

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

Крихкість криць в умовах концентрації напружень. (Повідомлення 2)

Ю. Я. Мешков, С. О. Котречко, К. Ф. Сорока

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

В статті аналізуються закономірності впливу властивостей міцності і пластичності конструкційних криць ($\sigma_{0,2} = 140\text{...}2100$ МПа, $\psi_K = 3\text{...}83\%$) на ступінь окрихчення призматичних зразків з нанесеною тріщиною втоми при триточковому вигині. Пропонується замість пластичності (ψ_K) аналізувати показник деформаційної стійкості (зламостійкості) $B_r = S_K/\sigma_{0,2}$, який відповідає за опір криці окрихченню в неоднорідних полях, створюваних концентраторами напружень (КН — надрізи, тріщини). Показано, що при даному виді випробувань критерієм крихкого руйнування криць за температури 293 К може слугувати критичне значення параметра зламостійкості $B_{rc} = 1,65$. Відхилення $B_r/B_{rc} > 1$ може використовуватись як міра захищеності криці від крихкості, тоді як при $B_r/B_{rc} \leq 1$ співвідношення слугує кількісною мірою прояву крихкості криці при вигині зразків із нанесеною тріщиною. Показана можливість прогнозування показника окрихчуваності криці B_r/B_{rc} розрахунковим способом за даними базових механічних характеристик $\sigma_{0,2}$, σ_B , S_K , які одержані при випробуваннях стандартних зразків на розтягування.

Ключові слова: криця, міцність, зламостійкість, крихкість, міра крихкості, концентратор напружень.

Regularities of the effect of strength and ductility of steel ($\sigma_{0,2} = 140\text{...}2100$ МПа, $\psi_K = 3\text{...}83\%$) on degree of embrittlement of prismatic pre-cracked spec-

Corresponding author: Kateryna Feodosiivna Soroka
E-mail: katerina.oleschenko@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, S. O. Kotrechko, and K. F. Soroka, Brittleness of Steels under Stress Concentration. (Report 2), *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 10: 1377–1393 (2022) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.44.10.1377](https://doi.org/10.15407/mfint.44.10.1377)

imens in three-point bending is analysed. Instead of plasticity (ψ_K), it is proposed to analyse the characteristic of deformation resistance (break resistance), $B_r = S_K/\sigma_{0.2}$ which is responsible for the resistance of steel to brittleness in inhomogeneous fields created by stress raisers (SR—notches, cracks). As shown, in this type of test the criterion value of brittle fracture of steels at a temperature of 293 K can be a critical value of the parameter of break resistance $B_{rc} = 1.65$. Deviation $B_r/B_{rc} > 1$ can be used as a measure of protection of steel from brittleness, while at $B_r/B_{rc} \leq 1$ the ratio serves as a quantitative measure of the manifestation of brittleness of steel in bending pre-cracked specimens. The possibility of predicting the characteristic of embrittlement of steel B_r/B_{rc} by the calculated method according to the basic mechanical characteristics $\sigma_{0.2}$, σ_B , S_K , which were obtained during tensile tests of standard specimens, is shown.

Key words: steel, strength, resistance to break, brittleness, measure of brittleness, stress raiser.

(Отримано 25 липня 2022 р.; остаточний варіант — 16 серпня 2022 р.)

1. ВСТУП. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Крихкість являє собою головну загрозу для конструкційної надійності металевих споруд і елементів конструкції (ЕК). Сучасна методологія запобігання крихкості конструкційних стопів, зокрема криць, базується на встановленні певних нормативних показників пластичності (ψ_K — відносне звуження зразка в місці розриву при розтягуванні), або ударної в'язкості KCV (Шарпі) чи KCU (Менаже) при динамічному руйнуванні на вигин зразка з надрізом [1, 2]. Нормативні показники ψ_K і KCV (KCU) змінюються від рівня міцності криці $\sigma_{0.2}$ (умовна межа текучості), але інтенсивність прояву стану крихкості металу залежить не лише від його рівня міцності ($\sigma_{0.2}$) і пластичності (ψ_K), але в технічному плані крихкість проявляється, в першу чергу, у підвищеній чутливості стопу до різного роду неоднорідностей напружено-деформованого стану (НДС) при навантаженні (наприклад, при вигині зразка, його перекося при розтягуванні, або при наявності концентратора напружень (КН) та інших факторів). Чутливість до неоднорідностей НДС при наближенні до стану крихкості металу позначається, перш за все, на поведінці такої характеристики як міцність зразка з КН σ_{NF} (σ_{NF} — середнє умовне напруження в місці розриву зразка з КН при розтягуванні) або σ_{C0} (σ_{C0} — те ж саме для зразка з КН при вигині). За низької температури навантаження тримка міцність σ_{NF} (σ_{C0}) може спочатку збільшуватися, а при наближенні до стану крихкості обов'язково відбувається пониження цих показників навіть до рівня, що нижче за $\sigma_{0.2}$ [3, 4].

У першій частині даного дослідження (Повідомлення 1) була розвинута феноменологічна модель прогнозування параметрів крихко-

го стану зразків з КН в умовах їх холодноламкості за низької температури [5]. Але окремий інтерес представляє собою задача визначення параметрів крихкого стану зразків при дії факторів КН саме за кімнатної температури $T_k = 293 \text{ K}$ за умови дії факторів збільшення $\sigma_{0,2}$ і зменшення ψ_k .

У цьому (Повідомленні 2), як і роботі [5], головною ознакою наближення крихкості зразків з КН будуть особливості поведінки не показників ψ_k чи КСV, а показники міцності цих зразків σ_{NF} (σ_{C0}).

В конструкційних крицях, яким властиві досить високі показники пластичності або в'язкості, під дією сильно неоднорідних силових полів, створюваних присутністю концентраторів напружень (нарізка на гвинтах, надрізи, тріщини) — можуть проявлятися ознаки окрихчення у вигляді зниженої пластичності або міцності надрізанних зразків, їх тримкої міцності σ_{NF} при розтягуванні або σ_{C0} — при вигині. Зазвичай для конструкційних криць $\sigma_{NF}; \sigma_{C0} > \sigma_{0,2}$, тобто, тримка міцність зразка з КН перевищує границю текучості $\sigma_{0,2}$ металу. Але зі збільшенням міцності ($\sigma_{0,2}$) і супутнім пониженням пластичності (ψ_k) криць ознаки втрати пластичності (ψ_k) і особливо тримкої міцності ($\sigma_{NF}; \sigma_{C0}$) зразків з КН підсилюються аж до повної крихкості. Умову крихкості запишемо у вигляді:

$$\sigma_{NF}; \sigma_{C0} = \sigma_{0,2}. \quad (1)$$

По своїй суті міцність як механічна властивість призначена для конструкційного застосування у виробках, які несуть корисне навантаження. Але конструкційну придатність міцності надають інші властивості: пластичність, в'язкість, тріщиностійкість, хоча для цього у міцності є власні резерви — пружний і деформаційно-пластичний, які захищають метал від крихкості у виробках зі складним напружено-деформаційним станом (НДС).

