

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

Механічна стабільність і крихкість металів і сплавів. Ч. 1. Параметри і критерії стабільного стану

Ю. Я. Мешков, Г. П. Зіміна

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

В статті розглядається проблема крихкого руйнування криць, спричиненого дією концентраторів напружень (КН), в тому числі тріщин, за низьких температур випробування. Автори роботи розглядають в'язко-крихкий перехід за критичної температури T_C руйнування зразків з КН як втрату механічної стабільності граничної міцності σ_{NF} під час руйнування зразка з КН нижче межі плинності металу $\sigma_{0,2}$. Механічну стабільність міцності металевим матеріалам надає пластичність, яка зосереджується в інтервалі деформаційного зміцнення між межею плинності $\sigma_{0,2}$ й істинним напруженням руйнування S_K у вигляді показника зламостійкості $B_r = S_K/\sigma_{0,2}$ під час в'язкого відриву у «шийці» зразка. Концентратор напружень локалізує весь резерв механічної стабільності металу B_r в зоні пластичності, чим зумовлює макроскопічну крихку поведінку зразка за температури $T \leq T_C$, де міцність зразка з КН $\sigma_{NF} \leq \sigma_{0,2}$. Встановлено залежність критичного рівня B_{rc} при T_C від резерву механічної стабільності міцності (B_r) і виду КН. Розглянуто ефективність окрихчувальної дії різних типів КН (надрізів і тріщин) на прикладі армко-заліза (α -Fe), а також конструкційних криць у широкому діапазоні показників міцності ($\sigma_{0,2} = 150\text{--}1500$ МПа) і пластичності ($\psi_K \approx 10\text{--}83\%$). Показано, що критичний параметер резерву механічної стабільності B_{rc} може стати ключовим засобом ранжування конструкційних сплавів у практичному матеріалознавстві під час атестації сплавів для застосування їх у виробі, що містять в собі конструкційні концентратори або тріщини втоми.

Corresponding author: Halyna Petrivna Zimina
E-mail: zimingal28@gmail.com

*G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,
36 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

Citation: Yu. Ya. Meshkov and H. P. Zimina, Mechanical Stability and Brittleness of Metals and Alloys. Pt. 1. Parameters and Criteria of the Stable State, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 45, No. 8: 1029–1040 (2023). DOI: [10.15407/mfint.45.08.1029](https://doi.org/10.15407/mfint.45.08.1029)

Ключові слова: міцність, крихкість, механічна стабільність, концентратор напружень, стабільність міцності, резерв стабільності міцності, ефективність концентратора.

This article considers the problem of brittle fracture of steels due to stress raisers (SRs), including cracks, at low test temperatures. The authors consider the ductile-to-brittle transition at the critical temperature of fracture of specimens with SRs, T_C , as a mechanical instability of the ultimate strength, σ_{NF} , at fracture of above specimens below the yield stress of metal, $\sigma_{0.2}$. The mechanical strength stability of metal materials is provided by ductility, which is manifested within the strain-hardening range between the yield stress $\sigma_{0.2}$ and true fracture stress S_K as the break resistance index $B_r = S_K/\sigma_{0.2}$ at ductile break in specimen 'neck'. The stress raiser localises the entire margin of mechanical stability of metal, B_r , in the ductility zone, which causes the macroscopic brittle behaviour of specimen at temperatures $T \leq T_C$, where strength of the specimen with SRs is $\sigma_{NF} \leq \sigma_{0.2}$. Dependence of the critical level, B_{rc} , at T_C on both the margin of mechanical stability of strength, B_r , and the SR type is ascertained. Effectiveness of the embrittlement effect of various SR types (notches and cracks) is considered using the example of armco-iron (α -Fe), as well as of structural steels over both a wide strength range ($\sigma_{0.2} = 150\text{--}1500$ MPa) and ductility range ($\psi_K \approx 10\text{--}83\%$). It is shown that the critical parameter of mechanical stability margin, B_{rc} , may become a key tool for ranking structural alloys in practical materials science, when certifying these alloys for their use in products containing structural stress raisers or fatigue cracks.

Key words: strength, brittleness, mechanical stability, stress raiser, strength stability, strength stability margin, concentrator efficiency.

(Отримано 27 березня 2023 р.; остаточн. варіант — 13 квітня 2023 р.)

