

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

Вплив пластичності на конструкційну надійність металевих стопів

Ю. Я. Мешков, Г. П. Зіміна

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

В статті на основі даних температурних залежностей механічних характеристик криць на стандартних зразках і зразках з нанесеними концентраторами напружень (КН) різного ступеню гостроти проаналізовано вплив властивості пластичності ψ_K (відносне звуження) на критичну температуру крихкості при різних умовах напружено-деформованого стану (НДС) — на тонких пластинах (ПНС), на зразках з кільцевим надрізом (СНС) при розтягуванні і на призматичних зразках з нанесеною тріщиною при трьохточковому вигині. Виявлено, що окрихчення криці під дією КН спричиняє саме локальна пластичність в зоні КН через ефект деформаційного зміцнення металу, що вимірюється параметром зламостійкості криці B_r . Критична величина зламостійкості B_{rc} при температурі T_c залежить від гостроти КН, виду НДС, а головне, від пластичності криці у вимірі показника зламостійкості, тобто з урахуванням впливу фактору деформаційного зміцнення. Найбільше роль пластичності металу проявляється в простих видах напруженого стану (ПНС), де немає великої жорсткості НДС, як в умовах СНС, тому екстремально гострі КН (тріщини) найбільше окрихчують метал саме в тонких пластинах, а не в пластинах (балках) помірної товщини. Показано, що конструкційна надійність виробів з криці з КН (k_s) по різному регулюється фактором пластичності (через B_r) в умовах різних видів НДС.

Ключові слова: міцність, пластичність, зламостійкість, крихкість, стабі-

Corresponding author: Galyna 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, Influence of Ductility on Structural Reliability of Metal Alloys, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 6: 807–821 (2022) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.44.06.0807](https://doi.org/10.15407/mfint.44.06.0807)

льність міцності криці, конструкційна надійність, концентратор напружень, тріщина.

Based on the temperature dependences of mechanical properties of steels for standard specimens and specimens with stress raisers (SR) of different sharpness the effect of ductility ψ_K (reduction in area) on the critical temperature of brittleness is analysed under the various stress-strain state (SSS)—for thin plates (biaxial stress state—BSS), for specimens with circular notches (triaxial stress state—TSS) at tension and for prismatic pre-cracked specimens at three-point bending. As ascertained, embrittlement of steel due to SR is caused by the local ductility near SR via the strain hardening of metal, which is characterized by the parameter of break resistance B_r . Critical value of break resistance B_{rc} at temperature T_c depends on SR sharpness, SSS mode, and on ductility characterizing by the coefficient of break resistance, *i.e.*, accounting for the influence of strain hardening. The effect of ductility is most vividly manifests itself for BSS, so, the sharpest SR (cracks) embrittle metal to maximum extent in thin plates, not in bars (plates of moderate thickness). As shown, structural reliability of steel products with SR (k_s) is governed by ductility (*via* B_r) by a different way for various SSS.

Key words: strength, ductility, break resistance, brittleness, strength stability of steels, structural reliability, stress raiser, crack.

(Отримано 12 квітня 2022 р.; остаточн. варіант — 2 червня 2022 р.)

1. ВСТУП. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Пластичність конструкційних металевих стопів має призначення забезпечувати виробам і навантаженим елементам конструкцій (ЕК) гарантовану надійність стопу в умовах присутності в них регулярних концентраторів напружень (КН) або випадкових дефектів, наприклад, тріщин. Гарантована силова надійність виробу означає, що міцність виробу (σ_{NF}) не може бути нижчою, ніж міцність самого металу ($\sigma_{0,2}$): $\sigma_{NF} \geq \sigma_{0,2}$ (σ_{NF} — середнє номінальне напруження руйнування ЕК, $\sigma_{0,2}$ — умовна межа плинності металу), але це можливо лише за наявності в металі достатньої пластичності. Чутливість металевих стопів до дії КН регулюється властивістю пластичності (ψ_K — відносне звуження при розриві зразка) і залежить від міцності стопу $\sigma_{0,2}$ і температури T [1], але особливо сильно від параметрів напружено-деформованого стану (НДС) виробу — виду НДС (лінійний чи об'ємний розтяг) [2], сили КН (α_σ — коефіцієнт концентрації напружень [3, 4]) та ін.

Оскільки в реальних виробках присутні всі фактори разом, то практикою вироблено усталені нормативи для характеристик пластичності ψ_K в залежності від міцності криці і відповідно до сфери застосування — будівництво, машинобудування, тощо [5]. Особливості впливу вказаних факторів на міцність виробів чи зразків з КН

(σ_{NF}) ретельно розглянуті в фундаментальних роботах класиків минулого [2, 4, 6], але окремо питання про вплив властивості пластичності на ступінь окрихчення криць під дією концентраторів напружень у кількісному вимірі було лише частково окреслено впродовж кількох останніх років в роботах авторів [7, 8]. В цих роботах автори показали, що сама по собі характеристика пластичності криці ψ_K , звісно, відіграє позитивну роль у зменшенні чутливості криці до її окрихчення під дією КН, але однозначної кореляції між показниками ψ_K і схильністю до крихкості, наприклад, у вигляді критичної температури крихкості T_C для певного КН встановити неможливо, оскільки на цю залежність певним чином впливає весь комплекс механічних властивостей стопу.

