



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 109974

(13) C2

(51) МПК

G01N 3/08 (2006.01)

G01N 3/18 (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ

## (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

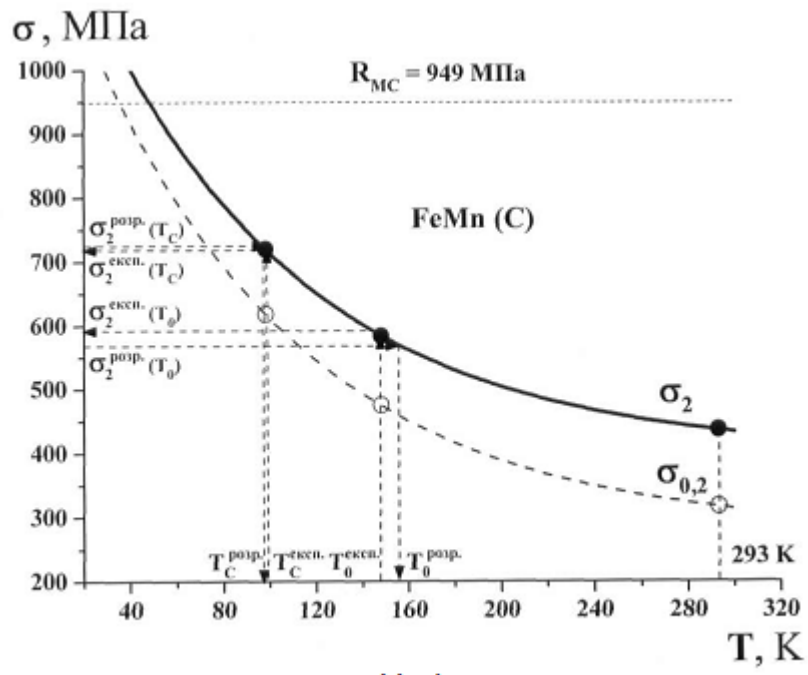
(21) Номер заявки:	а 2014 05366	(72) Винахідник(и):	Шиян Артур Віталійович (UA), Мешков Юрій Якович (UA), Сорока Катерина Феодосіївна (UA)
(22) Дата подання заявки:	20.05.2014	(73) Власник(и):	ІНСТИТУТ МЕТАЛОФІЗИКИ ІМ. Г.В. КУРДЮМОВА НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ, бул. Вернадського, 36, м. Київ-142, МСП, 03680 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на винахід:	26.10.2015	(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою:	Smida T., Babjak J., Dlouhy I. Prediction of fracture toughness temperature dependence from tensile test parameters // Kovove Mater.- 2010, 48. - Р. 1-8 UA 66722 U, 10.01.2012 Шиян А. В., Котречко С. А., Мешков Ю. Я., Сорока Е.Ф., Носенко О.П., Федорова И.С. Методические основы оценки качества конструкционных сталей по их способности сопротивляться хрупкому разрушению при одноосном растяжении // МТОМ. - 2014, № 2. - С. 5-28 UA 97081 C2, 26.12.2011 UA 66342 U; 26.12.2011 RU 2155329 C1, 27.08.2000 SU 1479847 A1, 15.05.1989 CN 101726441 A, 09.06.2010
(41) Публікація відомостей про заявку:	25.09.2014, Бюл.№ 18		
(46) Публікація відомостей про видачу патенту:	26.10.2015, Бюл.№ 20		

## (54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ КРИХКОСТІ КОНСТРУКЦІЙНОЇ СТАЛІ

### (57) Реферат:

Винахід належить до галузі дослідження властивостей твердих матеріалів шляхом прикладання статичних навантажень, а саме до визначення критичної температури крихкості конструкційної сталі (КС). Запропонований спосіб дозволяє розробити загальну методику для прогнозування критичної температури крихкості КС за результатами відносно простих і дешевих випробувань на квазістатичний одновісний розтяг стандартних гладких зразків в інтервалі температур від 77 К до 293 К, тобто за даними базових механічних характеристик КС, з достатньою для практичного використання точністю. Крім цього, за допомогою запропонованого способу можна визначати критичні характеристики міцності і механічної стабільності металу, який знаходиться в умовах концентрації напружень та складного напруженого-деформованого стану. Інформація про критичні значення температур крихкості, характеристик міцності і механічної стабільності металу є важливою при виборі КС для особливо відповідальних конструкцій, в тому числі об'єктів ядерної енергетики.

UA 109974 C2



Фиг. 1

Винахід належить до галузі дослідження властивостей твердих матеріалів шляхом прикладання статичних навантажень, а саме до визначення критичної температури крихкості конструкційної сталі (далі - КС) за допомогою випробувань на одновісне розтягнення стандартних гладких зразків та циліндричних зразків з кільцевим концентратором типу Шарпі, а також випробувань на триточковий згин зразків типу SE(B) з втомною тріщиною в інтервалі температур випробувань від 77 К до 293 К.

Під КС розуміють промислові матеріали, що використовують в будівництві, ядерній енергетиці, криогенній техніці, машинобудівництві тощо. При цьому ефективність використання КС в багатьох призначеннях можна значною мірою підвищити легуванням та методами термічної обробки.

Відомий спосіб визначення критичної температури крихкості (в'язко-крихкого переходу) КС, при якому проводять випробування стандартних гладких циліндричних зразків на одновісне розтягнення при температурах в інтервалі від 77 К до 293 К та визначають характеристику крихкої міцності  $R_{MC}$  при величині залишкової деформації в місці розриву зразка  $\psi_K = 2\%$  та характеристику механічної стабільності  $K_{ms}$  за відомою формулою:

$$K_{ms} = R_{MC} / \sigma_2,$$

де:  $\sigma_2$  - міцність пластичного металу при критичному ступені деформації  $e_c = 2\%$ , після чого будують температурну залежність характеристики механічної стабільності  $K_{ms} = f(T)$  та визначають на ній критичну температуру крихкості гладких зразків  $T_{bx}$  за умови, що  $K_{ms} = 1$  [1].

Недоліком даного способу є відсутність зв'язку базових механічних характеристик металу, таких, як  $\sigma_{0,2}$  - умовна межа текучості,  $\sigma_B$  - межа міцності,  $\psi_K$  - відносне звуження зразка після руйнування, та критичної температури крихкості  $T_{bx}$  гладких зразків КС з критичною температурою крихкості  $T_c$  циліндричних зразків з кільцевим концентратором типу Шарпі або критичною температурою крихкості  $T_0$  зразків типу SE(B) з втомною тріщиною в умовах складного напружено-деформованого стану.

Найбільш близьким за технічною суттю та результатом, що досягається, до способу, що заявляється, є спосіб визначення критичної температури крихкості  $T_c$  КС шляхом випробувань зразків з кільцевими концентраторами типу Шарпі, при якому визначають величину середнього номінального напруження руйнування  $\sigma_{NF}$  в інтервалі температур випробувань від 77 К до 293 К та будують його температурну залежність  $\sigma_{NF} = f(T)$ , будують також температурну залежність напруження загальної текучості  $\sigma_{GY} = f(T)$ , після чого визначають критичну температуру крихкості  $T_c$  в точці перетину цих температурних залежностей, стандартних гладких зразків на одновісне розтягнення при температурах 293 К і  $T_c$  та визначення при цьому базових механічних характеристик, а визначення критичної температури крихкості  $T_0$  КС проводять за методикою Майстер кривої шляхом випробування великомасштабних (240 × 50 × 25 мм) зразків типу SE(B) з втомною тріщиною на триточковий згин в інтервалі температур від 77 К до 293 К. При цьому, значення  $T_0$  використовують для прогнозування радіаційного ресурсу водо-водяних енергетичних реакторів [2].

