0	1443	1,64	713	0,81	2,02
7	15X12H2MФAB [4]	Г 1393 К, 1 год. + ВП 953 К, 2 год.	940	62,0	1983	2,11	1580	1,68	1,25
8	03X12H10MT [4]	1273 К, 1 год.; 1023 К, 2 год. + ВП 773 К, 2 год.	940	79,0	2670	2,84	1740	1,85	1,53
9	03X12H10MT [4]	Г 1373 К, 15 хв.; 1023 К, 2 год. + ВП 773 К, 2 год.	930	76,0	2325	2,50	1655	1,78	1,40
10	СП X75 [2]	ПД-АНЗО, 1 шар	430	67,5	1360	3,16	2830	1,92	1,64
11		ПД-АНЗО, 2 шара	361	60,7	1444	3,17	700	1,94	1,63
12		ПД-АНЗО, 3 шара	404	51,9	1252	3,10	776	1,92	1,61
13	СП 12ХН2МДФ [2]	КФ 48-АНК-54, ВП = 0,0	622	59,9	1244	2,00	970	1,56	1,28
14		те ж, ВП = 0,001	623	55,6	1160	1,86	890	1,43	1,30
15		те ж, ВП = 0,0022	628	68,1	1281	2,04	1005	1,60	1,27
16		те ж, ВП = 0,004	642	67,9	1400	2,18	1117	1,74	1,25
17	20X [5]	ВП 473 К	1150	53,9	1932	1,68	1276	1,11	1,51
18	50X [5]	Г 1113 К + ВП 423 К, 2 год.	1860	16,5	3050	1,64	930	1,50	1,09
19		Г 1113 К + ВП 473 К, 2 год.	1920	46,7	3150	1,64	1152	0,60	2,73
20		Г 1113 К + ВП 673 К, 2 год.	1560	48,6	2530	1,64	1248	0,80	2,05
21		Г 1113 К + ВП 773 К, 2 год.	1200	57,2	1980	1,65	1080	0,90	1,83
22	40С2Х [5]	ВТМО + ВП 473 К	1760	53,0	2870	1,63	774	0,44	3,70
23		ВТМО + ВП 573 К	1690	55,0	2770	1,65	900	0,53	3,11
24	60С2Х [5]	ВТМО + ВП 573 К	2205	38,0	3594	1,63	433	0,21	7,76
25		ВТМО + ВП 773 К	1570	40,0	2575	1,64	723	0,46	3,56
26	ШХ15 [5]	З 1133 К + ВП 473 К	2120	3,6	3460	1,63	1502	0,07	23,2
27	24ХН0МФА [5]	Г 1153 К + ВП 913 К, 15 год.	765	73,5	1920	2,51	1362	1,78	1,41
28	65Ф [5]	стан поставки	700	28,0	1183	1,69	800	1,14	1,48
29	10ХСНД [6]	вздовж прокату	419	69,7	1223	2,92	1020	2,43	1,20
30	10ХСНД [6]	поперек прокату	445	73,7	1400	3,15	1175	2,64	1,19
31	12Г2МФТ [6]	вздовж прокату	571	65,6	1290	2,26	1050	1,84	1,22
32		поперек прокату	602	58,4	1282	2,03	975	1,62	1,25
33	15ХСНД [7]	стан поставки	328	68,0	1046	3,19	880	2,68	1,19

Примітки: Г — гартування; ПО — пічне охолодження; ВП — відпуск; Н₂ — водне середовище; ЗШ — зварний шов; ПД — порошок дріт; КФ — керамічний флюс; В — вміст Бору; ВТМО — високотемпературне термічне оброблення, $B_{rCO} = \sigma_{CO}/\sigma_{0.2}$. Цифри посилань в колонці КС наведено в роботі [11].

показники B_r за експериментальними даними цитованих джерел, вказаних у колонці КС (табл. 1) в [11].

Нами в таблицю додано колонку α_{ef} , вираховану з величин S_K і σ_{CO} за формулою (2).

