

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

Міцність та її якість у конструкційних матеріалах

Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, О. В. Зацарна

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

У статті викладено основи нового підходу до аналізу проблеми крихкості виробів з конструкційних сталей, що несуть службове силове навантаження в умовах дії концентраторів напружень (КН) або тріщин. На прикладі результатів випробувань зразків з КН на одновісне розтягнення та триточковий згин показано, що значення характеристик пластичності (ψ_K) не дозволяють однозначно встановити поріг крихкості для даного виробу. З цією метою запропоновано доповнити комплекс механічних характеристик металів і сплавів параметром якості міцності B_{rNF} , прив'язаним до величини тримкості σ_{NF} виробу або зразка з КН та таким, що визначає поріг крихкості при критичному рівні $B_{rNF} \leq 1$, що відповідає критерію крихкості згідно умови $\sigma_{NF} \leq \sigma_{0,2}$. Показано, що параметр якості міцності B_{rNF} є більш інформативним порівняно з традиційними механічними характеристиками пластичності і в'язкості. Він однозначно пов'язаний з умовами навантаження даного виробу та може бути визначений розрахунковим способом на основі даних базових механічних характеристик металу, що виключає проведення складних і дороговартісних натурних випробувань виробу.

Ключові слова: міцність, якість міцності, деформаційна стійкість (злаомстійкість), концентратори напружень, поріг крихкості, тримкість.

The principles of a new approach to the problem of brittleness of structural steel products subjected to loading in presence of stress concentrators (SC) or

Corresponding author: Yuriy Yakovych Meshkov
E-mail: meshkov0305@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, A. V. Shiyana, and O. V. Zatsarna, Strength and Its Quality in Structural Materials, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 7: 1029–1040 (2020) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.42.07.1029](https://doi.org/10.15407/mfint.42.07.1029).

cracks are outlined in this article. The results of testing to uniaxial tension and three-point bending, as example, the samples with SC show that the ductility characteristics (ψ_K) do not allow the unambiguous determining of the fragility threshold. It is proposed to additionally introduce a strength quality parameter B_{rNF} to the complex of mechanical characteristics of metals and alloys. The strength quality parameter B_{rNF} relates to the bearing capacity σ_{NF} of a product or specimen with SC. At a critical value of $B_{rNF} \leq 1$, it indicates the brittleness threshold and meets the criterion of brittleness under condition of $\sigma_{NF} \leq \sigma_{0,2}$. As shown, the B_{rNF} parameter is more informative than the traditional mechanical characteristics of ductility and toughness. It is uniquely relates to the loading conditions of such products and can be obtained by calculations based on the data of basic mechanical characteristics of metals, which eliminates complicated and expensive full-scale tests of products.

Key words: strength, quality of strength, deformation resistance (break resistance), stress concentrators, fragility threshold, bearing capacity.

(Отримано 11 вересня 2019 р.; остаточн. варіант — 25 січня 2020 р.)

1. ВСТУП. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Головною ознакою придатності матеріалу для виробу, який витримує певне силове навантаження, є показник міцності, наприклад, умовна границя плинності ($\sigma_{0,2}$) конструкційної сталі (КС). Проте, лише одного цього показника недостатньо для визначення придатності КС для використання у виробках зі складними видами навантажень, де присутні різкі неоднорідності напружено-деформованого стану (НДС), які утворюються концентраторами напружень (КН) або при деформації згином тощо. У таких випадках конструкційна міцність матеріалів в умовах НДС виробу σ_{NF} — тримкість елементу конструкцій (ЕК), може суттєво відрізнятись від міцності самого матеріалу: $\sigma_{NF} > \sigma_{0,2}$ або $\sigma_{NF} < \sigma_{0,2}$.