Пружний резерв міцності, який вимірюється у вигляді коефіцієнта механічної стабільності K_{ms} [6–8], відображає резерв пружної стійкості металу вище границі текучості $\sigma_{0,2}$, і характеризує можливість металу протистояти крихкості від впливу факторів, які впливають на границю текучості $\sigma_{0,2}$, тобто пружну частину міцності.

До таких факторів в крицях належать низькі температури, стиснення плинності в жорстких видах НДС і різного роду субструктурні зміни в стопах [9]. Відмітимо, що в цьому випадку вичерпання пружного резерву міцності означає крихке руйнування без значної пластичної деформації, тобто, без серйозних змін мікроструктури стопу.

Другий резерв міцності — деформаційна стійкість стопу (або зламостійкість) B_r відповідає за граничну міцність руйнування зразка S_k після суттєвих структурних змін, які завершуються в'язким розривом в «шийці» зразка. Цей деформаційно-пластичний резерв

міцності особливо важливий для випадків неоднорідних силових полів (НСП) в області дії концентраторів напружень (КН) або у випадку вигину елемента конструкції (ЕК). При цьому в локальній області крайнього волокна надрізу або на кінчику тріщини НДС мало відрізняється від лінійного розтягування і тому весь деформаційний резерв $\Delta\sigma = S_K - \sigma_{0,2}$ тут може бути повністю реалізованим, тоді як в глибині пластичної зони зі складним НДС (підвищена жорсткість) частина зламостійкості B_r буде «погашена» за рахунок фактору пружного перезміцнення, тобто за рахунок частини пружного резерву міцності K_{ms} . В будь-якому випадку саме деформаційний резерв міцності B_r

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

слугує основним адаптивним фактором, який «приспосовує» метал до згубного впливу неоднорідних силових полів, тобто, до окрихчувальної дії КН. Величина B_r слугує мірою можливої адаптованості металу до окрихчувальної дії КН, тому має сенс поставити задачу визначення критичного порогу величини B_r , при якому стоп переходить в крихкий стан в умовах НСП, створюваних КН.

Властивість адаптивності до КН в величині B_r забезпечує пластична складова цієї характеристики, але показник пластичності металу ψ_K сам по собі не виявляє критичного порогу при настанні крихкості у виробках з КН. В таблицях 1 і 2 наведені дані, одержані в результаті аналізу експериментів, наведених в роботі [10]. Зі збільшенням міцності $\sigma_{0,2}$ показники пластичності криці ψ_K виявляють лише загальну тенденцію до їх зменшення, але поріг крихкості за критерієм (1) не прив'язаний до конкретних значень ψ_K або $\sigma_{0,2}$ (табл. 1, 2). Так, зразок з тріщиною при властивостях криці № 5 (табл. 2) $\sigma_{0,2} = 870$ МПа та $\psi_K = 23\%$ має позитивну тримку міцність — $\sigma_{C0} = 1218$ МПа $> \sigma_{0,2}$, тобто, задовольняють умови пластичності по (1), тоді як криця по п. № 23 з властивостями $\sigma_{0,2} = 1690$ МПа та $\psi_K = 55\%$, не зважаючи на більш високу пластичність — $\sigma_{C0} = 913$ МПа $< \sigma_{0,2}$, тобто за формулою (1) явно крихка, тому що $\sigma_{NF} < \sigma_{0,2}$.

Таке протиріччя не лише свідчить про складність картини впливу показників механічних властивостей криць на крихкість виробу з КН, але ще більше актуалізує задачу виявлення причин і закономірностей впливу властивостей міцності і пластичності на окрихчування криць під дією КН.

Далі ми спробуємо залучити для вирішення цієї задачі новий показник механічних властивостей, який поєднує в собі дві ролі — пластичності і резерву міцності — показник зламостійкості B_r (2), який раніше використовувався в роботах [10–12] при дослідженні явища окрихчування криць під дією КН.

З таблиці 1 видно, що тримка здатність зразка з КН σ_{NF} в більшій мірі визначається базовою міцністю металу $\sigma_{0,2}$, ніж резервами міцності B_r (порівняймо п.п. 1, 18 з п.п. 2, 3, 14). При цьому вплив показника пластичності ψ_K взагалі невідчутний: стоп п. 21 з меншою

ТАБЛИЦЯ 1. Механічні характеристики КС, що досліджувались у [10] в умовах ЛНС ($\sigma_{0,2}$, σ_B , ψ_K , B_r) та під дією КН типу 2 [10] за температури 293 К (B_{rNF} , σ_{NF} за [10]).

TABLE 1. Mechanical characteristics of steels studied in [10] under conditions of linear stress state (LSS) ($\sigma_{0,2}$, σ_B , ψ_K , B_r) and under the action the stress raisers (SR) 2 types [10] at 293 K (B_{rNF} , σ_{NF} [10]).

| № п/п | КС [10] | Оброблення | $\sigma_{0,2}$, МПа | σ_B , МПа | ψ_K , % | B_r | B_{rNF} | σ_{NF} , МПа |
|----------|------------|---|-------------------------|---------------------|--------------|-------|-----------|------------------------|
| 1 | Ст. 30 | Н 860°C | 350 | 570 | 60,0 | 2,97 | 2,68 | 938 |
| 2 | Ст. 45 | З 840°C + ВП 550°C | 870 | 1000 | 56,0 | 1,57 | 1,49 | 1296 |
| 3 | | З + ВП 200°C | 1360 | 1750 | 44,0 | 1,65 | 1,56 | 2122 |
| 4 | 30ХГСА | З + ВП 500°C | 1067 | 1170 | 55,0 | 1,58 | 1,46 | 1558 |
| 5 | | ІЗ 300°C | 1450 | 1680 | 57,0 | 1,74 | 1,66 | 2407 |
| 6 | 35ХГСЛ | Н + З 890°C + ВП 650°C | 820 | 970 | 51,0 | 2,03 | 1,49 | 1222 |
| 7 | | З 890°C + ВП 200°C | 1500 | 1730 | 47,0 | 1,50 | 1,40 | 2100 |
| 8 | 30ХГСНА | ІЗ 890°C в селітру за температури 300°C | 1195 | 1580 | 52,0 | 1,83 | 1,76 | 2103 |
| 9 | 12Х2НВФА | Н 910°C + ВП 550°C | 760 | 940 | 56,0 | 2,18 | 2,11 | 1604 |
| 10 | 23Х2НВФА | З 880°C + ВП 500°C | 1240 | 1410 | 58,0 | 1,75 | 1,69 | 2096 |
| 11 | 25Х2ГНТА | З 860°C + ВП 200°C | 1490 | 1680 | 48,0 | 1,64 | 1,56 | 2324 |
| 12 | 40ХНМА | З 850°C + ВП 560°C | 980 | 1060 | 56,0 | 1,80 | 1,72 | 1686 |
| 13 | 18Х2Н4ВА | З 860°C + ВП 170°C, 2 год | 915 | 1320 | 53,0 | 1,95 | 1,91 | 1748 |
| 14 | 40Х2СВА | З 900°C + ВП 220°C, 2,5 год | 1620 | 1950 | 42,0 | 1,54 | 1,42 | 2300 |
| 15 | 15Х2ГН2ВФА | Н 950°C + З 850°C + КО, 2 год + ВП 170°C, 2 год | 1150 | 1495 | 50,0 | 1,95 | 1,91 | 2197 |
| 16 | СН2А | Н 1000°C + КО, 2 год + ВП 400°C, 1 год | 1100 | 1300 | 60,0 | 1,87 | 1,82 | 2002 |
| 17 | Х17Н5М3 | Н 950°C + КО, 2 год + СТ 450°C, 1 год | 1100 | 1270 | 48,0 | 1,80 | 1,73 | 1903 |
| 18 | Х18Н9Т | З 1050°C | 250 | 660 | 63,0 | 6,40 | 3,16 | 790 |
| 19 | Х17Г9АН4 | З 1075°C | 400 | 760 | 70,0 | 3,95 | 2,88 | 1152 |
| 20 | ЭП105 | З 1000°C, ЗГ + СТ 820°C, 16 год + ПО 650°C, 10 год + + ВО | 920 | 1260 | 22,0 | 1,69 | 1,59 | 1463 |
| 21 | Х12Н20ТЗР | З 1170°C, 2 год + СТ 750°C, 16 год + ВО | 700 | 990 | 22,0 | 1,85 | 1,80 | 1260 |
| 22 | Х12Н22ТЗМР | З 1000°C, З год + СТ 750°C, 16 год + СТ 650°C, 16 год + ВО | 980 | 1280 | 33,0 | 1,74 | 1,65 | 1617 |

