

PHYSICS OF STRENGTH AND PLASTICITY

PACS numbers: 62.20.fk, 62.20.fq, 62.20.mj, 62.20.mm, 81.40.Nr

Проблеми атестації сталей і сплавів за їхньою схильністю до крихкості

Ю. Я. Мешков, Г. П. Зіміна

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

У роботі відзначено причини, що зумовлюють основні вади існуючої системи атестації сталей і сплавів щодо їхньої схильності до переходу у крихкий стан під дією таких факторів окрихчування, як наявність концентраторів напружень (КН) та низьких температур. Головна причина — застосування малоінформативних показників властивостей в'язкості або пластичності сплавів, що не проявляють чітких порогових ознак для визначення крихкого стану, умовність критеріїв крихкості, неможливість в кількісній формі порівнювати міру окрихчування зразків з різними видами КН і т.і. Для визначення критерію крихкого стану запропоновано застосовувати критичний рівень міцності сталі $\sigma_{0,2C}$ за температури T_C , коли міцність зразка з КН σ_{NF} збігається з $\sigma_{0,2C}$. Співвідношення $\sigma_{NF}/\sigma_{0,2C} = B_{rNF}$ показує міру захисту зразка з КН від крихкого стану, а за $B_{rNF} < 1$ — міру окрихчування від КН. Наведено приклади застосування критерію критичної міцності у визначенні міри холодноламкості сталей, а також в оцінці міри окрихчування під час випробувань на згин призматичних зразків з тріщиною втоми.

Ключові слова: крихкість, окрихчування сталей, критична міцність, зламостійкість, концентратор напружень.

This paper clarifies the reasons for the main shortcomings of existing system of certification of steels and alloys in terms of their tendency to transition to

Corresponding author: Halyna Petrivna Zimina
E-mail: 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 H. P. Zimina, Problems of Certification of Steel and Alloys by Their Tendency to Brittleness, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 10: 1377–1386 (2021) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.43.10.1377](https://doi.org/10.15407/mfint.43.10.1377).

a brittle state under the action of such embrittlement factors as the stress raisers (SR) and low temperatures. The main reason is the use of uninformative indicators of toughness or ductility of alloys that do not show clear thresholds for determining the brittle state; conditionality of brittleness criteria; inability to compare quantitatively the degree of embrittlement of specimens with different types of SR, *etc.* To determine the criterion of brittleness, it is proposed to apply a critical level of steel strength, $\sigma_{0.2C}$, at temperature T_C , when the strength of specimen with SR, σ_{NF} , coincides with $\sigma_{0.2C}$. Ratio $\sigma_{NF}/\sigma_{0.2C} = B_{rNF}$ is the measure of protection of specimen with SR from the transition to brittle state, and if $B_{rNF} < 1$, then it is the measure of embrittlement by SR. Examples of application of the critical strength criterion in determining the degree of cold brittleness of steels are given, as well as in assessing the degree of embrittlement in bending tests of prismatic specimens with a fatigue crack.

Key words: brittleness, brittleness of steels, critical strength, break resistance, stress raiser.

(Отримано 16 травня 2021 р.)

1. ВСТУП. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Загальновідомо, що присутність у металовиробах різного роду концентраторів напружень (КН), особливо тріщин, може призвести до крихкого руйнування навіть у випадках застосування сталей з нормативними показниками в'язкості (KCV , KCU) чи пластичності (ψ_K) [1]. Щоб запобігти цьому, технічними умовами для конструкційних сталей передбачено проведення спеціальних випробувань на зразках з нанесеними концентраторами напружень (надрізами, тріщинами) в інтервалі низьких температур для визначення їхньої температури крихкого руйнування T_K за певними пороговими значеннями показників ударної в'язкості на зразках типу Шарпі (KCV) або Менаже (KCU) [2]. Оскільки природних критичних порогових значень у характеристик в'язкості чи пластичності ψ_K не існує, то критерій крихкості за температури T_C призначають за умовними показниками, наприклад, $KCV = 2 \text{ Дж/см}^2$, або 40 Дж/см^2 [3]. Отже, T_C є умовною характеристикою крихкості зразка з КН і її величина не може однозначно відображати критичний комплекс механічних властивостей сталей різного класу міцності. Немає також показника для визначення міри крихкості чи окрихчування сталей об'єктивно у кількісному вимірі за кімнатних температур T_K для порівняння окрихчуваності сталей різними видами КН і міри переокрихчування за T_K .