Ступінь реалізації міцності металу $\sigma_{0,2}$ в НДС виробу σ_{NF} природно відображається співвідношенням $\sigma_{NF}/\sigma_{0,2}$, яке раніше в роботах [1, 2] було використано як характеристику деформаційної стійкості (зламостійкості) виробу B_{rNF} :

$$B_{rNF} = \sigma_{NF}/\sigma_{0,2}, B_{rC0} = \sigma_{C0}/\sigma_{0,2} \quad (1)$$

аналогічно до характеристики деформаційної стійкості (зламостійкості) металу B_r :

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

де σ_{C0} — номінальне напруження руйнування по ослабленому перерізу зразка — аналог σ_{NF} , B_{rC0} — аналог B_{rNF} в умовах згину, S_K —

істинне напруження в момент руйнування гладкого зразка у разі випробувань на одновісний квазістатичний розтяг.

Величину характеристики B_{rNF} або B_{rc0} можна розглядати як справжній показник якості міцності $\sigma_{0,2}$, оскільки він напрямую показує реальну конструкційну важливість величини $\sigma_{0,2}$ в умовах даного виробу.

Ефективну реалізацію міцності виробу в умовах складного НДС забезпечують за рахунок використання додаткових механічних властивостей металу — пластичності та в'язкості, кількісні показники яких є обов'язковими нормативними вимогами до КС [3, 4]. Проте, ані характеристики пластичності (ψ_K — показник пластичності в момент руйнування зразка при випробуваннях на одновісний розтяг [3]), ані ударної в'язкості (KCV , KCU) [4] не відображають напрямую якості міцності в сенсі показника B_{rNF} або B_{rc0} за (1), хоча самі по собі ці властивості звісно впливають на конструкційну якість міцності, не допускаючи крихкості виробу.

У цій роботі поставлена задача проаналізувати основні закономірності впливу запасу пластичності сталей різного рівня міцності на показники її конструкційної якості за (1) з метою виявити та показати практичну користь використання самої концепції якості міцності.

2. МАТЕРІАЛИ, МЕТОДИКИ

Поставлена задача вирішується на основі раніше одержаних авторами експериментальних даних [2, 6–11] з залученням доступних для аналізу опублікованих результатів інших авторів [12].

Постановка задачі дослідження полягає в тому, щоб відслідкувати зміни показника тримкості σ_{NF} при руйнуванні зразка з певним видом КН для сталей різного рівня міцності $\sigma_{0,2}$, який обумовлений їх хімічним складом та термообробкою [2, 6–11].

Проводили аналіз результатів випробувань зразків з надрізами за двох умов навантаження — розтяг з кільцевим надрізом [9, 11], який утворює сильний стиск пластичної деформації в області надрізу, та триточковий згин зразка з надрізом, де жорсткість НДС значно менша. У першому випадку тримкість зразка σ_{NF} значно перевищує $\sigma_{0,2}$, що призводить до збільшення показника якості міцності за (1), у другому випадку — умовна величина номінального напруження руйнування по ослабленому перерізу зразка σ_{c0} (аналог σ_{NF} у разі випробувань на тріщиностійкість [5]) та конструкційна якість міцності B_{rc0} за (1) суттєво менша, ніж при розтягу [11].

3. МІЦНІСТЬ ТА ЯКІСТЬ МІЦНОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ

Оптимізація комплексу механічних властивостей з метою забезпе-

чення міцності необхідної конструкційної якості традиційно є головною задачею матеріалознавства та інженерної практики. Оскільки кількісним індикатором такої властивості є співвідношення $\sigma_{NF}/\sigma_{0,2}$, тобто показник B_{rNF} за (1) є єдиним показником конструкційної якості металу відносно даного виду НДС виробу. Звісно, у кожного типу зразків в умовах певного виду НДС цей показник різний, тому мати інформацію про величину B_{rNF} чи B_{rC0} для кожного виробу або критично важливого ЕК надзвичайно важливо для інженерної практики, та врешті-решт дотепер це питання вирішували шляхом проведення натурних випробувань виробів або їхніх елементів.

У перспективі можна очікувати певного полегшення у вирішенні цього складного питання за рахунок розвитку методології аналітичного матеріалознавства, коли лабораторні методи атестації механічних властивостей металів шляхом випробовування спеціальних зразків можна буде замінити розрахунковими методами.