Було виявлено [7], що більш виразною в цьому відношенні може бути інша, спеціальна комплексна характеристика B_r , названа авторами [7, 8] зламостійкістю, яка поєднує в собі дві найважливіші властивості металу — міцність і пластичність. Зламостійкість B_r — це не сама міцність, а той резерв міцності, який починається у металі при навантаженні зразка вище межі плинності $\sigma_{0,2}$ до самого розриву в «шийці» S_K :

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

Отже, в деформаційному резерві міцності B_r властивість міцності металу реалізується у формі деформаційного зміцнення в ході пластичної деформації, тому величина B_r залежить від комплексу властивостей — ψ_K та n , де n — показник деформаційного зміцнення металу за Холомоном [9]. Тим самим використання комплексного показника B_r замість лише пластичності ψ_K розширює можливості аналізу питання про вплив пластичності на окрихчення криці під дією концентраторів напружень.

Тому в даній роботі було поставлено завдання з'ясувати, яким чином властивість пластичності металу через показник зламостійкості B_r впливає на захист його від окрихчення в умовах дії КН різної сили та при різних видах НДС — пласкому напруженому стані (ПНС) і складному (тривісний розтяг) напруженому стані (СНС), спричиненому дією КН.

2. МАТЕРІЯЛИ І МЕТОДИКА РОБОТИ

Для виконання поставлених задач не було необхідності здійснювати спеціальні експерименти, оскільки потрібний для аналізу набір експериментальних даних був доступний за результатами робіт інших авторів, опублікованих в науковій літературі та інших джерелах [1, 10–12], з яких можна було здійснити розрахункове визна-

чення параметрів B_r , B_{rc} (критичне значення зламостійкості за температури крихкості T_C зразка з певним КН).

Найбільш важливі для поставленої задачі експериментальні результати були одержані в дисертаційній роботі А. В. Шияна [10], де досліджувалась фізична природа крихкості металів на зразках з КН різної сили, в тому числі з тріщинами в умовах ПНС і СНС (рис. 1). Досліджувались два модельних стопи — м'яке армо-залізо (α -Fe) з $\sigma_{0,2} = 140$ МПа, $\psi_K = 83\%$ та низькопластична евтектоїдна криця У8 у відпаленому стані з $\sigma_{0,2} = 350$ МПа, $\psi_K = 13\%$ (табл. 1), а також типові конструкційні криці ст.Зсп, 10ХСНД та АК35 і декілька варіантів зварних швів криці 12ХН2МДФЗ.

В роботі [10] представлені певні температурні залежності базових механічних властивостей ($\sigma_{0,2}$, ψ_K , S_K) і середня номінальна напруга руйнування зразків з КН — σ_{NF} (на розтяг) і σ_{CO} (на трьохточковий

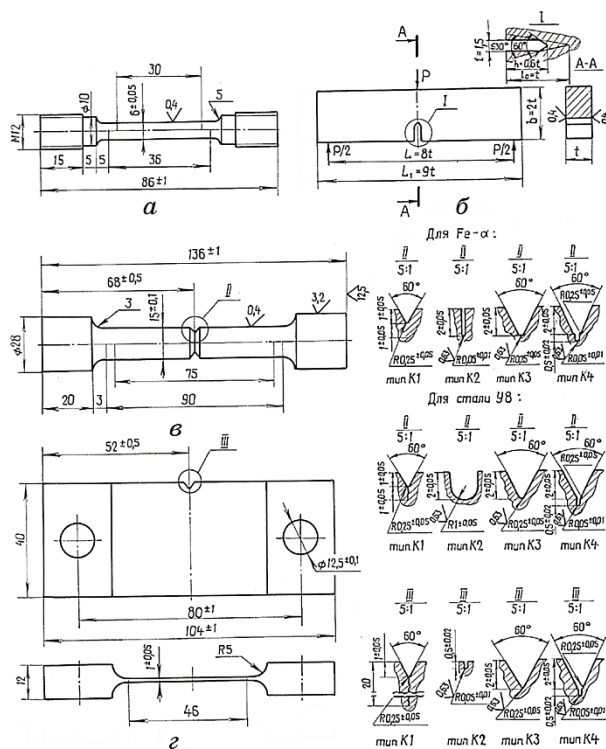


Рис. 1. Зразки, які використовуються при проведенні механічних випробувань: на одновісний розтяг (а), на статичний вигин (б), на розтяг в умовах СНС (в), на розтяг в умовах ПНС [10] (з).

Fig. 1. Specimens for mechanical tests: uniaxial tensile test (a), static bending test (b), biaxial tensile test (v), triaxial tensile test (z).

ТАБЛИЦЯ 1. Критичні параметри крихкого стану криць в полі різних ПНС і КН (за даними [10]).**TABLE 1.** Critical parameters of brittle state of steels at various biaxial stress states and stress raisers (according to [10]).

