

PACS numbers: 46.50.+a, 62.20.fq, 62.20.mj, 62.20.mm, 62.20.mt, 81.40.Lm, 81.40.Np

Роль пластичності в руйнуванні металів і стопів

Ю. Я. Мешков, Г. П. Зіміна, Ю. О. Полущкін

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

В оглядовій статті механічна властивість пластичності розглядається під кутом зору впливу її на крихкість металевих матеріалів через втручання в механічний напружено-деформований стан (НДС) металевого тіла (МТ) під силовим навантаженням: поява пластичності обмежує пружний вид НДС на межі плинності МТ $\sigma_{0,2}$ і породжує пружньо-пластичний вид НДС в межах напружень від $\sigma_{0,2}$ до S_K (істинне напруження руйнування зразка у «шийці»). Інтервал напружень $\Delta S = S_K - \sigma_{0,2}$ слугує резервом механічної стабільності (РМС) напруженого стану МТ з показником РМС у вигляді коефіцієнта $B_r = S_K / \sigma_{0,2}$ (зламостійкість МТ), що забезпечує пластичному МТ ресурс захисту від крихкого руйнування за $B_r > 1$. Пластичність породжує у МТ спосіб для захисту від швидкого руйнування — крихкості. Показник зламостійкості B_r слугує параметром кількісного виміру здатності МТ чинити опір руйнуванню МТ взагалі, в тому числі і під дією концентраторів напружень (КН) (надрізів, тріщин, тощо). В цій статті наведено результати аналізу експериментів з літературних джерел щодо ролі показника B_r (зламостійкості) в процесах руйнування конструкційних криць на зразках із КН за кімнатної та низьких температур випробувань.

Ключові слова: міцність, стабільність міцності, зламостійкість, перенапруження, концентратор перенапружень, крихкість, критичний параметр крихкості, субкритичне та надкритичне руйнування, захисний ре-

Corresponding author: Yuriy Yakovych Meshkov
E-mail: meshkov0305@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, H. P. Zimina, and Yu. O. Polushkin, The Role of Plasticity in the Fracture of Metals and Alloys, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **48**, No. 7: 757–773 (2026) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.48.07.0757](https://doi.org/10.15407/mfint.48.07.0757)

© Publisher PH ‘Akadempriodyka’ of the NAS of Ukraine, 2026. This is an open access article under the CC BY-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0>)

курс пластичности.

In the review paper, the mechanical property of plasticity is considered from the standpoint of its effect on the brittleness of metallic materials due to influence on the mechanical stress-strain state (SSS) of a metal under a force load: the appearance of plasticity limits the elastic form of the SSS at the yield point of a metal $\sigma_{0.2}$ and generates the elastic-plastic form of the SSS within the stress range from $\sigma_{0.2}$ to S_K (the true fracture stress of a sample in 'neck'). Stress interval $\Delta S = S_K - \sigma_{0.2}$ is a mechanical-stability margin (MSM) of the stress state of a metal with a numerical characteristic of MSM in the form of a coefficient $B_r = S_K / \sigma_{0.2}$ (break resistance), which provides the ductile metal with a protection margin against brittle fracture at $B_r > 1$. Plasticity creates within the metal a means to protect against rapid destruction (brittleness). The break-resistance coefficient B_r is a parameter for quantitative measurement of the metal ability to resist fracture of a metal in general, including under the action of stress raisers (SR) (notches, cracks, *etc.*). This paper presents the results of the analysis of experiments from literary sources on the role of break-resistance coefficient B_r in the processes of fracture of structural steels for specimens with stress raisers at both room and low test temperatures.

Key words: strength, strength stability, break resistance, overstrain, overstrain concentrator, brittleness, critical parameter of brittleness, subcritical and supercritical fracture, protective resource of plasticity.

(Отримано 27 травня 2025 р.; остаточн. варіант — 25 серпня 2026 р.)

1. ВСТУП

Властивість пластичности притаманна металевим матеріалам завдяки особливостям металічного типу міжатомових зв'язків, зумовлених наявністю в металах так званого «електронного газу» [1]. Пластична деформація починається за критичного напруження умовної межі плинності $\sigma_{0.2}$, що залежить від структури полікристалічного стопу, температури й динаміки навантаження [2] та завершується відривом після досягнення енергетичної нестабільності деформованої структури металу за напруження S_K (істинне напруження руйнування у «шийці» зразка) [3, 4]. Отже, в металевих матеріалах руйнування без початку пластичної деформації в принципі неможливе; тому закономірно постає питання про фізичну сутність тієї ролі, яку пластичність відіграє в явищі руйнування взагалі і в крихкому виді руйнування зокрема.

В традиційній методології дослідження крихкості металевих матеріалів широко використовують концепцію енергоємності руйнування за динамічного навантаження на вигин спеціальних призматичних зразків із надрізом певної гостроти з визначенням роботи руйнування («ударної в'язкості») KCV (надріз типу Шарпі) або KCU (надріз Менаже) [5]. Але з точки зору ролі пластичности в показниках ударної в'язкості KCV і KCU [Дж/м²] така методологія не

є адекватною, оскільки в показнику роботи руйнування вплив самої пластичності істотно притіняється впливом показника міцності ($\sigma_{0,2}$), особливо у високоміцних стопах, в результаті чого критерій крихкості у такій методології доводиться коригувати у відповідності до класу міцності стопу [6].

В даній роботі поставлену задачу пропонується розглядати, виходячи з уявлень про стан механічної стабільності напруженого металевго тіла (МТ), закладених у попередніх роботах авторів цієї концепції [7–11]. В концепції механічної стабільності роль пластичності у руйнуванні металів однозначно відображається у спеціальному показнику резерву (ресурсу) стабільності пластичного стану (РСПС) (зламостійкості металу) B_r [8]:

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

S_K — істинне напруження руйнування у «шийці» зразка, $\sigma_{0,2}$ — умовна межа плинності зразка за залишкової деформації $\varepsilon_{0,2} = 0,002$.