До того ж, використання такої механічної характеристики як конструкційна якість міцності B_{rNF} (B_{rC0}) робить зайвою цілу низку традиційних механічних випробувань, які менш інформативні з інженерної точки зору. Наприклад, величина ударної в'язкості (KCV) та температура крихкості T_C^{KCV} [6], яку при цьому визначають, жодним чином не пов'язані з величиною тримкості зразка, що випробовується. Але, якщо при випробуваннях на динамічний згин зразка з надрізом або тріщиною фіксувати не енергію руйнування, а навантаження руйнування P_C , то умовне напруження σ_{C0}^{KCV} , усереднене по робочому перерізу зразка F , може бути аналогом розрахункової тримкості, тобто відображати конструкційну якість міцності металу:

$$\sigma_{C0}^{KCV} = P_C/F. \quad (3)$$

Вочевидь, що для всіх видів навантажень зразків з КН саме випробовування на згин є найбільш показовими для оцінки конструкційної якості міцності, оскільки величина умовної тримкості при згині завжди нижча, ніж для зразка з КН при його розтязі $\sigma_{C0} < \sigma_{NF}$ [11]. Судячи з усього, для повноцінної атестації механічних властивостей достатньо використовувати два найпростіших види випробувань — на розтяг гладких зразків з визначенням базових механічних властивостей ($\sigma_{0,2}$, σ_B , S_K , ψ_K) та на статичний згин зразків з тріщиною втомі для визначення σ_{C0} в інтервалі температур експлуатації [5].

Для визначення конструкційної якості міцності в умовах найжорсткіших вимог до службових можливостей металу (згин балки з КН) одержані показники B_{rNF} (B_{rC0}) можуть бути розглянуті як більш інформативні порівняно з традиційними показниками плас-

тичності (ψ_K), в'язкості (KCV), тріщиностійкості (KIC) або частки крихкої складової на зламі зразка [4, 5].

Таким чином, ані пластичність, ані ударна в'язкість не гарантують високої конструкційної придатності високоміцних КС при випробування з КН, оскільки не мають однозначних показників критичного переходу до крихкого руйнування зразка чи виробу, який досліджується. Тому додаткова атестація сталі на показник конструкційної якості її міцності (B_{rNF} чи B_{rC0}) може бути доречною та мати практичну користь.

4. ВПЛИВ РІВНЯ МІЦНОСТІ $\sigma_{0,2}$ НА ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ПЛАСТИЧНОСТІ ψ_K З ТРИМКІСТЮ σ_{C0} КОНСТРУКЦІЙНОЇ СТАЛІ

Загальновідомим є сприятливий вплив показника пластичності сталі (ψ_K) на тримкість зразків з КН (σ_{NF} , σ_{C0}), однак встановити однозначну кореляцію між величинами ψ_K та σ_{NF} , або σ_{C0} досить проблематично. На рисунку 1 представлено результати обробки даних роботи [11] з дослідження тримкості зразків з тріщиною втоми при випробуваннях на триточковий згин [5].

Звертає на себе увагу різниця в характері поведінки характеристик ψ_K та σ_{C0} зі зміною міцності КС $\sigma_{0,2}$. Показник пластичності ψ_K має широкий інтервал розкиду його значень та має лише невеличку тенденцію до зниження при збільшенні $\sigma_{0,2}$. Цікавим є той факт, що при однаковому рівні міцності, наприклад, $\sigma_{0,2} = 800$ МПа (рис. 1) тримкість $\sigma_{0,2}$ для сталей різного рівня якості коливається в інтервалі значень від 700 МПа (при $\psi_K \approx 30\%$) до 1350 МПа ($\psi_K \approx 55\%$), але при однаковому значенні пластичності (наприклад, $\psi_K \approx 25-30\%$) для КС різних класів міцності ми одержуємо зовсім різний ступінь «передачі» міцності від металу до виробу: $B_{rC0} \approx 1,6-0,6$.