1. ВСТУП. ДВА ВИДИ МЕХАНІЧНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ

Кожному руйнуванню навантаженого тіла передує певний етап стабільного механічного стану, під час якого в матеріалі відбуваються процеси накопичення пружних і пластичних деформацій і зростання відповідних напружень σ_N . Стабільність механічного стану завершується руйнуванням у момент, коли напруження досягає граничної для наявної структури матеріалу міцності S_K : $\sigma_{NF} = S_K$. Відповідно, співвідношення напружень σ_N і S_K відображає поточний параметер механічної стабільності напруженого стану P_N :

$$P_N = S_K/\sigma_N. \quad (1)$$

Фізична сутність параметра P_N полягає в тому, що він відображає міру стабільності напруженого стану по відношенню до стану руйнування тіла, а з технічного боку вираз (1) є ні чим іншим, як коефіцієнтом запасу міцності навантаженого тіла під напруженням

σ_N , в якому замість широко вживаного в інженерній практиці показника $\sigma_{0,2}$ чи σ_B фігурує істинне напруження руйнування S_K . За визначенням $\sigma_N < S_K$ і $P_N > 1$. При $\sigma_N = S_K$ маємо $P_N = 1$ — критичний механічний стан напруження, тобто руйнування. Отже, за визначенням такий вид механічної стабільності, як механічна стабільність напружено деформованого стану (НДС) навантаженого тіла не може бути нижче критичного $P_C = 1$ навіть у однорідних полях напружень (ОПН). В умовах суто неоднорідних полів напружень (НПН), наприклад, за вигину, кручення або поблизу тріщин чи інших концентраторів напружень (КН) умова $P_N \geq 1$ ще більше підсилюється, тому що номінальні (середні) напруження σ_N можуть бути набагато нижчими за локальні σ_L . А оскільки руйнування у своєму зародковому стані є суто локальним явищем [1, 2], то слід розрізняти номінальні P_N по (1) і локальні P_L параметри механічної стабільності напруженого стану:

$$P_L = S_K / \sigma_L . \quad (2)$$

Але для металів, де у показника міцності є межа плинності $\sigma_{0,2}$, можливий інший вид механічної стабільності — стабільність механічних властивостей: міцності та пластичності. Другий вид механічної стабільності можливий тільки для металевих матеріалів і впливає з першого у окремому випадку, коли номінальне σ_N (або локальне σ_L) напруження перетинає рівень межі плинності $\sigma_{0,2}$ і стабільно підтримує міцність металу у стані пластичної деформації. Для другого виду стабільності відведено обмежений інтервал напружень між двома показниками міцності — $\sigma_{0,2}$ і S_K , де виникає додаткова міцність деформаційного зміцнення металу, що доповнює базову міцність, яку позначимо B_r :

$$B_r = S_K / \sigma_{0,2} . \quad (3)$$

Теоретичні основи механічної стабільності на підґрунті уявлень локального підходу щодо процесу руйнування детально розроблено в [3]. В даній роботі механічна стабільність розглядається як стабільність міцності у термінах, зручних для практичного застосування.

Параметер P_N механічної стабільності напруження σ_N по (1) може частково перекриватися з показником B_r по (3), але фізичні сутності їх істотно відрізняються між собою: P_N відмічає інтервал механічної стабільності напруженого стану в межах напружень від σ_N до S_K у чисто пружньому відліку, що прийнятно лише для крихких матеріалів, тоді як B_r , будучи для металів лише частиною величини P_N , відображає механічну стабільність міцності металу у стані активного пластичного деформування в межах двох фіксованих рубежів міцності — базової $\sigma_{0,2}$ і граничної S_K . Співвідношення цих

показників дає кількісний вимір особливої властивості — показник B_r механічної стабільності міцності та пластичності одночасно, який слугує резервом міцності металу в особливих умовах навантаження, коли в ході пластичної деформації в структурі металу постійно виникають зародкові тріщини (ЗТ) [1, 2], з яких за певних умов (при $\sigma_N = S_K$ або $\sigma_L = S_K$) сформується джерело руйнування [2].

Постає задача — з'ясувати як співвідношення показників B_r і P_N впливає на стан крихкості у металах, що є метою даної роботи. Але перед тим треба відмітити деякі особливості показника стабільності міцності B_r як специфічної механічної властивості металу.