2. МЕХАНІЧНА СТАБІЛЬНІСТЬ МЕТАЛІВ

Механічна стабільність тіла, що знаходиться під дією прикладених сил, означає стійке збереження діючого деформованого стану (напружено-деформованого стану — НДС) тіла в процесі його подальшого навантаження, яке закінчується або руйнуванням тіла (крихкість твердих тіл), або переходом до пластичної деформації (металеві матеріали). У металевих матеріалах стабільність механічного стану порушується двічі: спочатку порушується стабільність пружного стану тіла на умовній межі плинності ($\sigma_{0,2}$), вдруге стабільність пластичного (насправді пружньо-пластичного) НДС порушується у вигляді руйнування тіла за напруження S_K в результаті енергетичної нестабільності деградованої через пластичну деформацію структури металу [3]. Енергетична стабільність структури, заповненої масою субмікроскопічних зародкових тріщин (ЗТ) [3, 4], порушується за принципом, встановленим А. А. Гріффітом в моделі руйнування твердого тіла з еліптичною порожниною, що діє як концентратор напружень (КН) [12].

Фізичною причиною порушення стабільності пластичного деформованого стану (ПДС) металевих тіл є накопичення пружної енергії в результаті деформаційного зміцнення металу, коли за напруження S_K відбувається розрив міжатомових зв'язків зі спонтанним вивільненням накопиченої пружної енергії тіла, тобто повна ліквідація стабільності ПДС з одночасним припиненням пластичного деформування МТ і фіксацією показника пластичності зразка ψ_K .

Другий рівень механічної стабільності, що проявляється в інтервалі напружень $\Delta S = S_K - \sigma_{0,2}$, в попередніх роботах визначався як

деформаційний резерв міцності у вигляді коефіцієнта B_r (коефіцієнт зламостійкості) за формулою (1) [8–11]. Оскільки резерв міцності є наслідком прояву пластичності металу, то за своїм фізичним змістом величину ΔS і похідну від неї B_r можна трактувати як певний ресурс стабільності пластичного стану, який віддаляє момент енергетичної нестабільності деформаційно деградованої структури металу (момент руйнування за S_K) від можливого швидкого руйнування на межі плинності $\sigma_{0,2}$.

Отже, параметер B_r за (1) представляє собою кількісний вимір захисного ресурсу стабільності пластичного стану або захисний ресурс пластичності (ЗРП) в процесі руйнування металу взагалі і в крихкому руйнуванні зокрема. Зламостійкість B_r своєю величиною відображає міру захисту металу від крихкості, що стало предметом систематичних досліджень в роботах [8–11, 13–16]. Зрештою, саме в рамках концепції механічної стабільності в роботі [11] було представлено механізм руйнівальної дії КН як результат повного вбирання ЗРП (B_r) в зоні пластичності в околі вістря КН, що призводить до передчасного руйнування тіла з КН за номінальних напружень $\sigma_{NF} < S_K$ і до крихкого руйнування за $\sigma_{NF} < \sigma_{0,2}$ (рис. 1).

В роботі [14] роль показника зламостійкості B_r розглядалася в контексті впливу базових механічних властивостей (міцності та пластичності) на номінальне напруження руйнування σ_{NF} на зразках з КН різного типу у надрізів або тріщин втоми. Було показано, що застосування зламостійкості B_r уможливорює однозначно прогнозувати умову переходу до крихкого руйнування зразка з даним видом КН, якщо попередньо експериментально було визначено руйнівальну силу α_{efc} для тестового КН у вигляді критичного показника B_{rc} , за якого тестовий КН реалізує руйнування на рівні межі плинності металу $\sigma_{NF} = \sigma_{0,2}$ (рис. 2):

$$\alpha_{efc} = B_{rc} = (S_{KC}/\sigma_{0,2C}) \Big|_{\sigma_{NF}=\sigma_{0,2}}. \quad (2)$$

Умова (2) означає, що знайдено такий критичний для даного виду КН рівень $B_r = B_{rc}$, за якого весь ЗРП цілком вбирається у зоні пластичності КН і в результаті реалізує стан крихкості металу за номінального (середнього) напруження $\sigma_{NF} = \sigma_{0,2}$. Тим самим виявляється можливість відмічати перехід до крихкості МТ за механічною характеристикою B_r , сформованою з наперед відомих показників механічних властивостей металу — $\sigma_{0,2}$ і S_K , що мають бути заданими вже в його сертифікаційних показниках і не потребують додаткового визначення (рис. 2). Такий критичний показник B_{rc} є індивідуальною характеристикою кожного типу КН, але не сталою константою для геометрії даного КН, як, наприклад, Нейберів коефіцієнт концентрації напружень α_σ , а жорстко пов'язаною з наявним рівнем B_r стійкою кореляційною залежністю у вигляді співвід-

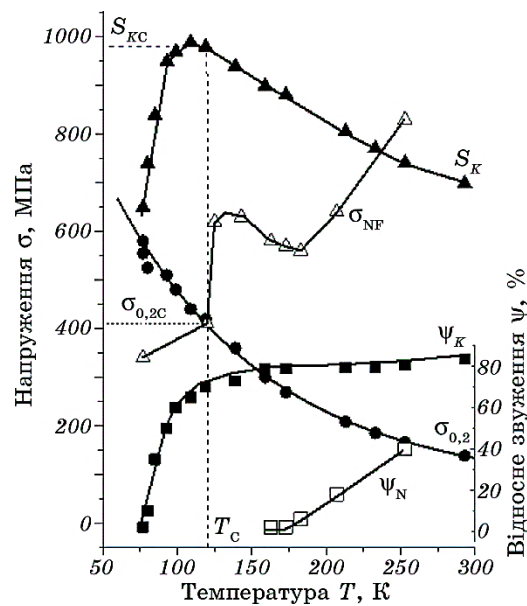


Рис. 1. Температурні залежності механічних властивостей α -Fe для гладких зразків ($\sigma_{0,2}$ — межа пластичності, S_K — істинне напруження руйнування, ψ_K — відносне звуження за розриву у шийці) і зразків з тріщиною втоми за триточкового вигину (σ_{NF} — середнє номінальне напруження руйнування в місці руйнування зразка, ψ_N — відносне звуження в нетто-перерізі зразка), $\sigma_{0,2C}$, S_{KC} — значення відповідних міцностей за критичної температури T_c [17].