Закономірність зміни тримкості σ_{C0} зразків з надрізом за триточкового згину при збільшенні рівня міцності $\sigma_{0,2}$ різних КС цікава тим, що в інтервалі міцності сталей $\sigma_{0,2} \approx 1000-1200$ МПа тримкість σ_{C0} досягає свого максимуму для даного «виробу» $\sigma_{C0}^{\max} \approx 1400-1600$ МПа. Подальше збільшення міцності сталі $\sigma_{0,2}$ призводить лише до поступового зниження σ_{C0} (рис. 1).

На рисунку 1 лінія, яка відповідає умові $\sigma_{C0} = \sigma_{0,2}$ розділяє область значень ψ_K і σ_{C0} на дві принципово різні області якості міцності: область А, де $\sigma_{C0} > \sigma_{0,2}$ та $B_{rC0} > 1$ (область «в'язкого» руйнування зразка з КН), та область В, де $\sigma_{C0} < \sigma_{0,2}$ та міцність «виробу» менше міцності металу, — це ознака крихкого стану виробу при $B_{rC0} < 1$. З'ясовується, що однакова пластичність ($\psi_K \approx 50\%$) для сталей з низькою міцністю (область А) достатня для в'язкого руйнування виробу, а для високоміцних (область В) навіть більш високі значення пластичності ($\psi_K \approx 50-60\%$) не гарантують захист від крихкого руйнування виробу. Звідси висновок — нормувальні показники

пластичності ψ_K (а, вочевидь, і в'язкості KCV , KCU) для КС різних класів міцності [3, 4] потребують суттєвого коригування з урахуванням показників якості міцності B_{rc0} цих стопів.

Причина настільки неоднозначної ролі показників пластичності (ψ_K) у формуванні тривкості виробу з КН полягає в тому, що під час пластичної деформації металу має місце ефект деформаційного зміцнення стопу, інтенсивність якого регулюється величиною показника деформаційного зміцнення та згідно Холомону [13]:

$$\sigma_e = Ae^n, \quad (4)$$

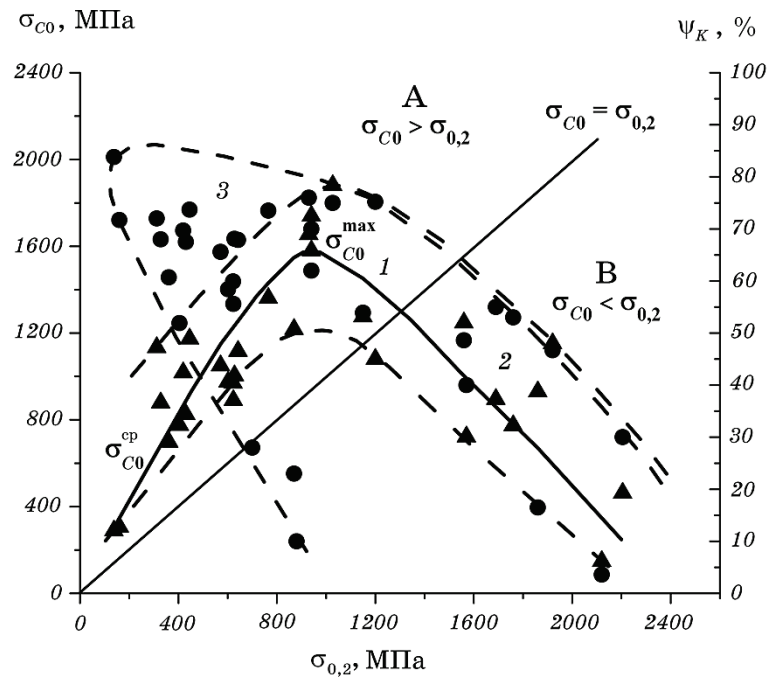


Рис. 1. Тенденції зміни тримкості σ_{c0} при випробуваннях на триточковий згин [5] та пластичності ψ_K зі зміною міцності $\sigma_{0,2}$ КС [11]: 1 — $\sigma_{c0}^{cp} = f(\sigma_{0,2})$ (суцільна лінія); 2 — область зміни σ_{c0} (▲), 3 — область зміни ψ_K (●) (обмежені пунктирними лініями); область А при $\sigma_{c0} > \sigma_{0,2}$ та $B_{rc0} > 1$, область В при $\sigma_{c0} < \sigma_{0,2}$ і $B_{rc0} < 1$; σ_{c0}^{cp} — усереднені значення тримкості; σ_{c0}^{max} — максимальне значення тримкості.

