

УДК 669.187.526; 669.01:539.4;539.2

ПРИНЦИПИ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНОГО ОКРИХЧЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ СПЛАВІВ У ЗАДАНИХ УМОВАХ ДІЇ НЕОДНОРІДНИХ СИЛОВИХ ПОЛІВ

ШИЯН А. В., к. ф.-м. н., с. н. с.

Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, бульвар Вернадського, 36, 02142, Київ, Україна, тел. +38 (044) 452-13-52, e-mail : shyian_av@ukr.net

Анотація. Розглянуто питання про поведінку закономірностей структурно-механічного окрихчення конструкційних сталей і титанових сплавів в умовах дії неоднорідних силових полів. Підтверджено встановлену раніше ідентичність закономірностей структурно-механічного окрихчення для конструкційних сталей і титанових сплавів та встановлено основні фактори, які впливають на їх поведінку. Показано, що основним фактором, який регулює збереження або зміну виду поведінки механічних характеристик конструкційного сплаву в умовах дії неоднорідних силових полів, є інтенсивність зміни його деформаційного зміцнення при зміні міцності. Встановлено, що вплив цього фактора має свої особливості для конструкційних сталей і титанових сплавів. Знайдено функціональний зв'язок між величиною радіуса кривизни r у вершині параболічної залежності структурно-механічного окрихчення і значенням теоретичного коефіцієнта концентрації напружень α_σ . Запропоновано принципи прогнозування закономірностей структурно-механічного окрихчення для конструкційних сталей і титанових сплавів у будь-яких заданих умовах дії неоднорідних силових полів, а також спосіб визначення величини показника α_σ за відомою експериментальною закономірністю структурно-механічного окрихчення.

Ключові слова: механічна стабільність; концентратори напружень; неоднорідні силові поля; структурно-механічне окрихчення; видовий перехід.

ПРИНЦИПЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКОГО ОХРУПЧИВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ В ЗАДАНЫХ УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ НЕОДНОРОДНЫХ СИЛОВЫХ ПОЛЕЙ

ШИЯН А. В., к. ф.-м. н., с. н. с.

Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, бульвар Вернадского, 36, 02142, Киев, Украина, тел. +38 (044) 452-13-52, e-mail : shyian_av@ukr.net

Аннотация. Рассмотрен вопрос о поведении закономерностей структурно-механического охрупчивания конструкционных сталей и титановых сплавов в условиях действия неоднородных силовых полей. Подтверждена установленная ранее идентичность закономерностей структурно-механического охрупчивания для конструкционных сталей и титановых сплавов и установлены основные факторы, влияющие на их поведение. Показано, что основным фактором, который регулирует сохранение или изменение вида поведения механических характеристик конструкционного сплава в условиях действия неоднородных силовых полей является интенсивность изменения его деформационного упрочнения при изменении прочности. Установлено, что влияние этого фактора имеет свои особенности для конструкционных сталей и титановых сплавов. Найдена функциональная связь между величиной радиуса кривизны r в вершине параболы зависимости структурно-механического охрупчивания и значением теоретического коэффициента концентрации напряжений α_σ . Предложены принципы прогнозирования закономерностей структурно-механического охрупчивания конструкционных сталей и титановых сплавов в любых заданных условиях действия неоднородных силовых полей, а также способ определения величины показателя α_σ по известной экспериментальной закономерности структурно-механического охрупчивания.

Ключевые слова: механическая стабильность; концентраторы напряжений; неоднородные силовые поля; структурно-механическое охрупчивание; видовой переход.

PRINCIPLES OF FORECASTING PATTERNS OF STRUCTURAL AND MECHANICAL EMBRITTLEMENT OF STRUCTURAL ALLOYS IN GIVEN CONDITIONS OF ACTION OF INHOMOGENEOUS FORCE FIELDS

SHIYAN A. V., *Cand. Sc. (Phys. and Math.), old res. fell.*

G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of NAS of the Ukraine, 36, Vernadsky av., 02142, Kyiv, Ukraine, phone: +38 (044) 452-13-52, e-mail : shyian_av@ukr.net

Abstract. The question of the behavior patterns of structural and mechanical embrittlement of structural steels and titanium alloys under the action of non-uniform force fields. Confirmed the identity of the previously established patterns of structural and mechanical embrittlement of structural steels and titanium alloys and installed the main factors that influence their behavior. It is shown that the main factor that regulates the maintenance or change of behavior of mechanical properties of structural alloys under the action of force fields is inhomogeneous intensity changes its strain hardening when changing strength. Found that the effect of this factor is different for structural steels and titanium alloys. Found functional relationship between the radius of curvature r at the apex of a parabolic dependence of structural and mechanical embrittlement and the value of the theoretical stress concentration factor α_σ . The principles of predicting patterns of structural and mechanical embrittlement of structural steels and titanium alloys in any given conditions of action of non-uniform force fields, as well as the method of determining the value of the indicator α_σ the known experimental patterns of structural and mechanical embrittlement.