Рисунок 4 підтверджує висновок про сповільнений характер зміни параметрів B_r і α_{ef} у порівнянні з «температурним» способом зміцнення криць (рис. 3), а також показує, що на зразках зі стандартною тріщиною втрата стабільності міцності σ_{CO} неминуча для високоміцних криць навіть найвищої конструкційної якості типу АК-35 вже за кімнатних температур (див. точку перетину кривих B_r і α_{ef} при $\sigma_{0,2} \cong 1200$ МПа; рис. 3).

Можна помітити відмінність у характері зміни ефективності руйнівальної дії КН (α_{ef}) з наближенням до критичного значення α_{efc} чи B_{rc} на двох рисунках — за «структурного» способу зміцнення (рис. 4) параметер α_{ef} наближається до критичного α_{efc} дуже повільно та лише в закритичній (крихкій) області нестабільної міцності починає стрімко зростати. За «температурного» способу зміцнення криць (рис. 3) це зростання ЕКН (α_{ef}) починається ще на докритичній стадії стабільності міцності тіла з КН (σ_{NF} ; $\sigma_{CO} > \sigma_{0,2}$). Завдяки цьому охолодження криці істотно пришвидшує критичний стан крихкості металу ($\alpha_{efc} = B_{rc}$) (рис. 3). Саме тому у практичному матеріалознавстві набули поширення такі методи атестації стопів на їхню крихкість, як руйнування зразків з концентраторами за понижених температур з визначенням критичної температури крихко-в'язкого переходу T_c [13].

Температурний вимір критичного стану (T_c) зручний своєю простотою та наочністю, але позбавлений прив'язки до механічних властивостей, а отже, для кожного конкретного стопу показник T_c має суто індивідуальну величину, яку важко порівнювати з іншим стопом.

Тому критерії крихкості стопів, прив'язані до критичних показників механічних властивостей, таких як міцність (3) або резерв міцності (4), є завідомо більш універсальними й інформативними. Зокрема, можна ставити задачу дослідити вплив міцності $\sigma_{0,2}$ або зламостійкості B_r на закономірність зміни показника окрихчувальної дії КН α_{ef} . Це — задача фундаментального рівня, яку неможливо здійснити стосовно показника критичної температури T_c , оскільки T_c є чутливою не лише до рівня міцності стопу $\sigma_{0,2}$, а й до нелінійності температурної залежності міцності $\sigma_{0,2}(T)$.

3. ВПЛИВ МІЦНОСТІ НА КРИТИЧНІ ПАРАМЕТРИ КРИХКОСТІ МЕТАЛЕВИХ СТОПІВ

Критерій крихкості (4) металів у вигляді безрозмірних параметрів РСМ (B_r) і ЕКН (α_{ef}) можна вважати найбільш універсальним, оскільки він містить в собі як температурний критерій $T = T_c$ (рис. 1 і 2), так і критерій критичної зламостійкості $B_r = B_{rc}$ (рис. 2 і 3) чи то

критичної міцності $\sigma_{0,2} = \sigma_{0,2C}$ (рис. 3), які по суті є окремим видом більш загального критерію $B_r = \alpha_{ef}$. Кожен з окремих критеріїв відображає свою власну ознаку втрати механічної стабільності (тобто крихкості криці) — температуру (T_C), критичний резерв міцності (B_{rc}) або критичну міцність стопу з даним видом неоднорідності поля напружень, і ці ознаки не обов'язково можуть узгоджуватися одна з іншою. Наприклад, на рис. 2 видно, що за температурною ознакою крихкості T_C на зразках з тріщиною кращим матеріалом є α -Fe ($T_C \cong 140$ К), найгіршим — високоякісна криця АК-35 ($T_C \cong 180$ К). Але за критерієм критичної зламостійкості $B_{rc} = \alpha_{ef}$, навпаки, криця АК-35 є найкращою ($\alpha_{efc} = 1,9$), а α -Fe має показник $\alpha_{efc} \cong 2,7$. Нагадаємо, що за визначенням (2) α_{ef} є показником окрихчувальної ефективності КН, тобто наскільки сильно КН знижує напруження руйнування σ_{NF} відносно граничної міцності металу S_K : $\alpha_{ef} = S_K / \sigma_{NF}$. Отже, чим нижче показник α_{ef} , тим менше неоднорідність поля «псує» граничну міцність металу і тим менше проявляє себе окрихчувальна дія КН. Тобто завжди бажано мати найнижче значення α_{ef} . За рисунком 2 такими є криці АК-35 і 10ХСНД, а за табл. 1 — криці відповідно до п.п. 1, 5, 7, 23, 30, 33.