Fig. 1. Trends in the bearing capacity (BC) σ_{c0} for three-point bending [5] and ductility ψ_K tests with a change in the strength $\sigma_{0,2}$ of structural steel (SS) [11]: 1 — $\sigma_{c0}^{cp} = f(\sigma_{0,2})$ (solid line); 2 — region of variation of σ_{c0} (▲), 3 — region of variation of ψ_K (●) (limited by dashed lines); region A with $\sigma_{c0} > \sigma_{0,2}$ and $B_{rc0} > 1$, region B with $\sigma_{c0} < \sigma_{0,2}$ and $B_{rc0} < 1$; σ_{c0}^{cp} — averaged values BC; σ_{c0}^{max} — maximum value of BC.

де σ_e — напруження плинності ступу за величини істинної деформації e , A — константа для даної сталі. Показник деформаційного зміцнення n варіюється в межах від 0 до 0,3 та залежить від міцності та структури сталі [14].

Як витікає з (4) за тримкість у пружно-пластичній області відповідальним є деформаційний приріст міцності ступу, який пов'язаний з посиленням (за рахунок показника ступеню n) впливом пластичності ступу e . Це означає, що для опису закономірності формування величини тримкості σ_{NF} або σ_{C0} одного лише показника пластичності сталі ψ_K недостатньо. Необхідно використовувати інший, комплексний показник, який відображає силову сторону локального деформаційного процесу в зоні дії КН.

5. ВПЛИВ РІВНЯ МІЦНОСТІ $\sigma_{0,2}$ НА ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ЗЛАМОСТІЙКОСТІ ТА ТРИМКОСТІ σ_{NF} КОНСТРУКЦІЙНОЇ СТАЛІ

Інформаційну обмеженість характеристики пластичності щодо якості міцності металу можна подолати. Варто звернути увагу на так званий деформаційний резерв міцності, який на діаграмі розтягу охоплює інтервал напружень в області деформаційного зміцнення ступу вище границі плинності ($\sigma_{0,2}$) і до величини істинного напруження в момент руйнування гладкого зразка S_K . Цей силовий резерв пластичної поведінки зразка в НДС лінійного розтягу раніше в роботах [1, 2, 7–11] було використано як міру особливої механічної властивості металу — показника деформаційної стійкості або зламостійкості B_r .

Величина B_r визначає тримкість σ_{NF} виробу з КН в умовах його в'язкого стану, коли зародок руйнування формується на контурі концентратора, де жорсткість НДС близька до одновісного розтягу, а локальна деформація e досягає максимальної величини, близької до граничного середнього значення деформації в шийці при напруженні руйнування S_K . Саме тому деформаційний резерв міцності B_r відіграє роль контрольного фактора у всьому інтервалі температур в'язкого руйнування зразка з КН, а величина σ_{NF} виявляється прямо пов'язаною з деформаційною стійкістю металу B_r [2, 9–11]. Співвідношення σ_{NF} (або σ_{C0}) з міцністю $\sigma_{0,2}$ відображає аналогічно до B_r деформаційну стійкість виробу з КН, тобто є показником своєрідної конструкційної властивості зламостійкості металу у виробі B_{rNF} (при розтягу) або B_{rC0} (при згині) відповідно до (1).

Логічно припустити, що дані показники механічних властивостей, на відміну від показника пластичності ψ_K , який не має чіткої порогової ознаки переходу в крихкий стан для зразків з КН (рис. 1), дозволяють подолати цю проблему.

На рисунку 2 результати тих самих експериментальних даних

тривкості зразків з КН при випробуванні на триточковий згин σ_{C0} , що і на рис. 1, представлено у поєднанні з показниками деформаційної стійкості (зламостійкості) сталей (B_r) та зламостійкості умовного «виробу» або зразка з КН (B_{rC0}).