Примітка: Н — нормалізація, З — загартування, ВП — відпуск, ІЗ — ізотермічне загартування, КО — криогенна обробка за температури -70°C , СТ — старіння, ПО — пічне охолодження, ВО — повітряне охолодження.

міцністю $\sigma_{0,2}$ і меншою пластичністю $\psi_K \approx 1260\text{--}1296$ МПа саме за рахунок більшого резерву міцності B_r .

Оскільки всі властивості в табл. 1 і 2 визначались лише за кімна-

ТАБЛИЦЯ 2. Значення вихідних базових характеристик ($\sigma_{0,2}$, σ_B , ψ_K) досліджених КС, їхніх зламостійкостей B_r по (2) в умовах ЛНС та B_{rc0} за формулою (4) в умовах дії КН типу 5 (дані [14–17] за температури 293 К).

TABLE 2. The values of basic mechanical characteristics of steels ($\sigma_{0,2}$, σ_B , ψ_K) and their break resistances B_r by (2) under conditions of LSS and B_{rc0} by (4) under the action the stress raisers (SR) 5 types (according to [14–17] at 293 K).

| № п/п | КС | Оброблення | $\sigma_{0,2}$, МПа | σ_{c0} , МПа | ψ_K , % | B_r | $\frac{B_r}{B_{rc}}$ | B_{rc0} |
|----------|----------------|---|-------------------------|------------------------|-----------------|-------|----------------------|-----------|
| 1 | Ак-35 | Стан поставки | 1027 | 1879 | 75,0 | 2,26 | 1,37 | 1,83 |
| 2 | α -Fe | З 1323 К, 2 год, ПО | 138 | 290 | 83,8 | 5,07 | 3,07 | 2,10 |
| 3 | 10ХСНД | З 1373 К, 2 год, ПО | 312 | 587 | 72,0 | 2,95 | 1,79 | 1,88 |
| 4 | Ст. 3 сп. | З 1373 К, 2,75 год, ПО | 160 | 307 | 71,7 | 3,14 | 1,90 | 1,92 |
| 5 | | З 1373 К, 1 год + ВП 1023 К, 16 год; 923 К, 10 год | 870 | 1218 | 23,0 | 1,82 | 1,10 | 1,40 |
| 6 | 10X15H27T3B2MP | З 1373 К, 1 год + ВП 1023 К, 16 год; 923 К, 10 год + Н ₂ | 880 | 713 | 10,0 | 1,64 | 0,99 | 0,81 |
| 7 | 15X12H2MФAB | З 1393 К, 1 год + ОП 953 К, 2 год | 940 | 1579 | 62,0 | 2,11 | 1,28 | 1,68 |
| 8 | 03X12H10MT | З 1273 К, 1 год; 1023 К, 2 год + ВП 773 К, 2 год | 940 | 1739 | 79,0 | 2,84 | 1,72 | 1,85 |
| 9 | 03X12H10MT | З 1373 К, 15 хв; 1023 К, 2 год + ОП 773 К, 2 год | 930 | 1655 | 76,0 | 2,50 | 1,52 | 1,78 |
| 10 | 20X | ВП 473 К | 1150 | 1277 | 53,9 | 1,68 | 1,02 | 1,11 |
| 11 | | З 1113 К + ВП 423 К, 2 год | 1860 | 930 | 16,5 | 1,64 | 0,99 | 0,50 |
| 12 | | З 1113 К + ВП 473 К, 2 год | 1920 | 1152 | 46,7 | 1,64 | 0,99 | 0,60 |
| 13 | 50X | З 1113 К + ВП 673 К, 2 год | 1560 | 1248 | 48,6 | 1,64 | 0,99 | 0,80 |
| 14 | | З 1113 К + ВП 773 К, 2 год | 1200 | 1080 | 57,2 | 1,65 | 1,00 | 0,90 |
| 15 | | ВТМО + ВП 473 К | 1760 | 774 | 53,0 | 1,63 | 0,99 | 0,44 |
| 16 | 40C2X | ВТМО + ВП 573 К | 1690 | 896 | 55,0 | 1,65 | 1,00 | 0,53 |
| 17 | | ВТМО + ВП 573 К | 2205 | 463 | 38,0 | 1,63 | 0,99 | 0,21 |
| 18 | 60C2X | ВТМО + ВП 773 К | 1570 | 722 | 40,0 | 1,64 | 0,99 | 0,46 |
| 19 | ШХ15 | З 1133 К + ВП 473 К | 2120 | 148 | 3,6 | 1,63 | 0,99 | 0,07 |
| 20 | 24XН0МФА | З 1153 К + ВП 913 К, 15 год | 765 | 1362 | 73,5 | 2,51 | 1,52 | 1,78 |
| 21 | 65Ф | Стан поставки | 700 | 798 | 28,0 | 1,69 | 1,02 | 1,14 |
| 22 | 10ХСНД | Вздовж прокату | 419 | 1018 | 69,7 | 2,92 | 1,77 | 2,43 |
| 23 | 10ХСНД | Впоперек прокату | 445 | 1175 | 73,7 | 3,15 | 1,91 | 2,64 |
| 24 | | Вздовж прокату | 571 | 1051 | 65,6 | 2,26 | 1,37 | 1,84 |
| 25 | 12Г2МФТ | Впоперек прокату | 602 | 975 | 58,4 | 2,03 | 1,23 | 1,62 |
| 26 | 15ХСНД | Стан поставки | 328 | 879 | 68,0 | 3,19 | 1,93 | 2,68 |

Примітка: КС — конструкційні криці, З — загартування, ПО — охолодження в пічці, Н₂ — водневе середовище, ОП — відпуск, ПП — порошковий дріт, КФ — керамічний флюс.