Fig. 1. Temperature dependence of the mechanical properties of α -Fe for unnotched specimens ($\sigma_{0,2}$ is yield strength, S_K is true fracture stress, ψ_K is reduction in area, when breaking) and specimens with a fatigue crack under three-point loading (σ_{NF} is the average nominal fracture stress of specimen, ψ_N is reduction in area of the specimen net cross-section), $\sigma_{0,2C}$, S_{KC} are the values of corresponding strengths at critical temperature T_c [17].

ношення $B_r/B_{rC} = f(B_r)$ [16]:

$$B_r / B_{rC} = 0,806 + 0,194 B_r \quad (3)$$

з коефіцієнтом кореляції $R = 0,71$. Рівняння (3) відображає зв'язок між B_r і B_{rC} для руйнування зразків у вигляді призматичних балок товщиною $t = 18$ мм з нанесеною тріщиною втоми за триточкового вигину [17]. Для циліндричних зразків з кільцевим надрізом [18] кореляційне співвідношення B_r/B_{rC} виконується з більш високим коефіцієнтом кореляції $R = 0,99$ [16]:

$$B_r / B_{rC} = 0,436 + 0,915 B_r. \quad (4)$$

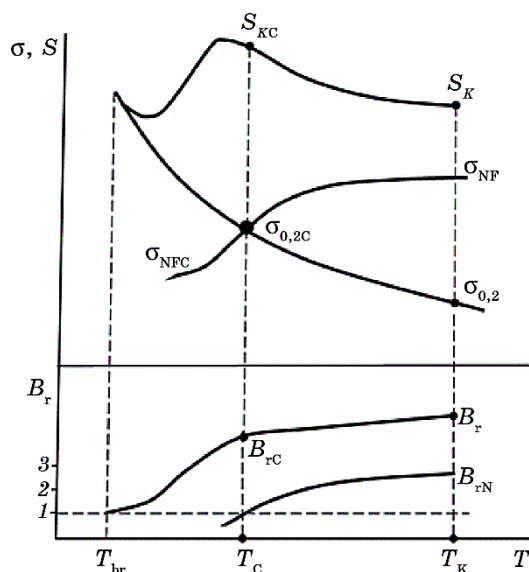


Рис. 2. Температурні залежності базових механічних характеристик $\sigma_{0,2}$, S_K і зламостійкостей для гладких зразків (B_r) і зразків з КН (B_{rN}) (схема).

Fig. 2. Temperature dependences of basic mechanical characteristics $\sigma_{0,2}$, S_K and break resistances for smooth specimens (B_r) and specimens with stress raisers (SR) (B_{rN}) (scheme).

З порівняння залежностей (3) і (4) видно, що для крихких матеріалів ($B_r = 1$) в межах похибки критичний рівень B_{rc} для всіх видів КН практично однаковий: $B_{rc} \cong 1$, тобто у крихкому матеріалі будь-який КН призведе до певної втрати тривкої здатності: $\sigma_{NF} < \sigma_{0,2}$. Але для металів ($B_r > 1$) величина B_{rc} залежить як від типу КН, так і від захисного ресурсу пластичності (B_r).

Аналіза причин такого впливу пластичності на умови руйнування металів під дією КН потребує більш детального розгляду.

3. ДВА ВИДИ МЕХАНІЗМУ ВИЧЕРПАННЯ ЗАХИСНОГО РЕСУРСУ ПЛАСТИЧНОСТІ ЗА ОКРИХЧЕННЯ МЕТАЛІВ

Захисний від крихкості ресурс пластичності, зосереджений в показнику зламостійкості B_r , може бути ввібраним до рівня $B_r = 1$, коли метал переходить від пластичного до крихкого стану, двома принципово різними способами — шляхом підвищення «межі плинності» початкової недеформованої структури металу $\sigma_{0,2}$, тобто за рахунок зміни нижньої межі резерву стабільності B_r за (1), або шляхом пониження верхнього рубежу пластичного стану — напруження руйнування S_K . Напруження початку ($\sigma_{0,2}$) і кінця (S_K)

ресурсу пластичності незалежні одне від другого, різні за своєю фізичною природою і тому змінюються за різними закономірностями.

Перший вид механізму вбирання ЗРП (B_r) яскраво проявляється в результаті низькотемпературного зростання $\sigma_{0,2}$ за охолодження криць (рис. 1, 2). Але можливий також механічний вид підвищення $\sigma_{0,2}$ через тристороннє розтягування в умовах складного НДС (СНС) або за структурних змін межі плинності $\sigma_{0,2}$ в процесах старіння, радіаційного опромінення, тощо, а також внаслідок динамічного навантаження зразка (ударні випробування криць).

Взагалі перший вид механізму вбирання ЗРП базується на високій чутливості показника $\sigma_{0,2}$ до впливу чинників: температури, виду НДС, швидкості навантаження, а також структурного стану металу, що змінюється в процесі пластичного деформування. Слід підкреслити, що головна ланка першого виду механізму зосереджена в початковій стадії пластичності ($\sigma_{0,2}$), в той час як другий вид зменшення ЗРП на шляху до крихкості металу регулюється кінцевою стадією пластичності — руйнуванням металу (S_K). Принципова відмінність першої та другої ланок механізму вичерпання ЗРП пов'язана з різною фізичною природою напружень початку пластичності ($\sigma_{0,2}$) і кінця пластичного стану металу (S_K).

Критерій плинності полікристалічного металу базується на суто усередненому (номінальному) напруженні $\sigma_{0,2}$ за залишкової макроскопічної деформації $\varepsilon_{0,2} = 0,2\% = 0,002$ і є за природою силовим (не енергетичним) критерієм [2]. Руйнування, навпаки, є суто локальним, мікроскопічним, навіть наномасштабного виміру явищем [19–21], що спричиняється енергетичною нестабільністю, і тому руйнування набуває характеру спонтанного, автокаталітичного процесу глобального масштабу. Критерій нестабільності у самому зародку руйнування описується в термінах локальних параметрів НДС [3, 4], що важко застосувати в інженерній практиці; тому в параметрі резерву стабільності міцності B_r (1) використовується практично доступна величина S_K — номінальне (середнє) напруження руйнування у шийці зразка, як така, що макроскопічно відображає момент закінчення стадії пластичного деформування.