№	Криця	НДС (r , мм)	$\sigma_{0,2}$, МПа	Ψ_K , %	B_r	$\sigma_{0,2c}$, МПа	S_{Kc} , МПа	Ψ_c , %	B_{rc} (α_{et})	B_r/B_{rc} (k_s)	D_r (k_s^{-1})	T_C , К
1	α -Fe	ПНС, КЗ (0,25)	140	83	5,0	500	950	58	1,9	2,6	0,38	100
2	У8	(0,25)	350	13	2,7	500	975	10	1,95	1,38	0,72	200
3	α -Fe	ПНС, К2 (0,05)	140	83	5,0	490	970	60	2,0	2,5	0,40	70
4	У8	(0,05)	350	13	2,7	540	1010	8	1,84	1,47	0,68	200
5	α -Fe	ПНС, К4 (0,05)	140	83	5,0	445	920	65	2,2	2,27	0,44	100
6	У8	(0,05)	350	13	2,7	440	970	12	2,2	1,23	0,81	240
7	α -Fe	ПНС, К ₁	140	83	5,0	350	950	70	2,7	1,85	0,54	130
8	У8	(тріщина)	350	13	2,7	340	920	13	2,7	1,0	1,0	300
9	α -Fe	СНС, КЗ (0,25)	140	83	5,0	470	960	60	2,0	2,5	0,40	110
10	У8	(0,25)	350	13	2,7	825	940	2	1,14	2,4	0,42	125
11	α -Fe	СНС, К2 (0,25)	140	83	5,0	420	970	70	2,3	2,17	0,46	110
12	У8	(1,0)	350	13	2,7	770	950	2	1,23	2,20	0,45	125
13	α -Fe	СНС, К4 (0,05)	140	83	5,0	420	980	65	2,3	2,17	0,46	120
14	У8	(0,05)	350	13	2,7	650	960	3	1,5	1,80	0,54	150
		СНС, $t = 9$ мм										
15а	α -Fe	ВИГИН, $t = 18$ мм	140	83	5,0	420	980	65	2,3	2,17	0,46	115
15б		(тріщина)				370	975	70	2,7	1,85	0,54	140
		СНС, $t = 9$ мм										
16а	У8	ВИГИН, $t = 18$ мм	350	13	2,7	550	1020	7	1,85	1,46	0,68	180
16б		(тріщина)				460	970	12	2,1	1,30	0,77	220

вигин) (рис. 2) для всіх досліджених стопів.

За критичну температуру крихкості T_C зразка з КН приймалась температура, при якій номінальне напруження руйнування σ_{NF} або σ_{CO} співпадало з базовою міцністю металу $\sigma_{0,2c}$:

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

Відповідно, критичне значення зламостійкості B_{rc} при $T = T_C$:

$$B_{rc} = S_{Kc}/\sigma_{0,2c}. \quad (3)$$

Критичній величині зламостійкості стопу в момент крихкості для зразка з концентратором напружень B_{rc} відповідає критична

характеристика пластичності ψ_c . Ефект окрихчення стопу відображається на зміні величин трьох показників — пластичності в межах $\psi_K - \psi_c$, зламостійкості $B_r - B_{rc}$ і температури крихкості T_c . Але кількісні закономірності можна прослідкувати лише на показнику зламостійкості B_{rc} (табл. 1).

Поряд з цим в даній роботі аналізувались результати подібних експериментів інших авторів [1, 11], де були наведені певні температурні залежності відповідних механічних властивостей.

В роботі [10] випробування проводились на зразках з концентратором різного типу ($K_1 - K_4$) (рис. 1), де K_4 — з наведеною тріщиною втоми; у трьох видах НДС — на тонких ($t = 1$ мм) пластинах (ПНС, п.п. 1–8 табл. 1); на зразках з кільцевим надрізом з великою жорсткістю напруженого стану (СНС, п.п. 9–14); призматичних зразках різної товщини $t = 9$ мм і $t = 18$ мм на трьохточковий вигин з КН у вигляді тріщини втоми (п.п. 15, 16) (зразки для визначення в'язкості руйнування стопів K_{Ic} [12]).

У роботі [1] наведено дані лише для зразків з кільцевими надрізами (СНС).

3. АНАЛІЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

При розгляді проблеми окрихчення металевих стопів від дії КН можливі два суттєво різних методологічних підходи. Традиційно для цього розглядають безпосередньо показники механічних властивостей при руйнуванні зразків з нанесеним концентратором, наприклад, роботу руйнування (ударну в'язкість, KCV або KCU), в'язкість руйнування K_{Ic} , критичну температуру крихкості T_c , тощо. Цей підхід здавна практикується в матеріалознавстві і відображений у відповідних нормативних документах і стандартах [12, 13]. Але з таких експериментальних даних важко відтворити загальну картину фізичної природи впливу механічних властивостей самого металу на одержаний результат експерименту, оскільки кожний стоп для кожного виду КН дає свій власний критичний показник відповідної властивості.

В даній роботі здійснено інший підхід. На зразках з КН фіксується лише момент самої критичної ситуації в процесі руйнування, наприклад, критична втрата міцності зразка з КН σ_{NF} (σ_{Co}) нижче рівня міцності самого металу $\sigma_{0,2}$, тобто критерій критичного стану:

$$\sigma_{NF}(\sigma_{Co}) \leq \sigma_{0,2c}. \quad (4)$$

Такий стан в даному випадку умовно приймається як перехід до крихкості зразка з КН, а температура T_c вважається температурою крихкості (рис. 2). Але головна суть даного підходу до проблеми полягає у тому, щоб визначити, який відгук викликає критична си-

туація у системі властивостей самого металу, що чітко фіксується на фоні наявних температурних залежностей $\sigma_{0,2}$, S_K , ψ_K (рис. 2). Подальшій аналізі підлягає саме система впливу вихідних властивостей металу при $T_K = 300$ К на критичні показники при T_C — $\sigma_{0,2c}$, S_{Kc} , ψ_c , $B_{гс}$ та ін. для кожного сталого виду КН чи НДС. В такому підході чітко видно конкретну роль кожного фактору, окремо чи у взаємодії з іншими, у відтворенні критичного стану за критерієм (4), який є станом лише умовної крихкості даної системи «зразок + КН».