тних температур $T_k = 293$ К, то за цими даними визначати ступінь крихкості за критичною температурою T_c неможливо, отже єдиним способом оцінки крихкості може слугувати порівняння самих механічних показників, а саме міцності зразка з КН (σ_{NF} або σ_{CO}) з базовою міцністю матеріалу $\sigma_{0,2}$.

Про це мова піде далі.

2. РОЛЬ ФАКТОРА МІЦНОСТІ У ПІДВИЩЕННІ СХИЛЬНОСТІ ДО КРИХКОСТІ ЗРАЗКІВ З ТРИЩИНОЮ

В роботі [10] проведено систематичне дослідження механічних властивостей криць в широкому діапазоні змін показників міцності ($\sigma_{0,2} = 140 \dots 2200$ МПа) та пластичності ($\psi_k = 10 \dots 83\%$). Аналіза даних проводилася як за результатами власних експериментів авторів [10], так і відповідних літературних даних [14–17]. Метою цього дослідження була розробка методології аналітичного, тобто розрахункового способу визначення граничної тримкої міцності в мо-

ТАБЛИЦЯ 3. Показники міцності $\sigma_{0,2}$ і $\sigma_{0,2C}$ і зламостійкості B_r і B_{rc} конструкційних криць у порівнянні з температурою в'язко-крихкого переходу T_c (за даними випробувань [3, 4]).

TABLE 3. Characteristics of strength ($\sigma_{0,2}$ and $\sigma_{0,2C}$) and resistance to break (B_r and B_{rc}) of structural steels as compared to the temperature of ductile-to-brittle transition T_c (by the data of tests [3, 4]).

| № п/п | Криця, оброблення | Тип КН | $\sigma_{0,2}$, МПа | $\sigma_{0,2c}$, МПа | $\sigma_{0,2}/\sigma_{0,2c}$ | B_r | B_{rc} | B_r/B_{rc} | T_c , К | ΔT_c , град |
|-------|---------------------------|--|----------------------|-----------------------|------------------------------|-------|----------|--------------|-----------|---------------------|
| 1 | Ст.30 | Група 1. К1[9] кільцевий надріз, розтягнення | 350 | 800 | 2,29 | 2,97 | 1,31 | 2,28 | 77 | 216 |
| 2 | 30ХГСА (з. в.; 200°C) | | 1400 | 1600 | 1,14 | 1,58 | 1,5 | 1,05 | 150 | 143 |
| 3 | 30ХГСА (ізот. з.; 300°C) | | 1500 | 1600 | 1,07 | 1,8 | 1,45 | 1,24 | 130 | 163 |
| 4 | 30ХГСНА (ізот. з.; 200°C) | | 1450 | 1700 | 1,17 | 1,77 | 1,57 | 1,13 | 83 | 210 |
| 5 | 30ХГСНА (ізот. з.; 300°C) | | 1170 | 1400 | 1,2 | 2,1 | 1,36 | 1,54 | 77 | 216 |
| 6 | 10Х2СВА | | 1600 | 1700 | 1,06 | 1,83 | 1,59 | 1,15 | 160 | 133 |
| 7 | У8 (з. а.; 400°C) | | 1180 | 1300 | 1,10 | 1,58 | 1,54 | 1,03 | 200 | 93 |

Продовження таблиці 3.

Continuation of Table 3.

| | | | | | | | | | |
|----|--|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| 8 | α -Fe | 140 | 350 | 2,5 | 5,0 | 2,77 | 1,81 | 140 | 153 |
| 9 | V8 (відпал.) | 340 | 450 | 1,32 | 2,8 | 2,15 | 1,3 | 220 | 73 |
| 10 | ст.Зсп | 160 | 400 | 2,5 | 3,1 | 2,0 | 1,55 | 147 | 146 |
| 11 | 10ХСНД | 310 | 420 | 1,35 | 2,9 | 2,5 | 1,16 | 180 | 113 |
| 12 | АК35 | 1027 | 1100 | 1,07 | 2,3 | 2,0 | 1,15 | 180 | 113 |
| 13 | ЗШ 12ХН2МДФ (легування Бором (В=0,0)) | 640 | 700 | 1,09 | 1,97 | 1,81 | 1,09 | 173 | 120 |
| 14 | ЗШ 12ХН2МДФ (В=0,001) | 640 | 820 | 1,28 | 1,8 | 1,46 | 1,23 | 175 | 118 |
| 15 | ЗШ 12ХН2МДФ (В=0,0022) | 640 | 977 | 1,53 | 2,0 | 1,5 | 1,33 | 65 | 228 |
| 16 | ЗШ 12ХН2МДФ (В=0,004) | 650 | 968 | 1,49 | 2,17 | 1,67 | 1,3 | 81 | 212 |

Група 2. К2 [10] згин з тріщин

мент руйнування зразка з надрізом (однорізне розтягування — σ_{NF}) і з тріщиною (триточковий вигин — σ_{C0}). Вихідними показниками для розрахунку слугували базові механічні характеристики криць $\sigma_{0,2}$, σ_B і ψ_K . Наведені в [10] дані будуть використані нижче для аналізу впливу факторів міцності ($\sigma_{0,2}$) і зламостійкості (B_r) на тримку міцність при розтягуванні зразка з кільцевим надрізом (типу К2 [5] — $D = 10$ мм, $t = 1,5$ мм, $r = 0,1$ мм, кут надрізу 45°) і стандартних прямокутних плоских зразків з крайовою тріщиною втоми на триточковий вигин (КН типу К5 за [5]) (табл. 3 і 2, відповідно). За експериментальними даними стосовно $\sigma_{0,2}$ і σ_{NF} (при розтягуванні) обчислювали показник приведеної зламостійкості

$$B_{rNF} = \frac{\sigma_{NF}}{\sigma_{0,2}}, \quad (3)$$

а за даними стосовно σ_{C0} (при вигині) — показник

$$B_{rc0} = \frac{\sigma_{c0}}{\sigma_{0,2}}. \quad (4)$$

За своїм змістом величини B_{rNF} і B_{rc0} означають ступінь перевищення тримкої міцності σ_{NF} (σ_{c0}) зразка з КН над границею текучості $\sigma_{0,2}$ матеріялу, тобто, являє собою міру конструкційної надійності виробу, враженого окрихчувальною дією КН. За умови B_{rNF} (B_{rc0}) > 1 цей показник є параметром позитивної конструкційної придатності умовного «виробу» з КН, при B_{rNF} (B_{rc0}) < 1 — параметром негативної конструкційної придатності. Тобто величина B_{rNF} (B_{rc0}) чисельно характеризує такі важливі для техніки явища, як міру віддаленості «виробу» з КН від крихкого стану або міру спротиву крихкості стопу «виробу» з КН при даній температурі випробувань. Негативна конструкційна придатність (< 1) означає кількісну міру силової надійності такого умовного «виробу». Відмітимо, що це принциповий крок у дослідженні явища крихкості в матеріалознавстві, оскільки вперше демонструє можливість кількісного представлення поняття «крихкості» і «захисту від крихкості» у вигляді конкретного чисельного показника механічної властивості. З такою механічною характеристикою можна оперувати в дослідженні закономірностей взаємозв'язку показників різних механічних властивостей, що і послугувало предметом даної роботи.