Але є можливість надати критерію крихкості однозначний, а не умовний зміст, якщо залучити для цього не допоміжну механічну характеристику (в'язкість KCV , KCU чи пластичність ψ_K), а основну

— міцність $\sigma_{0,2}$ (умовна межа плинності), яка у момент крихкості втрачає свою надійність таким чином, що зразок з КН або реальний металовиріб (наприклад, прогонич з гвинтовою нарізкою) різко втрачає міцність у вигляді тримкої здатності зразка σ_{NF} і великого розкиду значень σ_{NF} за повторних вимірів за T_C (рис. 1).

Тобто, для властивості міцності момент переходу до крихкого стану зразка з КН має не умовний, а цілком однозначний технічний зміст, пов'язаний з силовою надійністю виробу або зразка з КН, що виражається у можливості передчасного руйнування під час навантажень.

Задача даної роботи полягає в розробці основ методології кількісної оцінки схильності металів до крихкості за критерієм критичної міцності у момент в'язко-крихкого переходу зразка з КН.

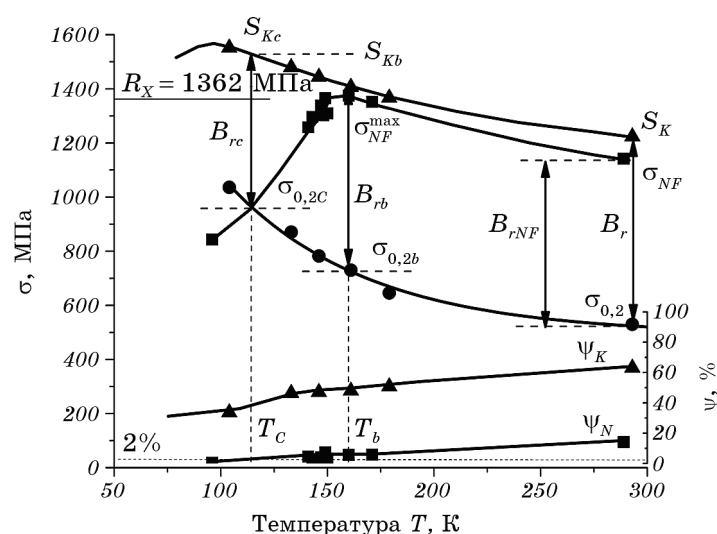


Рис. 1. Температурні залежності напружень гладких зразків і зразків з кільцевим надрізом за результатами випробувань на одновісний розтяг ($d = 8$ мм, $r = 0,25$ мм, $t = 1,4$ мм): $\sigma_{0,2}$, S_K — умовна межа плинності та істинне напруження руйнування гладкого зразка; $\sigma_{0,2C}$, S_{Kc} — те ж для критичної температури T_C ; σ_{NF} — середнє номінальне напруження руйнування зразка з КН; ψ_K — відносна звуження в місці руйнування гладкого зразка; ψ_N — те саме для зразка з КН [4].

Fig. 1. Temperature dependences of tensions built by the results of uniaxial tensile tests of unnotched specimens and specimens with circular notch ($d = 8$ mm, $r = 0.25$ mm, $t = 1.4$ mm): $\sigma_{0,2}$, S_K are the yield stress and true fracture stress of unnotched specimen, respectively; $\sigma_{0,2C}$, S_{Kc} are the values of corresponding strengths at critical temperature T_C ; σ_{NF} is the average nominal fracture stress of specimen with SR; ψ_K is the reduction in area at the fracture locus of unnotched specimen; ψ_N is the same for specimens with SR [4].