Разом з тим, спосіб визначення критичних температур крихкості  $T_c$  або  $T_0$  КС за найближчим аналогом має наступні недоліки: а) складність, тривалість в часі та висока вартість виготовлення дослідних зразків; б) технічна складність методик експериментального визначення критичних температур крихкості  $T_c$  та  $T_0$ ; в) відсутність методики достовірного прогнозування критичної температури крихкості  $T_c$  або  $T_0$  для широкого кола КС з використанням даних тільки базових механічних характеристик металу, що отримують за результатами відносно простих і дешевих випробувань гладких зразків на одновісне розтягнення.

В основу винаходу поставлено задачу вдосконалення способу визначення критичних температур крихкості  $T_c$  та  $T_0$  КС за допомогою випробувань зразків з концентраторами напружень (далі - КН) відповідно на одновісне розтягнення та триточковий згин, стандартних гладких зразків на одновісне розтягнення при та визначення при цьому базових механічних характеристик в інтервалі температур від 77 К до 293 К, шляхом отримання достатньої кількості експериментальних даних для побудови температурних залежностей характеристик умовної межі текучості  $\sigma_{0,2}$  та міцності пластичного металу  $\sigma_2$  при критичному ступені деформації 2 % з

метою визначення їх критичних величин  $\sigma_{0,2C}$  і  $\sigma_{0,2C}$  при температурах крихкості  $T_c$  та  $T_0$ . Це дозволило авторам на основі отриманих результатів визначити характеристики механічної стабільності  $K_{ms}$  і  $K_{msc}$ , та їх оптимальні величини  $K_{ms}^{opt}$  і  $K_{msc}^{opt}$ , показники міри механічної якості  $\mu_{Kms}^{\sigma}$  і міри якості за окрихчуваністю  $\mu_{Kmsc}^{\sigma}$  металу, відповідно, без КН та під дією КН, оптимальні

5 значення міцності  $\sigma_2^{opt}$  і  $\sigma_{2C}^{opt}$  за даними величин міцності  $\sigma_2$  металу при деформації  $e_c = 2\%$  для оптимізованих КС та побудувати закономірності зміни конструкційної якості металу у вигляді показника співвідношення двох мір якості  $\mu_{Kmsc}^{\sigma} / \mu_{Kms}^{\sigma}$  від співвідношення двох відповідних показників механічної стабільності  $K_{msc} / K_{ms}$ , що характеризують КС при двох видах випробувань - з КН и без КН. Ці закономірності за своїм змістом є закономірностями структурно-механічного окрихчення КС. Крім того, на основі відомої системи взаємозв'язку характеристик "пластичність-міцність-механічна стабільність" та їх оптимізації, авторами було встановлено зв'язок між показником зміни конструкційної міцності КС при критичній деформації  $e_c \approx 2\%$  у вигляді співвідношення  $\sigma_2 / \sigma_{2C}$  з відповідним показником зміни умовної межі текучості у вигляді співвідношення  $\sigma_{0,2} / \sigma_{0,2C}$  нормованим на відповідне співвідношення оптимальних значень

10 міцності  $\sigma_2^{opt} / \sigma_{2C}^{opt}$  при деформації  $e_c \approx 2\%$ . При побудові вказаних залежностей була врахована відома методика розподілу КС на види за характером поведінки їх механічних характеристик та встановлена авторами можливість зміни або збереження належності КС до відповідного початкового виду поведінки механічних характеристик при кімнатній температурі випробувань  $T_{вип.} = 293K$  і кінцевого виду при критичній температурі  $T_c$  або  $T_0$ . Таким чином,

20 було сформовано чотири можливих комбінації поведінки механічних характеристик за наступними видовими переходами: 1-1, 2-2 - в разі збереження початкового виду КС без дії КН (1-го або 2-го) в кінцевих критичних умовах під дією КН; 1-2, 2-1 - в разі зміни початкової видової належності в кінцевих умовах. Отримані залежності дали змогу віднайти систему рівнянь, вирішення якої чисельними методами дозволяє розрахувати критичні параметри міцності  $\sigma_{0,2C}$ ,

25  $\sigma_{2C}$  та механічної стабільності  $K_{msc}$  при  $T_c$  або  $T_0$  для шуканої КС. Це дало змогу визначати критичну температуру крихкості  $T_c$  або  $T_0$  КС за відомим значенням міцності  $\sigma_{2C}$  при  $e_c \approx 2\%$  на температурній залежності  $\sigma_2 = f(T)$ . Запропонований спосіб дозволяє прогнозувати критичну температуру крихкості  $T_c$  або  $T_0$  КС за результатами відносно простих і дешевих випробувань на квазістатичний одновісний розтяг стандартних гладких зразків в інтервалі температур від 77 К до 293 К, тобто за даними базових механічних характеристик КС, з достатньою для практичного використання точністю. Крім цього, за допомогою запропонованого способу можна визначати критичні характеристики міцності і механічної стабільності металу, який знаходиться в умовах концентрації напружень та складного напруженого-деформованого стану - далі НДС, що робить даний спосіб більш інформативним.

35 Поставлена задача вирішується тим, що у відомому способі визначення критичної температури крихкості конструкційної сталі, при якому проводять випробування зразків з кільцевими КН типу Шарпі на одновісне розтягнення і визначення при цьому критичної температури крихкості  $T_c$  за умови загальної текучості, стандартних гладких зразків на одновісне розтягнення при температурах 293 К і  $T_c$  та визначення при цьому базових

40 механічних характеристик, а визначення критичної температури крихкості  $T_0$  проводять за методикою Майстер кривої шляхом випробувань зразків типу SE(B) з втомною тріщиною на триточковий згин, згідно з винаходом, будують для досліджуваної КС температурні залежності характеристик умовної межі текучості  $\sigma_{0,2}$  та міцності пластичного металу  $\sigma_2$  при критичному ступені деформації 2 %, визначають їх критичні величини  $\sigma_{0,2C}$  і  $\sigma_{2C}$  при температурах

45 крихкості  $T_c$  та  $T_0$ , за отриманими даними визначають характеристики механічної стабільності  $K_{ms}$  і  $K_{msc}$  та їх оптимальні величини  $K_{ms}^{opt}$  і  $K_{msc}^{opt}$ , показники міри механічної якості  $\mu_{Kms}^{\sigma}$  і міри якості за окрихчуваністю  $\mu_{Kmsc}^{\sigma}$  металу, відповідно, в умовах відсутності КН та дії КН, оптимальні значення міцності  $\sigma_2^{opt}$  і  $\sigma_{2C}^{opt}$  при деформації 2 % для оптимізованих КС, після цього, враховуючи розподіл КС на види за характером поведінки їх механічних характеристик в умовах дії КН при температурі  $T_c$  або  $T_0$  та за відсутності КН при температурі 293 К, будують закономірності зміни конструкційної якості металу у вигляді показника співвідношення двох мір

якості  $\mu_{K_{msc}}^{\sigma} / \mu_{K_{ms}}^{\sigma}$  від співвідношення двох відповідних показників механічної стабільності  $K_{msc} / K_{ms}$  та закономірності зміни конструкційної міцності КС у вигляді показника співвідношення двох величин міцності  $\sigma_2 / \sigma_{2C}$  при критичній деформації 2 % від співвідношення двох відповідних показників умовної межі текучості  $\sigma_{0,2} / \sigma_{0,2C}$  нормованих на співвідношення

5 відповідних оптимальних значень міцності  $\sigma_2^{\text{опт}} / \sigma_{2C}^{\text{опт}}$ , далі, за отриманими залежностями, розраховують критичну міцність  $\sigma_{2C}$  шуканої КС при  $T_c$  або  $T_0$  чисельними методами, за величиною якої визначають критичну температуру крихкості  $T_c$  або  $T_0$ , використовуючи температурну залежність  $\sigma_2 = f(T)$ .