В таблиці 1 і 2, взятих з роботи [10], нами додані дві колонки — σ_{NF} (або σ_{c0}) і співвідношення B_r/B_{rc} .

$$K_s = \frac{B_r}{B_{rc}}, \quad (5)$$

де $B_{rc} \approx 1,65$ є показником критичної зламостійкості для зразка з даним типом КН в умовах випробування, коли конструкційна придатність із позитивної переходить у негативну, тобто B_{rNF} (B_{rc0}) ≤ 1 .

Із таблиці 2 бачимо, що для криці № 17 маємо $B_{rc0} = 1,11$ при $B_r = 1,68$ в той час як для криці № 6 $B_{rc0} = 0,81$ (тобто $B_{rc0} < 1$) при $B_r = 1,64$. Шляхом інтерполяції одержуємо, що для умови $B_{rc0} \approx 1,0$ потрібна зламостійкість $B_{rc} \approx 1,65-1,66$. Тому наближено прийmemo за критичну величину $B_{rc} \approx 1,65$ для порогу переходу зразка з КН типу К5 [10] з тріщиною втоми від в'язкого до крихкого руйнування. В такому випадку співвідношення B_r/B_{rc} в табл. 2 буде слугувати кількісною мірою захисту криці з концентратором типу К5 від крихкості, а показник цього співвідношення K_s в формулі (5) називаємо параметром опору крихкості криці за кімнатної температури випробувань T_k . Інакше кажучи, параметер P_{br} являє собою не що інше, як буферний запас зламостійкості B_r , що перешкоджає настанню крихкості за критерієм втрати конструкційної придатності в сенсі σ_{NF} (σ_{c0}) = $\sigma_{0,2}$ за кімнатних температур T_k в зразках з да-

ним типом КН.

В роботі [10] запропоновано методу розрахункового визначення σ_{NF} (σ_{C0}) і відповідно B_{rNF} (B_{rC0}) для зразків з надрізом (КН) за даними випробувань ненадріжаних зразків на розтягування, виходячи з міцності криці $\sigma_{0,2}$ і граничної міцности при розриві в «шийці» зразка S_K :

$$B_{rC0} = b \ln \left[\left(S_K / \sigma_{0,2} - c \right) / a \right], \quad (6)$$

де $a = 3,50 \cdot 10^{-4}$, $b = 0,2290$, $c = 1,6279$, величини яких визначаються для кожного виду КН за відомим алгоритмом [10].

Графічно дані табл. 2 представлені в залежностях B_{rC0} від міцности ($\sigma_{0,2}$) та зламостійкості стопів (B_r) на рис. 1. Як бачимо, характер впливу властивостей міцности і пластичности на конструкційну

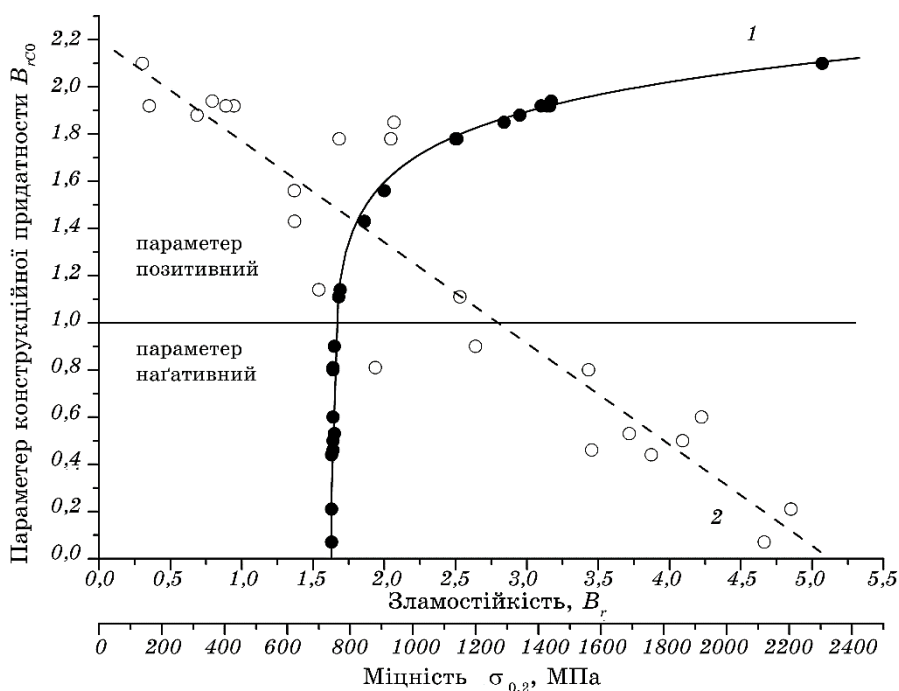


Рис. 1. Залежність зламостійкості зразків з КН типу 5 (B_{rC0} , як параметер конструкційної придатности при вигині зразка з тріщиною) від факторів: 1 — зламостійкості КС при ЛНС B_r ; 2 — міцности КС $\sigma_{0,2}$ (за аналізою даних роботи [10]).

Fig. 1. Dependence of the break resistance for specimens with SR 5 types (B_{rC0} , as structural suitability parameter in bending of pre-cracked specimens) on factors: 1—break resistance of steels under LSS B_r ; 2—strength of the steel $\sigma_{0,2}$ (according to [10]).

придатність (B_{rc0}) діаметрально протилежний, хоча точність прогнозування B_{rc0} по B_r суттєво вища, ніж по $\sigma_{0,2}$. Однак, не можна розкид експериментальних даних на основі міцності $\sigma_{0,2}$ (крива 2, рис. 1) відносити лише за рахунок похибки експерименту, оскільки головний вклад в розкид величини B_{rc0} при однаковому значенні міцності $\sigma_{0,2}$ дає відмінність в пластичних властивостях порівнюваних стопів. Наприклад, при $\sigma_{0,2} = 940$ МПа стоп № 8 (табл. 2) має $\psi_K = 79\%$, $B_r = 1,85$ і $B_{rc0} = 1,72$, майже як стоп № 6 при $\sigma_{0,2} = 880$ МПа, $\psi_K = 10\%$, $B_r = 0,81$ і $B_{rc0} = 0,81$, тобто, останній стоп цілком крихкий при даному КН. Те ж стосується і порівняння властивостей інших стопів в табл. 2 — № 9, № 27 зі стопом № 6. Отже, прогнозування B_{rc0} слід проводити за даними вихідної зламостійкості B_r , а крива 2 відображає лише основну тенденцію щодо зниження рівня конструкційної придатності B_{rc0} з ростом міцності криці, але з урахуванням поправки, внесеної в цю залежність, фактором зламостійкості конкретного стопу.