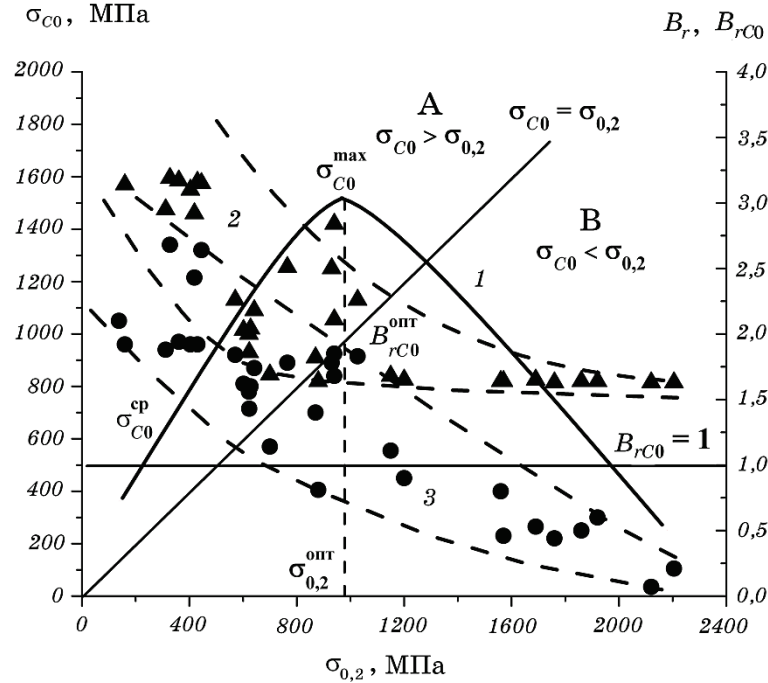


Рис. 2. Тенденції зміни тримкості σ_{C0} , зламостійкості зразка з КН B_{rC0} при випробуванні на триточковий згин [5] та початкової зламостійкості B_r зі зміною міцності $\sigma_{0,2}$ КС [11]: 1 — $\sigma_{C0}^{cp} = f(\sigma_{0,2})$ (суцільна лінія); 2 — область зміни B_r (\blacktriangle), 3 — область зміни B_{rC0} (\bullet) (обмежені штриховими лініями); область А при $\sigma_{C0} > \sigma_{0,2}$ та $B_{rC0} > 1$, область В при $\sigma_{C0} < \sigma_{0,2}$ та $B_{rC0} < 1$; $B_{rC0} = 1$ — перехід до крихкості даного виробу (зразка) за ознакою катастрофічної втрати його міцності; σ_{C0}^{cp} — усереднене значення тримкості; σ_{C0}^{max} — максимальне значення тримкості; $\sigma_{0,2}^{opt}$ — оптимальне значення міцності, B_{rC0}^{opt} — оптимальне значення зламостійкості зразка з КН (оптимальна якість міцності сталі при $\sigma_{0,2}^{opt}$).

Fig. 2. Trends in BC σ_{C0} , break resistance of a specimen with SC B_{rC0} for three-point bending tests [5] and initial break resistance B_r with a change in strength $\sigma_{0,2}$ SS [11]: 1 — $\sigma_{C0}^{cp} = f(\sigma_{0,2})$ (solid line); 2 — region of variation of B_r (\blacktriangle), 3 — region of variation of B_{rC0} (\bullet) (limited by dashed lines); region A with $\sigma_{C0} > \sigma_{0,2}$ and $B_{rC0} > 1$, region B with $\sigma_{C0} < \sigma_{0,2}$ and $B_{rC0} < 1$; $B_{rC0} = 1$ — the boundary of the transition to the fragility of a given product (sample) on the basis of a catastrophic loss of its strength; σ_{C0}^{cp} — averaged values BC; σ_{C0}^{max} — maximum value BC; $\sigma_{0,2}^{opt}$ — optimum strength value, B_{rC0}^{opt} — the optimal value of break resistance of the sample with SC (optimum quality of steel strength at $\sigma_{0,2}^{opt}$).