Завдяки тому, що в формулі (3) замість показника напруження σ_N представлений показник механічної властивості $\sigma_{0,2}$, то величина B_r за своїм фізичним змістом переходить від категорії показника стабільності напруженого стану (типу P_N по (1)) до показника нової властивості металу B_r , яка відображає стабільність міцності в умовах пластичної деформації, коли $\sigma_{NF} \geq \sigma_{0,2}$. Можна відмітити, що ця властивість, — механічна стабільність міцності та пластичності металів, — здавна відома технологам гарячого та холодного оброблення металів у процесах кування, прокатки та холодного волочіння дроту, коли міцність металу зберігається під час інтенсивної деформації вище межі плинності $\sigma_{0,2}$. Саме від величини резерву стабільності міцності B_r залежить ступінь можливої деформаційної формозміни заготовки під захистом властивості механічної стабільності міцності металу (B_r) в інтервалі між базовою ($\sigma_{0,2}$) і граничною (S_K) міцностями металу.

Надалі властивість стабільності міцності та пластичності B_r для скорочення будемо називати резервом стабільності міцності або просто резервом міцності.

Але в конструкційному застосуванні металів у показника B_r інша роль — в зоні стабільності міцності може виникати або стабільно існувати будь-яка неоднорідність НДС, якщо вона не перевищує резерв стабільності міцності B_r . Тим самим показник резерву стабільності міцності B_r відіграє вирішальну роль у захисті елементів конструкцій (ЕК) від крихкого руйнування в тих видах навантаження, де має місце різка неоднорідність НДС — під час вигину, кручення, в ЕК, що містять в собі конструктивні КН або набуті дефекти — тріщини.

За таку корисну функцію характеристики B_r автори робіт [4–7] назвали цю властивість металу зламостійкістю. Яким чином реалізується захисна роль цієї властивості в крицях мова піде нижче, але слід зазначити, що саме нестабільність міцності природньо крихких матеріалів (скло, граніт, тощо) є характерним проявом їхньої особливої механічної поведінки в умовах неоднорідних видів навантаження (вигин, кручення, наявність КН, тріщини). Безсумнівно, що добре відому крихкість, а по-суті таку екстремально ви-

соку нестабільність міцності викликано відсутністю резерву стабільності міцності: $B_r = 1$ через відсутність у крихких матеріалів характеристики межі плинності $\sigma_{0,2}$.

З усього вищенаведеного випливає, що два розглянуті вище види механічної стабільності P_N (1) і B_r (3) описують різні предмети стабільності: P_N є параметром, що характеризує стабільний (без руйнування) напружений стан навантаженого тіла, B_r — показником особливої властивості металу — резерву стабільності його міцності в умовах пластичного деформування. Порушення стабільності напруженого стану ($P_N = 1$) означає руйнування тіла; порушення стабільності міцності ($B_r = 1$) означає крихкість матеріалу.

2. РОЛЬ РЕЗЕРВУ МЕХАНІЧНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ МІЦНОСТІ МЕТАЛЕВИХ СТОПІВ У НЕОДНОРІДНИХ СИЛОВИХ ПОЛЯХ

Головною особливістю напруженого стану в неоднорідних силових полях (НСП) є те, що в умовах НСП різко розрізняється роль номінальних (σ_N) і локальних (σ_L) напружень у відповідності з різною фізичною сутністю двох граничних явищ у металі — плинності та руйнування: плинність ($\sigma_{0,2}$) зумовлено статистично усередненою структурою металу, а руйнування (S_K) — зародковими тріщинами (ЗТ) суто локального походження на окремих елементах структури металу — межах зерен, на розломах включень твердої фази та ін. [2, 8]. Тому локальний і номінальний параметри механічної стабільності для напруження руйнування S_K (P_L і P_N) будуть відрізнятися відповідно до ступеня неоднорідності НДС в зоні КН. В такому разі умова локального руйнування по (2) $P_L = 1$ може відбутися за будь-якого параметра P_N , більшого чи меншого за 1, в тому числі і при $P_N > B_r$, тобто при $\sigma_{NF} < \sigma_{0,2}$.