Проте, слід відзначити, що для металевих стопів за будь-яким критерієм крихкості завжди є поняттям суто умовним, тому в фізичному матеріалознавстві нерідко вживається більш доречний термін «квазикрихкість» [14]. Але стосовно критерія за умовою (4) падіння міцності зразка σ_{NF} чи σ_{CO} нижче рівня $\sigma_{0,2c}$ при T_C з суто технічного боку означає не що інше, як втрату стабільності міцності стопу під дією КН, що проявляється у надмірній чутливості σ_{NF} (σ_{CO}) до розкиду міцності стопу $\sigma_{0,2}$, до перекосу зразка з КН або інших дрібних порушень умов експерименту. Тому автори вважають більш доречним стан умовної крихкості назвати станом нестабільності міцності стопу $\sigma_{0,2}$ в умовах дії КН [15, 16] при температурі T_C . На відміну від цього при більш високих температурах $T > T_C$ аж до кімнатних $T_C \approx 300$ К, де міцність зразка з КН σ_{NF} (σ_{CO}) стійко тримається вище відповідного рівня $\sigma_{0,2}$ (рис. 2), такої нестабільно-

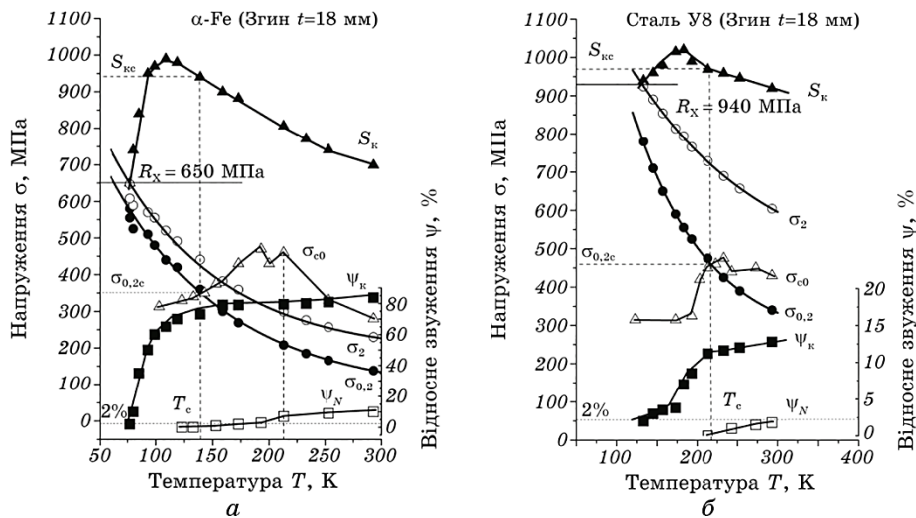


Рис. 2. Температурні залежності механічних властивостей α -Fe (а) і криці У8 (б) в умовах трьохточкового вигину зразка з тріщиною втоми.

Fig. 2. Temperature dependences of mechanical properties of α -Fe (a) and steel У8 (b) at three-point bending of specimen with fatigue crack.

сти міцності стопу в умовах дії КН немає, це стан стабільності міцності, що може бути певною ознакою конструкційної надійності даного стопу стосовно зразків з даним видом КН.

З таблиці 1 видно, що всюди, де $T_c < T_k$, або де стабільність міцності порушується лише при низьких температурах, наявна пластичність стопу перевищує критичну $\psi_k > \psi_c$, що свідчить про конструкційну надійність при даному виді випробування металу.

Для кожного концентратора напружень незалежно від виду НДС (ПНС, СНС чи проміжного виду при вигині) відмічається індивідуальне значення пластичності ψ_c без видимої закономірності. Отже, у критичній ситуації при $T = T_c$ кожен концентратор потребує свій конкретний рівень пластичності ψ_c для того, щоб здійснити свою окрихчувальну функцію у відповідних умовах НДС згідно з силою цього концентратора, як закладена у величині теоретичного коефіцієнта концентрації напружень α_σ [3, 4]:

$$\alpha_\sigma = \sigma_{1\max} / \sigma_N. \quad (5)$$

Для пружно-пластичних металів коефіцієнт α_σ непридатний, але певним чином все ж таки впливає на ефективність окрихчувальної сили КН [4], для визначення якої потрібно знайти інший показник — α_{ef} .

4. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

З п.п. 1–8 таблиці 1, де представлені дані для чотирьох видів КН (K_1 – K_4) попарно для двох стопів з різним рівнем пластичності ($\psi_k = 83\%$ і $\psi_k = 13\%$) впливає, що для кожного типу КН зі своїм рівнем α_σ критичний показник ψ_c різний для різних стопів, а критичний рівень зламостійкості B_{rc} практично однаковий (див. п.п. 1–8).