Чітко видно, що межа переходу до крихкості даного «виробу» за ознакою катастрофічної втрати його міцності в області В за критерієм

$$\sigma_{c0} \leq \sigma_{0,2} \quad (5)$$

при $B_{rc0} \leq 1$ настає для всіх видів сталей з міцністю $\sigma_{0,2} > 1200\text{--}1300$ МПа, незалежно від їхніх показників пластичності (ψ_K) (див. рис. 1).

Показово, що навіть великі значення характеристики $B_r > 2,0\text{--}3,0$ для сталей низької та середньої міцності ($\sigma_{0,2} < 1000$ МПа) та відповідно для сталей з більшим показником $\psi_K \approx 60\text{--}80\%$ не дозволяють реалізувати досить високу конструкційну якість міцності B_{rc0} відповідно до (1) при випробуваннях на згин зразків з КН. Можливо, робота елемента конструкції на згин, особливо при наявності КН, є найбільш критичною для виробів та споруд в сенсі їх схильності до окрихчування при експлуатації. У цьому сенсі окрихчувальна дія такого шкідливого механічного ефекта як напруження плинності або жорсткість НДС в ЕК менш шкідлива, ніж різка неоднорідність пластичної деформації в зонах КН навіть у сталях з високою природною пластичністю.

Прояв згаданого ефекта чітко видно з рис. 3, де для порівняння показано однакові значення тримкості зразків з КН на згин (σ_{c0}) та на розтяг з кільцевим надрізом σ_{NF} (відповідно [10]), де збільшенню тримкості σ_{NF} сприяє стиснення деформації під надрізом. Збільшення σ_{NF} продовжується також при $\sigma_{0,2} > 1000\text{--}1200$ МПа, де при згині зразків з КН чітко проявляється тенденція до окрихчування у вигляді зниження σ_{c0} та, відповідно, втрати якості міцності B_{rc0} .

Наприкінці слід підсумувати, що введений термін «якість міцності» може виявитись досить корисним при необхідності повноцінної атестації конструкційних можливостей використання металів у виробках з ЕК з КН, що дозволяє знизити загрозу їх крихкого руйнування через недостатню пластичність.

6. ВИСНОВКИ

1. Конструкційна якість міцності — це перевищення тримкості виробу (зразка) з концентратором напружень (КН) σ_{NF} (або σ_{c0}) над границею плинності самого металу $\sigma_{0,2}$, що відображає конструктивну ефективність використання властивості міцності металу у виробі.
2. Підвищення рівня міцності сталей за рахунок покращення їхнього хімічного складу або удосконалення термічної обробки призводить до зниження їх здатності чинити опір окрихчувальній дії КН, насамперед через чутливість до ефекту локального деформаційного ущільнення сталі на контурі КН.
3. Ефективність конструкційного використання міцності сталі, яка оцінюється величиною параметра якості міцності B_{rNF} (B_{rc0}), знижу-

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Ю. Я. Мешков, С. А. Котречко, А. В. Шиян, *Металлофиз. новейшие технол.*, **41**, № 5: 633 (2019).
2. В. Н. Грищенко, Ю. Я. Мешков, Ю. А. Полушкин, А. В. Шиян, *Металлофиз. новейшие технол.*, **37**, № 7: 961 (2015).
3. *ГОСТ 1497-84, «Металлы. Методы испытаний на растяжение»* (Москва: Изд-во стандартов: 1984).
4. *ГОСТ 9454-78, «Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных комнатной и повышенных температурах»* (Москва: Изд-во стандартов: 1978).
5. *ГОСТ 25.506-85, «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении»* (Москва: Изд-во стандартов: 1985).
6. А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков, *Охрупчивание металлических сплавов в условиях концентрации напряжений. Конструкционные стали и титановые сплавы* (Германия, Саарбрюккен: LAP LAMBERT Academic Publishing: 2015).
7. Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, Г. П. Зимина, *Сталь*, № 6: 47 (2018).
8. Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, В. Н. Грищенко, *Сб. научн. трудов «Строительство, материаловедение, машиностроение»* (Днепропетровск: Изд. ПГАСА: 2016), т. 89, с. 112.
9. А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков *Сталь*, № 1: 49 (2019).
10. Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, *Сталь*, № 4: 48 (2018).
11. А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков, *Сталь*, № 6: 39 (2019).
12. T. Smida, J. Babjak, and I. Dlouhy, *Kovove Mater.*, **48**: 1 (2010).
13. J. H. Hollomon, *Trans. AIME Iron Steel Div.*, **162**: 268 (1945).
14. С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, *Предельная прочность. Кристаллы, металлы, конструкции* (Киев: Наукова думка: 2008).