Отже, атестація стопів щодо їхньої схильності до окрихчення від дії КН за ознакою T_C не завжди відображає конструкційну якість

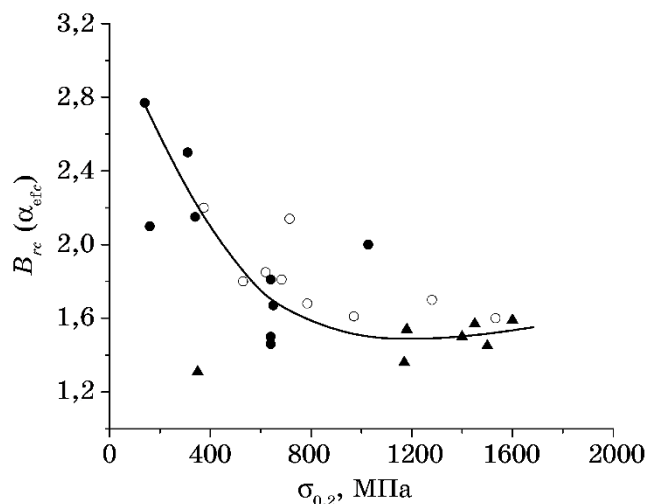


Рис. 5. Залежність критичних параметрів $B_{rc} (\alpha_{efc})$ для T_C від міцності криць $\sigma_{0,2}$ на зразках з різними видами КН: ● — тріщина втоми (за [10]), ○ — кільцевий надріз за [11], ▲ — за [15].

Fig. 5. Dependences of the critical parameter $B_{rc} (\alpha_{efc})$ at T_C on yield strength $\sigma_{0,2}$ for specimens with various SR types: ●—fatigue crack (by [10]), ○—circular notch (by [11]), ▲—by [15].

або конструкційну придатність стопу для надійного несення розрахункових силових навантажень. Практична корисність параметра T_C до певної міри може виявитися в тих випадках, коли T_C знаходиться безпосередньо в зоні кліматичних (T_K) або експлуатаційних ($T_{\text{експ}}$) температур, де загроза втрати експлуатаційної придатності стопу стає очевидною.

В цьому відношенні більш інформативними маркерами в'язко-крихкого переходу можуть стати критичні показники, що представляють певні механічні властивості стопу в умовах дії КН безпосередньо за температури T_C : $\sigma_{0,2C}$, B_{rc} (α_{efc}). Можливості практичного застосування цих механічних показників в атестації конструкційної придатності металевих стопів потребують окремого розгляду, а тут ми торкнемося лише впливу міцності $\sigma_{0,2}$ і зламостійкості B_r на критичні показники B_{rc} (α_{efc}).

Окремі питання впливу резерву міцності B_r на параметри крихкого стану T_C і B_{rc} раніше розглядалися в нашій роботі [14] із залученням даних з довідника [15]. Результати роботи [14] дають змогу відобразити залежність від міцності $\sigma_{0,2}$ критичного параметра α_{efc} (B_{rc}) (рис. 5). Цілком логічно, що критичні значення B_{rc} так само понижуються з підвищенням $\sigma_{0,2}$, як і B_r і α_{ef} на рис. 4, але розкид показників B_{rc} значно більший, аніж для B_r , що, безумовно, пов'язане з впливом пластичності (точніше, зламостійкості B_r) на B_{rc} і, відповідно, на критичний показник ЕКН α_{efc} .

4. ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ РЕЗЕРВУ МІЦНОСТІ (ЗЛАМОСТІЙКОСТІ) B_r НА РУЙНУВАЛЬНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ КН α_{ef}

Пластичність є другою найважливішою механічною властивістю металевих стопів, яка цілком зосереджена в резерві міцності B_r за (1); тому будь-яку продуктивну аналізу ролі пластичності в механічній поведінці металевих тіл доводиться виконувати в параметрах узагальненої характеристики пластичності — зламостійкості B_r [1–5, 11–14].

