

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

## Холодноламкість сталей в умовах концентрації напружень (Повідомлення 1)

Ю. Я. Мешков, К. Ф. Сорока

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

У роботі представлено феноменологічну модель в'язко-крихкого переходу у сталях, викликаного дією низьких температур і концентраторів напружень (КН) — надрізів, тріщин тощо. Розглянуто закономірності впливу чинників міцності і в'язкості сталі на критичну температуру крихкості  $T_c$  зразків з кільцевим надрізом у разі розтягування або зразків з тріщиною у разі триточкового вигину. Показано, що причиною крихкості зразків з КН є надлишкове (надкритичне) низькотемпературне зміцнення сталі, незбалансоване з необхідним запасом її в'язкості, коли реальна міцність сталі  $\sigma_{0,2}$  перевищує критичну  $\sigma_{0,2c}$  для даного виду КН. Розкрито зміст величини  $\sigma_{0,2c}$  у термінах спеціальних показників зламостійкості сталі  $B_n$ , що відображають її запас в'язкості. Сформульовано рекомендації щодо оптимізації комплексу механічних властивостей для виробів типу кріпильних прогоничів, що несуть на собі КН у вигляді гвинтової нарізі, з метою попередження їхньої холодноламкості за низькотемпературної експлуатації.

**Ключові слова:** міцність, зламостійкість, холодноламкість, крихке руйнування, концентратор напружень.

The paper presents a phenomenological model of the ductile-to-brittle transition in steels due to the action of low temperatures and stress raisers (SR)—notches, cracks, *etc.* Regularities of the effect of strength and toughness of

---

Corresponding author: Kateryna Feodosiyivna Soroka  
E-mail: [katerina.oleschenko@gmail.com](mailto:katerina.oleschenko@gmail.com)

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

Citation: Yu. Ya. Meshkov and K. F. Soroka, Cold Brittleness of Steels under Stress Concentration (Report 1), *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 43, No. 6: 781–796 (2021) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.43.06.0781](https://doi.org/10.15407/mfint.43.06.0781).

steel on the critical temperature of brittleness  $T_c$  for specimens with an annular notch in tension or pre-cracked specimens in three-point bending are considered. As shown, the excessive (supercritical) low-temperature hardening of steel, unbalanced with the required margin of its toughness, when real strength of the steel,  $\sigma_{0,2}$ , exceeds critical strength for a given type of SR,  $\sigma_{0,2c}$ , is the reason for brittleness of specimens with SR. Physical essence of the quantity  $\sigma_{0,2c}$  is explained in terms of specific characteristics of the steel resistance to break,  $B_r$ , reflecting its margin of toughness. Recommendations are formulated for optimising a set of mechanical properties for products such as fastening bolts with SR in the form of a screw thread, to prevent their cold brittleness during low-temperature operation.

**Key words:** strength, resistance to break, cold brittleness, brittle fracture, stress raiser.

*(Отримано 28 жовтня 2020 р.; остаточн. варіант — 2 квітня 2021 р.)*

## 1. ВСТУП. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Холодноламкість сталевих виробів викликана дією концентраторів напружень (КН) і низьких температур [1]. Основи фізичної природи цього небезпечного явища лежать у сильно вираженій температурній залежності міцності (границі плинності  $\sigma_{0,2}$ ) конструкційних сталей з ОЦК-гратницею заліза [2, 3]. Основним параметром, що характеризує схильність до холодноламкості ступу, слугує критична температура крихкості  $T_c$  зразка з надрізом під час випробувань на ударний вигин в інтервалі температур нижче кімнатних ( $T_k$ ) з визначенням питомої роботи руйнування зразка  $KCV$  ( $KCU$ ) [4]. Критерієм крихкості, зазвичай, слугує певний умовний поріг показника ударної в'язкості  $KCV$  (наприклад, 2 або 3 Дж/см<sup>2</sup>).

Методологія дослідження холодноламкості сталей є суто емпіричною, тому що встановити стійкі фізично обґрунтовані зв'язки між параметрами  $T_c$  і  $KCV$  поки не вдалося, але добре відомо, що умова крихкості сталі у разі будь-яких випробувань і критерію крихкості залежить від поєднання двох найважливіших властивостей металу — його міцності і пластичності. Проблема зводиться до адекватного вибору відповідних характеристик механічних властивостей і встановлення кореляційних зв'язків між ними у початкових (за  $T_k$ ) та критичних (за  $T_c$ ) станах ступу. Таким чином, можна було б підійти до вирішення завдання прогнозу оцінки очікуваного рівня холодостійкості сталі на основі даних первинних властивостей у вихідному (за  $T_k$ ) стані металу.

Головна складність тут полягає в необхідності поєднувати в одному аналізі дві протилежні властивості — міцність ( $\sigma_{0,2}$ ) і пластичність ( $\psi$  — звуження зразка у разі розриву в «шийці»), коли у випадку зростання одного відбувається систематичне зниження іншого.

Узгоджене, тобто несуперечливе поєднання міцності і пластичності металів можна побачити в самій міцності, точніше в тій її частині, яка пов'язана зі стадією пластичного деформування зразка перед руйнуванням, тобто в деформаційному зміцненні металу. Саме ця неосновна, додаткова до пружної ( $\sigma_{0,2}$ ) частина повної міцності металу  $S_k$  (істинне напруження руйнування) є тим деформаційним резервом міцності, який містить в собі весь потенціал опору металу крихкості. Цю специфічну механічну характеристику, яку називають деформаційною стійкістю або зламостійкістю у роботах [5–8], використано для аналізу закономірностей окрихчування сталей під дією концентраторів напружень:

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

Залежність компонентів зламостійкості  $S_k$  і  $\sigma_{0,2}$  від температури цілком явна (рис. 1) і тому за критичної температури крихкості  $T_c$  сталь має критичну величину  $B_{rc}$ :

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

Співвідношення величин  $B_r / B_{rc}$  певним чином відображає схильність сталі до холодноламкості і дозволяє простежити закономірності роздільного впливу факторів вихідної міцності і пластичності металу на відношення  $B_r / B_{rc}$  і саму температуру холодноламкості.