2. КРИТЕРІЙ В'ЯЗКО-КРИХКОГО ПЕРЕХОДУ ЗА ПОКАЗНИКОМ МІЦНОСТІ ЗРАЗКА З КН

Для дослідження окрихчувальної дії концентраторів напружень (надрізів, тріщин) на основі показників міцності стопу в роботах [4–6] запроваджено поняття про спеціальну характеристику деформаційної стійкості або зламостійкості B_r , яка являє собою резерв базової міцності, що проявляє себе в інтервалі навантаження зразка вище межі плинності $\sigma_{0,2}$ впритул до моменту руйнування у разі розтягу гладкого зразка — S_K :

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

Для розтягу зразка з кільцевим надрізом аналогічний резерв конструкційної міцності має вигляд:

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

або у разі згину зразка з тріщиною [5]:

$$B_{rCO} = \sigma_{CO} / \sigma_{0,2}. \quad (3)$$

У термінах показників резервів міцності критерій крихкості означає, що руйнування відбувається за напруження $\sigma_{0,2}$, тобто для гладкого зразка $S_K = \sigma_{0,2}$, а для зразків з КН:

$$\sigma_{NF}, \sigma_{CO} = \sigma_{0,2}. \quad (4)$$

Фізичний сенс виразу (4) означає, що у даної міцності $\sigma_{0,2}$ відсутній конструкційний резерв міцності — $B_{rNF}, B_{rCO} = 1$. Отже, критерій крихкості у даному випадку має конкретний фізичний зміст, на відміну від умовних критеріїв за показниками KCV чи ψ_K , а саме — вичерпання резервів міцності B_r і B_{rNF} .

Критичну температуру крихкості T_c на рис. 1 визначають з перетину кривих σ_{NF} і $\sigma_{0,2}$, що відповідно відмічає величину критичної міцності $\sigma_{0,2C}$ і критичної зламостійкості B_{rc} :

$$B_{rc} = S_{Kc} / \sigma_{0,2C}. \quad (5)$$

З виразу (5) видно, що критичний рівень зламостійкості сталі у момент крихкості зразка з КН за T_c відповідає таким умовам розподілу локальних пластичних деформацій у зоні дії КН, коли наявний для даної температури T_c резерв міцності сталі B_{rc} цілком поглинається існуючою неоднорідністю напружено-деформованого стану (НДС). Логічно припускати, що така ситуація може реалізовувати-

ся на крайньому волокні кінчика надріза чи тріщини, де локальна пластична деформація найбільша і локальне напруження руйнування наближається до критичного рівня S_{Kc} .

Таку спрощену модель руйнування зразка з КН можна застосовувати для опису ситуації саме для моменту крихкості за температури T_c , де, як відомо, зона пластичності гранично мала і локалізована біля крайнього волокна КН, а жорсткість НДС близька до лінійного натягу ($j = 1,15$) [7].

3. МІРА КРИХКОСТІ І ОКРИХЧУВАННЯ СТОПУ ПІД ДІЄЮ КН ЗА КІМНАТНИХ ТЕМПЕРАТУР

Показник критичної температури T_c може відображати схильність до крихкості зразка з КН лише у температурному вимірі у вигляді безпечного для виробу інтервалу температур $\Delta T = T_K - T_c$. Але в ΔT не відображена індивідуальна силова особливість стопу (рівень $\sigma_{0,2}$), яка впливає на міру безпечності, тобто «цінності» для виробу цього показника ΔT .

Але співвідношення показників B_r і B_{rc} у вигляді:

$$D_{br} = B_{rc} / B_r \quad (6)$$

показує ступінь наближення зразка з КН до порогу крихкості саме у силовому вимірі, як кількісну міру схильності сталі до окрихчування. Величина коефіцієнта окрихчування D_{br} за (6) вказує, яку частину запасу міцності B_r поглинає неоднорідність НДС, спричинена дією концентратора напружень, завдяки чому можна порівнювати між собою окрихчувальну ефективність дії КН не лише для різних стопів, а й для різних видів КН, що принципово важливо.