На рисунку 2 ці ж дані табл. 2 представлені у вигляді взаємозв'язку величин, які відносяться лише до даних, одержуваних

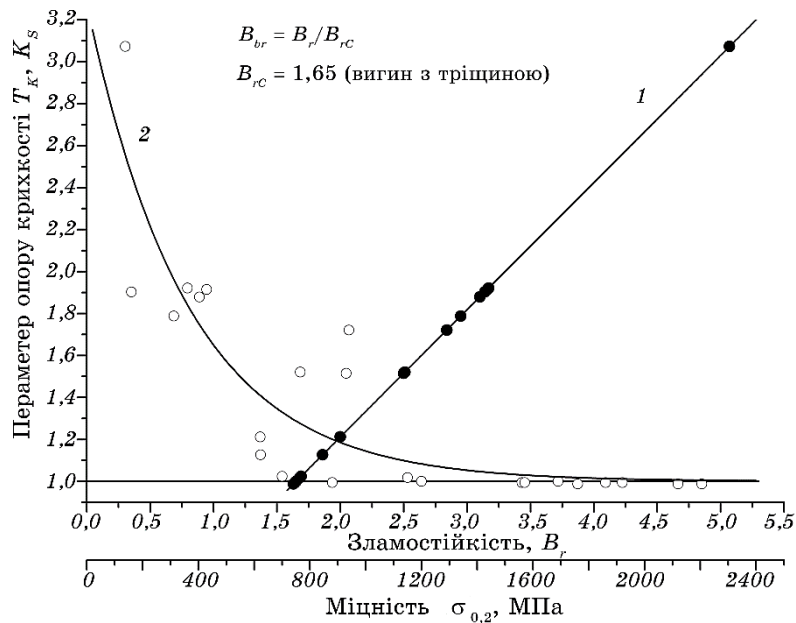


Рис. 2. Залежність опору крихкості, як залишкового резерву міцності K_s , від міцності $\sigma_{0,2}$ (крива 2) і резерву міцності B_r (крива 1). Оброблення даних роботи [10].

Fig. 2. Dependence of the resistance to brittleness as the residual strength margin K_s , the strength $\sigma_{0,2}$ (line 2) and strength margin B_r (line 1). According to [10].

при базових механічних випробуваннях гладких зразків при розтягуванні — $\sigma_{0,2}$ і B_r . Шуканою величиною слугує за формулою (5) параметер опору крихкості K_s , де за [10] $B_{rc} = 1,65$. Така аналіза краща в порівнянні з рис. 1, оскільки не вимагає експерименту зі зразками з концентраторами напружень або розрахунків за формулою (6). Як бачимо, параметер міри захисту від крихкості K_s лінійно зростає зі збільшенням B_r , що тривіально по суті, але явно гіперболічно падає з ростом $\sigma_{0,2}$, зберігаючи ті ж причини розкиду даних K_s , що і на рис. 1.

В залежностях 1 і 2 на рис. 2 представлено справжню суть даної роботи, мета якої — виміряти кількісно рівень захисту від крихкості криці одразу за табличними характеристиками $\sigma_{0,2}$ і B_r , не вдаючись до спеціальних випробувань зразків з потрібним типом КН. В даному випадку на рис. 2 представлений найсильніший тип КН — зразок із тріщиною втоми, який використовується для визначення характеристики в'язкості руйнування криці K_{1C} , що за необхідності дає змогу паралельно оцінювати тріщиностійкість криці за даними $\sigma_{0,2}$ і B_r .

З рисунку 2 видно, що в загальному випадку міцність $\sigma_{0,2} \geq 700$ МПа за наявності тріщини у виробі вже може слугувати причиною крихкості, якщо в'язкість криці недостатньо висока. З іншого боку, при рівню в'язкості, яка відповідає зламостійкості $B_r \geq 2$, будь-яка криця з міцністю $\sigma_{0,2} \leq 700$ МПа не дасть змогу коректно визначити показник K_{1C} за температури $T = T_k$ (293 К), принаймні на зразках товщиною $t = 20$ мм, для яких справедливі залежності, наведені на рис. 2. В той же час високоміцні криці ($\sigma_{0,2} \geq 1000$ МПа) явно крихкі в даних умовах випробування. Висловлені міркування можуть виявитись корисними при вирішенні однієї вельми важливої технічної задачі, яка має практичне значення — виявити пробіли допустимих властивостей міцності і пластичності криць, які не допускають можливості передчасного руйнування сталевих болтів з високоміцних криць через окрихчувальну дію КН, створювану гвинтовою нарізкою на поверхні болтів.

3. ПРИНЦИП РЕГУЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОМІЦНИХ КРИЦЕВИХ БОЛТІВ

Високоміцні крицеві болти мають широке технічне застосування в роз'ємних з'єднаннях, особливо в авіаційному машинобудівництві і висотному будівництві. Небезпека окрихчування такого виробу стримує прагнення підвищувати міцність криць, що знижує технічну ефективність їхнього використання у виробках [13].

Дані випробувань зразків з кільцевими надрізами типу К2 з табл. 1 дають змогу розглядати зразок з кільцевою нарізкою як модель

зразка з гвинтовою нарізкою (болта) з дещо зміненим коефіцієнтом концентрації за Нейбером, який піддається необхідному коригуванню за методологією, представленою в роботі [10].

З метою аналізу поставленої вище задачі на наступних рисунках представлені дані щодо тримкої міцності σ_{c0} зразків з тріщиною (рис. 3) і кільцевим надрізом σ_{NF} (рис. 4 за даними табл. 1). На обох рисунках наведена лінія 1 для порогу конструкційної придатності σ_{c0} (σ_{NF}) > 1 і непридатності (σ_{c0} (σ_{NF}) ≤ 1). Видно, що на зразках з тріщиною негативна конструкційна придатність можлива вже при $\sigma_{0,2} \leq 700$ МПа в залежності від рівня в'язкості криці, а на зразках з кільцевим надрізом К5 за [10] (рис. 4) σ_{NF} зберігає позитивну конструкційну придатність аж до максимальних значень σ_{NF} при міцності $\sigma_{0,2} \approx 1500\text{--}1900$ МПа і $B_r \geq 2$, тобто у вказаних межах властивостей криць крихкість болтам з нарізкою, близькою за геометрією КН типу К2 ($D = 10$ мм, $t = 1,5$ мм, $r = 0,1$ мм за [10]) не загрожує.