У цьому і полягає основне завдання даної роботи, для вирішення якого потрібно сформулювати відповідну модель взаємозв'язку основних показників властивостей між собою.

## 2. МОДЕЛЬ ХОЛОДНОЛАМКОСТІ ЗРАЗКІВ СТАЛІ З КОНЦЕНТРАТОРОМ НАПРУЖЕНЬ

В основу моделі покладено відому температурну залежність міцності  $\sigma_{0,2}$  залізвуглецевих стопів, яку відображають коефіцієнтом низькотемпературного зміцнення  $\beta = d\sigma/dT$ , або у скінченних різницях як середня величина  $\bar{\beta}$  в інтервалі температур  $\Delta T$  [8]:

$$\bar{\beta} = \Delta\sigma / \Delta T. \quad (3)$$

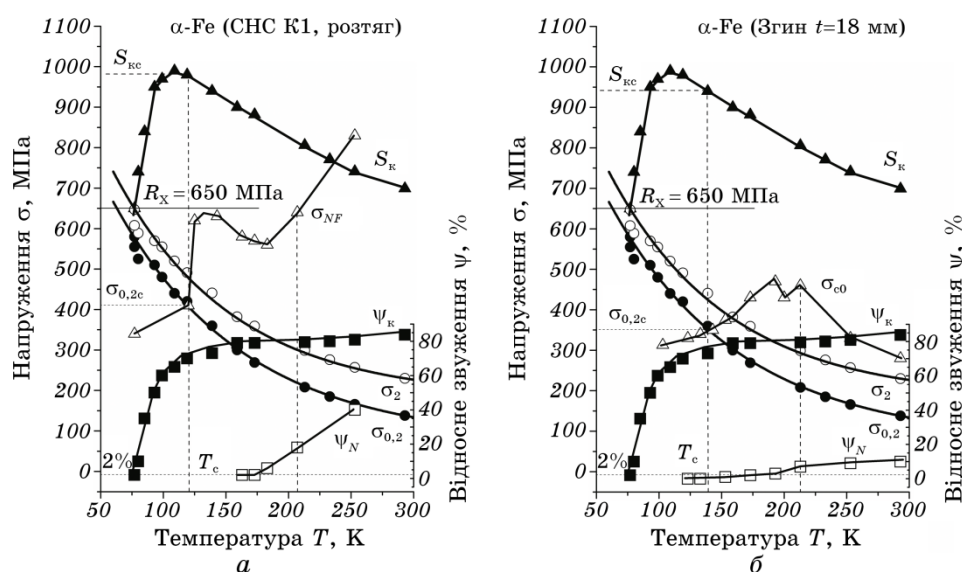
Якщо  $\Delta\sigma = \sigma_{0,2c} - \sigma_{0,2}$ , то  $\Delta T_c = T_k - T_c$ , де  $\sigma_{0,2}$  — міцність (границя плинності) сталі за вихідної кімнатної температури  $T_k$ ,  $\sigma_{0,2c}$  — те ж саме за критичної температури в'язко-крихкого переходу.

Таким чином, інтервал температур  $\Delta T$  є температурною мірою властивості холодостійкості сталі, що відповідає вимогам штатної експлуатації виробу. З іншого боку, величина  $\Delta\sigma$  є міцнісною мірою властивості холодостійкості, і, по суті, є силовим еквівалентом ве-

личини  $\Delta T_c$ , використання якого відкриває можливості для структурної інтерпретації явища холодноламкості металів — перейти від звичної температурної шкали вимірювань цієї властивості до більш фундаментальної і змістовної системи характеристик міцності і пластичності сталей. Для цього нам буде потрібно вихідний вираз (1) перевести у форму базового рівняння холодостійкості:

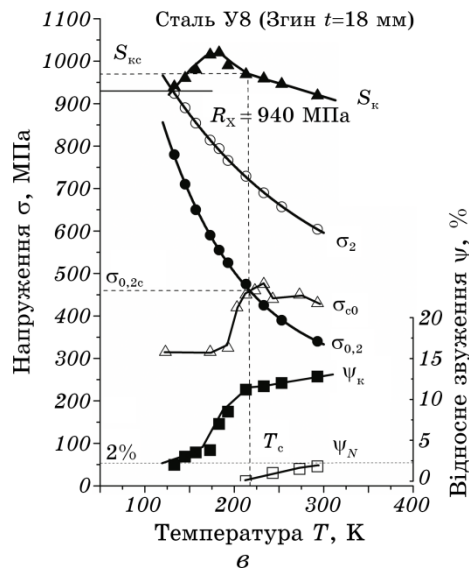
$$\Delta T_c = \Delta \sigma_c / \sqrt{\beta} \quad (4)$$

і розкрити фізичний зміст величини  $\Delta \sigma_c$  у певних показниках меха-



**Рис. 1.** Температурні залежності за результатами випробувань на одновісний розтяг гладких зразків і зразків з КН: в умовах СНС (К1)  $\alpha$ -Fe, розтяг (а), з концентратором К2  $\alpha$ -Fe (б) та сталь У8, згин з тріщиною (в). Тут  $\sigma_{0.2}$  — границя плинності гладкого зразка,  $\sigma_2$  — міцність сталі у разі залишкової деформації 2%,  $S_k$  — істинне напруження руйнування,  $\sigma_{0.2c}$ ,  $\sigma_{2c}$ ,  $S_{kc}$  — значення відповідних міцностей за критичної температури  $T_c$ ,  $\sigma_{c0}$  — середнє номінальне напруження у місці руйнування зразка,  $\psi_k$  — пластичність гладкого зразка,  $\psi_N$  — пластичність зразка у разі згину з тріщиною,  $R_x$  — крихка міцність ([10]).

**Fig. 1.** Temperature dependences built by the results of uniaxial tensile tests of unnotched specimens and specimens with SR under the multiaxial stress state (K1),  $\alpha$ -Fe, tensile test (a), with SR K2  $\alpha$ -Fe (b), steel Y8, with crack (c). Here  $\sigma_{0.2}$  is the yield stress of unnotched specimen,  $\sigma_2$  is the strength of steel at residual strain 2%,  $S_k$  is the true fracture stress,  $\sigma_{0.2c}$ ,  $\sigma_{2c}$ ,  $S_{kc}$  are the values of corresponding strengths at critical temperature  $T_c$ ,  $\sigma_{c0}$  is the average nominal stress in the fracture locus in specimen with SR,  $\psi_k$  is the ductility of unnotched specimen,  $\psi_N$  is the ductility of specimen at crack,  $R_x$  is the brittle strength.