Але найбільш поширеним на практиці є гібридний варіант вичерпання захисного ресурсу пластичності, що спостерігається за звичайного в'язкого руйнування зразка металу за кімнатних температур. Тут в процесі деформування пластичність одночасно виконує дві протилежні функції — запобігає швидкому руйнуванню металу на межі плинності $\sigma_{0,2}$ (захисна роль пластичності від крихкості металу) й одночасно породжує передумови для закінчення пластичності (передумови руйнування) внаслідок деформаційної деградації полікристалічної структури металу (зародкові тріщини, пори, розлами твердих частинок структури, тощо); накопичення деформаційних пошкоджень елементів структури готує базу для подаль-

шої енергетичної нестабільності та руйнування металу. Деформаційне зміцнення металу забезпечує достатній рівень густини пружної енергії за напруження S_K :

$$W_\varepsilon = S_K^2 / (2E); \quad (5)$$

W_ε означає середній граничний рівень густини накопиченої енергії в об'ємі деформованого тіла в зоні розриву за умовного квазіоднорідного напруження S_K у шийці зразка, де фактично спостерігається певна неоднорідність НДС [22, 23].

Саме такий гібридний механізм вбирання ЗРП реалізується в локальній зоні пластичності поблизу вістря КН (надрізу, тріщини), де критичний рівень номінальної густини пружної енергії $W_{\varepsilon C}$ за номінального напруження в нетто-перерізі надрізаного зразка σ_{NF} складає

$$W_{\varepsilon C} = \sigma_{NF}^2 / (2E), \quad (6)$$

а залишковий резерв стабільності міцності зразка з КН B_{rN} по аналогії з (1) —

$$B_{rN} = \sigma_{NF} / \sigma_{0,2}. \quad (7)$$

4. АНАЛІЗА ЕКСПЕРИМЕНТІВ З ОКРИХЧЕННЯ КРИЦЬ ПІД ДІЄЮ КН В МОДЕЛЮ ЗРП

Вище було з'ясовано, що властивість пластичності металів відіграє головну регульовальну роль у механізмі руйнування як в крихкому, так і у в'язкому варіантах процесу. Але ключовим моментом у проблемі визначення критичних параметрів крихкості є вибір адекватної механічної характеристики, відповідальної за регульовальну роль пластичності. Відразу зазначимо, що найбільш поширена на практиці традиційна методика визначення так званої ударної в'язкості за Шарпі (KCV) або Менаже (KCU) [5], за якою в основу критерію крихкості покладено умовний параметер роботи руйнування зразка з КН, не спроможна адекватно оцінити роль пластичності в руйнуванні, оскільки в критичному показнику критерію крихкості KCV_c або KCU_c не виокремлюється внесок в енергію руйнування роботи пластичної деформації із внеску міцності металу. В результаті вказана методологія потребує певної коректури для критичних показників роботи руйнування відповідно до класу міцності металу [6].

Концепція механічної стабільності, яку представлено в циклі робіт [8–11], ґрунтується на розгляді прямого внеску пластичності в формування параметра зламостійкості (B_r), що безпосередньо відпо-

відає за міру захисту металу від крихкості під дією КН за рахунок створюваного пластичністю певного ресурсу захисту від руйнування.

Далі в короткому огляді буде представлено основний підсумок з результатів застосування концепції захисного ресурсу пластичності для дослідження закономірностей у формуванні критичних параметрів крихкості конструкційних криць в умовах концентрації напружень.

В роботі [16] аналізували результати досліджень в роботах [17, 18], з яких було вираховано параметри ЗРП B_r і B_{rc} для зразків з кільцевими надрізами та тріщинами втоми на певному наборі конструкційних криць (табл. 1). З таблиці 1 видно, що для кожного виду криці є власний індикатор крихкого руйнування за критичної температури T_c у вигляді коефіцієнта холодостійкості K_{cr} , який по

ТАБЛИЦЯ 1. Критичні параметри крихкості криць B_{rc} і K_{cr} для КН різного виду (група 1 — надріз із $D = 8$ мм [18], група 2 — тріщина втоми [17]) в залежності від базової зламостійкості B_r (C_B — вміст Бору).

TABLE 1. Critical parameters of brittleness of steels, B_{rc} and K_{cr} , for stress raisers (SR) of different types (group 1 is notch with $D = 8$ mm [18], group 2 is fatigue crack [17]) depending on the basic break resistance B_r (C_B is boron contents).

№	Криця, оброблення	Тип КН	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{0,2C}$, МПа	B_r	$B_{rc} (\alpha_{efc})$	K_{cr}
1	Ст. 30	Група 1. К1[18] кільцевий надріз розтягнення	350	800	2,97	1,31	2,27
2	30ХГСА (з. в., 200°C)		1400	1600	1,58	1,5	1,05
3	30ХГСА (ізот. з., 300°C)		1500	1600	1,8	1,45	1,24
4	30ХГСНА (ізот. з., 200°C)		1450	1700	1,77	1,57	1,13
5	30ХГСНА (ізот. з., 300°C)		1170	1400	2,1	1,36	1,54
6	10Х2СВА		1600	1700	1,83	1,59	1,15
7	У8 (з. а., 400°C)	Група 2. К2[17] вигин з тріщиною	1180	1300	1,58	1,54	1,03
8	α -Fe		140	350	5,0	2,77	1,85
9	У8 (відпал)		340	450	2,8	2,15	1,30
10	Ст. 3сп		160	400	3,1	2	1,55
11	10ХСНД		310	420	2,9	2,5	1,16
12	АК35		1027	1100	2,3	2	1,15
13	ЗШ 12ХН2МДФ (легув. Бором $C_B = 0,0$)		640	700	1,97	1,81	1,09
14	ЗШ 12ХН2МДФ ($C_B = 0,001$)		640	820	1,8	1,46	1,23
15	ЗШ 12ХН2МДФ ($C_B = 0,0022$)		640	977	2,0	1,5	1,33
16	ЗШ 12ХН2МДФ ($C_B = 0,004$)		650	968	2,17	1,67	1,30

суті є показником частини залишкової, не увібраної в зоні КН базової зламостійкості B_r за температури T_K :

$$K_{cr} = B_r / B_{rc}. \quad (8)$$

Встановлено, що показник холодостійкості має закономірний зв'язок із ЗРП (B_r), залежний від виду КН (рис. 3) (див. формули (3) і (4)). З формул (3) і (4) визначимо критичний параметер зламостійкості B_{rc} :

$$B_{rc} = B_r / (a + bB_r), \quad (9)$$

де a і b залежать від виду КН.