У підсумку, оптимальний рекомендований комплекс механічних властивостей криць для болтів такого типу може бути представлений наступним чином: для забезпечення граничної міцності болтів на розриві рівнем $\sigma_{NF} \geq 2000$ МПа необхідно забезпечити для криці

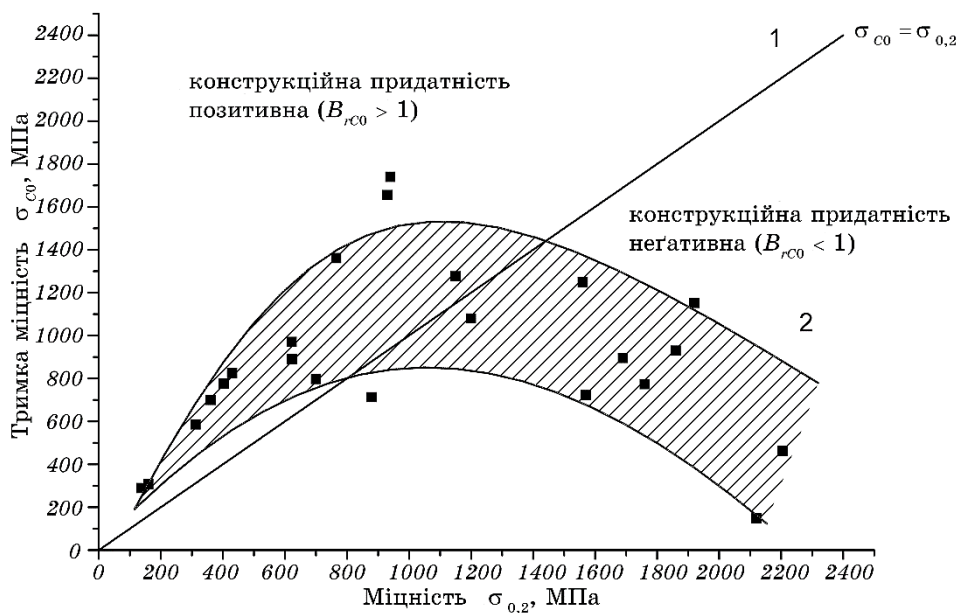


Рис. 3. Залежність міцності зразків з КН типу 5 (вигин зразка з тріщиною) σ_{c0} від міцності криць $\sigma_{0,2}$. Оброблення даних роботи [10].

Fig. 3. Dependence of the resistance to brittleness as the residual strength margin K_s , the strength $\sigma_{0,2}$ (line 2) and strength margin B_r (line 1). According to [10].

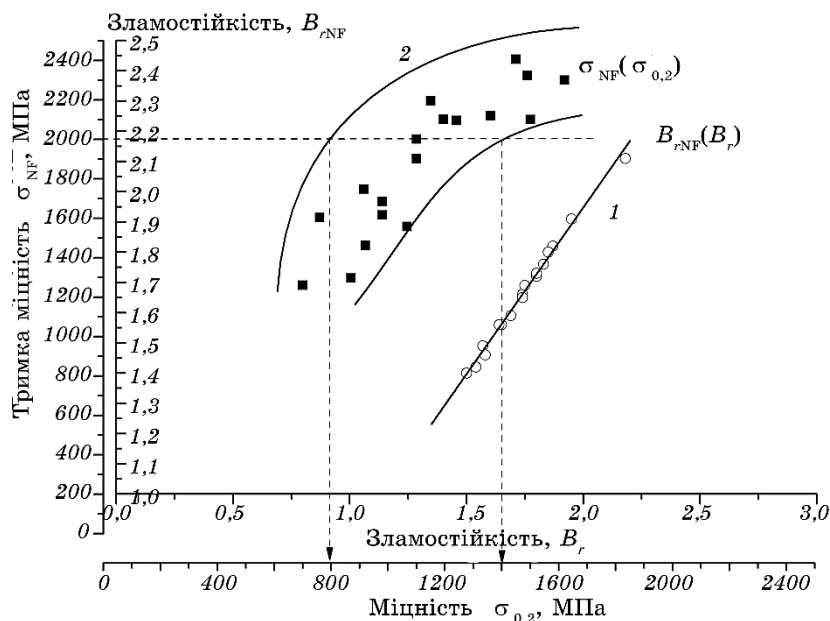


Рис. 4. Залежність міцності на розтягування σ_{NF} зразків з кільцевим надрізом типу К2 від міцності сталей $\sigma_{0,2}$ (крива 2) і приведеного резерву міцності B_{rNF} зразка з КН від параметру зламостійкості B_r (крива 1). Оброблення даних роботи [10].

Fig. 4. Dependence of the tensile strength σ_{NF} of specimens with circular notches 2 types on steels strength $\sigma_{0,2}$ (line 2) and safety margin B_{rNF} of specimens with SR on characteristic of break resistance B_r (line 1). According to [10].

властивості — $\sigma_{0,2} \approx 800\text{--}1400$ МПа; і $B_r = 2,0\text{--}1,4$; $B_{rNF} = 2,0\text{--}1,5$ (рис. 4). Цей набір властивостей забезпечить найвищу для такого типу виробів надійну міцність болта ($\sigma_{NF} \geq 2000$ МПа), що дасть змогу гарантувати їх робоче навантаження на рівні $\sigma \leq 1400$ МПа, тобто, з коефіцієнтом запасу по міцності не менше ніж $K_{зп} = 2000/1400 = 1,4$. Даний розрахунок має умовний характер, оскільки проведений лише для ілюстрації принципової можливості цілеспрямованого регулювання комплексу механічних властивостей важливого класу виробів з метою захисту їх від можливості крихкого розриву при випадковому перевантаженні (наприклад, при надлишковому перенапряженні гвинтового з'єднання).

4. ВИСНОВКИ

Крихкість сталених виробів під дією концентраторів напружень (як регулярних, так і випадкових типу тріщин) може контролюватися

збалансовано підібраним комплексом властивостей міцності і пластичності. Але для цієї мети необхідно використовувати нетрадиційну, спеціальну властивість з класу деформаційних резервів міцності — зламостійкість $B_r = S_K / \sigma_{0,2}$. Критичне значення B_{rc} для кожного виду КН має бути встановлене заздалегідь і тоді співвідношення $B_r / B_{rc} \geq 1$ є мірою буферного запасу пластичності металу, який захищає його від крихкості при даному виді КН. Показово, що, виходячи з даних щодо традиційної характеристики пластичності ψ_K , подібне граничне значення ψ_C визначити неможливо, тому що в міру зростання міцності криці $\sigma_{0,2}$ вимоги до величини ψ_K також зростають. Це ставить під сумнів розповсюджений в інженерній практиці принцип оцінки збереження надійності матеріалу, коли при збільшенні міцності добиваються збереження показника пластичності на тому ж рівні.

Ознакою позитивної конструкційної придатності виробу з КН слугує умова, при якій номінальна міцність виробу σ_{NF} перевищує границю текучості $\sigma_{0,2}$ самого стопу ($B_{rNF} > 1$). Ця умова зручна тим, що величина B_{rNF} однозначно пов'язана з вихідною зламостійкістю B_r і може бути визначена розрахунковим шляхом, що дає змогу за необхідності уникнути експериментальної процедури зі спеціальними зразками (з надрізами, тріщинами і т.п.). Однак, найбільш ефективно переваги характеристики зламостійкості B_r проявляються у випадку, коли визначена порогова критична величина B_{rc} , для якої співвідношення $B_r \leq B_{rc}$ означає умову крихкості виробу, тобто $B_{rNF} \leq 1$. Для зразків з КН з відомим B_{rc} процедура оцінки захисту від крихкості гранично проста — достатньо мати в розпорядженні характеристику B_r на основі лінійного розтягування зразка — за умови $B_r > B_{rc}$ конструкційна придатність матеріалу з таким КН позитивна однозначно, оскільки $B_{rNF} (B_{rc0}) > 1$. На основі показників пластичності (ψ_K) або в'язкості (KCV, KCU) досягнути такої однозначності критерію крихкості виробу з КН не є можливим.