За рахунок побудови авторами залежностей  $\mu_{K_{msc}}^{\sigma} / \mu_{K_{ms}}^{\sigma} = f(K_{msc} / K_{ms})$  та

10  $\sigma_2 / \sigma_{2C} = f[(\sigma_{0,2} / \sigma_{0,2C}) \cdot (\sigma_2^{\text{опт}} / \sigma_{2C}^{\text{опт}})]$  запропонований спосіб дозволяє з більш високою і достатньою для практичного використання точністю визначати критичну температуру крихкості КС  $T_c$  або  $T_0$ , а також критичні характеристики міцності  $\sigma_{0,2C}$ ,  $\sigma_{2C}$  та механічної стабільності  $K_{msc}$  при  $T_c$  або  $T_0$  металу, який знаходиться в критичних умовах складного НДС. При цьому автори використовували експериментальні дані базових механічних характеристик металу, а

15 саме: умовної межі текучості  $\sigma_{0,2}$ ; межі міцності  $\sigma_B$ ; відносного звуження після руйнування зразка  $\psi_K$ , отримані при температурах випробувань 293 К і  $T_c$ , а також значення критичної температури крихкості  $T_0$  для модельних КС. Це дозволило побудувати температурні залежності характеристик міцності  $\sigma_{0,2} = f(T)$  та  $\sigma_2 = f(T)$  та визначити на них критичні величини  $\sigma_{0,2C}$  і  $\sigma_{2C}$  при температурах крихкості  $T_c$  та  $T_0$ , за якими були побудовані закономірності зміни

20 конструкційної якості металу (структурно-механічного окрихчення)  $\mu_{K_{msc}}^{\sigma} / \mu_{K_{ms}}^{\sigma} = f(K_{msc} / K_{ms})$  та зміни конструкційної міцності при критичній деформації 2 %  $\sigma_2 / \sigma_{2C} = f[(\sigma_{0,2} / \sigma_{0,2C}) \cdot (\sigma_2^{\text{опт}} / \sigma_{2C}^{\text{опт}})]$  для досліджуваних КС. При цьому використовували методику розподілу КС на види за характером поведінки їх механічних характеристик та враховували можливість зміни або збереження належності КС до відповідного початкового виду поведінки механічних

25 характеристик при кімнатній температурі випробувань  $T_{\text{вип.}} = 293\text{К}$  за відсутністю КН і кінцевого виду при критичній температурі  $T_c$  або  $T_0$  в присутності КН. Використання встановлених модельних закономірностей дало змогу визначати розрахунковим способом величини критичних характеристик міцності  $\sigma_{0,2C}$  і  $\sigma_{2C}$  та механічної стабільності  $K_{msc}$  металу, який знаходиться під дією КН, а за температурною залежністю  $\sigma_2 = f(T)$  і відомим значенням

30 характеристики  $\sigma_{2C}$  шуканої КС - її критичну температуру крихкості  $T_c$  або  $T_0$ . Інформація про значення критичних температур крихкості  $T_c$  та  $T_0$  є важливою при виборі КС для відповідальних конструкцій, в тому числі об'єктів ядерної енергетики, що експлуатуються в умовах концентрації напружень та складного НДС.

Запропонований спосіб пояснюється таблицями та графіками, а саме: в таблиці 1 наведені значення емпіричних коефіцієнтів в залежностях (9) та (10) для різних видових переходів досліджуваних КС;

в таблиці 2 наведені результати визначення характеристик міцності  $\sigma_{2C}^{\text{розр.}}$  при деформації  $e_c = 2\%$  і критичних температурах крихкості  $T_c$  та  $T_0$ , величин самих температур крихкості  $T_c^{\text{розр.}}$ ,  $T_0^{\text{розр.}}$  для досліджуваних КС в умовах дії КН типу К1 і К2 та оцінки точності

40 запропонованого способу;

на фіг. 1 зображений спосіб визначення експериментального значення міцності  $\sigma_{2C}$  при деформації  $e_c = 2\%$  і критичній температурі крихкості  $T_0$ ; розрахункові значення характеристик  $a_{2C}$  при температурах  $T_c$  і  $T_0$  та самих критичних температур крихкості  $T_c$  та  $T_0$ ; температурні залежності характеристик міцності  $\sigma_{0,2} = f(T)$  та  $\sigma_2 = f(T)$  для сталі FeMn (С) [2]; о, • - експериментальні дані;

45

на фіг. 2 зображені залежності оптимальних значень механічної стабільності  $K_{ms}^{opt}$  та міцності  $\sigma_2^{opt}$  при деформації  $\epsilon_c \approx 2\%$  від умовної межі текучості  $\sigma_{0,2}$  для двох видів поведінки механічних характеристик КС;

на фіг. 3 зображені залежності показників зміни конструкційної якості  $\mu_{K_{msc}}^\sigma / \mu_{K_{ms}}^\sigma$  від показників зміни механічної стабільності  $K_{msc} / K_{ms}$  для КС двох початкових видів поведінки механічних характеристик при критичній температурі крихкості  $T_c$  (криві 1) та при критичній температурі крихкості  $T_0$  (криві 2): а) 1-го: суцільні лінії - видовий перехід 1-1, штрихові лінії - видовий перехід 1-2; б) 2-го: суцільні лінії - видовий перехід 2-2, штрихові лінії - видовий перехід 2-1; експериментальні дані: темні знаки - КН типу К1; світлі знаки - КН типу К2; літери англійською - означення досліджуваних КС в [2] та табл. 2;

на фіг. 4 зображені залежності показників зміни конструкційної міцності  $\sigma_2 / \sigma_{2C}$  при деформації  $\epsilon_c \approx 2\%$  від показників зміни умовної межі міцності  $\sigma_{0,2} / \sigma_{0,2C}$ , нормованих на співвідношення відповідних оптимальних значень міцності  $\sigma_2^{opt} / \sigma_{2C}^{opt}$ , для видових переходів: суцільні лінії - видові переходи 1-1 та 2-2, штрихові лінії - видові переходи 1-2 та 2-1; темні знаки - КН типу К1; світлі знаки - КН типу К2;

на фіг. 5 зображений приклад визначення міцності  $\sigma_{2C}$  зразка з КН типу К1 сталі CrNi (Т) [2] при критичній температурі крихкості  $T_c$  в результаті вирішення системи рівнянь (11) чисельними методами;

на фіг. 6 зображені залежності величини механічної стабільності: критичного рівня  $K_{ms}^{kp}$  (крива 1) та оптимальної  $K_{ms}^{opt}$  (крива оптимізації 2) від міцності  $\sigma_{0,2}$ , 2 для визначення видового переходу зразків початкового 1-го виду поведінки механічних характеристик КС, що мають КН; А, В - області зміни конструкційної якості; "О", "С", "У" - досліджувані КС; темні смуги - відображення мір якості  $\mu_{K_{ms}}^\sigma$ ,  $\mu_{K_{msc}}^\sigma$ , відповідно, за (4) і (5).

Спосіб реалізується наступним чином.

З метою побудови експериментальних залежностей  $\mu_{K_{msc}}^\sigma / \mu_{K_{ms}}^\sigma = f(K_{msc} / K_{ms})$  та  $\sigma_2 / \sigma_{2C} = f[(\sigma_{0,2} / \sigma_{0,2C}) \cdot (\sigma_2^{opt} / \sigma_{2C}^{opt})]$  матеріали для досліджень добирали за принципом широкого охоплення різноманітних комбінацій властивостей міцності та пластичності КС, що використовуються в ядерній енергетиці та належать до різних класів за структурним станом, якістю і хімічним складом. При цьому базові механічні характеристики змінювались в наступних інтервалах: міцність - від  $\sigma_{0,2} = 194 \text{ МПа}$  до  $\sigma_{0,2} = 934 \text{ МПа}$ , пластичність - від  $\psi_K = 30,9\%$  до  $\psi_K = 85,5\%$  при температурі випробувань  $T_{вип.} = 293 \text{ К}$ . Проводили випробування на одновісне розтягнення зразків з кільцевим КН (радіус  $r = 0,25 \text{ мм.}$ ; кут розкриття  $w = 45^\circ$  - далі концентратор типу К1) і статичний триточковий згин зразків типу SE(B) з втомною тріщиною - далі концентратор типу К2 та, відповідно, визначали критичні температури крихкості  $T_c$  за умови загальної текучості, а  $T_0$  за методикою Майстер кривої [3]. Крім того, проводили випробування стандартних гладких циліндричних зразків на одновісне розтягнення при кімнатній температурі (293 К) і температурі  $T_c$  з метою визначення базових механічних характеристик КС: умовної межі текучості  $\sigma_{0,2}$ ; межі міцності  $\sigma_B$  та відносного звуження зразка після руйнування  $\psi_K$  [2]. Це дозволило отримати достатній об'єм даних для подальшої коректної статистичної обробки.