Це можна розуміти так, що кожен КН згідно зі своїм рівнем α_σ , або точніше α_{ef} , для реалізації своєї окрихчувальної функції для різних металів потребує різної дози пластичності ψ_c , але однакову кількість зламостійкості B_{rc} . Це означає, що оскільки в величині B_{rc} поєднується дія двох чинників — пластичної деформації і деформаційного зміцнення в локальній зоні КН, то однаковість величин B_{rc} для матеріалів з різними показниками міцності і пластичності зумовлена тим, що пік напружень в зоні КН в межах від $\sigma_{0,2c}$ до S_{kc} відповідає однаковій ефективній силі КН, або ефективності концентратора даного типу α_{ef} . Тобто це має означати, що B_{rc} по (3) можна розглядати, як певну міру ефективної концентрації напружень α_{ef} для даного стопу:

$$B_{rc} = \alpha_{ef}. \quad (6)$$

ТАБЛИЦЯ 2. Критичні показники крихкого стану криць при випробуваннях на холодостійкість (п.п. 1–7 по даним [1], п.п. 8–16 по [10]).**TABLE 2.** Critical parameters of brittle state of steels during cold resistance tests (rows 1–7—according to [1], rows 8–16—according to [10]).

№	Криця, оброблення	Тип КН	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{0,2c}$, МПа	B_r	B_{rc}	k_s	B_{rc}/B_r	T_c , К
1	ст.30	Кільцевий надріз, розтяг	350	800	2,97	1,31	2,28	0,44	77
2	30ХГСА (г.в. 200°C)		1400	1600	1,58	1,50	1,05	0,95	150
3	30ХГСА (ізот. г. 300°C)		1500	1600	1,80	1,45	1,21	0,81	130
4	30ХГСНА (ізот. г. 200°C)		1450	1700	1,77	1,57	1,13	0,89	83
5	30ХГСНА (ізот. г. 300°C)		1170	1400	2,10	1,36	1,54	0,66	77
6	10Х2СВА		1600	1700	1,83	1,59	1,15	0,87	160
7	У8 (г.в. 400°C)		1180	1300	1,58	1,54	1,03	0,97	200
8	α -Fe	Вигин балки з тріщиною	140	350	5,0	2,77	1,9	0,55	140
9	У8 (відп.)		340	450	2,8	2,15	1,3	0,77	220
10	ст.Зсп		160	400	3,1	2,10	1,51	0,64	147
11	10ХСНД		310	420	2,9	2,5	1,2	0,86	180
12	АК35		1027	1100	2,3	2,0	1,2	0,87	180
13	12ХН2МДФ 3Ш (лег. бором В = 0,0)		640	700	1,97	1,81	1,09	0,92	173
14	12ХН2МДФ 3Ш (лег. бором В = 0,001)		640	820	1,80	1,46	1,23	0,81	175
15	12ХН2МДФ 3Ш (лег. бором В = 0,0022)		640	977	2,00	1,50	1,33	0,75	65
16	12ХН2МДФ 3Ш (лег. бором В = 0,004)		650	968	2,17	1,67	1,3	0,77	81

Отже, пік КН наповнюється пружністю в тій мірі, в якій реалізована в ньому доза пластичності ψ_c може здійснити функцію зміцнення металу (в локальній зоні КН) в повній мірі у відповідності до величини α_{ef} , тобто B_{rc} .

Такий принцип формування величини B_{rc} виконується при будь-якому виді НДС. Але на відміну від ПНС (п.п. 1–8 табл.1), де критична доза пластичності ψ_c реалізується в повній мірі згідно з величиною α_{ef} , для КН з кільцевим надрізом (СНС) з великою жорсткістю НДС (п.п. 9–14) через стиснення пластичності дозволена доза ψ_c

різко зменшується (пари п.п. 2 і 10, а також п.п. 6 і 14 для криці У8), то відповідно зменшується і фактор $\alpha_{ef}(B_{rc})$.

Тобто, в СНС на кільцевих надрізах через жорсткість НДС різну для різних криць принцип рівності α_{ef} для різних криць (при однаковому КН) не виповнюється, на відміну від зразків у вигляді тонких пластин (ПНС).

Цікаво відзначити, що для третьої групи криць, на зразках у вигляді тонких ($t = 9$ мм) і товстих ($t = 18$ мм) балок з КН у вигляді тріщин з навантаженням на трьохточковий вигин (рис. 1, б), ми маємо проміжну картину формування критичної величини B_{rc} тих же криць (п.п. 15, 16 в табл. 1).

Під час вигину балки з тріщиною найбільша жорсткість НДС створюється у центральному перерізі зразка і ця жорсткість збільшується з ростом товщини t зразка. Але на бокових гранях зразка умови деформації вільні від жорсткості, отже там НДС наближена до умов ПНС. Тому на прикладі високопластичного стопу α -Fe видно, що при $t = 18$ мм пластичність в центральному перерізі зразка настільки стиснена, що її пік напруження неспроможний відтворити критичне напруження S_{kc} і тому це реалізує нестиснений на бокових гранях пік пластичності, який подібний до умов ПНС (п. 7 — $B_{rc} = 2,7$) і реалізує руйнування балки з тріщиною при такому ж $B_{rc} = 2,7$ (п. 15б в табл. 1). На низькопластичній криці У8 цей ефект менш виразний, але теж помітний (п.п. 16а, 16б в табл. 1).