Кореляційні залежності (3) і (4) дають змогу виконувати розрахункові визначення критичної температури крихкості T_c через експериментально встановлену температурну залежність базової ($\sigma_{0,2}$) і граничної (S_K) міцності (рис. 1) без додаткових випробувань зразків з КН. Це — суттєва методологічна перевага концепції ЗРП перед традиційною методикою ударної в'язкості, що потребує додаткових випробувань зразків з КН в широкому інтервалі температур [5, 6].

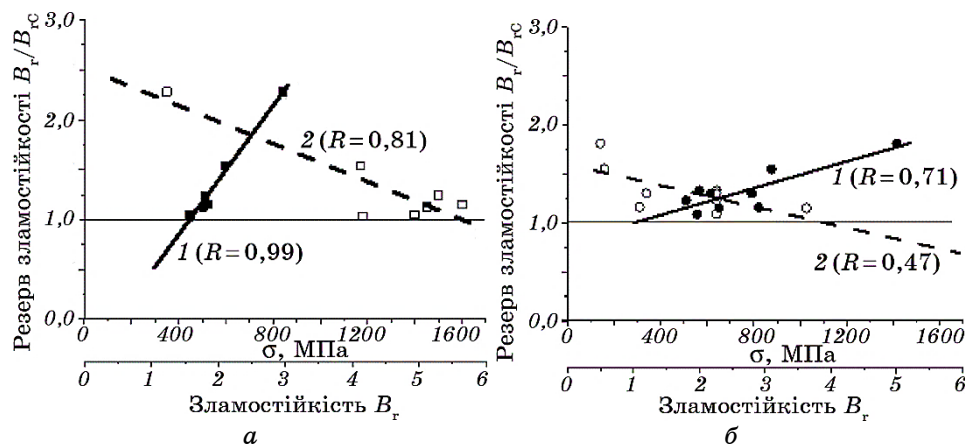


Рис. 3. Зміна параметра холодостійкості B_r/B_{rc} від властивостей міцності $\sigma_{0,2}$ та зламостійкості B_r за випробувань зразків з КН: К1 (п. 1–7, табл. 1, □ і ■) (а), К2 (п. 8–16, табл. 1, ○ і ●) (б); лінія 1 — залежність для B_r/B_{rc} шкали B_r , лінія 2 — те саме для шкали $\sigma_{0,2}$; R — коефіцієнт кореляції.

Fig. 3. Change in the cold brittleness parameter B_r/B_{rc} due to strength properties $\sigma_{0,2}$ and resistance to break B_r at testing specimens with stress raisers (SR): K1 (p. 1–7, Table 1, □ and ■) (a), K2 (p. 8–16, Table 1, ○ and ●) (b); line 1 is dependence for B_r/B_{rc} of the B_r scale, line 2 is the same for the $\sigma_{0,2}$ scale; R is correlation coefficient.

Використання параметра зламостійкості B_r уможливорює радикально спростити методологію атестації металевих стопів на крихкість за кімнатної температури T_K без визначення температури крихкості T_C , виходячи із заздалегідь експериментально визначеного порогового показника руйнівальної ефективності КН α_{ef}^{th} за (2) за руйнування зразка з КН за умови $\sigma_{NF} = \sigma_{0,2}$, але за кімнатної температури випробувань $T_K \cong 300$ К. Тоді в'язкі матеріали з $B_r \geq \alpha_{ef}^{th}$ за кімнатної температури T_K руйнуються запевне за $\sigma_{NF} > \sigma_{0,2}$ ($B_{rN} > 1$), а крихкі (для даного виду КН), у яких $B_r < \alpha_{ef}^{th} = B_{rC}(T_K)$, руйнуються нижче межі плинності стопу $\sigma_{NF} < \sigma_{0,2}$ ($B_{rN} < 1$, див. поз. 19–26 табл. 2 з роботи [13]) (рис. 4).

На рисунку 4 наведено зміну параметра залишкової зламостійкості B_{rN} у зразка з КН, що представляє залишкову тривку здатність σ_{NF} за формулою (7) зразка з КН для різних видів КН, що досліджувались у роботах різних авторів за кімнатної температури T_K [13, 17, 18]. З рисунку 4 видно, що за кімнатної температури T_K лише на зразках з тріщиною втоми вдається реалізувати умови крихкого руйнування ($B_{rN} \leq 1$) виключно на зразках лише високоміцних

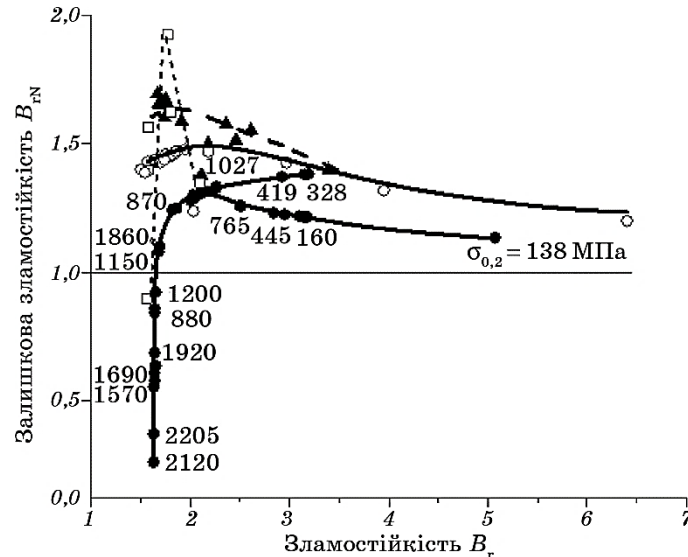


Рис. 4. Залежність залишкової зламостійкості B_{rN} від початкової (B_r) для зразків з різними видами КН із $T_K \cong 300$ К: зразки з тріщиною втоми [13] (●), з КН по [17] (○, ▲), з КН по [18] (□). Цифри — значення $\sigma_{0,2}$ за $T_K \cong 300$ К.