Продовження рис. 1.

Continuation of Fig. 1.

нічних властивостей. Зрозуміло, що  $\Delta\sigma_c$  є функцією показників властивостей міцності ( $\sigma_{0,2}$ ) і пластичності ( $\psi_k$ ) або в'язкості ( $KCV$ ), але виразити цей зв'язок через характеристики  $\psi_k$  або  $KCV$  безпосередньо вельми проблематично. Тому нижче ми звернемося до введених у роботах [5–7] нових понять про деформаційні резерви міцності у вигляді показників деформаційної стійкості або зламостійкості (1). Безрозмірна величина  $B_r$  відображає деформаційний резерв збереження міцності металу, навантаженого вище границі плинності аж до руйнування зразка у «шийці» ( $S_k$ ) з проявом властивості пластичності ( $\psi_k$ ). Тобто зламостійкість містить в собі одночасно інформацію про міцнісні і пластичні резерви міцності металу, навантаженого в умовах лінійного напруженого стану (ЛНС).

Умовно характеристику  $B_r$  можна трактувати як своєрідний показник «квазіпластичності» металу, оскільки він прямо пов'язаний з пластичністю  $\psi_k$  у разі розриву в «шийці», хоча чисельно  $B_r$  згідно (1) представлена у міцнісному вигляді. Саме тому, деформаційна стійкість  $B_r$  як фізична величина відіграє роль резерву міцності  $\sigma_{0,2}$  [7].

Перетворимо вираз  $\Delta\sigma_c$  у зручний для аналізу вигляд:

$$\Delta\sigma_c = \sigma_{0,2c} - \sigma_{0,2} = \sigma_{0,2} (\sigma_{0,2c} / \sigma_{0,2} - 1). \quad (5)$$

Вираз в дужках, використовуючи (2), зведемо до показників  $B_r$  і  $S_k$ ,

маючи на увазі, що  $\sigma_{0,2c} = S_{kc}/B_{rc}$ , до цього індекс «с» показує, що зазначені характеристики  $S_{kc}$  і  $B_{rc}$  означають їхні величини за критичної температури в'язко-крихкого переходу  $T_c$ :

$$\Delta\sigma_{0,2c} = \Delta\sigma_{0,2} [(B_r/B_{rc})(S_{kc}/S_k) - 1]. \quad (6)$$

Далі з (6) і (4) отримуємо:

$$\Delta T_c = (\sigma_{0,2}/\bar{\beta}) [(B_r/B_{rc})(S_{kc}/S_k) - 1]. \quad (7)$$

Вираз (7) є формулою холодостійкості, в якій можна виділити дві ключові складові — міцнісну  $Y$  і пластичну  $Z$ :

$$Y = \sigma_{0,2}/\bar{\beta}, \quad (8)$$

$$Z = (B_r/B_{rc})(S_{kc}/S_k) - 1. \quad (9)$$

З (7), (8) і (9) отримуємо коротку формулу характеристики холодостійкості:

$$\Delta T_c = YZ, \quad (10)$$

в якій явно відображений роздільний вплив факторів міцності і пластичності на холодостійкість сталі. При цьому слід не забувати, що між величинами  $Y$  і  $Z$  є свій внутрішній зв'язок, коли збільшенню  $Y$  (міцності) відповідає зниження  $Z$  (пластичності). Виявлення цього вельми важливого зв'язку є окремою задачею в даному напрямку досліджень.

### 3. ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ФАКТОРІВ МІЦНОСТІ І ПЛАСТИЧНОСТІ У ХОЛОДОСТІЙКОСТІ СТАЛІ

З формули холодостійкості (7) випливає, що зі зростанням міцності  $\sigma_{0,2}$  і зі зменшенням температурної залежності міцності ( $\bar{\beta}$ ) відбувається збільшення інтервалу холодостійкості  $\Delta T_c$ , тобто зниження критичної температури крихкості виробу  $T_c$ . Але це справедливо лише для сталі з великим фактором  $Z$ , тобто у низькоміцних і високопластичних марок сталей, для яких зміна фактора пластичності  $Z$  згідно (9) через великі значення  $B_r/B_{rc} \gg 1$  майже не впливає на  $\Delta T_c$ . Тому головне суперництво факторів міцності  $Y$  і пластичності  $Z$  починається для сталей середньої і високої міцності ( $\sigma_{0,2} \approx 300$  МПа і вище), де відносно незначне зменшення величини  $B_r/B_{rc}$  у факторі  $Z$  може істотно знизити холодостійкість навіть коли значення  $\sigma_{0,2}$  високі.

Для кількісного аналізу показників властивостей міцності  $\sigma_{0,2}$  і зламостійкості  $B_r$  і  $B_{rc}$  (що представляють властивість пластичності

у вихідному ( $T_k$ ) і критичному ( $T_c$ ) станах) скористаємося експериментальними даними, отриманими в роботах [9] і [10]. Вибір цих джерел для нашого аналізу обумовлений тим, що свої дослідження умов крихкості зразків з надрізами автори супроводжували повними діаграмами температурної залежності характеристик сталей  $\sigma_{0,2}(T)$  і  $S_k(T)$  (рис. 1).

У таблиці 1 наведено результати обробки первинних даних, де за низькотемпературними випробуваннями низки сталей, наведених в роботі [9] (група 1, поз. 1–7) визначали стандартні характеристики  $\sigma_{0,2}$ ,  $S_k$  (для обчислення  $B_r$ ).

Критичні значення  $\sigma_{0,2}$  і  $S_k$  визначали за температури крихкості  $T_c$  і даними випробувань зразка з кільцевим надрізом (глибина надрізу  $t = 1,5$  мм, радіус  $r = 0,1$  мм, кут надрізу  $60^\circ$ , зразок діаметром 10 мм, далі надріз типу К1 [9], табл. 1). Критерієм крихкості за температури  $T_c$  була умова втрати тримкої міцності зразка з КН до рі-

**ТАБЛИЦЯ 1.** Показники міцності  $\sigma_{0,2}$  і  $\sigma_{0,2c}$  та зламостійкості  $B_r$  і  $B_{rc}$  конструкційних сталей у порівнянні з температурою в'язко-крихкого переходу  $T_c$  (за даними випробувань [9, 10]).