Руйнування металічного виробу з КН за середніх (номінальних) навантажень нижче межі плинності металу $\sigma_{0,2}$, тобто в пружній області, є аналогом прояву нестабільності міцності для природньо крихкого матеріалу в неоднорідних НДС. Але в металах ця нестабільність стає критичною (або практично відчутною) лише в тому випадку, коли гранична міцність руйнування σ_{NF} під дією КН падає нижче $\sigma_{0,2}$ металу. Це означає, що насправді в металевих стопах ми маємо справу не з крихкістю металів, а з крихкою поведінкою металевого тіла в неоднорідних НДС, якщо розмах неоднорідності напружень в момент руйнування перевищує резерв стабільності міцності B_r :

$$S_K / \sigma_{NF} > S_K / \sigma_{0,2} . \quad (4)$$

Як бачимо, пластичність як властивість металу (ψ_K) не фігурує в умові переходу до крихкої поведінки тіла з КН; тому в металах

крихкість в умовах НСП означає не втрату пластичності (ψ_K), а нестачу достатнього для даного виду НСП резерву стабільності міцності B_r . Тому цілком зрозуміло, що у природньо крихких матеріалів (скло, граніт), у яких просто немає резерву стабільності міцності ($B_r = 1$), характерною особливістю їхньої поведінки під навантаженням є прояв цілковитої нестабільності міцності під час вигину зразків або нанесення надрізів твердим інструментом.

Зі співвідношення (4) видно, що в умовах НСП стабільність міцності руйнування металу S_K зникає, коли тривка здатність σ_{NF} зразка з КН стає меншою, ніж межа плинності $\sigma_{0,2}$; отже критерієм крихкості зразка з КН природньо прийняти умову

$$\sigma_{NF} = \sigma_{0,2}. \quad (5)$$

На рисунку 1 показано, що умова (5) відмічає критичну температуру в'язко-крихкого переходу для зразка з КН, якій відповідає критичний рівень міцності металу $\sigma_{0,2} = \sigma_{0,2C}$ і критичний показник

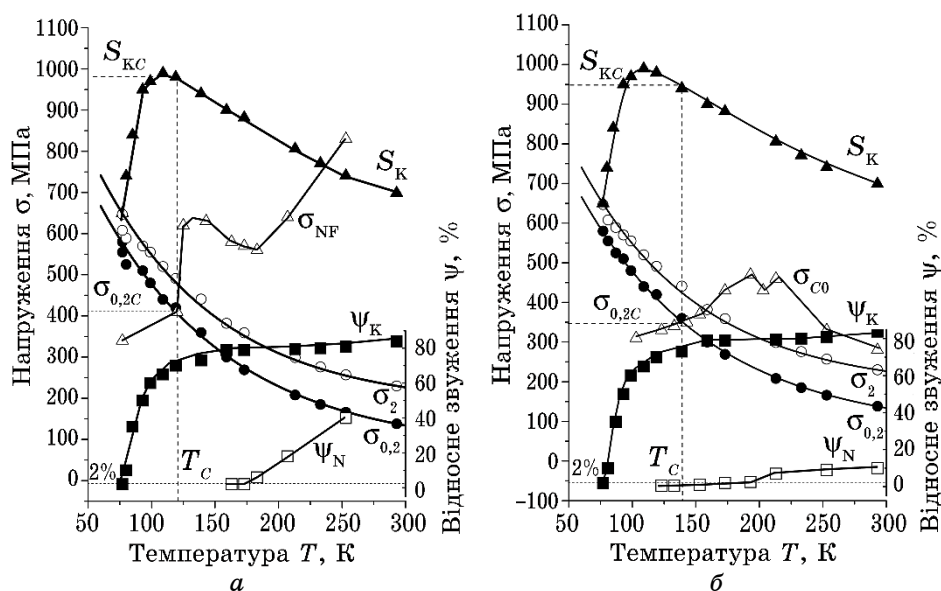


Рис. 1. Температурні залежності механічних властивостей α -Fe для гладких зразків ($\sigma_{0,2}$, ψ_K , S_K) і зразків з концентраторами напружень: *a* — зразки з кільцевим надрізом за руйнування на розтяг (σ_{NF} , ψ_N); *б* — зразки з тріщиною втоми за триточкового навантаження (σ_{C0} , ψ_N).

Fig. 1. Temperature dependence of the mechanical properties of α -Fe for unnotched specimens ($\sigma_{0,2}$, ψ_K , S_K) and specimens with stress raisers: *a* — specimens with an annular notch at tensile test fracture (σ_{NF} , ψ_N); *б* — specimens with a fatigue crack under three-point loading (σ_{C0} , ψ_N).

зламостійкості $B_r = B_{rc}$. Отже, для позначення критичного стану переходу зразка з КН до крихкості (тобто втрати стабільності міцності) достатньо лише одного параметра — критичного резерву міцності (зламостійкості) B_{rc} :

$$B_{rc} = S_{Kc} / \sigma_{0,2c} . \quad (6)$$

За температури $T > T_C$ маємо $B_r > B_{rc}$ і $\sigma_{NF} > \sigma_{0,2}$ — стабільність міцності σ_{NF} ; за $T < T_C$ — навпаки, нестабільність граничної міцності, крихкість.