В даній роботі представлені лише основи методології аналізу проблеми крихкості виробів з КН на базі концепції конструкційної придатності металів і стопів. Реальна практична користь від запропонованої методології може бути виявлена на двох рівнях її використання — лабораторному і загальнотехнічному.

В лабораторному вигляді методологія може бути реалізована вже сьогодні, якщо вибрати в якості стандарту будь-яку нині використовувану методу оцінки матеріалів на крихкість, наприклад, випробування на статичний вигин зразків типу Шарпі, які використовуються у випробуваннях на ударну в'язкість (KCV). За умови фіксування граничного навантаження руйнування зразка з надрізом P_c , яка дає змогу визначити міцність σ_{c0} і показник конструкційної придатності B_{rc0} , можна стандартизувати нову аналітичну методологію оцінки в кількісній формі міри захисту стопів від крихкості,

спричиненої дією КН. При цьому у визначенні такої величини, як робота руйнування (ударна в'язкість KCV), потреба не виникає.

В області інженерного загальнотехнічного використання дана методологія вимагатиме подальшого детального опрацювання з метою визначення критичних параметрів зламостійкості B_{rc} не зразків з КН, а окремих елементів конструкції або вузлів механізмів, що дасть змогу з часом замінити в необхідних випадках натурні випробування цих вузлів простими обчислювальними операціями.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. А. А. Шмыков, *Справочник термиста* (Москва: Машгиз: 1961).
2. ГОСТ 9454-78. *Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах* (Москва: Издательство стандартов: 1978).
3. П. Ф. Кошелев, С. Е. Беляев, *Прочность и пластичность конструкционных материалов при низких температурах* (Москва: Машиностроение: 1967).
4. А. В. Шиян, *Физическая природа локального напряжения хрупкого разрушения сталей и сварных швов* (Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук) (Київ: 1990).
5. Ю. Я. Мешков, К. Ф. Сорока, *Металлофиз. новейшие технол.*, **43**, № 6: 781 (2021).
6. С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, *Успехи физики металлов*. **10**, № 2: 207 (2009).
7. С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, *Предельная прочность. Кристаллы, металлы, конструкции* (Київ: Наукова думка: 2008).
8. Ю. Я. Мешков, С. А. Котречко, А. В. Шиян, *Механическая стабильность металлов и сплавов* (Київ: Наукова думка: 2014).
9. Ю. Я. Мешков, Г. А. Пахаренко, *Структура металла и хрупкость стальных изделий* (Київ: Наукова думка: 1985).
10. А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков, Ю. А. Полушкин, *Сталь*, № 6: 39 (2019).
11. В. Н. Грищенко, Ю. Я. Мешков, Ю. А. Полушкин, А. В. Шиян, *Металлофиз. новейшие технол.*, **37**, № 7: 961 (2015).
12. Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, *Сталь*, № 1: 45 (2019).
13. В. С. Гнучев, *Проблемы прочности*, № 4: 113 (1977).
14. В. А. Зозуляк, В. А. Пронив, *Физико-химическая механика материалов*, № 2: 17 (1977).
15. *Механика разрушения и прочность материалов* (Ред. В. В. Панасюк) (Київ: Наук думка: 1988), т. 3.
16. Н. И. Новожилова, Г. Н. Малышев, В. Г. Хотмиров, *Проблемы прочности*, № 6: 89 (1981).
17. Р. В. Гольдштейн, Б. М. Овсянников, Н. И. Волгина, А. В. Карзов, Н. М. Осипенко, А. В. Минашин, *Проблемы прочности*, № 1: 79 (1982).

REFERENCES

1. A. A. Shmykov, *Spravochnik Termista* (Moscow: Mashgiz: 1961) (in Russian).

2. GOST 9454-78. *Metally. Metody Ispytaniya na Udarnyy Izgib pri Ponizhennykh, Komnatnoy i Povyshennykh Temperaturakh* [Metals. Impact Test Method at Low, Room and High Temperatures] (Moscow: Izdatel'stvo Standartov: 1978) (in Russian).
3. 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).
4. 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).
5. Yu. Ya. Meshkov and K. F. Soroka, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 6: 781 (2021) (in Ukrainian).
6. S. A. Kotrechko and Yu. Ya. Meshkov, *Usp. Fiz. Met.*, **10**, No. 2: 207 (2009).
7. S. A. Kotrechko and Yu. Ya. Meshkov, *Predelnaya Prochnost. Kristally, Metally, Konstruktsii* [Ultimate Strength. Crystals, Metals, Structures] (Kyiv: Naukova Dumka: 2008) (in Russian).
8. Yu. Ya. Meshkov, S. A. Kotrechko, and A. V. Shiyan, *Mekhanicheskaya Stabilitnost Metallov i Splavov* [Mechanical Stability of Metals and Alloys] (Kyiv: Naukova Dumka: 2014) (in Russian).
9. Yu. Ya. Meshkov and G. A. Pakharenko, *Struktura Metalla i Khrupkost' Stalnykh Izdeliy* [Structure of Metal and Brittleness of Steel Products] (Kyiv: Naukova Dumka: 1985) (in Russian).
10. A. V. Shiyan and Yu. Ya. Meshkov, and Yu. A. Polushkin, *Stal'*, No. 6: 39 (2019) (in Russian).
11. V. N. Grischenko, Yu. Ya. Meshkov, Ya. A. Polushkin, and A. V. Shiyan, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **37**, No. 7: 961 (2015) (in Russian).
12. Yu. Ya. Meshkov and A. V. Shiyan, *Stal'*, No. 1: 45 (2019) (in Russian).
13. V. S. Gnuchev, *Problemy Prochnosti*, No. 4: 113 (1977) (in Russian).
14. V. A. Zozuliak and V. A. Proniv, *Fiziko-Khimicheskaya Mekhanika Materialov*, No 12: 17: (1977).
15. *Mekhanika Razrusheniya i Prochnost' Materialov* (Ed. V. V. Panasyuk) (Kyiv: Naukova Dumka: 1988), vol. 3 (in Russian).
16. N. I. Novozhilova, G. N. Malyshev, and V. G. Hotmirov, *Problemy Prochnosti*, No. 6: 89 (1981) (in Russian).
17. R. V. Goldshteyn, B. M. Ovsyannikov, N. I. Volgina, A. V. Karsov, N. M. Osipenko, and A. V. Minashin, *Problemy Prochnosti*, No. 1: 79 (1982) (in Russian).