Методика визначення критичних температур крихкості  $T_c$  або  $T_0$  конструкційної сталі за даними її базових механічних характеристик полягає у наступному:

1) за результатами випробувань стандартних гладких циліндричних зразків на одновісне розтягнення при температурах 293 К і  $T_c$  та визначення базових механічних характеристик досліджуваних КС [2] проводять обробку цих даних, використовуючи методику [4] з метою визначення характеристик крихкої міцності  $R_{MC}$  та механічної стабільності  $K_{ms}$  при 293 К і  $K_{msc}$  при  $T_c$  за відомими залежностями:

$$K_{ms} = R_{MC} / \sigma_2, \quad (1)$$

$$K_{msc} = R_{MC} / \sigma_{2C}, \quad (2)$$

де:  $\sigma_2$ ,  $\sigma_{2C}$  - міцність металу при деформації  $\epsilon_c = 2\%$  відповідно при 293 К без КН та при  $T_c$  під дією КН;

- 2) будують температурну залежність міцності  $\sigma_2 = f(T)$  за відомими значеннями  $\sigma_2$  при 293 К і при  $T_c$ , на якій за відомою експериментальною величиною критичної температури крихкості  $T_0$  визначають міцність  $\sigma_{2C}$  при деформації  $\epsilon_c = 2\%$  (фіг. 1) та, згідно з (2), механічну стабільність  $K_{msc}$  металу при цій температурі.

При побудові температурної залежності  $\sigma_2 = f(T)$  використовують температурну залежність умовної межі текучості  $\sigma_{0,2} = f(T)$ , досліджену в [5] та модифіковану авторами для умов квазістатичного розтягнення у вигляді:

$$\sigma_{0,2}(T) = \sigma_{0,2}(293) + C_1 \cdot \exp[-(C_2 - C_3 \cdot \ln \dot{\epsilon}) \cdot T] - C_1 \cdot \exp[-(C_2 - C_3 \cdot \ln \dot{\epsilon}) \cdot 293], \quad (3)$$

- де:  $\dot{\epsilon}$  - швидкість деформації (при квазістатичному розтягненні:  $\dot{\epsilon} = 0,0004 \text{ с}^{-1}$ ;  $C_3 = 0,000415$  - константа);  $\sigma_{0,2}(293)$  - умовна межа текучості при 293 К;  $C_1$  - коефіцієнт, який характеризує максимальну висоту термічно переборних бар'єрів;  $C_2$  - коефіцієнт, який залежить від щільності дислокацій та довжини дислокаційних сегментів [5]. В формулі (3) значення коефіцієнта  $C_2$  залежить від величини пластичної деформації, що дозволяє використовувати її для побудови не тільки температурної залежності  $\sigma_{0,2} = f(T)$ , але й температурної залежності  $\sigma_2 = f(T)$  при умові збереження величини коефіцієнта  $C_1$  (фіг. 1);

- 3) за отриманими даними визначають характеристики механічної стабільності:  $K_{ms}$ , яка відображує загальний запас опору крихкості металу як такого;  $K_{msc}$ , що відображує частину запасу опору крихкості, втраченого в умовах присутності в зразку КН, та, за своєю природою, є мірою окрихчуваності металу. Визначають також якісні показники металу:

міру механічної якості  $\mu_{K_{ms}}^{\sigma}$  металу за механічною стабільністю  $K_{ms}$  при заданій міцності  $\sigma_{0,2}$  [6]:

$$\mu_{K_{ms}}^{\sigma} = K_{ms} / K_{ms}^{opt}, \quad (4)$$

- де:  $K_{ms}^{opt}$  - оптимальне (найвище) значення механічної стабільності КС при заданій міцності  $\sigma_{0,2}$  на кривій оптимізації [6];

відповідно до (4), міру якості за окрихчуваністю  $\mu_{K_{msc}}^{\sigma}$  металу за механічною стабільністю  $K_{msc}$  при заданій міцності  $\sigma_{0,2C}$ ,

$$\mu_{K_{msc}}^{\sigma} = K_{msc} / K_{msc}^{opt}, \quad (5)$$

- де:  $K_{msc}^{opt}$  - оптимальне (найвище) значення механічної стабільності КС при заданій міцності  $\sigma_{0,2C}$  на кривій оптимізації.

- В [6] було показано, що систему взаємозв'язку властивостей КС "пластичність-міцність-механічна стабільність", яка описується за допомогою параболічних рівнянь регресії  $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$  при умові  $K_{ms} = \text{const}$ , можна розділити на два види поведінки механічних характеристик при зміні міцності  $\sigma_{0,2}$ : перший характеризується наявністю максимумів ( $\psi_K^{\text{макс}}, \sigma_{0,2}^{\text{макс}}$ ), а другий – наявністю мінімумів ( $\psi_K^{\text{мін}}, \sigma_{0,2}^{\text{мін}}$ ) на заданих рівнях  $K_{ms}$ . Відповідно до цього:

для КС 1 -го виду поведінки механічних характеристик відкоректована авторами залежність параметра  $K_{ms}^{opt}$  в (4) від міцності  $\sigma_{0,2}$  має вигляд (фіг. 2):

$$K_{ms}^{opt} = a \cdot \ln[b + c / (1 + d \cdot \sigma_{0,2}^m)], \quad (6)$$

- де:  $a = -0,476$ ;  $b = 2,87 \cdot 10^{-3}$ ;  $c = 2,37 \cdot 10^{-3}$ ;  $d = 5,40 \cdot 10^{-4} [\text{МПа}^{-1}]$ ;  $m = -4,673$  - емпіричні коефіцієнти; для КС 2-го виду поведінки механічних характеристик використовують залежність (6) з емпіричними коефіцієнтами:

$$a = -0,392; b = 1,60 \cdot 10^{-4}; c = 1,28 \cdot 10^{-5}; d = 6,72 \cdot 10^{-3} [\text{МПа}^{-1}]; m = -2,886 \quad (7)$$

- 4) для визначення оптимальних величин міцності  $\sigma_2^{opt}$  беруть значення міцності  $\sigma_2$  металу при деформації  $\epsilon_c = 2\%$  для оптимізованих КС, що використовувались в [6] при побудові кривих оптимізації. Аналіз показав, що залежності  $\sigma_2^{opt} = f(\sigma_{0,2})$  апроксимуються експоненціальною функцією виду (фіг. 2):

$$\sigma_{2C}^{opt} = A_{1,2} \cdot \exp(\sigma_{0,2} / B_{1,2}) - C_{1,2}, \text{ МПа}, (8)$$

де: для КС 1-го виду:  $A_1=5191,4$ ;  $B_1=6144,3$ ;  $C_1=5034,1$ ; а для КС 2-го виду:  $A_2=5585,0$ ;  $B_2=6519,3$ ;  $C_2=5379,8$  - емпіричні коефіцієнти.