**TABLE 1.** Characteristics of strength ( $\sigma_{0,2}$  and  $\sigma_{0,2c}$ ) and resistance to break ( $B_r$  and  $B_{rc}$ ) of structural steels as compared to the temperature of ductile-to-brittle transition  $T_c$  (by the data of tests [9, 10]).

№	Сталь, обробка	Тип КН	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{0,2c}$	$\sigma_{0,2c}/\sigma_{0,2}$	$B_r$	$B_{rc}$	$B_r/B_{rc}$	$T_c$	$\Delta T_c$
			МПа						К	
1	Ст. 30	Група 1. К1 [9] кільцевий надріз, розтягнення	350	800	2,29	2,97	1,31	2,28	77	216
2	30ХГСА (з. в., 200°C)		1400	1600	1,14	1,58	1,50	1,05	150	143
3	30ХГСА (із. з., 300°C)		1500	1600	1,07	1,80	1,45	1,24	130	163
4	30ХГСА (із. з., 200°C)		1450	1700	1,17	1,77	1,57	1,13	83	210
5	30ХГСА (із. з., 300°C)		1170	1400	1,20	2,10	1,36	1,54	77	216
6	10Х2СВА		1600	1700	1,06	1,83	1,59	1,15	160	133
7	У8 (з. а., 400°C)		1180	1300	1,10	1,58	1,54	1,03	200	93
8	$\alpha$ -Fe	Група 2. К2 [10] згин з тріщиною	140	350	2,5	5,0	2,77	1,81	140	153
9	У8 (відпал.)		340	450	1,32	2,8	2,15	1,30	220	73
10	ст. Зсп		160	400	2,5	3,1	2,0	1,55	147	146
11	10ХСНД		310	420	1,35	2,9	2,5	1,16	180	113
12	АК35		1027	1100	1,07	2,3	2,0	1,15	180	113
13	ЗШ 12ХН2МДФ (легув. бором $B = 0,0$ )		640	700	1,09	1,97	1,81	1,09	173	120
14	ЗШ 12ХН2МДФ (легув. бором $B = 0,001$ )		640	820	1,28	1,8	1,46	1,23	175	118
15	ЗШ 12ХН2МДФ (легув. бором $B = 0,0022$ )		640	977	1,53	2,0	1,5	1,33	65	228
16	ЗШ 12ХН2МДФ (легув. бором $B = 0,004$ )		650	968	1,49	2,17	1,67	1,3	81	212

вня границі плинності сталі за цієї температури:

$$\sigma_{NF} \approx \sigma_{0,2}(T_c). \quad (11)$$

Друга група сталей (поз. 8–10) поряд зі стандартними показниками на розрив в інтервалі температур до 77 К у роботі [10] була випробувана на триточковий вигин зразків з тріщиною з визначенням середнього номінального напруження у місці руйнування  $\sigma_{c0}$  за критерієм крихкості, аналогічним (10):  $\sigma_{c0} \approx \sigma_{0,2}(T)$  (рис. 1, б, в).

З даних таблиці 1 неможливо надійно простежити за окремим впливом на холодостійкість  $\Delta T_c$  факторів міцності  $Y$  і пластичності  $Z$  сталей, для чого треба було б зафіксувати параметри одного з факторів та змінювати другий за явно невеликого обсягу експерименту.

Однак, незважаючи на обмежений набір експериментальних даних у роботах [9, 10] певні зв'язки між механічними властивостями можна встановити у вигляді кореляційних співвідношень. У таблиці 1 для випробувань на холодостійкість у разі розтягування зразків з кільцевим надрізом типу К1 згідно [9] наведено 7 видів сталей (поз. 1–7), для випробувань на триточковий вигин зразків з нанесеною тріщиною (концентратор типу К2) наведено 9 варіантів сталей згідно [10], серед яких є кілька варіантів зварних швів (СШ12ХН2МДФ) з різним рівнем мікролегування бором (поз. 13–16).

Температура крихкості  $T_c$  зразків групи 2 у разі згину фіксували за умовою зниження тримкої міцності  $\sigma_{c0}$  зразка з КН до рівня границі плинності  $\sigma_{0,2c}$  сталі згідно (10), де  $\sigma_{0,2c} = \sigma_{0,2}(T_c)$  (рис. 1, б, в). За температури  $T_c$  фіксували критичні показники первинних властивостей  $\sigma_{0,2c}$  і  $S_{kc}$  для визначення граничної величини зламостійкості  $B_{rc} = S_{kc}/\sigma_{0,2c}$  в момент крихкості зразка з даним типом КН.

Критична величина зламостійкості  $B_{rc}$  відіграє ключову роль в холодноламкості виробів з КН, а в її залежності від структурно-детермінованих властивостей міцності і пластичності стопу міститься фізична природа холодноламкості, прояснити яку можна через встановлені закономірності зв'язку критичних параметрів  $B_{rc}$  різних сталей з показниками вихідних властивостей міцності і пластичності стопів.