Таким чином, при вигині балки НДС під дією КН проявляє себе відразу у двох протилежних видах — у центрі як трьохвісний розтяг (СНС), а назовні як лінійний розтяг (ПНС). Це треба враховувати при розгляді критичних параметрів при окрихченні криць з концентраторами напружень в таких зразках. З таблиці 2 видно, як при вигині і при розтягу в СНС механічні властивості ($\sigma_{0,2}$, ψ_K , B_r) криць і зварних швів впливають на критичні показники $\sigma_{0,2c}$, ψ_c , і B_{rc} за даними експериментів [10].

З наведених даних видно, що критичний показник зламостійкості B_{rc} при T_c однозначно характеризує окрихчувальну силу КН, яку можна прийняти як ефективний концентратор напружень α_{ef} у пластичному металі і він, безперечно, впливає на показник T_c , але більш чітко це можна побачити не в абсолютній величині B_{rc} , а у його співвідношенні з базовою величиною B_r :

$$k_s = B_r/B_{rc}, \quad (7)$$

де k_s представляє надлишкову величину пластичних властивостей металу, які уможливають йому відвести критичну ситуацію окрихчення від кімнатних до більш низьких температур $T_c < T_K$, тобто гарантують зразку з КН певний ресурс холодостійкості [16], або іншими словами, за температури T_K величина k_s представляє

запас резерву міцності, який означає певну міру ступеню захисту металу від окрихчення його даним видом КН. Можна вважати, що величина k_s відображає собою міру конструкційної надійності металу у даному виді механічних випробувань, тому є можливість запровадити систему оцінки показника k_s , наприклад, при сертифікації конструкційних стопів на відповідність певному класу їх конструкційної надійності згідно з їх спротивом окрихченню при випробуваннях на зразках з КН різної сили.

На рисунку 3 показано, як зміна виду НДС (ПНС \rightarrow СНС \rightarrow СНС + ПНС, вигин балки) впливає на роль пластичних властивостей (через показник B_r) у зберіганні конструкційної придатності криць з табл. 1.

Видно, що чутливість показника k_s до пониження B_r від 5 до 2,7 (або ψ_K від 83% до 13%) найбільш виразна у групі різних КН при ПНС саме на зразках у вигляді тонких пластин (рис. 1, з), причому найбільше надійність міцності страждає на тонких пластинах з тріщинами, де величина α_{ef} найбільш висока (лінія 7–8). Але на зразках з кільцевими надрізами (СНС) нахил ліній майже зник, і для низькопластичної криці У8 ($B_r = 2,7$) виявилось, що надійність міцності k_s навіть зросла в порівнянні з умовами ПНС, хоча для більш пластичного металу $\alpha\text{-Fe}$ ($B_r = 5$) це вже не так.

Для зразків зі змішаною НДС (балка з тріщиною на вигин) надій-

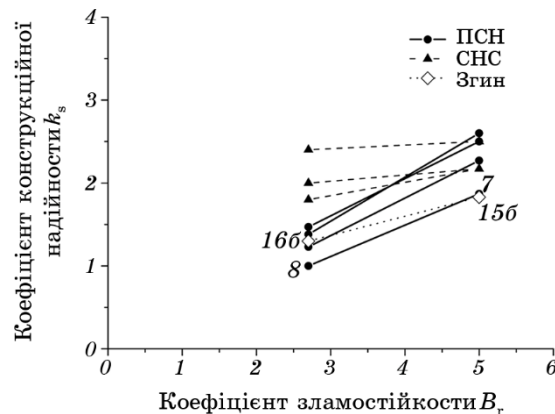


Рис. 3. Вплив показника зламостійкості B_r на коефіцієнт конструкційної надійності k_s при руйнуванні зразків з КН в різних умовах НДС за даними табл. 1 (п.п. 7, 8 — тонкі пластини, ПНС, тріщина; п.п. 15б–16б — вигин балки, тріщина).

Fig. 3. Influence of the break resistance index B_r on the coefficient of structural reliability k_s at fracture of specimens with stress raiser under the various stress-strain state (SSS) according to Table 1 (rows 7, 8—thin plates, biaxial stress state, crack; rows 15b–16b— beam bending, crack).

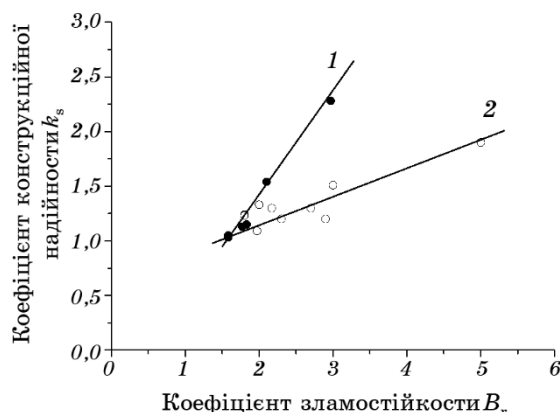


Рис. 4. Порівняння впливу пластичності (через показник B_r) на конструкційну надійність криць k_s за даними з табл. 2: 1 — розтяг зразка з кільцевим надрізом (п.п. 1–7 табл. 2 [1]), 2 — вигин балки з тріщиною (п.п. 8–16 [10]).

Fig. 4. Comparison of the ductility effect (*via* the coefficient B_r) on structural reliability of steels, k_s , according to the data of Table 2: 1—tension of specimen with circular notch (rows 1–7 Table 2 [1]), 2—bending of bar with crack (rows 8–16 [10]).