Відповідно, для визначення показників  $K_{msc}^{opt}$  і  $\sigma_{2C}^{opt}$ , в залежності (6) - (8)

5 замість значень міцності  $\sigma_{0,2}$  підставляють значення критичної міцності  $\sigma_{0,2C}$  при  $T_c$  або  $T_0$ .

5) за отриманими даними будують закономірності зміни конструкційної якості металу у вигляді показника співвідношення двох мір якості  $\mu_{Kmsc}^{\sigma} / \mu_{Kms}^{\sigma}$  від співвідношення двох відповідних показників механічної стабільності  $K_{msc} / K_{ms}$ .

10 При побудові залежностей  $\mu_{Kmsc}^{\sigma} / \mu_{Kms}^{\sigma} = f(K_{msc} / K_{ms})$  враховують можливість збереження або зміни належності КС до відповідного початкового (при  $T_{вип.} = 293K$ ) та кінцевого (при  $T_c$  або  $T_0$ ) виду поведінки механічних характеристик. Таким чином, формують чотири можливих комбінації поведінки механічних характеристик металу або чотири видові переходи в умовах відсутності КН та дії КН: 1-1, 2-2 - у випадку збереження початкового (без КН) виду КС (1-го чи 2-го) в кінцевих критичних умовах (під дією КН); 1-2, 2-1 - у випадку зміни початкового виду в кінцевих умовах. Закономірності зміни конструкційної якості металу (структурно-механічного окрихнення) в приведеному стані мають наступний вигляд (фіг. 3):

$$K_{ms}^{opt} = K_{msc}^{opt} \cdot \sigma_{0,2} / \sigma_{0,2C} \cdot [A + B \cdot (\sigma_{0,2} / \sigma_{0,2C}) - C(\sigma_{0,2} / \sigma_{0,2C})^2], (9)$$

де: А, В, С - емпіричні коефіцієнти, що залежать від видового переходу КС (див. табл. 1).

20 6) далі будують закономірності зміни конструкційної міцності КС при деформації 2 % у вигляді показника співвідношення  $\sigma_2 / \sigma_{2C}$  з відповідним показником зміни умовної межі текучості  $\sigma_{0,2} / \sigma_{0,2C}$ , нормованим на співвідношення оптимальних значень міцності  $\sigma_2^{opt} / \sigma_{2C}^{opt}$ , також враховуючи принцип розподілу КС на види за характером поведінки їх механічних характеристик в умовах дії КН при температурі  $T_c$  або  $T_0$  та відсутності КН при температурі 293 К (фіг. 4):

$$25 \quad \sigma_2 / \sigma_{2C} = a + b \cdot (\sigma_{0,2} / \sigma_{0,2C}) \cdot (\sigma_2^{opt} / \sigma_{2C}^{opt}) - c \cdot [(\sigma_{0,2} / \sigma_{0,2C}) \cdot (\sigma_2^{opt} / \sigma_{2C}^{opt})]^2, (10)$$

де: а, b, с - емпіричні коефіцієнти, що залежать від видового переходу КС (див. табл. 1);

7) за отриманими залежностями (9) і (10) формують систему рівнянь, вирішення якої чисельними методами дозволяє розрахувати величину критичної міцності  $\sigma_{2C}$  при  $T_c$  або  $T_0$  для шуканої КС (фіг. 5):

$$30 \quad M = K_{ms}^{opt},$$

$$N = K_{msc}^{opt} \cdot \sigma_{2C} \cdot (A + B \cdot X) - C \cdot X^2 / \sigma_2, (11)$$

де:  $X = \sigma_2 / \sigma_{2C}$ ;  $\sigma_{2C} = \sigma_2 / (a + b \cdot Y - c \cdot Y^2)$ , МПа;  $Y = (\sigma_{0,2} / \sigma_{0,2C}) \cdot (\sigma_2^{opt} / \sigma_{2C}^{opt})$ ; А, В, С, а, b, с - емпіричні коефіцієнти, що залежать від видового переходу КС (див. табл. 1).

35 Важливо зазначити, що відоме значення критичної міцності  $\sigma_{2C}$  дає змогу визначати інші критичні характеристики КС, що знаходиться під дією КН, а саме: умовну межу текучості  $\sigma_{0,2C}$  за залежністю (10) і механічну стабільність  $K_{msc}$  за залежністю (2).

З метою визначення видового переходу для шуканої КС використовують спеціальну методику, яка заснована на використанні особливих критичних характеристик міцності  $\sigma_{0,2}^{kp}$  і пластичності  $\psi_k^{kp}$ , що визначають умови належності цього сплаву до певних видів поведінки механічних характеристик при зміні його міцності від  $\sigma_2$  до  $\sigma_{2C}$  в результаті дії КН. В [6] встановлена залежність  $\sigma_{0,2}^{kp} = f(K_{ms})$ , використання якої в оберненому вигляді дозволяє визначити критичний рівень механічної стабільності  $K_{ms}^{kp}$ , при якому відбувається зміна виду поведінки механічних характеристик КС:

$$K_{ms}^{kp} = \lg[b / (\sigma_{0,2} - a) - 1] - c, (12)$$

45 де:  $a=107,40$ , МПа;  $b=1128,80$ , МПа;  $c=1,79$  - емпіричні коефіцієнти.

Видовий перехід для шуканого сплаву визначають за принципом, представленим на фіг. 6 для КС 1-го початкового виду поведінки механічних характеристик. На фіг. 6 показано, що видовий перехід КС залежить від зміни її конструкційної якості в умовах концентрації напружень: збереження виду КС відбувається за умови, якщо рівень початкової міри механічної



якості  $\mu_{Kms}^{\sigma}$  і кінцевої міри якості за окрихчуваністю  $\mu_{Kmsc}^{\sigma}$  при заданих рівнях міцності, відповідно,  $\sigma_{0,2}$  і  $\sigma_{0,2C}$ , знаходяться в певних областях зміни конструкційної якості - в межах області А (випадок КС "Y") або в межах області В (випадок КС "C"), що розмежовані залежністю (12) - крива 1 на фіг. 6. В цих випадках відбувається збереження виду поведінки механічних характеристик при зміні міцності  $\sigma_{0,2}$  в результаті дії КН - видові переходи 1-1 або 2-2. Якщо рівні початкової  $\mu_{Kms}^{\sigma}$  і кінцевої  $\mu_{Kmsc}^{\sigma}$  міри якості знаходяться в різних областях А і В (випадок КС "O"), то це призводить до зміни виду поведінки механічних характеристик при зміні міцності від  $\sigma_{0,2}$  до  $\sigma_{0,2C}$  в результаті дії КН - видові переходи 1-2 або 2-1.

Спосіб визначення видового переходу для шуканої КС в умовах концентрації напружень полягає в наступному:

принцип визначення кінцевого виду поведінки механічних характеристик КС не залежить від способу визначення критичної температури крихкості ( $T_c$ ,  $T_0$  або ін.) та початкового виду КС при  $T_{вип.} = 293K$ ;

визначають початковий вид поведінки механічних характеристик шуканої КС за відсутності дії КН при  $T_{вип.} = 293K$  згідно з методикою [6];

в залежності від початкового виду поведінки механічних характеристик шуканої КС, визначають критичні характеристики  $\sigma_{0,2C}$ ,  $\sigma_{2C}$  і  $K_{msc}$  в умовах дії КН для видового переходу 1-1 або 2-2 за допомогою запропонованого способу;

якщо за результатами розрахунку маємо  $K_{ms} \geq K_{ms}^{kp}$ ; та  $K_{msc} \geq K_{ms}^{kp}$ ; (див. випадок "Y" на фіг. 6) або  $K_{ms} < K_{ms}^{kp}$ ; и  $K_{msc} < K_{ms}^{kp}$  (див. випадок "C" на фіг. 6), то належність до початкового виду поведінки механічних характеристик шуканої КС при величині міцності  $\sigma_{0,2}$  збереглась і, кінцевий вид цієї сталі при  $\sigma_{0,2C}$  відповідає початковому, тобто маємо вірний розрахунок для видового переходу 1-1 або 2-2;

якщо за результатами розрахунку маємо  $K_{ms} \geq K_{ms}^{kp}$ , а  $K_{msc} < K_{ms}^{kp}$  (див. випадок "O" на фіг. 6), то належність до початкового виду поведінки механічних характеристик шуканої КС при величині міцності  $\sigma_{0,2}$  не збереглась і, кінцевий вид цієї сталі при  $\sigma_{0,2C}$  не відповідає початковому, тобто треба повторити розрахунок для видового переходу 1-2 або 2-1. Для випадку, коли  $K_{ms} < K_{ms}^{kp}$ , а  $K_{msc} \geq K_{ms}^{kp}$ , визначення видового переходу проводиться аналогічно.