Саме це можна зробити з аналізу даних табл. 1, запозиченої з роботи [8], де для різних сталей і двох видів КН співставлено показники D_{br} і ΔT . Але більш показовою і інформативною для оцінки окрихчуваності стопу під дією КН є остаточна зламостійкість зразка з КН B_{rNF} , B_{rCO} за (2) і (3), яка демонструє фактичний деформаційний запас міцності, що залишається у виробі з КН в умовах дії неоднорідних полів напружень.

Важливо те, що остаточна зламостійкість B_{rNF} , B_{rCO} визначає ступінь окрихчуваності стопу сама по собі, за даної температури випробувань, наприклад, кімнатної T_K . Отже, якщо за B_{rNF} чи B_{rCO} наявний показник, то нема потреби відшукувати критичну температуру крихкості стопу T_c .

Крім того, за B_{rNF} , $B_{rCO} < 1$ цей показник дає кількісну міру переокрихчування зразка з даним видом КН, переокрихчування, яке спричинене лише фактором надлишкового структурного зміцнення стопу до рівня вище критичного $\sigma_{0,2C}$ вже за температури T_K . У таб-

лиці 2 це наглядно ілюструє показник B_{rco} різних сталей, зокрема високоміцних інструментальних сталей, для яких $B_{rco} < 1$ [5].

У роботі [8] досліджували закономірності взаємозв'язку між вихідною (B_r) і остаточною (B_{rc}) зламостійкостями різних сталей під дією різних КН (рис. 2, 3), що, в принципі відкриває можливості для розрахункового визначення величин D_{br} за (6) для даного виду КН, тобто можливості для атестації сталей на крихкість і окричування від дії КН лише за даними механічних випробувань на розрив стандартних зразків без спеціальних концентраторів напружень.

ТАБЛИЦЯ 1. Критичні показники крихкого стану сталей у разі обробки: г.в. (гартування + відпуск), ізот.г. (ізотермічне гартування), відп. (відпал), ЗШ (зварний шов), В (легування бором) у результаті випробувань на холодостійкість (ΔT_c) [8].

TABLE 1. Critical parameters of brittle state of steels during cold resistance tests (ΔT_c) [8]: г.в. is hardening + tempering, ізот.г. is isothermal hardening, відп. is annealing, ЗШ is weld joint, В is boron alloying.

№	Сталь, обробка	Тип КН	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{0,2C}$, МПа	B_r	B_{rc}	B_{rc}/B_r	T_c , К	ΔT_c , °С
1	ст.30	Кільцевий надріз, розтяг	350	800	2,97	1,31	0,44	77	216
2	30ХГСА (г.в. 200°С)		1400	1600	1,58	1,50	0,95	150	143
3	30ХГСА (ізот.г., 300°С)		1500	1600	1,80	1,45	0,81	130	163
4	30ХГСНА (ізот.г., 200°С)		1450	1700	1,77	1,57	0,89	83	210
5	30ХГСНА (ізот.г., 300°С)		1170	1400	2,10	1,36	0,66	77	216
6	10Х2СВА		1600	1700	1,83	1,59	0,87	160	133
7	У8 (г.в., 400°С)		1180	1300	1,58	1,54	0,97	200	93
8	α -Fe		140	350	5,0	2,77	0,55	140	153
9	У8 (відп.)	Згин балки з тріщиною	340	450	2,8	2,15	0,77	220	73
10	ст.3сп		160	400	3,1	2,10	0,64	147	146
11	10ХСНД		310	420	2,9	2,5	0,86	180	113
12	АК35		1027	1100	2,3	2,0	0,87	180	113
13	ЗШ 12ХН2МДФ (В = 0,0)		640	700	1,97	1,81	0,92	173	120
14	ЗШ 12ХН2МДФ (В = 0,001)		640	820	1,80	1,46	0,81	175	118
15	ЗШ 12ХН2МДФ (В = 0,0022)		640	977	2,00	1,50	0,75	65	228
16	ЗШ 12ХН2МДФ (В = 0,004)		650	968	2,17	1,67	0,77	81	212