На рисунку 6 залежності параметра α_{ef} від міцності $\sigma_{0,2}$, що були представлені на рис. 3 і 4, перебудовано в координатах « α_{ef} – B_r ». Помітно, що характер кривих зміни α_{ef} для «температурного» способу зміцнення принципово не змінився (порівняти криві 1а, 2а і 3а рисунків 3 і 6), тоді як для «структурного» способу зміцнення крива 2 на рис. 6 втратила той розбіг показників α_{ef} , що був на її залежності від показника міцності $\sigma_{0,2}$ (рис. 4). Це означає, що саме резерв міцності B_r , а не сама міцність $\sigma_{0,2}$ визначає ефективність руйнівальної дії КН α_{ef} . Впорядкований вигляд кривих 1а–3а на рис. 3 лише підтверджує цей висновок.

Цілком зрозуміло, якщо в залежностях від резерву міцності

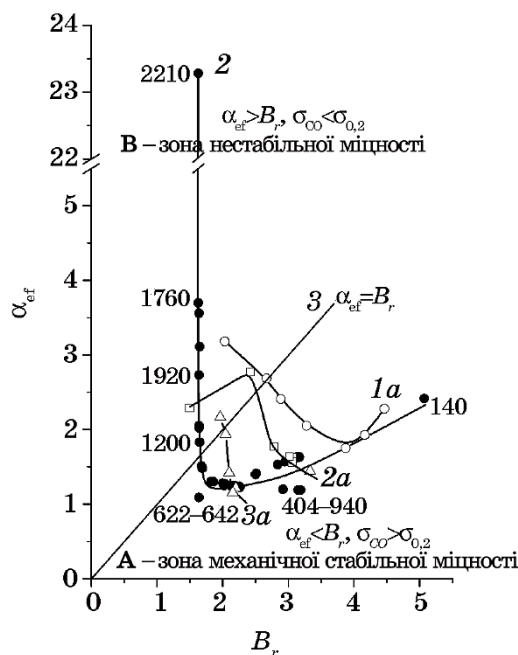


Рис. 6. Залежність коефіцієнта ЕКН α_{ef} від резерву міцності B_r . Криві 1а, 2а, 3а — за «температурного» способу зміцнення криць α -Fe, 10ХСНД і АК-35 відповідно (за [10]). 2 — структурний вплив на міцність $\sigma_{0,2}$ за $T_k = 300$ К за рахунок складу криці та термооброблення (за [11]). Цифри біля кривих — позначки рівня міцності $\sigma_{0,2}$ (табл., крива 3; рис. 2, криві 1а–3а). 3 — лінія критичного переходу від стабільної (А) до нестабільної (В) міцності зразків з тріщиною втоми.

Fig. 6. Dependence of coefficient α_{ef} on the strength margin B_r . Curves 1а, 2а, 3а—at the ‘temperature’ method of hardening for α -Fe, 10ХСНД and АК-35, respectively (by [10]). 2 shows the structural influence on yield strength $\sigma_{0,2}$ at $T_k = 300$ K due to the steel composition and heat treatment (by [11]). The numbers next to the curves are the strength level $\sigma_{0,2}$ marks (Table, curve 3; Fig. 2, curves 1а–3а). 3 is the critical transition line from stable to unstable strength of specimens with fatigue crack.

впорядковуються параметри α_{ef} для криць різного класу міцності, то й критичні показники α_{efc} , що на рис. 5, мають теж втратити свій розбіг, що було показано в [1].

Таким чином, аналіза експериментальних даних вказує на те, що з двох головних механічних властивостей металу, — міцності та пластичності, — роль чинника, що регулює ефективність окрихчувальної дії КН α_{ef} , належить резерву міцності B_r , тобто показнику пластичності, але не в простому деформаційному вимірі (δ_p , ψ_k), а в узагальненій формі у вигляді властивості зламостійкості (B_r за

(1)).

На рисунку 6 діагональна пряма Z для умови $\alpha_{ef} = B_r$ ділить простір рисунку на дві протилежні зони: в зоні **B** розміщені позначки $\alpha_{ef} > B_r$ означають, що відповідні рівні міцності криць $\sigma_{0,2}$ не можуть бути у зразку з КН, тому що номінальне напруження руйнування зразка $\sigma_{co} < \sigma_{0,2}$. В рамках концепції механічної стабільності міцності це означає нестабільність міцності руйнування σ_{co} .