8) на завершення, за величиною критичної міцності  $\sigma_{0,2C}$  визначають критичну температуру крихкості  $T_c$  або  $T_0$ , використовуючи температурну залежність  $\sigma_2 = f(T)$ .

Приклад визначення критичної температури крихкості  $T_c^{розн.}$  за розрахунковим значенням критичної міцності  $\sigma_{2C}^{розн.}$  для сталі FeMn (C) [2] наведений на фіг. 1.

В таблиці 2 наведені результати оцінки точності визначення критичної міцності КС  $\sigma_{2C}^{расч.}$ , при якій величина вибіркового стандарту складає: при дії КН типу K1 1,97 % з вірогідністю 0,958 в довірчому інтервалі  $\pm 4,0$  %, а при дії КН типу K2 3,06 % з вірогідністю 0,950 в довірчому інтервалі  $\pm 6,0$  %, що достатньо для практичного використання запропонованого способу. При цьому, абсолютне відхилення розрахункових значень критичних температур крихкості АТ від експериментальних для КН типу K1 не перевищує  $\pm 10$  K, а для КН типу K2 не перевищує  $\pm 15$  K (див. табл. 2), що також є достатньо високим показником точності задля використання запропонованого способу на практиці.

Важливо також відмітити, що точність регресії базових розрахункових закономірностей  $\mu_{Kmsc}^{\sigma} / \mu_{Kms}^{\sigma} = f(K_{msc} / K_{ms})$  та  $\sigma_2 / \sigma_{2C} = f[(\sigma_{0,2} / \sigma_{0,2C}) \cdot (\sigma_{2C}^{отт.} / \sigma_{2C}^{отт.})]$ , при якій залишкова дисперсія не перевищує значення  $3 \cdot 10^{-5}$ , а коефіцієнт кореляції не нижче 0,996, дозволяє віднести ці закономірності до розряду функціональних.

Таким чином, запропонований спосіб дозволяє з достатньою для практичних цілей точністю визначати критичну температуру крихкості  $T_c$  або  $T_0$  для широкого кола конструкційних сталей за результатами відносно простих і дешевих випробувань на квазістатичний одновісний розтяг стандартних гладких зразків в інтервалі температур від 77 K до 293 K, тобто за даними базових механічних характеристик металу -  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$  та  $\psi_K$ . Крім цього, за допомогою запропонованого способу можна спрогнозувати критичні характеристики міцності  $\sigma_{0,2C}$ ,  $\sigma_{2C}$  та механічної

стабільності  $K_{msc}$  металу, який знаходиться в умовах концентрації напружень та складного напруженого-деформованого стану, що робить даний спосіб більш інформативним.

Джерела інформації:

- 5 1. Патент України на корисну модель № 66722, МПК 06, G 01N 3/08, 3/14, 3/18, опубл. 10.01.12, 2012, Бюл. 1.
2. Smida T., Babjak J., Dlouhy I. Prediction of fracture toughness temperature dependence from tensile test parameters // Kovove Mater.-2010, 48. - P. 1-8.
3. ASTM E 1921: Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range. 2005.
- 10 4. Шиян А. В. Определение характеристик хрупкой прочности и механической стабильности конструкционных сталей // МТОМ.-2012, № 3-4, - С. 29-56.
5. Ярошевич В.Д., Рывкина Д.Г. Влияние структуры на активационные параметры процесса деформирования армо-железа при низких температурах // ФММ. 1971, Т. 31. вып. 6. - С. 1293-1298.
- 15 6. Шиян А. В., Котречко С. А., Мешков Ю. Я., Сорока Е.Ф., Носенко О.П., Федорова И.С. Методические основы оценки качества конструкционных сталей по их способности сопротивляться хрупкому разрушению при одноосном растяжении // МТОМ.-2014, № 2. -С. 5-28.

Таблица 1

Значення емпіричних коефіцієнтів в залежностях (9) та (10) для різних видових переходів досліджуваних КС

Тип КН	Видовий перехід	Емпіричні коефіцієнти					
		A	B	C	a	b	c
K1	1-1	0,2561	0,8608	0,1149	0,3692	0,8262	0,2020
	1-2	0,0280	1,5230	0,6015	0,3520	0,8722	0,1057
	2-2	-0,2193	2,0293	0,8170	0,3710	0,8186	0,1968
	2-1	-0,1830	2,2360	1,0725	0,2863	1,0353	0,4208
K2	1-1	-0,2122	1,9139	0,7039	0,3692	0,8262	0,2020
	1-2	-0,0751	1,6627	0,6423	0,3520	0,8722	0,1057
	2-2	- 0,0505	1,5672	0,5176	0,3710	0,8186	0,1968
	2-1	- 0,3723	2,6263	1,2758	0,2863	1,0353	0,4208

Примітка: K1 - концентратор напружень з радіусом  $r=0,25$  мм. та кутом розкриття  $w=45^\circ$ ; K2 - концентратор напружень - втомна тріщина.

Таблиця 2

Результати визначення характеристик міцності  $\sigma_{2C}^{\text{розр.}}$  ( $T_c$ ),  $\sigma_{2C}^{\text{розр.}}$  ( $T_0$ ), критичних температур крихкості  $T_c^{\text{розр.}}$ ,  $T_0^{\text{розр.}}$  для КН типу К1, К2 та оцінки точності запропонованого способу

КС [2]	КН типу К1 ( $T_c$ )						КН типу К2 ( $T_0$ )					
	$\sigma_{2C}^{\text{експ.}}$ , МПа	$\sigma_{2C}^{\text{розр.}}$ , МПа	$\delta$ , %	$T_c^{\text{експ.}}$ , К	$T_c^{\text{розр.}}$ , К	$\Delta T$ , К	$\sigma_{2C}^{\text{експ.}}$ , МПа	$\sigma_{2C}^{\text{розр.}}$ , МПа	$\delta$ , %	$T_0^{\text{експ.}}$ , К	$T_0^{\text{розр.}}$ , К	$\Delta T$ , К
J	950	978	2,9	103	97	-6	832	861	3,5	148	133	-15
X	1042	1023	-1,8	93	99	6	882	886	0,5	158	154	-4
M	1095	1106	1,0	103	98	-5	860	874	1,6	242	230	-12
V	1090	1101	1,0	108	104	-4	882	869	-1,5	206	216	10
H	1115	1114	-0,1	78	78	0	828	861	4,0	153	140	-13
I	1047	1011	-3,4	68	78	10	920	893	-2,9	108	117	9
T	1012	1012	0,0	68	68	0	881	883	0,2	108	107	-1
A	446	452	1,3	173	170	-3	311	329	5,8	261	245	-15
C	720	723	0,4	98	97	-1	584	569	-2,6	148	156	8
E	880	873	-0,8	78	81	3	677	686	1,3	143	141	-2
N	609	635	4,3	123	114	-9	454	478	5,3	198	182	-15
O	764	752	-1,6	103	107	4	570	583	2,3	173	162	-11
P	688	678	-1,5	98	101	3	518	520	0,4	170	166	-4
S	663	655	-1,2	108	109	1	482	500	3,7	188	176	-12
p	1336	1319	-1,3	168	178	10	1237	1238	0,1	263	256	-7