Викладені вище міркування і огляд одержаних за участю авторів результатів робіт з проблеми окрихчування сталей і стопів під дією факторів міцності і неоднорідності НДС (концентраторів напружень) виявляють реальну можливість для практичного інженерного матеріалознавства суттєво спростити, а головне, радикально під-

ТАБЛИЦЯ 2. Значення базових механічних характеристик $\sigma_{0,2}$, σ_B , ψ_K сталей і зламостійкостей B_r (для сталей) та B_{rCO} (для зразка з тріщиною у разі трьохточкового згину) за даними роботи [5]: температура випробувань — 293 К, Г — гартування, ПО — пічне охолодження, ВП — відпуск, H_2 — водневе середовище, ЗП — зварний шов, ПД — порошковий дріт, КФ — керамічний флюс, В — вміст бору, ВТМО — високотемпературна термічна обробка, номери в [] — цитовані джерела даних в [5].

TABLE 2. The values of basic mechanical characteristics of steels, $\sigma_{0,2}$, σ_B , ψ_K , and their break resistances B_r (for steel) and B_{rCO} (for specimen with a crack at three point bending) according to [5]: test temperature is 293 K, Г is hardening, ПО is stove cooling, ВП is tempering, H_2 is hydrogen environment, ЗП is weld joint, ПД is flux cored wire, КФ is ceramic flux, В is Boron content, ВТМО is high-temperature heat treatment, numbers in [] are cited data sources in [5].

№	КС	Обробка	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	ψ_K , %	B_r	B_{rCO} [1]
1	АК-35 [2]	Стан поставки	1027	1141	75,0	2,26	1,83
2	α -Fe [2]	Г 1323 К, 2 год. ПО	138	307	83,8	5,07	2,10
3	10ХСНД [2]	Г 1373 К, 2 год. ПО	312	454	72,0	2,95	1,88
4	Ст.3 сп. [2]	Г 1373 К, 2,75. ПО	160	340	71,7	3,14	1,92
5	10Х15Н27Т3В2МР [3]	Г 1373 К, 1 год. + ВП	870	1270	23,0	1,82	1,40
		1023 К, 16 год.; 923 К, 10 год.					
		Г 1373 К, 1 год. + ВП					
6	15Х12Н2МФАВ [4]	1023 К, 16 год.; 923 К, 10 год. + H_2	880	1240	10,0	1,64	0,81
7		Г 1393 К, 1 год. + ВП 953 К 2 год.					
8		1273 К, 1 год.; 1023 К, 2 год. + ВП 773 К 2 год.					
9	03Х12Н10МТ [4]	Г 1373 К, 15 хв.; 1023 К, 2 год. + ВП 773 К, 2 год.	930	1010	76,0	2,50	1,78
10	СП X75 [2]	ПД-АНЗО, 1 шар	430	636	67,5	3,16	1,92
11		ПД-АНЗО, 2 шара	361	662	60,7	3,17	1,94
12		ПД-АНЗО, 3 шара	404	730	51,9	3,10	1,92
13	СП 12ХН2МДФ [2]	КФ 48-АНК-54, ВП = 0,0	622	781	59,9	2,00	1,56
14		те саме, ВП = 0,001	623	759	55,6	1,86	1,43
15		те саме, ВП = 0,0022	628	780	68,1	2,04	1,60
16		те саме, ВП = 0,004	642	783	67,9	2,18	1,74
17	20Х [5]	ВП 473 К	1150	1210	53,9	1,68	1,11

Продовження табл. 2.

Continuation of Table 2.