ність міцності k_s наближена до стану ПНС з тріщиною, але все ж таки помітно вища для всіх криць з табл. 2. Це означає, що випробування призматичних зразків з тріщиною на трьохточковий вигин є досить простою і достатньо чутливою методою визначення схильності криць до окрихнення під дією КН, тим більше, що ця метода широко застосовується на практиці, тому що є однією із стандартів для визначення показників тріщиностійкості K_{Ic} (рис. 4) [12]. Щодо такого показника окрихчуваності метала, як критична температура T_C , то з табл. 1 і 2 можна бачити деяку кореляцію між коефіцієнтом надійності міцності k_s і T_C , але на цей зв'язок сильно впливає фактор температурної залежності міцності криці $\beta = \partial\sigma_{0,2}/\partial T$, який в свою чергу залежить від класу міцності криці і інших чинників, тому ця задача потребує окремого розгляду.

На даному етапі досліджень показник надійності міцності криць k_s на зразках з КН може слугувати досить інформативним доповненням до таких традиційних показників, як ударна в'язкість KCV , KCU , тріщиностійкість K_{Ic} , температура T_C . Суттєво важливою перевагою коефіцієнта k_s перед іншими є те, що величина k_s є кількісною мірою запасу внутрішньої спроможності металу чинити опір окрихчувальній дії будь-якого концентратора напружень незалежно від виду НДС, включаючи тонколистові вироби, для яких визначення тріщиностійкості K_{Ic} є складною методологі-

чною проблемою, як і для інших виробів із стопів з високим рівнем пластичності.

5. ВИСНОВКИ

1. Властивість пластичності конструкційних стопів, з одного боку, зменшує окрихчувальну дію концентраторів напружень, але з іншого, внаслідок деформаційного зміцнення в зоні пластичності КН підсилює загрозу крихкості виробу. Тому ефективним регулятором впливу пластичності на окрихчення металу виступає спеціальний комплексний показник зламостійкості B_r , що поєднує в собі фактори пластичності і деформаційного зміцнення.

2. Для кожного стопу з його характеристикою B_r існує критичний показник B_{rc} , що фіксує момент втрати стабільності міцності зразка з даним КН при $T = T_c$. Величина B_{rc} є показником, що відповідає ефективному коефіцієнту концентрації напружень α_{ef} для КН у пластичному металі, має свій зв'язок з видом НДС, міцністю і пластичністю стопу і кількісно характеризує окрихчувальну дію концентратора на даний метал.

3. Крихкість (або нестабільність базової міцності $\sigma_{0,2}$) при кімнатних ($T_K \approx 300$ К) температурах виникає тоді, коли сила окрихчувальної дії фактора КН (α_{ef}) разом з базовою міцністю $\sigma_{0,2}$ реалізують локальний пік напружень в зоні пластичності КН, відображений граничною міцністю металу S_K (тобто $\sigma_{0,2} + \sigma_{0,2}\alpha_{ef} \approx S_K$) або, що те саме, коли величина α_{ef} цілком покриває наявний резерв міцності B_r , що стає критичним B_{rc} для даного КН — $\alpha_{ef} = B_{rc}$. Зауважимо, що така критична ситуація можлива при різних рівнях номінального навантаження σ_N , в залежності від рівня базової міцності $\sigma_{0,2}$ металу, але завжди за умови виконання однакового критерія $\alpha_{ef} = B_{rc}$ для будь-якого металу при даному КН.

4. Якщо при T_K вищевказаний критерій не досягається $\alpha_{ef} < B_r$, отже має місце надлишок резерву міцності — B_r ($\alpha_{ef}/B_r > 1$) у вигляді запасу резерву міцності $k_s = B_r/B_{rc} > 1$, то цей показник k_s в якості коефіцієнту надійності міцності $B_r/B_{rc} > 1$ забезпечує той надлишок резерву міцності $\sigma_{0,2}$ при $T_K \approx 300$ К, який може бути використаним при більш низьких температурах $T_c < T_K$. Отже параметр k_s забезпечує певну холодостійкість металу при даному виді КН.

5. Конструкційна надійність міцності k_s регулюється не базовою міцністю металу $\sigma_{0,2}$, а резервом базової міцності B_r разом з показником жорсткості НДС в зоні дії КН. Збільшення жорсткості в СНС внаслідок стиснення пластичності в зоні КН зменшує пік КН (α_{ef}), а отже і B_{rc} і тому k_s в СНС більше, ніж в зразках з ПНС при однакового КН, а звідси впливає збільшення надійності міцності, що виражається в пониженні T_c зразків з кільцевими надрізами в порівнянні з плоскими зразками (ПНС). Тобто в тонких пластинах плас-