В оглядовій роботі Дж. Нотта [16] такий стан кваліфікується як катастрофічне «швидке» руйнування, що свідчить про непридатність криці для конструкції даного типу. Навпаки, в зоні **A** ($\alpha_{ef} < B_r$, $\sigma_{co} > \sigma_{0,2}$) розташована зона стабільної міцності σ_{co} , яка відповідно до [16] означає регулярний вид «пластичного» руйнування виробу внаслідок екстремально надлишкового перевантаження тіла.

Власне, поділ на вказані два види типів руйнування металевих об'єктів є технічно виправданим і більш зрозумілим, аніж поділ на крихкі та в'язкі види руйнування. Концепція механічної стабільності міцності, викладена вище, надає такому поділу видів руйнування (за автором [16]) певного фізичного змісту. Більше того, в цій концепції закладено можливість запровадити систему відліку міри конструкційної придатності металевого стопу у вигляді кількісного показника конструкційної придатності (ПКП) стопу для виробів певного класу відповідальності за силову надійність елементу конструкції. Але ця тема потребує окремого розгляду.

В Ч. 3 циклу робіт з концепції механічної стабільності металів буде розглянуто роль чинників НДС у окрихченні під дією КН.

5. ВИСНОВКИ

1. Руйнівальна ефективність КН визначається параметром α_{ef} , дія якого проявляється через фактори деформаційного (B_r) і пружного (j) перенапруження в зоні пластичного деформування біля кінчика КН. Величина α_{ef} є мірою співвідношення істинних напружень руйнувань гладкого зразка (S_K) і зразка з КН (σ_{NF}): $\alpha_{ef} = S_K / \sigma_{NF}$.

2. Захист металу від крихкості здійснюється за рахунок резерву міцності $B_r = S_K / \sigma_{0,2}$, в межах якого реалізуються фактори перенапруження — деформаційного (B_r) і пружного (j), що проявляється у величині параметра α_{ef} . Критичний в'язко-крихкий перехід під дією КН визначається критерієм $\alpha_{ef} = B_r$, причому самі параметри набувають критичного значення $\alpha_{ef} = B_{rc}$.

3. Кожен з параметрів механічної стабільності має власну залежність від механічних властивостей — міцності та пластичності (зламостійкості). Зламостійкість B_r з підвищенням міцності $\sigma_{0,2}$ спадає, а α_{ef} , навпаки, зростає, особливо виразно для високоміцних криць ($\sigma_{0,2} > 1000$ МПа) з низькою зламостійкістю ($B_r < 1,6-1,7$).

4. Критичні значення параметрів B_{rc} і α_{efc} мають подібну, але наба-

гато слабшу залежність від міцності. Для високоміцних криць критичні значення α_{efc} і B_{rc} тотожні наявним показникам зламостійкості $B_r \leq 1,6-1,7$ і мало придатні для оцінювання конструкційної придатності криць за наявності КН.

5. Невиразна залежність критичних значень B_{rc} і α_{efc} від механічних властивостей $\sigma_{0,2}$ і B_r означає, що критичні показники взагалі втрачають свою практичну вагомість для системи атестації криць на крихкість у порівнянні з більш виразними наявними показниками B_r і α_{ef} безпосередньо за температур експлуатації виробів $T_{експ}$. Саме цей комплекс механічних характеристик утворює відповідний показник конструкційної придатності криць, який потребує окремого розгляду (див. «Ч. 3»).