Fig. 4. Dependence of the residual fracture toughness of B_{rN} on the initial (B_r) for specimens with different types of stress raisers (SR) at $T_K \cong 300$ K: fatigue cracked specimens [13] (●), with SR according to [17] (○, ▲), with SR according to [18] (□). Numbers are values of $\sigma_{0,2}$ at $T_K \cong 300$ K.

криць інструментального класу (табл. 2), в той час як звичайні криці конструкційного класу з показником $B_{rN} \geq 2$, в тому числі й високоміцні (поз. 1, АК-35, $\sigma_{0,2} = 1027$ МПа, $B_r = 2,26$) з тріщиною втоми, руйнуються цілком в'язко за виключенням криці, що зазнала водневого окрихчення за міцності $\sigma_{0,2} = 880$ МПа (поз. 6, табл. 2), у якої $B_{rN} = 0,81$.

ТАБЛИЦЯ 2. Механічні властивості криць і зразків з тріщиною за вигину за $T_K \cong 300$ К [13]: Г — гартування, ПО — пічне охолодження, ВП — відпуск, H_2 — водневе середовище, ЗШ — зварний шов, ПД — порошковий дріт, КФ — керамічний флюс, C_B — вміст Бору, ВТМО — високотемпературне термічне оброблення, $B_{rCO} = \sigma_{CO}/\sigma_{0,2}$. Цифри посилань в колонці КС наведено в роботі [13].

TABLE 2. Mechanical properties of steels and specimens with crack at bending at $T_K \cong 300$ K [13]: Г is quenching, ПО is furnace cooling, ВП is tempering, H_2 is hydrogen environment, ЗШ is weld seam, ПД is flux cored wire, КФ is ceramic flux, C_B is boron contents, ВТМО is high-temperature heat treatment, $B_{rCO} = \sigma_{CO}/\sigma_{0,2}$. Reference numbers in the КС column are given in the work [13].

№	КС	Оброблення	$\sigma_{0,2}$, МПа	ψ_K , %	S_K , МПа	B_r	σ_{NF} , МПа	B_{rN}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	АК-35 [2]	Стан поставки	1027	75,0	2321	2,26	1820	1,83
2	α -Fe [2]	Г 1323 К, 2 год. ПО	138	83,8	700	5,07	290	2,10
3	10ХСНД [2]	Г 1373 К, 2 год. ПО	312	72,0	920	2,95	590	1,88
4	Ст. 3 сп. [2]	Г 1373 К, 2,75. ПО	160	71,7	502	3,14	307	1,92
5		Г 1373 К, 1 год. + ВП 1023 К, 16 год., 923 К, 10 год. 10Х15Н27Т3В2МР [3]	870	23,0	1583	1,82	1220	1,40
6		Г 1373 К, 1 год. + ВП 1023 К, 16 год, 923 К, 10 год. + H_2	880	10,0	1443	1,64	713	0,81
7	15Х12Н2МФАВ [4]	Г 1393 К, 1 год. + ВП 953 К 2 год	940	62,0	1983	2,11	1580	1,68
8	03Х12Н10МТ [4]	1273 К, 1 год, 1023 К, 2 год. + ВП 773 К 2 год.	940	79,0	2670	2,84	1740	1,85
9	03Х12Н10МТ [4]	Г 1373 К, 15 хв., 1023 К, 2 год. + ВП 773 К, 2 год.	930	76,0	2325	2,50	1655	1,78
10		ПД-АНЗО, 1 шар	430	67,5	1360	3,16	2830	1,92
11	СШ Х75 [2]	ПД-АНЗО, 2 шара	361	60,7	1444	3,17	700	1,94
12		ПД-АНЗО, 3 шара	404	51,9	1252	3,10	776	1,92
13		КФ 48-АНК-54, ВП, $C_B = 0,0$	622	59,9	1244	2,00	970	1,56
14	СШ 12ХН2МДФ [2]	те ж, ВП, $C_B = 0,001$	623	55,6	1160	1,86	890	1,43
15		те ж, ВП, $C_B = 0,0022$	628	68,1	1281	2,04	1005	1,60
16		те ж, ВП, $C_B = 0,004$	642	67,9	1400	2,18	1117	1,74

Продовження Таблиці 2.

Continuation of Table 2.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
17	20X [5]	ВП 473 К	1150	53,9	1932	1,68	1276	1,11
18		Г 1113 К + ВП 423 К, 2 год.	1860	16,5	3050	1,64	930	1,50
19		Г 1113 К + ВП 473 К, 2 год.	1920	46,7	3150	1,64	1152	0,60
20	50X [5]	Г 1113 К + ВП 673 К, 2 год.	1560	48,6	2530	1,64	1248	0,80
21		Г 1113 К + ВП 773 К, 2 год.	1200	57,2	1980	1,65	1080	0,90
22	40C2X [5]	ВТМО + ВП 473 К	1760	53,0	2870	1,63	774	0,44
23		ВТМО + ВП 573 К	1690	55,0	2770	1,65	900	0,53
24	60C2X [5]	ВТМО + ВП 573 К	2205	38,0	3594	1,63	433	0,21
25		ВТМО + ВП 773 К	1570	40,0	2575	1,64	723	0,46
26	ШХ15 [5]	З 1133 К + ВП 473 К	2120	3,6	3460	1,63	1502	0,07
27	24ХН0МФА [5]	Г 1153 К + ВП 913 К, 15 год.	765	73,5	1920	2,51	1362	1,78
28	65Ф [5]	Стан поставки	700	28,0	1183	1,69	800	1,14
29	10ХСНД [6]	Вздовж прокату	419	69,7	1223	2,92	1020	2,43
30	10ХСНД [6]	Поперек прокату	445	73,7	1400	3,15	1175	2,64
31	12Г2МФТ [6]	Вздовж прокату	571	65,6	1290	2,26	1050	1,84
32		Поперек прокату	602	58,4	1282	2,03	975	1,62
33	15ХСНД [7]	Стан поставки	328	68,0	1046	3,19	880	2,68

З таблиці 2 випливає висновок, що пороговим показником ефективності КН α_{ef}^{th} за температури $T_K = 300$ К для зразка з тріщиною втоми (за регламентом у зразків для випробувань на тріщиностійкість K_{IC} по [24]) є величина

$$\alpha_{ef}^{th} = B_{rc}(T_K) = 1,66. \quad (10)$$

Відповідно, для зразків з надрізами різної гостроти пороговий показник руйнівальної ефективності КН має бути меншим за 1,66, тобто некритичним для криць з $B_r \geq 2$, яким крихкість від КН за $T_K \cong 300$ К запевне не загрожує, і тому для криць конструкційного класу схильність до крихкості можна виявляти лише за низькотемпературних випробувань на температуру T_c .