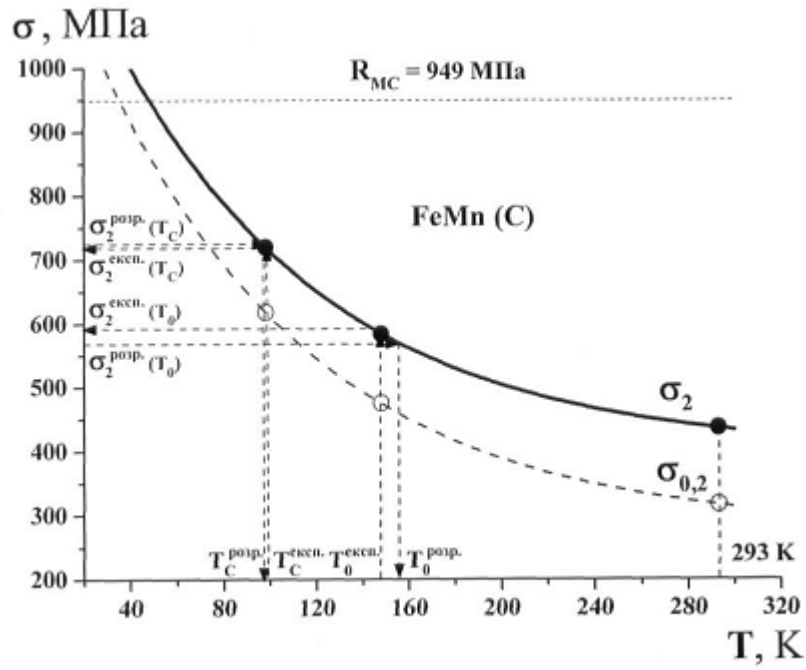
Примітки:  $\delta$  - похибка розрахункового визначення міцності  $\sigma_{2C}^{\text{розр.}}$  відносно експериментального значення  $\sigma_{2C}^{\text{експ.}}$ ,  $\Delta T$  - абсолютне відхилення розрахункових значень  $T_c^{\text{розр.}}$ ,  $T_0^{\text{розр.}}$  - від експериментальних  $T_c^{\text{експ.}}$  і  $T_0^{\text{експ.}}$ ; КС [2]: "J" - 10Ch2MFA; "X" - 15Ch2NMFAA; "M", "V" - 20CrNiMoV; "H" - CrMoV; "I", "T" - CrNi; "A" - Fe; "C", "E", "N", "O", "p", "S" - FeMn; "P" - Lo8CrNiMo

5

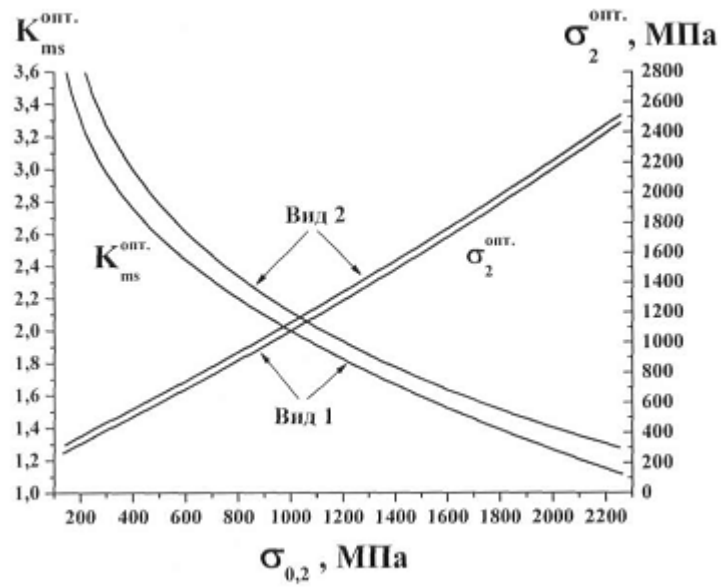
## ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

Спосіб визначення критичної температури крихкості конструкційної сталі (КС), при якому проводять випробування зразків з кільцевими концентраторами напружень (КН) типу Шарпі на одновісне розтягнення і визначення при цьому критичної температури крихкості  $T_c$  за умови загальної текучості, стандартних гладких зразків на одновісне розтягнення при температурах 293 К і  $T_c$  та визначення при цьому базових механічних характеристик, а визначення критичної температури крихкості  $T_0$  проводять за методикою Майстер кривої шляхом випробувань зразків типу SE(B) з втомною тріщиною на триточковий згин, який **відрізняється** тим, що проводять випробування зразків з різноманітними комбінаціями властивостей міцності та пластичності, при цьому для досліджуваних КС будують температурні залежності характеристик умовної межі текучості  $\sigma_{0,2}$  та міцності пластичного металу  $\sigma_2$  при критичному ступені деформації 2 %, визначають їх критичні величини  $\sigma_{0,2C}$  і  $\sigma_{2C}$  при температурах крихкості  $T_c$  та  $T_0$ , за отриманими даними визначають характеристики механічної стабільності  $K_{ms}$  і  $K_{msc}$  та їх оптимальні величини  $K_{ms}^{onm.}$  і  $K_{msc}^{onm.}$ , показники міри механічної якості  $\mu_{Kms}^{\sigma}$  і міри якості за окрихчуваністю  $\mu_{Kmsc}^{\sigma}$  металу, відповідно, в умовах відсутності КН та дії КН, оптимальні значення міцності  $\sigma_2^{onm.}$  і  $\sigma_{2C}^{onm.}$  при деформації 2 % для оптимізованих КС, після цього, враховуючи розподіл КС на види за характером поведінки їх механічних характеристик в умовах

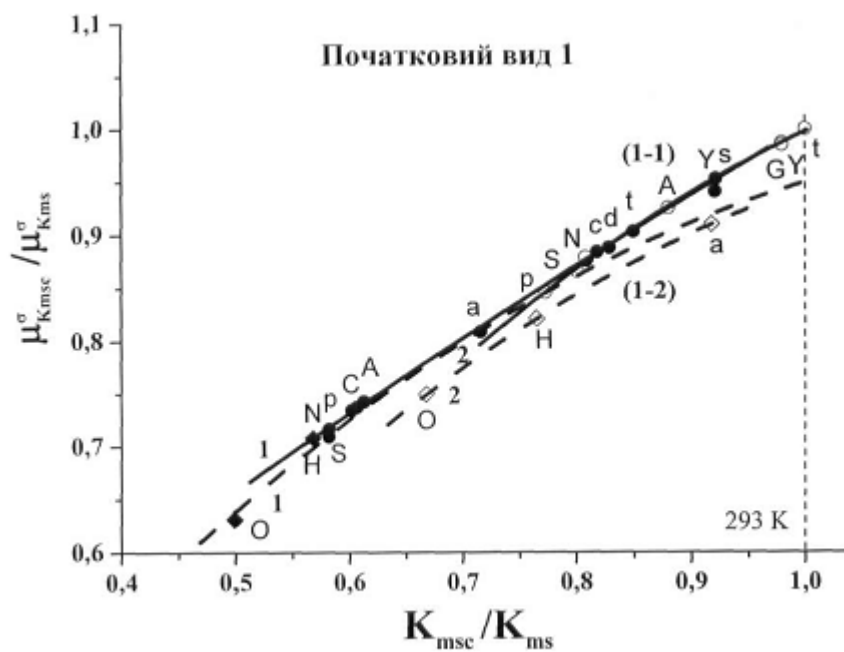
- дії КН при температурі  $T_c$  або  $T_0$  та за відсутності КН при температурі 293 К, будують закономірності зміни конструкційної якості металу у вигляді показника співвідношення двох мір якості  $\mu_{K_{msc}}^\sigma / \mu_{K_{ms}}^\sigma$  від співвідношення двох відповідних показників механічної стабільності  $K_{msc} / K_{ms}$  та закономірності зміни конструкційної міцності КС у вигляді показника
- 5 співвідношення двох величин міцності  $\sigma_2 / \sigma_{2C}$  при критичній деформації 2 % від співвідношення двох відповідних показників умовної межі текучості  $\sigma_{0,2} / \sigma_{0,2C}$ , нормованих на співвідношення відповідних оптимальних значень міцності  $\sigma_2^{onm.} / \sigma_{2C}^{onm.}$ , при цьому за отриманими залежностями та виміряними базовими механічними характеристиками шуканої КС розраховують критичну міцність  $\sigma_{2C}$  шуканої КС при  $T_c$  або  $T_0$  чисельними методами, за
- 10 величиною якої визначають критичну температуру крихкості  $T_c$  або  $T_0$ , використовуючи температурну залежність  $\sigma_2 = f(T)$ .