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

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Ю. Я. Мешков, Г. П. Зіміна, *Металлофіз. новітні технол.*, **45**, № 8: 1029 (2023).
2. В. Н. Грищенко, Ю. Я. Мешков, Ю. А. Полушкин, А. В. Шиян, *Металлофіз. новейшие технол.*, **37**, № 7: 961 (2015).
3. Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, *Сталь*, № 4: 46 (2018).
4. Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, *Сталь*, № 12: 52 (2019).
5. А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков, *Металлофіз. новейшие технол.*, **41**, № 6: 775 (2019).
6. Р. Петерсон, *Коэффициенты концентрации напряжений* (Москва: Мир: 1977).
7. Г. Н. Савин, В. И. Тульчин, *Справочник по концентрации напряжений* (Київ: Вища школа: 1976).
8. Ю. Я. Мешков, Г. А. Пахаренко, *Структура металла и хрупкость стальных изделий* (Київ: Наукова думка: 1985).
9. Ю. Я. Мешков., С. А. Котречко, А. В. Шиян, *Механическая стабильность металлов и сплавов* (Київ: Наукова думка: 2014).
10. 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).
11. А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков, Ю. А. Полушкин, *Сталь*, № 6: 39 (2019).
12. *Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. ГОСТ 25.506-85* (Москва: Изд-во стандартов: 1985).
13. *Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. ГОСТ 9454-78* (Москва: Изд-во стандартов: 1978).
14. Ю. Я. Мешков, Г. П. Зіміна, *Металлофіз. новітні технол.*, **44**, № 6: 807 (2022).
15. П. Ф. Кошелев, С. Е. Беляев, *Прочность и пластичность конструкцион-*

них матеріалів при низьких температурах (Москва: Машиностроение: 1967).

16. J. Knott, *Phil. Trans. R. Soc. A*, **373**: 20140126.

REFERENCES

1. Yu. Ya. Meshkov and G. P. Zimina, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **45**, No. 8: 1029 (in Ukrainian).
2. V. N. Gryshchenko, Yu. Ya. Meshkov, Yu. A. Polushkin, and A. V. Shiyan, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **37**, No. 7: 961 (2015) (in Russian).
3. Yu. Ya. Meshkov and A. V. Shiyan, *Stal'*, No. 4: 46 (2018) (in Russian).
4. Yu. Ya. Meshkov and A. V. Shiyan, *Stal'*, No. 12: 52 (2019) (in Russian).
5. A. V. Shiyan and Yu. Ya. Meshkov, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 6: 775 (2019) (in Russian).
6. R. Peterson, *Koeffitsienty Kontsentratsii Napryazheniy* [Stress Concentration Factors] (Moskva: Mir: 1977) (in Russian).
7. G. N. Savin and V. I. Tul'chin, *Spravochnik po Kontsentratsii Napryazheniy* [Handbook of Stress Concentration] (Kiev: Vyshcha Shkola: 1976) (in Russian).
8. Yu. Ya. Meshkov and G. A. Pakhareno, *Struktura Metalla i Khrupkost' Stal'nykh Izdeliy* [Metal Structure and Brittleness of Steel Products] (Kiev: Naukova Dumka: 1985) (in Russian).
9. Yu. Ya. Meshkov, S. A. Kotrechko, and A. V. Shiyan, *Mekhanicheskaya Stabil'nost' Metallov i Splavov* [Mechanical Stability of Metals and Alloys] (Kiev: Naukova Dumka: 2014) (in Russian).
10. A. V. Shiyan, *Fizicheskaya Priroda Lokalnogo 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).
11. A. V. Shiyan, Yu. Ya. Meshkov, and Yu. A. Polushkin, *Stal'*, No. 6: 39 (2019) (in Russian).
12. *Rashchyoty i Ispytaniya na Prochnost'. Metody Mekhanicheskikh Ispytaniy Metallov. Opredelenie Kharakteristik Treshchinostoykosti (Viazkosti Razrusheniya) pri Staticheskoy Nagruzhennii. GOST 25.506-85* (Moskva: Izdatel'stvo Standartov: 1985) (in Russian).
13. *Metally. Metody Ispytaniya na Udarnyi Izgib pri Ponizhennykh, Komnatnoy i Povyshennykh Temperaturakh* [Metals. Impact Test Method at Low, Room, and High Temperatures], *GOST 9454-78* (Moskva: Izdatel'stvo Standartov: 1978) (in Russian).
14. Yu. Ya. Meshkov and G. P. Zimina, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 6: 807 (2022) (in Ukrainian).
15. 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: Metallurgiya: 1967) (in Russian).
16. J. Knott, *Phil. Trans. R. Soc. A*, **373**: 20140126.