Отже, для криць конструкційного класу достатньо встановити вимогу на рівень зламостійкості $B_r \geq 2$, щоб бути впевненим за силою надійності у виробках за будь-якого регулярного конструктивного концентратора напружень (наприклад, нарізки на болтових кріпленнях, зубчаті шестерні, тощо), за виключенням експлуатації в умовах довготривалих циклічних навантажень, за яких можлива загроза втомного руйнування.

5. ЗАКІНЧЕННЯ

В твердих тілах з крихкого матеріалу (скло, граніт, тощо) руйнування напруженого тіла спричиняються енергетичною нестабільністю дефектів структури або порожнин у тілі, де виникають розірвані міжатомові зв'язки. Граничний енергетичний рівень крихкого матеріалу $W_{\text{ср}}$ регулюється його міцністю у відповідності з наявною структурою матеріалу.

В металевих матеріалах властива їм пластичність різко сповільнює темп накопичення пружної енергії до небезпечного граничного рівня $W_{\text{ср}}$, чим завдяки ЗРП (B_r) запобігає швидкому (крихкому) руйнуванню металевих тіл на межі плинності $\sigma_{0,2}$, віддаляє момент енергетичної нестабільності деформованої структури металу до напруження в'язкого руйнування S_K . Тому інтервал напружень $\sigma_{0,2} - S_K$ створює для металу специфічний захисний ресурс пластичного стану, що віддаляє стан енергетичної нестабільності (руйнування) до більш високої межі — S_K . Створений в інтервалі напружень $\Delta S = S_K - \sigma_{0,2}$ деформаційний резерв базової міцності $\sigma_{0,2}$ являє собою особливу механічну характеристику, що відображає пластичність металу у суто силовому вимірі коефіцієнта зламостійкості $B_r = S_K / \sigma_{0,2}$.

Захисна сила ЗРП залежить від пластичності металу (ψ_K) і темпу деформаційного зміцнення за Холломоновою закономірністю, є ключовим чинником у визначенні параметрів крихкого стану в тілах з неоднорідними видами НДС (вигин, надрізи, тріщини в МТ), де відбувається суто локалізоване вбирання ЗРП за рахунок локального перезміцнення в зоні КН за номінального (середнього) напруження в тілі σ_{NF} на рівні межі плинності металу $\sigma_{0,2}$ або навіть нижче $\sigma_{0,2}$.

Критична ситуація руйнування МТ на межі плинності металу $\sigma_{0,2}$ визначає не лише критичну температуру крихкості T_c для тіла з КН, але й критичний рівень зламостійкості $B_{rc} = S_{Kc} / \sigma_{0,2c}$ для даного виду КН, що стає знаковою величиною для характеристики самого концентратора напружень, його руйнівальної ефективності у вигляді критичного коефіцієнта руйнівальної ефективності КН $\alpha_{\text{efc}} = B_{rc}(T_c)$.

Кожен вид КН має свій власний показник α_{efc} , але не фіксований на певній величині B_{rc} , тому що енергетична нестабільність (руйнування) не забезпечується лише пружним ресурсом резерву міцності $\Delta S = S_K - \sigma_{0,2}$, а й сумарним напруженням резерву міцності ΔS разом з базовою міцністю $\sigma_{0,2}$, тобто показником граничної міцності S_K . Тому B_{rc} за T_c для кожного виду КН має свою власну усталену закономірність «дрейфу» B_{rc} зі зміною S_K металу. Але доля критичної ефективності КН α_{efc} в наявній зламостійкості металу у вигляді співвідношень (3), (4) для B_r / B_{rc} є стабільною, властивою для даного виду КН, що дає змогу здійснювати розрахунковий підхід до ви-

значення критичних параметрів крихкого стану (T_c, B_{rc}) зразка з наперед відкаліброваним видом КН лише за базовим показником зламостійкості металу B_r за формулами (3), (4).

Саме цей результат досліджень з проблеми крихкого руйнування металевих стопів під дією КН, на думку авторів роботи, може свідчити про розкриття ключової ролі захисного ресурсу пластичності B_r (як наслідок самої пластичності металу) в процесах руйнування металевих виробів, елементів конструкцій і металевих споруд.

Автори щиро дякують завідувачу відділу фізики міцності та руйнування матеріалів Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України чл.-кор. НАН України, проф. С. О. Котречку за увагу до даної роботи, корисні поради та доброзичливу критику.

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

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Ф. Зейтц, *Современная теория твердого тела* (Москва: Гостехиздат: 1949) (пер. з англ.).
2. А. Х. Котрелл, *Дислокации и пластическое течение в кристаллах* (Москва: Металлургия: 1958) (пер. з англ.).
3. С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, *Предельная прочность. Кристаллы, металлы, конструкции* (Київ: Наукова думка: 2008).
4. Ю. Я. Мешков, Т. Н. Сердитова, *Разрушение деформированной стали* (Київ: Наукова думка: 1989).
5. *ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах* (Москва: Издательство стандартов: 1978).
6. *ПНАЭ Г-7-002086. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.*
7. Ю. Я. Мешков, С. А. Котречко, А. В. Шиян, *Механическая стабильность металлов и сплавов* (Київ: Наукова думка: 2014).
8. Ю. Я. Мешков, Г. П. Зіміна, *Металофіз. новітні технол.*, **45**, № 8: 1029 (2023).
9. Ю. Я. Мешков, Г. П. Зіміна, *Металофіз. новітні технол.*, **46**, № 4: 355 (2024).
10. Ю. Я. Мешков, Г. П. Зіміна, *Металофіз. новітні технол.*, **46**, № 10: 1031 (2024).
11. Ю. Я. Мешков, Г. П. Зіміна, К. Ф. Сорока, Т. В. Мельниченко, *Металофіз. новітні технол.*, **47**, № 7: 753 (2025).
12. А. А. Griffith, *Phil. Trans. A*, **221**, Iss. 562–593: 163 (1920).
13. А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков, Ю. А. Полупшин, *Сталь*, № 6: 39 (2019).
14. А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков, *Металофіз. новітні технол.*, **41**, № 6: 775 (2019).
15. А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков, *Сталь*, № 1: 45 (2019).
16. Ю. Я. Мешков, С. О. Котречко, К. Ф. Сорока, *Металофіз. новітні технол.*, **44**, № 10: 1377 (2022).
17. А. В. Шиян, *Физическая природа локального напряжения хрупкого разрушения сталей и сварных швов* (Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук) (Київ: Институт металлофизики АН УССР: 1990).
18. П. Ф. Кошелев, С. Е. Беляев, *Прочность и пластичность конструкционных*