Показник критичної зламостійкості  $B_{rc}$  стопу в момент крихкості за  $T_c$  завжди менший вихідної зламостійкості  $B_r$  за  $T_k$  (табл. 1), але однозначний зв'язок з первинними характеристиками  $\sigma_{0,2}$  і  $B_r$  має не сама критична величина зламостійкості  $B_{rc}$ , а її співвідношення з  $B_r$ , тобто резерв зламостійкості  $B_r/B_{rc}$  в момент крихкості за даного КН — критичний параметр  $P_{rc} > 1$  (табл. 1):

$$P_{rc} = B_r/B_{rc}. \quad (12)$$

Розкриваючи зміст величин  $B_r$  і  $B_{rc}$ , маємо:



$$P_{rc} = (S_k/\sigma_{0,2})(\sigma_{0,2c}/S_{kc}) = (\sigma_{0,2c}/\sigma_{0,2})(S_k/S_{kc}). \quad (13)$$

Оскільки  $S_{kc} > S_k$  (рис. 1), то параметр резерву зламостійкості  $P_{rc}$  згідно (13) безпосередньо відображає міру перевищення критичної міцності стопу  $\sigma_{0,2c}$  за  $T_c$  над вихідною міцністю  $\sigma_{0,2}$  за  $T_k = 293$  К. Це означає, зокрема, що збільшення відношення  $B_r/B_{rc}$  можна прямо пов'язувати з підвищенням показника критичного перезміцнення стопу  $\sigma_{0,2c}/\sigma_{0,2}$  і зі зростанням рівня холодостійкості  $\Delta T_c$ , так як  $S_k < S_{kc}$  (рис. 1). Якщо рівень  $B_r/B_{rc} = 1$ , крихкість зразка з КН настає вже за кімнатних температур ( $\Delta T_c = 0$ ), як результат надлишкового перезміцнення стопу без участі температурного чинника за рахунок лише структурного компонента.

Таким чином, будь-яке окрихчування під дією КН, як низькотемпературне (за холодноламкості), так і структурне (за  $T_k$ ) має своєю фізичною причиною незбалансоване з пластичністю перезміцнення стопу. Відмінністю холодноламкості від крихкості є те, що у разі холодноламкості надмірне перезміцнення стопу над критичним рівнем  $\sigma_{0,2c}$  формується двома джерелами — структурою і низькою температурою. Таким чином, звичайна крихкість стопів за  $T_k$  є всього лише окремим випадком більш загального явища — холодноламкості, яке має два види критичних (порогових) показників — температурний ( $T_c$ ) і міцнісний ( $\sigma_{0,2}$ ). Останній безпосередньо пов'язаний зі структурою стопу. Цим обумовлюється істотна відмінність в методології оцінки стопів в їх схильності до крихкості і до холодноламкості під впливом КН.

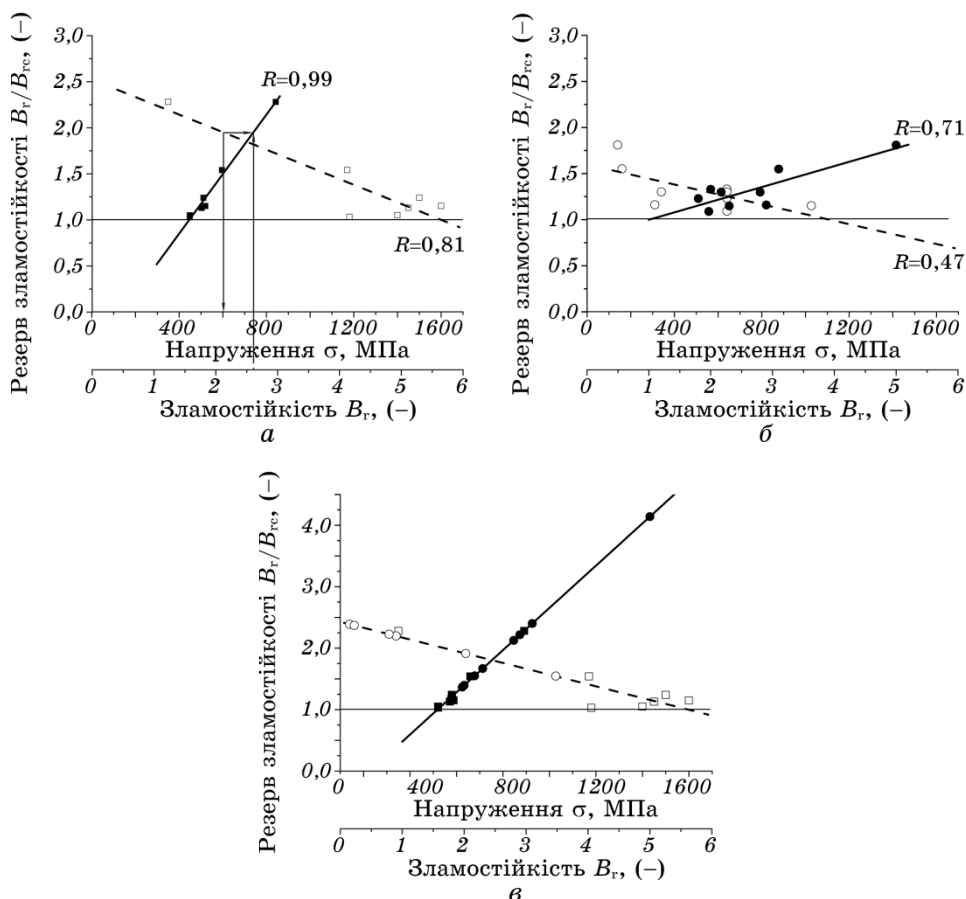
Традиційно холодноламкість оцінюється за критичною температурою  $T_c$  стопу з КН. У даній роботі для оцінки холодостійкості показано можливість практичного використання особливого структурно-детермінованого параметра  $P_{rc}$  згідно (12), який поєднує в собі властивості міцності і пластичності як у вихідному (за  $T_k$ ), так і в критичному (за  $T_c$ ) станах. На відміну від традиційного температурного способу оцінки холодостійкості сталей ( $\Delta T_c$ ), запропонований тут параметр  $P_{rc}$  згідно (12) дозволяє здійснити аналіз цього явища в термінах конкретних показників певних механічних властивостей сталі.

#### 4. ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ВПЛИВУ НА РІВЕНЬ ХОЛОДНОЛАМКІСТІ СТОПІВ ЗА РАХУНОК РАЦІОНАЛЬНОГО ПОЄДНАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МІЦНОСТІ І ПЛАСТИЧНОСТІ

Результати експериментальних даних робіт [9, 10] представлено в розділі 3 з позиції моделі збалансованих властивостей міцності і пластичності на основі критерію критичного резерву зламостійкості  $P_{rc}$  (12), дозволяють виявити ключову роль показників властивостей  $\sigma_{0,2}$  і  $B_r$  в задачі захисту стопів від окрихчування під дією КН і

низьких температур.