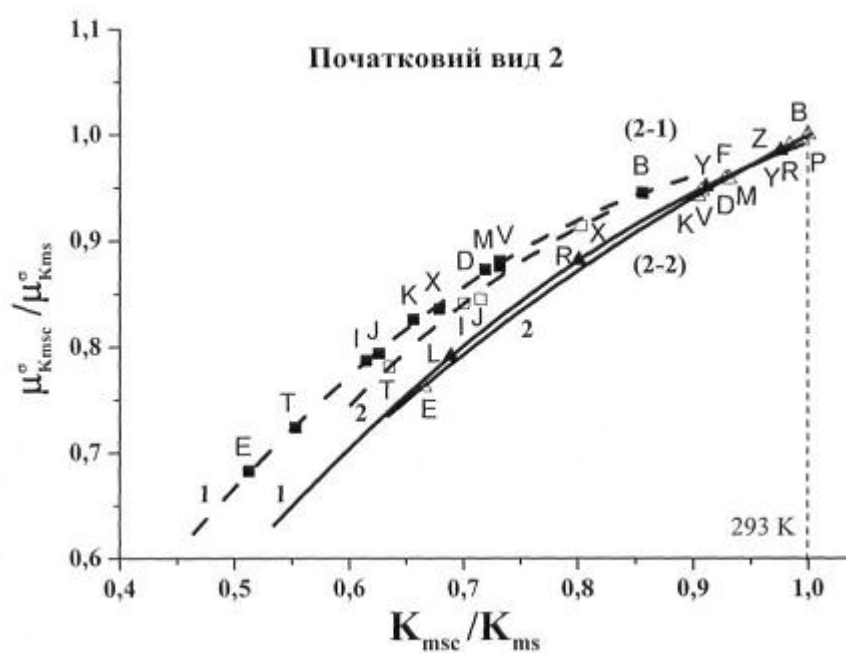
Фиг. 1



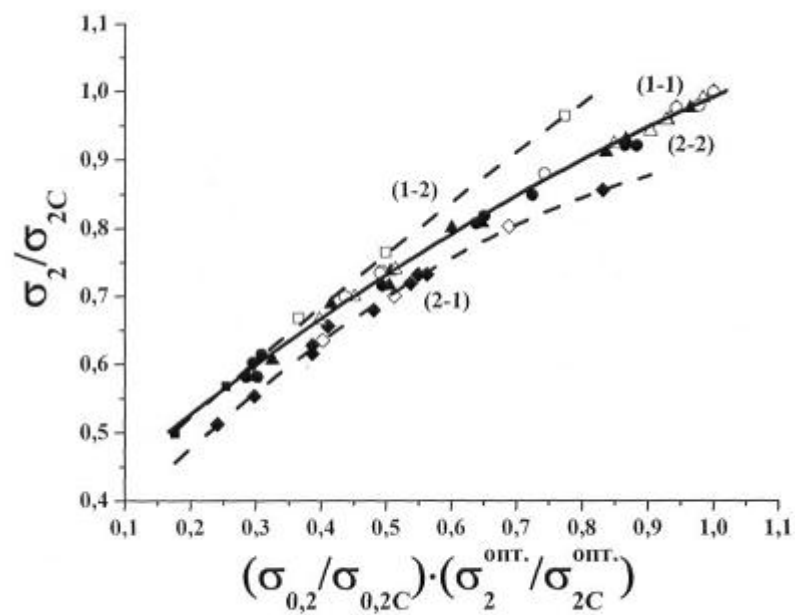
Фиг. 2



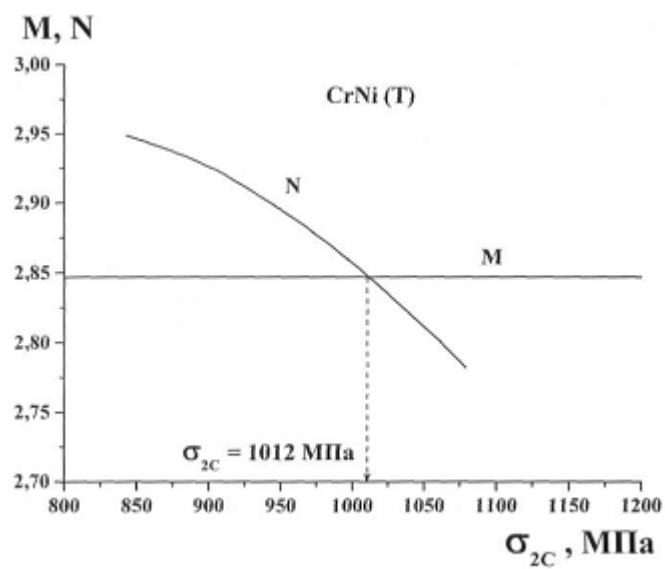
Фиг. 3а



Фиг. 3б



Фиг. 4



Фиг. 5

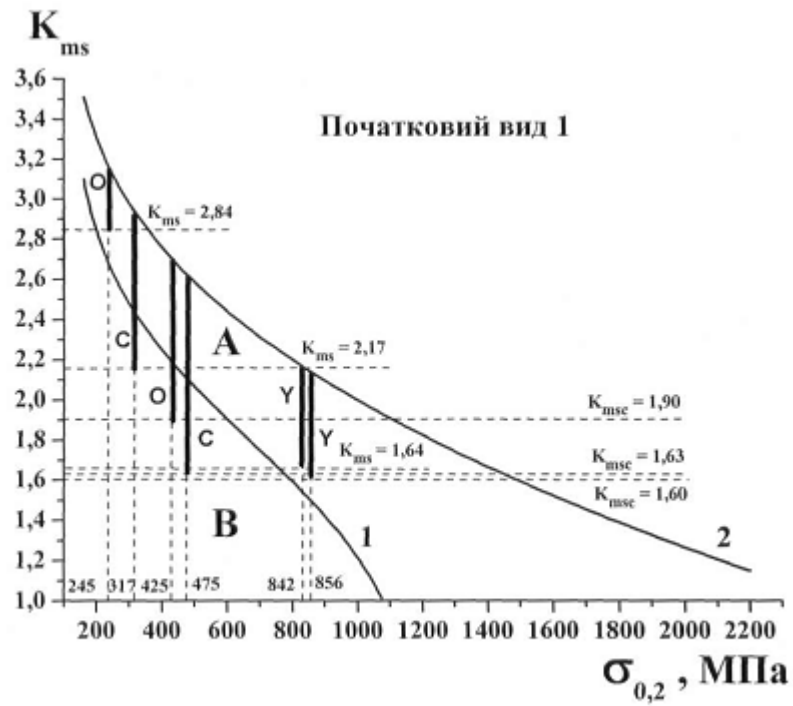


Fig. 6

Комп'ютерна верстка Д. Шеверун

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Василя Липківського, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601