- материалов при низких температурах* (Москва: Машиностроение: 1967).
19. A. N. Stroth, *Proc. Roy. Soc. A*, **223**: 404 (1954).
 20. Ю. Я. Мешков, *Физические основы разрушения стальных конструкций* (Киев: Наукова думка: 1981).
 21. Ю. Я. Мешков, Г. А. Пахаренко, *Структура металлов и хрупкость стальных изделий* (Киев: Наукова думка: 1985).
 22. Н. Н. Давиденков, Н. И. Спиридонова, *Заводская лаборатория*, № 11: 583 (1945).
 23. П. Бриджмен, *Исследование больших пластических деформаций и разрыва* (Москва: Издательство иностранной литературы: 1955) (пер. з англ.).

REFERENCES

1. F. Seitz, *Sovremennaya Teoriya Tverdogo Tela* [The Modern Theory of Solids] (Moskva: Gostekhizdat: 1949) (Russian translation).
2. A. H. Cottrell, *Dislokatsii i Plasticheskoe Techenie v Kristallakh* [Dislocations and Plastic Flow in Crystals] (Moskva: Metallurgiya: 1958) (Russian translation).
3. S. O. Kotrechko and Yu. Ya. Meshkov, *Predel'naya Prochnost'. Kristally, Metally, Konstruktsii* [Ultimate Strength. Crystals, Metals, Structures] (Kiev: Naukova Dumka: 2008) (in Russian).
4. Yu. Ya. Meshkov and T. N. Serditova, *Razrushenie Deformirovannoy Stali* [Destruction of Deformed Steel] (Kiev: Naukova Dumka: 1989) (in Russian).
5. *GOST 9454-78. Metally. Metod Ispytaniya na Udarnyy Izgib pri Ponizhennykh, Komnatnoy i Povyshennykh Temperaturakh* [Metals. Impact Test Method at Low, Room and High Temperatures] (Moskva: Izdatel'stvo Standartov: 1978) (in Russian).
6. *PNAEh G-7-002086. Normy Raschyota na Prochnost' Oborudovaniya i Truboprovodov Atomnykh Ehnergeticheskikh Ustanovok* [Standards for Calculating the Strength of Equipment and Pipelines of Nuclear Power Plants] (in Russian).
7. Yu. Ya. Meshkov, S. O. Kotrechko, and A. V. Shiyan, *Mekhanicheskaya Stabilit'nost' Metallov i Splavov* [Mechanical Stability of Metals and Alloys] (Kiev: Naukova Dumka: 2014) (in Russian).
8. Yu. Ya. Meshkov and H. P. Zimina, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **45**, No. 8: 1029 (2023) (in Ukrainian).
9. Yu. Ya. Meshkov and H. P. Zimina, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **46**, No. 4: 355 (2024) (in Ukrainian).
10. Yu. Ya. Meshkov and H. P. Zimina, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **46**, No. 10: 1031 (2024) (in Ukrainian).
11. Yu. Ya. Meshkov, H. P. Zimina, K. F. Soroka, and T. V. Melnychenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* **47**, No. 7: 753 (2025) (in Ukrainian).
12. A. A. Griffith, *Phil. Trans. A*, **221**, Iss. 562–593: 163 (1920).
13. A. V. Shiyan, Yu. Ya. Meshkov, and Yu. A. Polushkin, *Stal'*, No. 6: 39 (2019) (in Russian).
14. A. V. Shiyan and Yu. Ya. Meshkov, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 6: 775 (2019) (in Russian).
15. A. V. Shiyan and Yu. Ya. Meshkov, *Stal'*, No. 1: 45 (2019) (in Russian).
16. Yu. Ya. Meshkov, S. O. Kotrechko, and K. F. Soroka, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 10: 1377 (2022) (in Ukrainian).
17. A. V. Shiyan, *Fizicheskaya Priroda Lokal'nogo Napryazheniya Khrupkogo*

- Razrusheniya Staley i Svarnykh Shvov* [The Physical Nature of the Local Stress of Brittle Fracture of Steels and Welds] (Thesis of Disser. for Cand. Phys.-Math. Sci.) (Kiev: Institute for Metal Physics, A.S. of UkrSSR: 1990) (in Russian).
18. P. F. Koshelev and S. E. Belyaev, *Prochnost' i Plastichnost' Konstruktsionnykh Materialov pri Nizkikh Temperaturakh* [Strength and Plasticity of Structural Materials at Low Temperatures] (Moskva: Mashinostroenie: 1967) (in Russian).
 19. A. N. Stroth, *Proc. Roy. Soc. A*, **223**: 404 (1954).
 20. Yu. Ya. Meshkov, *Fizicheskie Osnovy Razrusheniya Stal'nykh Konstruktsiy* [Physical Foundations of Destruction of Steel Structures] (Kiev: Naukova Dumka: 1981) (in Russian).
 21. Yu. Ya. Meshkov and G. A. Pakhareno, *Struktura Metallov i Khrupkost' Stal'nykh Izdeliy* [Structure of Metals and Brittleness of Steel Products] (Kiev: Naukova Dumka: 1985) (in Russian).
 22. N. N. Davidenkov and N. I. Spiridonova, *Zavodskaya Laboratoriya*, No. 11: 583 (1945) (in Russian).
 23. P. W. Bridgman, *Issledovanie Bol'shikh Plasticheskikh Deformatsiy i Razryva* [Studies in Large Plastic Flow and Fracture] (Moskva: Izdatel'stvo Inostrannoy Literatury: 1955) (Russian translation).