Два споріднених параметра стабільності — стабільність напруженого стану P_N по (1) і резерв стабільності міцності B_r по (3), що запобігає крихкості металу, характеризують процес руйнування у всій необхідній повноті, як з боку напруженого стану (P_N), так і з боку властивостей металу ($\sigma_{0,2}$, S_K , B_r). Тому системну аналізу ефективності окрихчувальної дії КН на різних металевих стопах доцільно здійснювати саме на цих показниках процесу руйнування.

В момент руйнування при σ_{NF} під дією КН показник $P_N > 1$ відображає ефективність α_{ef} руйнувальної дії КН для металу з певним рівнем B_r :

$$\alpha_{ef} = S_K / \sigma_{NF} . \quad (7)$$

Нижче ми будемо користуватися саме показниками α_{ef} і B_r для аналізу ефективності окрихчувальної дії КН на прикладі криць різного класу міцності.

3. ВПЛИВ РЕЗЕРВУ СТАБІЛЬНОСТІ МІЦНОСТІ B_r НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РУЙНУВАЛЬНОЇ ДІЇ КН α_{ef}

Вибір двох вищезгаданих механічних показників (B_r і α_{ef}) для аналізу природи окрихчувальної дії КН у металевих виробах виглядає цілком доречним і обґрунтованим, оскільки в такій постановці задачі має місце протистояння двох співрозмірних, але протилежних по своїй природі властивостей — властивості спротиву руйнуванню металу у неоднорідних полях напружень (B_r) і здатності КН за рахунок сили, закладеної в коефіцієнті концентрації напружень α_σ [9, 10], здолати наявний резерв стабільності міцності металу B_r . Нагадаємо, що в металевих стопах завдяки присутності резерву міцності B_r ця сила КН різко знижується від ідеального Нейберового показника α_σ до ефективної діючої сили КН — α_{ef} по (7), яка залежить не лише від α_σ , а й від резерву міцності B_r .

Співвідношення властивостей металу (B_r) і ефективної сили концентратора напружень стосовно цього ж металу (α_{ef}) повністю контролюють характер руйнування тіла з КН: при $\alpha_{ef} < B_r$ руйнування

в'язке, оскільки при $\sigma_{NF} > \sigma_{0,2}$ маємо стабільність базової міцності; при $\alpha_{ef} > B_r$ руйнування крихке, тому що при $\sigma_{NF} < \sigma_{0,2}$ — нестабільність міцності руйнування (S_K); при $\alpha_{ef} = B_r$ — в'язко-крихкий перехід ($\sigma_{NF} = \sigma_{0,2} = \sigma_{0,2C}$) при $T = T_C$ (рис. 1). Отже, критерієм крихкості для будь-якого тіла з КН (в тому числі і з тріщиною) є не лише умова (5) $\sigma_{NF} = \sigma_{0,2}$, але також її еквіваленти: $B_r = B_{rc}$ (6) і

$$\alpha_{ef} = B_r. \quad (8)$$

Критерій (8) визначає критичну для даного металу ефективність КН α_{efc} через критичний показник резерву стабільності міцності B_{rc} для температури в'язко-крихкого переходу T_C (рис. 2).

При $T > T_C$ маємо $B_r > \alpha_{ef}$, тому що $\sigma_{0,2} < \sigma_{NF}$ (рис. 2). Це означає, що захисні (від крихкості) можливості металу (B_r) переважають руйнівальні можливості КН (α_{ef}), і метал зберігає стабільність своєї міцності ($\sigma_{0,2}$) у зразку з КН. Нижче T_C , навпаки, $\alpha_{ef} > B_r$, відповідно, $\sigma_{NF} < \sigma_{0,2}$, під дію КН метал втрачає стабільність своєї міцності, що означає перехід до крихкої поведінки зразка з КН (рис. 2).