тичного металу тріщина більш небезпечна, ніж у стрижнях чи балках саме за рахунок великого деформаційного зміцнення в зоні КН. 6. Найбільш чутливі до окрихчення при пониженні резерву міцності B_r в умовах дії КН саме тонкостінні елементи конструкції, на яких визначення параметру в'язкості руйнування K_{Ic} найбільш проблематичне, тому застосування розглянутої вище методології загальної дефектостійкості металів на основі показників B_r , B_{rc} і k_s в таких виробках техніки може виявитись дійсно ефективним і корисним.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. П. Ф. Кошелев, С. Е. Беляев, *Прочность и пластичность конструкционных материалов при низких температурах* (Москва: Машиностроение: 1967).
2. Г. С. Писаренко, А. А. Лебедев, *Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии* (Киев: Наукова думка: 1976).
3. Р. Петерсон, *Коэффициенты концентрации напряжений* (Москва: Мир: 1977).
4. В. П. Когаев, Н. А. Махутов, А. П. Гусенков, *Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность* (Москва: Машиностроение: 1985).
5. А. А. Шмыков, *Справочник термиста* (Москва: Машгиз: 1961).
6. Г. В. Ужик, *Сопротивлению отрыву и прочность материалов* (Москва: Издательство Академии наук СССР: 1950).
7. В. Н. Грищенко, Ю. Я. Мешков, Ю. А. Полушкин, А. В. Шиян, *Металлофиз. новейшие технол.*, **37**, № 7: 961 (2015).
8. Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, В. Н. Грищенко, *Строительство, материаловедение, машиностроение*, **89**: 112 (2016).
9. J. N. Hollomon, *Trans. AIME Iron Steel Div.*, **162**: 268 (1945).
10. А. В. Шиян, *Физическая природа локального напряжения хрупкого разрушения сталей и сварных швов* (Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук) (Киев: Институт металлофизики АН УССР: 1990).
11. *ГОСТ 25.506-85 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении* (Москва: Издательство стандартов: 1985).
12. *ГОСТ 9454-78 Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных комнатной и повышенных температурах* (Москва: Издательство стандартов: 1978).
13. *ASTM E1921. Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range.*
14. Г. Г. Курдюмова, Ю. В. Мильман, В. Н. Трефилов, *Металлофизика*, **1**, № 2: 55 (1979).
15. Ю. Я. Мешков, Г. П. Зіміна, *Металлофиз. новітні технол.*, **44**, № 2: 273 (2022).
16. Ю. Я. Мешков, К. Ф. Сорока, *Металлофиз. новейшие технол.*, **43**, № 6: 781 (2021).

REFERENCES

1. P. F. Koshelev and S. E. Belyaev, *Prochnost' i Plastichnost' Konstruktsionnykh Materialov pri Nizkikh Temperaturakh* [Strength and Plasticity of Structural Materials at Low Temperatures] (Moscow: Mashinostroenie: 1967) (in Russian).
2. G. S. Pisarenko and A. A. Lebedev, *Deformirovanie i Prochnost' Materialov pri Slozhnom Napryazhenom Sostoyanii* [Deformation and Strength of Materials under Complex Stress State] (Kyiv: Naukova Dumka: 1976) (in Russian).
3. R. Peterson, *Koeffitsienty Kotsentratsii Napryazheniy* [Stress Concentration Coefficients] (Moscow: Mir: 1977) (in Russian).
4. V. P. Kogaev, N. A. Makhutov, and A. P. Gusenkov, *Raschety Detaley Mashin i Konstruktsiy na Prochnost' i Dolgovechnost'* [Calculations of Machine Parts and Constructions for Strength and Durability] (Moscow: Mashinostroenie: 1985) (in Russian).
5. A. A. Shmykov, *Spravochnik Termista* [Thermist's Handbook] (Moscow: Mashgiz: 1961) (in Russian).
6. G. V. Uzhik, *Soprotivleniyu Otryvu i Prochnost' Materialov* [Detachment Resistance and Strength of Materials] (Moscow: Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR: 1950) (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. Yu. Ya. Meshkov, A. V. Shiyan, and V. N. Grishchenko, *Stroitel'stvo, Materialovedenie, Mashinostroenie*, **89**: 112 (2016) (in Russian).
9. J. H. Hollomon, *Trans. AIME Iron Steel Div.*, **162**: 268 (1945).
10. 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 Joint Welds] (Thesis of Dissert. for PhD Phys.-Math. Sci.) (Kyiv: Institut metallofiziki AN USSR: 1990) (in Russian).
11. *GOST 25.506-85 Raschety i Ispytaniya na Prochnost'. Metody Mekhanicheskikh Ispytaniy Metallov. Opredelenie Kharakteristik Treshchinostoykosti (Vyazkosti Razrusheniya) pri Sticheskom Nagruzhenii* [GOST 25.506-85 Calculations and Strength Tests. Methods of Mechanical Testing of Metals. Determination of Characteristics of Crack Resistance (Fracture Toughness) under Static Loading] (Moscow: Izdatel'stvo Standartov: 1985) (in Russian).
12. *GOST 9454-78 Metally. Metod Ispytaniya na Udarnyy Izgib pri Poni-zhennykh Komnatnoy i Povyshennykh Temperaturakh* [GOST 9454-78 Metals. Test Method for Impact Bending at Low Room and Elevated Temperatures] (Moscow: Izdatel'stvo Standartov: 1978) (in Russian).
13. *ASTM E1921. Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T₀, for Ferritic Steels in the Transition Range.*
14. G. G. Kurdyumova, Yu. V. Mil'man, and V. N. Trefilov, *Metallofizika*, **1**, No. 2: 55 (1979) (in Russian).
15. Yu. Ya. Meshkov and H. P. Zimina, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 2: 273 (2022) (in Ukrainian).
16. Yu. Ya. Meshkov and K. F. Soroka, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 6: 781 (2021) (in Ukrainian).