Критичне значення параметра  $P_{гс}$  за  $T_c$  не має постійного значення і змінюється у широких межах (від 2,5 до 1,0) від ступу до ступу і залежить від конкретних значень міцності  $\sigma_{0,2}$  та зламостійкості  $B_r$ , яка відповідає за пластичність (рис. 2). Зростання міцності веде до



**Рис. 2.** Зміна параметра холодостійкості  $B_r/B_{гс}$  від поєднання взаємозбалансованих властивостей міцності  $\sigma_{0,2}$  і зламостійкості  $B_r$  у разі випробувань зразків з КН: К1 (поз. 1–7, табл. 1, □ і ■) (а), К2 (поз. 8–16, табл. 1, ○ і ●) (б); дані групи 1 (□ і ■), доповнені даними групи 2 (○ і ●), перерахованими для випробувань за типом надрізу К1 за формулами (15) і (16) (в).

**Fig. 2.** Change in the cold brittleness parameter  $B_r/B_{гс}$  vs. the combination of mutually balanced properties of strength  $\sigma_{0,2}$  and resistance to break  $B_r$  at testing specimens with SR: K1 (pos. 1–7, Table 1, □ and ■) (a), K2 (pos. 8–16, Table 1, ○ and ●) (б), the data of group 1 (□ and ■), completed by the data of group 2 (○ and ●), recalculated for tests with SR type K1 by the formulas (15) and (16) (в).

зниження  $P_{rc}$ , зростання  $B_r$  — до збільшення  $P_{rc}$ , тобто до поліпшення холодостійкості. Але ці зв'язки показників не є самостійними, а взаємозалежні. Наприклад, у випробуваннях зразків сталі з концентратором К1 (кільцевий надріз) для сталі з показником  $B_r = 2,7$  величина шуканого показника  $P_{rc}$  складе  $B_r/B_{rc} = 2,1$ , але лише за умови, що міцність сталі  $\sigma_{0,2}$  не буде перевищувати рівень 600 МПа (рис. 2); для концентратора К2 (вигин балки з тріщиною, рис. 2, б) відповідно  $P_{rc} = 1,35$  при  $\sigma_{0,2} \leq 500$  МПа. Більш високі значення міцності сталей вимагатимуть зниження критичних показників  $P_{rc}$ , що відповідно призведе до зниження критичного рівня допустимого перезміцнення  $\sigma_{0,2c}/\sigma_{0,2}$  сталі згідно (13), тобто до зниження холодостійкості, що передбачає використання певним чином збалансованого поєднання властивостей міцності і пластичності.

У результаті, загальна оцінка ефекту холодноламкості сталей втрачає свою однозначність, якщо розглядати явища у температурному або міцнісному (тобто структурному) вимірі, тому необхідність використання того чи іншого підходу може диктуватися міркуваннями практичної доцільності. Так, наприклад, для сталей з величиною  $P_{rc} \leq 1,10-1,15$  температурний показник холодостійкості  $\Delta T_c$  більш прийнятний через надмірно високу чутливість до коливань рівня міцності  $\sigma_{0,2}$  і коефіцієнта  $\beta$  у формулі (6). Це клас високоміцних конструкційних сталей. Навпаки, для низькоміцних і високопластичних сталей  $P_{rc} > 1,5-2,0$  зручнішим в інформативному сенсі і у практичному відношенні є показник критичного перезміцнення  $\sigma_{0,2c}/\sigma_{0,2}$  за  $T = T_c$ , що впливає з формули (13):

$$\sigma_{0,2c}/\sigma_{0,2} = P_{rc}(S_{kc}/S_k). \quad (14)$$

Наведені на рисунку 2 залежності механічних властивостей можна апроксимувати наступними кореляційними співвідношеннями з відповідними коефіцієнтами кореляції  $R$ : перша група сталей для поз. 1–7 (табл. 1), (випробування на розтягнення, концентратор К1):

$$B_r/B_{rc} = 2,523 - 0,00095\sigma_{0,2}, \quad R = 0,81, \quad (15)$$

$$B_r/B_{rc} = 0,436 + 0,915B_r, \quad R = 0,99, \quad (16)$$

друга група сталей для поз. 8–16 (табл. 1) (випробування на тріточковий вигин, концентратор К2 (тріщина)):

$$B_r/B_{rc} = 1,596 - 0,00054\sigma_{0,2}, \quad R = 0,4, \quad (17)$$

$$B_r/B_{rc} = 0,806 + 0,194B_r, \quad R = 0,71. \quad (18)$$

З формул (15)–(18) видно, що точність апроксимації даних для

зламостійкості ( $B_r$ ) значно краща, ніж для міцності ( $\sigma_{0,2}$ ), і оскільки в обох випадках прогнозована величина  $B_r/B_{rc}$  одна і та сама, то практично для її обчислення досить використовувати лише один, більш точний показник  $B_r$  — формули (16) і (18), тоді як збалансовану з ним міцність  $\sigma_{0,2}$  визначають з умови рівності формул (15) і (16) або (17) і (18). Сенс попарних кореляційних співвідношень (15), (16) та (17), (18) проглядається ще і в тому, що вони наочно демонструють принцип необхідності збалансованого поєднання конкретних показників властивостей міцності й пластичності ( $\sigma_{0,2}$  і  $B_r$ ) стопу для реалізації єдиного можливого загального для цього комплексу властивостей показника холодостійкості ( $B_r/B_{rc}$ ). Розбіжність у розрахункових величинах  $P_{rc}$ , що задаються двома показниками  $\sigma_{0,2}$  і  $B_r$ , означає відсутність збалансованого комплексу властивостей і, отже, контроль за показником холодостійкості залишається за тією властивістю ( $\sigma_{0,2}$  або  $B_r$ ), яка прогнозує нижчий рівень  $B_r/B_{rc}$ .

Представлені вище дані аналізу параметрів низькотемпературного окрихчування стопів під дією КН, по суті, ілюструють можливості ефективного використання аналітичної методології керування холодноламкістю сталей, яку містять формули (15)–(18), у такий спосіб.