Отже, критичне значення резерву стабільності міцності стає B_{rc} вузловим чинником у проблемі переходу металу від в'язкого до

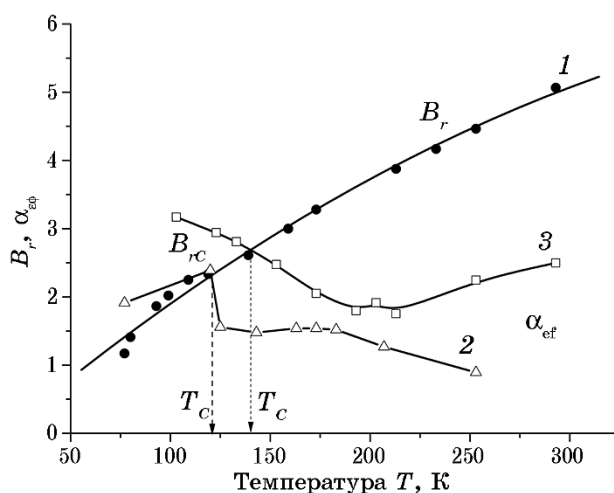


Рис. 2. Температурні залежності показників резерву стабільної міцності B_r (лінія 1) і ефективності руйнівальної дії КН α_{ef} для зразків α -Fe (за рис. 1): 2 — кільцевий надріз, розтяг; 3 — тріщина втоми (вигин) (розраховано за даними S_K , $\sigma_{0,2}$, σ_{NF} (σ_{C0}) по [11]).

Fig. 2. Temperature dependences of indexes of both the strength stability margin, B_r (line 1), and the 'destructive effectiveness' of the SRs, α_{ef} , for α -Fe specimens (by Fig. 1): 2—annular notch at tensile test; 3—fatigue crack under three-point bending (calculated according to the data of S_K , $\sigma_{0,2}$, σ_{NF} (σ_{C0}) by [11]).

крихкого стану, де безпосередньо стикаються у прямій протидії механічні властивості металу (міцність і пластичність у параметрі B_r) і механічні руйнівальні чинники напруженого стану (ефективність руйнівальної дії КН α_{ef}).

Подальша задача полягає у системній аналізі основних чинників, що впливають на параметер критичного резерву міцності B_{rc} для криць різного класу міцності. Для цього автори скористалися результатами експериментальних досліджень з доступних джерел інформації, де наведено дані, потрібні для розрахунку величини α_{ef} (7) і B_r (3) в широкому інтервалі температур для зразків з КН і без КН [11, 12] (табл. 1). Результати випробувань для криць з різним рівнем міцності ($\sigma_{0,2} \approx 150\text{--}1600$ МПа) і резервом стабільності міцності (РСМ) ($B_r \approx 1,5\text{--}5,0$) на зразках з кільцевим надрізом за розтягування (п.п. 1–7 табл. 1 по [12]) або на призматичних балках на триточковий вигин з наведеною тріщиною (п.п. 8–16 по [11]) представлено на рис. 3.

Ефективність α_{ef} руйнівальної дії тріщин (лінія 2 рис. 3) помітно вище за α_{ef} для кільцевих надрізів (лінія 1 рис. 3), але ця різниця нівелюється для високоміцних малопластичних криць ($B_r \approx 1,5\text{--}2,0$). В цілому зростання B_r супроводжується підвищенням B_{rc} , особливо на зразках з тріщинами, але для кільцевих надрізів ця тенденція помітна лише для криць з надлишково високою пластичністю, тобто для низькоміцних криць ($B_r \approx 5,0$, $\sigma_{0,2} \approx 150$ МПа), в той час як у конструкційних криць високої міцності ($B_r \leq 2,5$, $\sigma_{0,2} \approx 1000\text{--}1500$ МПа) руйнівальна ефективність надрізів залишається невисокою ($\alpha_{ef} \leq 1,5$), очевидно, внаслідок недостатньо великого рівня концентрації напружень α_σ в порівнянні з тріщинами.

З наведеної аналізи видно, що резерв механічної стабільності міцності B_r у взаємодії з руйнівальною ефективністю КН (α_{ef}) дійсно відіграє регульовальну роль у окрихченні металу в умовах НСП через критичне значення резерву стабільності міцності B_{rc} . В зв'язку з цим виникає потреба більш детального розгляду цієї проблеми під кутом зору впливу виду НДС на ефективність руйнівальної дії КН (α_{ef}), що є задачею подальших досліджень.

4. ВИСНОВКИ

Стабільність механічного стану в металах означає стабільність їхніх основних механічних властивостей — міцності та пластичності в умовах неоднорідних НДС. Рівень механічної стабільності визначається показником резерву стабільності міцності B_r (зламостійкості), який для конструкційних матеріалів є повноцінним замінником властивостей пластичності.