№	КС	Обробка	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	ψ_K , %	B_r	B_{rCO} [1]
18	50X [5]	Г 1113 К + ВП 423 К, 2 год.	1860	2300	16,5	1,64	1,50
19		Г 1113 К + ВП 473 К, 2 год.	1920	2090	46,7	1,64	0,60
20		Г 1113 К + ВП 673 К, 2 год.	1560	1640	48,6	1,64	0,80
21		Г 1113 К + ВП 773 К, 2 год.	1200	1270	57,2	1,65	0,90
22	40C2X [5]	ВТМО + ВП 473 К	1760	2060	53,0	1,63	0,44
23		ВТМО + ВП 573 К	1690	1910	55,0	1,65	0,53
24	60C2X [5]	ВТМО + ВП 573 К	2205	2400	38,0	1,63	0,21
25		ВТМО + ВП 773 К	1570	1715	40,0	1,64	0,46
26	ШХ15 [5]	З 1133 К + ВП 473 К	2120	2340	3,6	1,63	0,07
27	24ХН0МФА [5]	Г 1153 К + ВП 913 К, 15 год.	765	870	73,5	2,51	1,78
28	65Ф [5]	Стан поставки	700	1080	28,0	1,69	1,14
29	10ХСНД [6]	Уздовж прокату	419	592	69,7	2,92	2,43
30	10ХСНД [6]	Поперек прокату	445	633	73,7	3,15	2,64
31	12Г2МФТ [6]	Уздовж прокату	571	667	65,6	2,26	1,84
32		Поперек прокату	602	696	58,4	2,03	1,62
33	15ХСНД [7]	Стан поставки	328	520	68,0	3,19	2,68

вищити інформативність і ефективність діяльної системи атестації сталей і стопів з метою виявлення їхньої здатності протистояти крихкості або окрихчуванню під дією низьких температур і концентрації напружень.

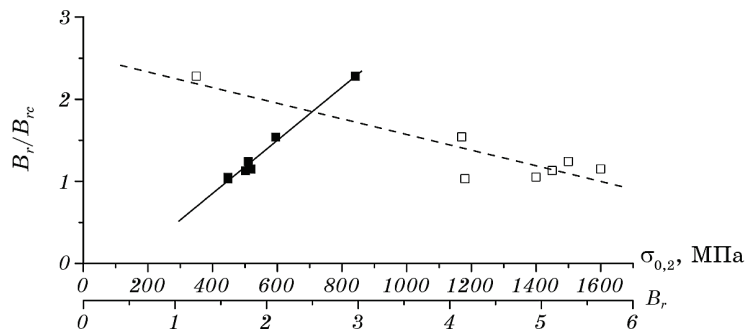


Рис. 2. Залежність залишкового резерву міцності B_r/B_{rc} від міцності $\sigma_{0,2}$ (пунктирна лінія, \square — експериментальні дані) та від зламостійкості B_r (суцільна лінія, \blacksquare — експериментальні дані) для зразків з кільцевим надрізом [8].

Fig. 2. Dependence of the residual strength margin B_r/B_{rc} on the strength $\sigma_{0,2}$ (dashed line, \square is experimental data) and on the break resistance B_r (solid line, \blacksquare is experimental data) for specimens with a circular notch [8].

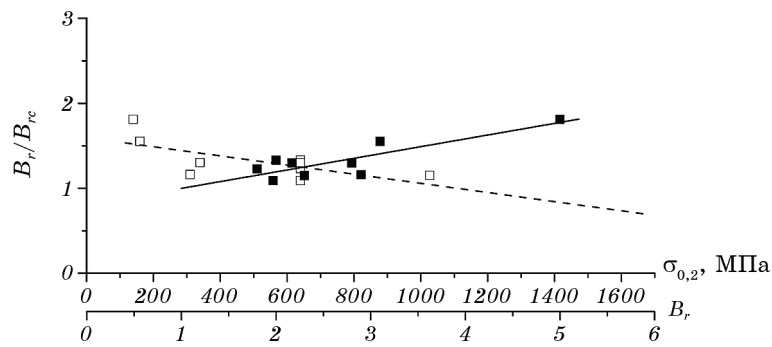


Рис. 3. Те саме, що на рис. 2, для зразків із тріщиною [8].

Fig. 3. The same as Fig. 2 for specimens with crack [8].