У таблиці 1 представлено результати двох видів випробувань для порівняно невеликих наборів марок сталей для кожного виду концентратора — 7 марок для К1 і 9 для К2. Але використовуючи співвідношення (15) і (16), можна поповнити експериментальні дані однієї групи зразків з К1 (поз. 1–7, табл. 1) розрахунковими даними показників із серії сталей іншої групи К2 (поз. 8–16, табл. 1) або навпаки (рис. 2, в).

Таким чином, можна переводити результати будь-яких видів випробувань на холодноламкість для одного типу зразка зі стандартним КН, обраного за стандартний, тобто позначити найпростіший і найзручніший метод визначення холодостійкості на зразках з нескладними надрізами, але приводити їхні результати обчислювальним шляхом до даних, одержаних на складних зразках, наприклад, з нанесеними втомними тріщинами. Це може істотно спростити всю технологію лабораторної практики механічних випробувань металів.

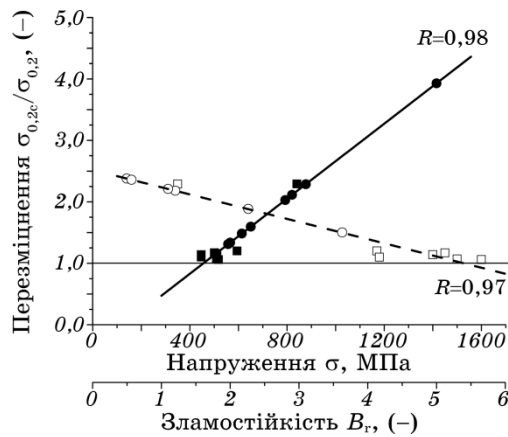
Показник критичного резерву зламостійкості  $P_{cr}$  згідно (12) має більш високу кореляцію порівняно з вихідною зламостійкістю  $B_r$  ( $R = 0,99$  згідно (16)), ніж з міцністю  $\sigma_{0,2}$  ( $R = 0,81$  згідно (15)) і тому кращий для обчислювальної методології прогнозування порога холодноламкості, оскільки в  $P_{cr}$  відповідно до (13) головний внесок вносить відношення  $\sigma_{0,2c}/\sigma_{0,2}$ , то для більш наочного опису порогів холодноламкості можна застосовувати такі залежності (рис. 3).

$$\sigma_{0,2c}/\sigma_{0,2} = 2,519 - 0,00099\sigma_{0,2}, \quad R = 0,97, \quad (19)$$

$$\sigma_{0,2c}/\sigma_{0,2} = -0,392 + 0,864B_r, \quad R = 0,98. \quad (20)$$

Цей метод зручний тим, що виходячи з температурної залежності міцності згідно (4) легко перейти до температурного показника холодостійкості  $\Delta T_c$  (табл. 1).

Визначення порогових значень міцності сталі  $\sigma_{0,2c}$  зі співвідношень типу (19), (20) може виявитися практично корисним в пошуках меж раціонального підвищення міцності сталей, які використовують для виготовлення прогоничних з'єднань, де гвинтова нарізь створює КН, подібний типу КН1 (табл. 1). Надмірне перезміцнення веде до різкого падіння тримкої міцності сталевих прогоничів [11, 12], попередити яке можна, розрахунковим шляхом визначивши критичну міцність  $\sigma_{0,2c}$  за формулами, подібними (19), (20), якщо заздалегідь встановити відповідну залежність експериментально. Однак, завдання раціонального формування комплексу властивостей міцності ( $\sigma_{0,2}$ ) і зламостійкості ( $B_r$ ) для захисту виробів з КН від крихкості за кімнатних температур може стати предметом окремого дослідження.



**Рис. 3.** Міцнісний індикатор холодостійкості  $\sigma_{0,2c}/\sigma_{0,2}$  залежно від збалансованих показників властивостей  $\sigma_{0,2}$  і  $B_r$  для обох груп сталей (табл. 1) у випробуваннях на розтяг з кільцевим надрізом за типом К1 (□ і ■ — експеримент, ○ і • — розрахунок для сталей групи 2 за формулами (19) і (20)).

**Fig. 3.** Strength characteristic of cold brittleness  $\sigma_{0,2c}/\sigma_{0,2}$  vs. the balanced characteristics  $\sigma_{0,2}$  and  $B_r$  for both groups of steels (Table 1) at tensile tests with an annular notch of type K1 (□ and ■ is the experiment, ○ and • is the calculation for steels of group 2 by the formulas (19) and (20)).

## 5. ВИСНОВКИ

Встановлено, що холодостійкість сталей у разі випробувань на зразках з КН можна характеризувати трьома видами показників — температурним ( $\Delta T_c$ ), міцнісним ( $\sigma_{0,2c}/\sigma_{0,2}$ ) або комплексним — за критичним резервом міцності ( $P_{rc} = B_r/B_{rc}$ ). Але жоден із зазначених параметрів сам по собі не може виявити свій критичний рівень за  $T_c$ , спираючись лише на один з показників властивостей — міцності  $\sigma_{0,2}$  або зламостійкості  $B_r$ , але тільки у випадку аналізу двох останніх параметрів ( $\sigma_{0,2c}/\sigma_{0,2}$  або  $P_{rc}$ ) і зі спільним використанням показників двох видів механічних властивостей ( $\sigma_{0,2}$  і  $B_r$ ) вдається визначити рівень критичного значення міцності  $\sigma_{0,2c}$  або резерву зламостійкості  $P_{rc}$ , що відповідає за температуру  $T_c$ . Це означає, що критерій холодноламкості може бути лише двопараметричним, а тому не має єдиного порогового значення для різних сталей, а змінюється у широкому інтервалі значень залежно від поєднання показників  $\sigma_{0,2}$  і  $B_r$  кожної сталі.

Оптимальний поріг холодноламкості  $T_c$  визначають збалансованим поєднанням властивостей міцності і пластичності (через показник  $B_r$ ), коли обидві механічні характеристики дають один і той самий критичний показник  $P_{rc}(\sigma_{0,2}) = P_{rc}(B_r)$ . Якщо  $P_{rc}(\sigma_{0,2}) > P_{rc}(B_r)$ , то джерелом крихкості за  $T_c$  є надмірне перезміцнення (тобто  $\sigma_{0,2} > \sigma_{0,2c}$ ), або, що те ж саме — брак властивості пластичності ( $B_r$ ) для даної міцності ( $\sigma_{0,2}$ ). У такому випадку критичну температуру крихкості визначає менший з показників  $P_{rc}$ , а метал є носієм невідповідної, тобто незбалансованої за властивостями холодостійкості.