Поняття механічної стабільності металу набуває принципово важливого значення для визначення поняття крихкості матеріалів

ТАБЛИЦЯ 1. Критичні показники крихкого стану криць під час випробувань на холодостійкість (п.п. 1–7 за даними [11], п.п. 8–16 по [12]).

TABLE 1. Critical parameters of brittle state of steels during cold resistance tests (rows 1–7—according to [11], rows 8–16—according to [12]).

№	Криця, оброблення	Тип КН	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{0,2c}$, МПа	B_r	B_{rc} (α_{efc})	T_c , К
1	ст.30	Кільцевий надріз, розтяг	350	800	2.97	1.31	77
2	30ХГСА (г.в. 2000С)		1400	1600	1.58	1.50	150
3	30ХГСА (ізот. г. 3000С)		1500	1600	1.80	1.45	130
4	30ХГСНА (ізот. г. 2000С)		1450	1700	1.77	1.57	83
5	30ХГСНА (ізот. г. 3000С)		1170	1400	2.10	1.36	77
6	10Х2СВА		1600	1700	1.83	1.59	160
7	У8 (г.в. 4000С)		1180	1300	1.58	1.54	200
8	α -Fe	Вигин балки з тріщиною	140	350	5.0	2.77	140
9	У8 (відп.)		340	450	2.8	2.15	220
10	ст.3сп		160	400	3.1	2.10	147
11	10ХСНД		310	420	2.9	2.5	180
12	АК35		1027	1100	2.3	2.0	180
13	12ХН2МДФ ЗШ (лег. Бором В = 0.0)		640	700	1.97	1.81	173
14	12ХН2МДФ ЗШ (лег. Бором В = 0.001)		640	820	1.80	1.46	175
15	12ХН2МДФ ЗШ (лег. Бором В = 0.0022)		640	977	2.00	1.50	65
16	12ХН2МДФ ЗШ (лег. Бором В = 0.004)		650	968	2.17	1.67	81

Примітки: г.в. — гартування + відпуск; ізот. г. — ізотермічне гартування, відп. — відпал, ЗШ — зварний шов, В — легування Бором.

у матеріалознавстві: крихкість — це нестабільний механічний стан матеріалу, який проявляється у нестабільності його міцності в умовах неоднорідних НДС через відсутність (у крихких матеріалів) або локальне вичерпання (у металевих стопах) резерву міцності B_r — властивості зламостійкості.

Для металевих матеріалів вузлове значення набуває критичний показник властивості зламостійкості B_{rc} , за якого відбувається перехід від стабільного до нестабільного механічного стану під дією КН (при $T = T_c$).

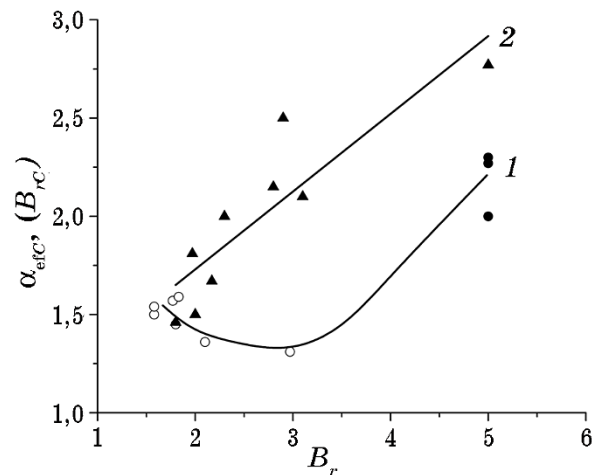


Рис. 3. Залежність показника критичного резерву стабільності міцності криць B_{rc} (α_{efc}) під час переходу до стану крихкості ($T = T_c$) від наявного резерву міцності B_r при $T = 300$ К за даними табл. 1: 1 — розрив за розтягування зразків з кільцевим надрізом (\circ — п.п. 1–7 по [12], \bullet — по [11]); 2 — руйнування зразків з тріщиною за вигину (п.п. 8–16 по [11]).

Fig. 3. Dependence of the index of critical strength stability margin of steels, B_{rc} (α_{efc}), at transition to the state of brittleness ($T = T_c$) on the current strength margin, B_r , at $T = 300$ K, according to the data of Table 1: 1—break at tension of specimens with an annular notch (\circ —lines 1–7 by [12], \bullet —by [11]); 2—fracture of specimens with a crack at bending (lines 8–16 by [11]).