Стає зрозумілішим, чому провідну роль у явищі крихкості належить саме властивості міцності ($\sigma_{0.2}$), а не в'язкості (KCV) або пластичності (ψ_K), тому що зростання міцності супроводжується зменшенням резерву конструкційної міцності (B_{rNF} , $B_{rCO} = 1$). Саме це дозволяє стопу демонструвати чіткий поріг крихкої міцності $\sigma_{0.2C}$ у випадку дії КН (B_{rc}). Розглянуті тут принципи нової системи атестації стопів на крихкість спонукають до пошуків нових методологій оцінки конструкційних можливостей стопів з метою підвищення силової надійності металевих виробів і елементів конструкцій.

4. ВИСНОВКИ

1. Визначення порогу крихкості зразків з КН за ознакою критичної міцності $\sigma_{0.2C}$ або критичної зламостійкості B_{rc} (за B_{rNF} , $B_{rCO} = 1$) позбавляє методологію атестації стопів на схильність до окрихчування недоліків, пов'язаних з умовністю призначення порогів крихкості у разі застосування характеристик в'язкості (KCV) чи пластичності (ψ_K).
2. Використання для атестації стопів показників зламостійкості B_r і остаточної зламостійкості B_{rNF} , B_{rCO} дозволяє кількісно визначати ступінь окрихчуваності, спричиненої дією КН, що важливо для ранжування стопів за цією ознакою.
3. Втілення нових методів атестації стопів у практичне матеріалознавство сприятиме більш грамотному використанню резервів механічних властивостей стопів для підвищення надійності металовиробів і елементів конструкцій.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. *Металловедение и термическая обработка* (Ред. Н. Г. Гудцов,

- М. Л. Бернштейн, А. Г. Рахштадт) (Москва: Металлургия: 1956).
2. ГОСТ 9454-78. *Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах* (Москва: Издательство стандартов: 1978).
3. *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ Г-7-002-86* (Москва: Энергоатомиздат: 1989).
4. В. Н. Грищенко, Ю. Я. Мешков, Ю. А. Полушкин, А. В. Шиян, *Металлофиз. новейшие технол.*, **37**, № 7: 961 (2015).
5. А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков, Ю. А. Полушкин, *Сталь*, № 6: 39 (2019).
6. Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, *Сталь*, № 12: 52 (2019).
7. Л. А. Копельман, *Сопротивляемость сварных узлов хрупкому разрушению* (Ленинград: Машиностроение: 1978).
8. Ю. Я. Мешков, К. Ф. Сорока, *Металлофиз. новейшие технол.*, **43**, № 6: 781 (2021).

REFERENCES

1. *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka* [Metallurgy and Heat Treatment] (Eds. N. G. Gudtsov, M. L. Bernshteyn, and A. G. Rakhshadt) (Moscow: Metallurgiya: 1956) (in Russian).
2. ГОСТ 9454-78. *Metally. Metod Ispytaniya na Udarnyy Izgib pri Ponizhennykh, Komnatnoy i Povyshennykh Temperaturakh* [Metals. Impact Bending Test Method at Low, Room and Elevated Temperatures] (Moscow: Izdatel'stvo Standartov: 1978) (in Russian).
3. *Normy Rascheta na Prochnost' Oborudovaniya i Truboprovodov Atomnykh Energeticheskikh Ustanovok PNAE G-7-002-86* [Standards for Calculating the Strength of Equipment and Pipelines of Nuclear Power Plants] (Moscow: Energoatomizdat: 1989) (in Russian).
4. V. M. Gryshchenko, Yu. Ya. Meshkov, Yu. O. Polushkin, and A. V. Shiyan, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **37**, No. 7: 961 (2015) (in Russian).
5. A. V. Shiyan, Yu. Ya. Meshkov, and Yu. A. Polushkin, *Stal'*, No. 6: 39 (2019) (in Russian).
6. Yu. Ya. Meshkov and A. V. Shiyan, *Stal'*, No. 12: 52 (2019) (in Russian).
7. L. A. Kopel'man, *Soprotivlyaemost' Svarnykh Uzlov Khrupkomu Razrusheniyu* [Brittle Fracture Resistance of Welded Assemblies] (Leningrad: Mashinostroenie: 1978) (in Russian).
8. Yu. Ya. Meshkov and K. F. Soroka, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 6: 781 (2021) (in Ukrainian).