Слід розрізняти окрихчування сталі за холодноламкістю ( $T_c$ ) і крихкістю виробів за кімнатних температур ( $T_k$ ). Холодноламкість, як явище, відрізняється від звичайної крихкості тим, що перезміцнення створює фактор низькотемпературного охолодження і водночас сильно залежить від температурного коефіцієнта  $\beta$ , тоді як за звичайної крихкості виробу з КН перезміцнення створено лише структурою стопу вже за  $T_k$ . У результаті цього критичний параметр крихкості, на відміну від холодноламкості, може виявитися однопараметричним, що вимагає окремого розгляду.

Важливо також зазначити, що у структурно-детермінованих параметрів холодостійкості ( $P_{rc}$  і  $\sigma_{0,2c}/\sigma_{0,2}$ ) явною перевагою перед температурним  $\Delta T_c$ , є те, що для перших існує можливість чіткої структурної інтерпретації їхньої фізичної природи, а також — нескладної розрахункової оцінки їхніх критичних значень, таких важливих для практичної інженерії. За необхідності більш точні розрахунки необхідних параметрів окрихчування конструкційних стопів під дією КН можна здійснити за допомогою детально розробленої, хоча і досить складної аналітичної методології, представленої у серії робіт А. В. Шияна зі співавторами [13, 14].

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. И. П. Волчок, В. Г. Ковбаса, *Прочность сталей, работающих в условиях низких температур* (Москва: Metallurgiya: 1988), с. 5.
2. H. Conrad, *J. Iron and Steel Inst.*, **198**, No. 4: 364 (1961).
3. Ю. В. Мильман, В. И. Трефилов, *О физической природе температурной зависимости предела текучести. Механизм разрушения металлов* (Киев: Наукова думка: 1966), с. 59.
4. ГОСТ 9454-78. *Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах* (Москва: Издательство стандартов: 1978).
5. В. Н. Грищенко, Ю. Я. Мешков, Ю. А. Полушкин, А. В. Шиян, *Металлофиз. новейшие технол.*, **37**, № 7: 961 (2015).
6. Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, *Сталь*, № 4: 46 (2018).
7. Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, *Сталь*, № 3: 59 (2020).
8. Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, *Сталь*, № 1: 45 (2019).
9. П. Ф. Кошелев, С. Е. Беляев, *Прочность и пластичность конструкционных материалов при низких температурах* (Москва: Машиностроение: 1967).
10. А. В. Шиян, *Физическая природа локального напряжения хрупкого разрушения сталей и сварных швов* (Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук) (Киев: Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры: 1990).
11. В. С. Гнучев, *Проблемы прочности*, № 4: 113 (1977).
12. Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, *Сталь*, № 11: 113 (2018).
13. А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков, *Охрупчивание металлических сплавов в условиях концентрации напряжений. Конструкционные стали и титановые сплавы* (Саарбрюккен: LAP LAMBERT: 2015).
14. Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян, *Металлофиз. новейшие технол.*, **41**, № 6: 775 (2019).

## REFERENCES

1. I. P. Volchok and V. G. Kovbasa, *Prochnost' Staley, Rabotayushchikh v Usloviyakh Nizkikh Temperatur* [Strength of Steels at Low Temperatures] (Moscow: Metallurgiya: 1988), p. 5 (in Russian).
2. H. Conrad, *J. Iron and Steel Inst.*, **198**, No. 4: 364 (1961).
3. Yu. V. Mil'man and V. I. Trefilov, *O Fizicheskoy Prirode Temperaturnoy Zavisimosti Predela Tekuchesti. Mekhanizm Razrusheniya Metallov* [Physical Nature of the Temperature Dependence of Yield Stress. Metal Fracture Mechanism] (Kyiv: Naukova Dumka: 1966), p. 59 (in Russian).
4. GOST 9454-78. *Metally. Metod Ispytaniya na Udarnyy Izgib pri Ponizhennykh, Komnatnoy i Povyshennykh Temperaturakh* [Metals. Impact Bending Test Method at Low, Room and Elevated Temperatures] (Moscow: Izdatel'stvo Standartov: 1978) (in Russian).
5. V. M. Gryshchenko, Yu. Ya. Meshkov, Yu. O. Polushkin, and A. V. Shiyan, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **37**, No. 7: 961 (2015) (in Russian).
6. Yu. Ya. Meshkov and A. V. Shiyan, *Steel Transl.*, **48**: 256 (2018).

7. Yu. Ya. Meshkov and A. V. Shiyan, *Steel Transl.*, **50**: 192 (2020).
8. Yu. Ya. Meshkov and A. V. Shiyan, *Steel Transl.*, **49**: 66 (2019).
9. P. F. Koshelev and S. E. Belyaev, *Prochnost' i Plastichnost' Konstruktsionnykh Materialov pri Nizkikh Temperaturakh* [Strength and Plasticity of Structural Materials at Low Temperatures] (Moscow: Mashinostroenie: 1967) (in Russian).
10. A. V. Shiyan, *Fizicheskaya Priroda Lokal'nogo Napryazheniya Khrupkogo Razrusheniya Staley i Svarnykh Shvov* [Physical Nature of Local Stress of Brittle Fracture of Steels and Welds] (Thesis of Disser. for PhD Phys.-Math. Sci.) (Kyiv: Pridneprovskaya Gosudarstvennaya Akademiya Stroitel'stva i Arkhitektury: 1990) (in Russian).
11. V. S. Gnuchev, *Problemy Prochnosti*, No. 4: 113 (1977) (in Russian).
12. Yu. Ya. Meshkov and A. V. Shiyan, *Steel Transl.*, **48**: 745 (2018).
13. A. V. Shiyan and Yu. Ya. Meshkov, *Okhrupchivanie Metallicheskiy 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] (Saarbrücken: LAP LAMBERT: 2015) (in Russian).
14. Yu. Ya. Meshkov and A. V. Shiyan, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 6: 775 (2019) (in Russian).