REFERENCES

1. Yu. Ya. Meshkov, S. A. Kotrechko, and A. V. Shiyan, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 5: 633 (2019).
2. V. N. Grischenko, Yu. Ya. Meshkov, Ya. A. Polushkin, and A. V. Shiyan, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **37**, No. 7: 961 (2015) (in Russian).
3. *GOST 1497-84. 'Metally. Metody Ispytaniy na Rastyazhenie'* [Metals. Tensile Test Methods] (Moscow: Publishing Standards: 1984) (in Russian).
4. *GOST 9454-78. 'Metally. Metody Ispytaniya na Udarnyy Izgib pri Ponizhennykh Komnatnoy i Povashennykh Temperaturakh'* [Metals. Impact Bending Test Method at Low, Room and Elevated Temperatures] (Moscow: Publishing Standards: 1978) (in Russian).
5. *GOST 25.506-85. 'Rashchyoty i Ispytaniya na Prochnost. Metody Mekhanicheskikh Ispytaniy Metallov. Opredelenie Kharakteristik Treshchinostoykosti (Vyazkosti Razrusheniya) pri Staticheskom Nagruzhenii'* [Calculations and Strength Tests. Methods of Mechanical Testing of Metals. Determination of Fracture Toughness Characteristics (Fracture Toughness)]

- Under Static Loading] (Moscow: Publishing Standards: 1985) (in Russian).
6. A. V. Shiyan and Yu. Ya. Meshkov, *Okhrupchivanie Metallicheskih Splavov v Usloviyakh Kontsentratsii Napryazheniy. Konstruktsionnye Stali i Titanovye Splavy* [Embrittlement of Metal Alloys in the Conditions of Stress Concentration. Structural Steel and Titanium Alloys] (Germany, Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing: 2015) (in Russian).
 7. Yu. Ya. Meshkov, A. V. Shiyan, and G. P. Zimina, *Stal'*, No. 6: 47 (2018) (in Russian).
 8. Yu. Ya. Meshkov, A. V. Shiyan, and V. N. Grishchenko, *Sbornik Nauchnykh Trudov 'Stroitelstvo, Materialovedenie, Mashinostroenie'* [Collection of Scientific Proceedings of 'Construction, Materials Science, Mechanical Engineering'] (Dnepropetrovsk: Izd. PGASA: 2016), vol. 89, p. 112 (in Russian).
 9. A. V. Shiyan and Yu. Ya. Meshkov, *Stal'*, No. 1: 66 (2019).
 10. Yu. Ya. Meshkov and A. V. Shiyan, *Stal'*, No. 4: 256 (2018).
 11. A. V. Shiyan and Yu. Ya. Meshkov, *Stal'*, No. 6: 414 (2019).
 12. T. Smida, J. Babjak, and I. Dlouhy, *Kovove Mater.*, **48**: 1 (2010).
 13. J. H. Hollomon, *Trans. AIME Iron Steel Div.*, **162**: 268 (1945).
 14. S. A. Kotrechko and Yu. Ya. Meshkov, *Predelnaya Prochnost. Kristally, Metally, Konstruktsii* [Ultimate Strength. Crystals, Metals, Structures] (Kyiv: Naukova Dumka: 2008) (in Russian).