В межах резерву стабільної міцності B_r концентратор напружень як джерело неоднорідності НДС втрачає свою руйнівальну ефективність, закладену в Нейберовому коефіцієнті концентратора напружень α_σ і реалізує істотно зменшену ефективність локальних перенапружень α_{ef} відповідно до критичної величини резерву міцності B_{rc} .

Детальна аналіза закономірностей впливу на ключовий параметер крихкого стану металів B_{rc} головних показників механічних властивостей і основних чинників НДС стає нагальною задачею в подальшому розвитку концепції механічної стабільності металів як стабільності їхніх механічних властивостей.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. A. N. Stroh, *Proc. Roy. Soc. London A*, **223**, No. 1154: 404 (1954).
2. Ю. Я. Мешков., С. А. Котречко, А. В. Шиян. *Механическая стабильность металлов и сплавов* (Киев: Наукова думка: 2014).
3. С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, *Проблемы прочности*, № 2: 55 (2009).

4. В. Н. Грищенко, Ю. Я. Мешков, Ю. А. Полушкин, А. В. Шиян, *Металлофиз. новейшие технол.*, **37**, № 7: 961 (2015).
5. Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, *Сталь*, № 4: 46 (2018).
6. Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, *Сталь*, № 12: 52 (2019).
7. А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков, *Металлофиз. новейшие технол.*, **41**, № 6: 775 (2019).
8. Ю. Я. Мешков, Г. А. Пахаренко. *Структура металла и хрупкость стальных изделий* (Киев: Наукова думка: 1985).
9. Р. Петерсон. *Коэффициенты концентрации напряжений* (Москва: Мир: 1977) (пер. з англ.).
10. Г. Н. Савин, В. И. Тульчин. *Справочник по концентрации напряжений* (Киев: Вища школа: 1976).
11. П. Ф. Кошелев, С. Е. Беляев, *Прочность и пластичность конструкционных материалов при низких температурах* (Москва: Машиностроение: 1967).
12. А. В. Шиян, *Физическая природа локального напряжения хрупкого разрушения сталей и сварных швов* (Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук) (Киев: Институт металлофизики АН УССР: 1990).

REFERENCES

1. A. N. Stroh, *Proc. Roy. Soc. London A*, **223**, No. 1154: 404 (1954).
2. Yu. Ya. Meshkov, S. A. Kotrechko, and A. V. Shiyan, *Mekhanicheskaya Stabilitnost' Metallov i Splavov* (Kiev: Naukova Dumka: 2014) (in Russian).
3. S. A. Kotrechko and Yu. Ya. Meshkov, *Problemy Prochnosti*, No. 2: 55 (2009).
4. V. N. Grishchenko, Yu. Ya. Meshkov, Yu. A. Polushkin, and A. V. Shiyan, *Metallfiz. Noveishie Tekhnol.*, **37**, No. 7: 961 (2015) (in Russian).
5. Yu. Ya. Meshkov and A. V. Shiyan, *Stal'*, No. 4: 46 (2018) (in Russian).
6. Yu. Ya. Meshkov and A. V. Shiyan, *Stal'*, No.12: 52 (2019) (in Russian).
7. V. Shiyan and Yu. Ya. Meshkov, *Metallfiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 6: 775 (2019) (in Russian).
8. Yu. Ya. Meshkov and G. A. Pakhareno, *Stryktura Metalla i Khrupkost' Stal'nykh Izdeliy* (Kiev: Naukova Dumka: 1985) (in Russian).
9. R. Peterson, *Koeffitsienty Kontsentratsii Napryazheniy* (Moskva: Mir: 1977) (Russian translation).
10. G. N. Savin and V. I. Tul'chin, *Spravochnik po Kontsentratsii Napryazheniy* (Kiev: Vyshcha Shkola: 1976) (in Russian).
11. P. F. Koshelev and S. E. Belyaev, *Prochnost' i Plastichnost' Konstruktsionnykh Materialov pri Nizkikh Temperaturakh* (Moskva: Metallurgiya: 1967) (in Russian).
12. A. V. Shiyan, *Fizicheskaya Priroda Lokalnogo Napryazheniya Khrupkogo Razrusheniya Staley i Svarnykh Shvov* [The Physical Nature of the Local Stress of Brittle Fracture of Steels and Welds] (Thesis of Dissert. for Cand. Phys.-Math. Sci.) (Kiev: Institute for Metal Physics, Academy of Sciences of Ukr.SSR: 1990) (in Russian).