Keyword : mechanical stability; stress concentrators; heterogeneous force fields; structural and mechanical embrittlement; specific transition.

Вступ

Викладений у праці [1] феноменологічний підхід до тлумачення стану крихкості металу, розроблений на основі концепції механічної стабільності і розуміння ефекту окрихчення в результаті впливу різноманітних факторів, у тому числі концентраторів напружень (КН), дає можливість оперувати в умовах дії неоднорідних силових полів такими кількісними показниками як критичне значення механічної стабільності K_{msc} і її залишковий резерв P_{ms} . Перший з них відображує ступінь втрати вихідної механічної стабільності K_{ms} металу за дії КН, а другий – критичну температуру крихкості зразка з КН.

Таким чином, стало можливим розробити системи оцінки ефективності окрихчувальної дії КН на конструкційні сплави з різним рівнем міцності $\sigma_{0,2}$, пластичності ψ_K та вихідної механічної стабільності K_{ms} , які були запропоновані в [1; 2] для конструкційних сталей (КС) і в [3] для конструкційних титанових сплавів (КТС) у вигляді відповідних моделей структурно-механічного окрихчення. Такі моделі стали основою для розрахункового визначення критичних параметрів міцності $\sigma_{0,2C}$, σ_{2C} , механічної стабільності K_{msc} , P_{ms} і відповідних критичних температур крихкості T_C , T_0 та інших [2; 3] для зразків із будь-якою геометрією КН, що перебувають у різних умовах дії неоднорідних силових полів.

У працях [1; 4] було показано, що існують системи взаємозв'язку властивостей «пластичність – міцність – механічна стабільність» для КС і КТС, які можуть бути кількісно описані за допомогою параболічних рівнянь регресії $\psi_K = f(\sigma_{0,2})$ за умови $K_{ms} = \text{const}$. При цьому такі параболічні рівняння, залежно від типу екстремуму, можна розподілити на

два види поведінки механічних характеристик. Перший вид сплавів при зміні міцності характеризується наявністю максимумів характеристик пластичності (ψ_K^{max}), а другий – наявністю мінімумів (ψ_K^{min}) при заданих рівнях механічної стабільності K_{ms} . У вказаних працях, за результатами обробки достатньо великого банку даних КС і КТС, були встановлені закономірності узгодженої зміни характеристик міцності ($\sigma_{0,2}$) і пластичності (ψ_K) за умови $K_{ms} = \text{const}$, проведена оптимізація цих властивостей та побудовані криві оптимізації для систем їх взаємозв'язку. Сенс таких кривих оптимізації полягає в тому, що вони характеризують оптимальне (найкраще) співвідношення характеристик пластичності ψ_K^{opt} і механічної стабільності K_{ms}^{opt} конструкційних сплавів при заданій міцності $\sigma_{0,2}$. Таким чином, аналіз результатів, отриманих у [4], показав, що відношення величин характеристик механічної стабільності K_{ms} до їх оптимальних значень K_{ms}^{opt} на кривих оптимізації при заданій міцності $\sigma_{0,2}$ можна розглядати як показники механічної якості $\mu_{K_{ms}}^\sigma$ КС або КТС :

$$\mu_{K_{ms}}^\sigma = K_{ms} / K_{ms}^{opt} . \quad (1)$$

Відповідно до (1), для кількісної оцінки якості металу, що окрихчений дією КН, доцільно використати міру конструкційної якості за ознакою ступеня окрихчення – $\mu_{K_{msc}}^\sigma$ за критичним значенням механічної стабільності K_{msc} при значенні міцності $\sigma_{0,2C}$ (тобто за частиною опору крихкості,

втраченою в результаті присутності в зразку КН при критичній температурі T_c , T_0 або іншій). Тоді, за аналогією, маємо для $\mu_{K_{msc}}^\sigma$ [1–3]:

$$\mu_{K_{msc}}^\sigma = K_{msc} / K_{msc}^{omn.}, \quad (2)$$

де $K_{ms}^{omn.}$, $K_{msc}^{omn.}$ – оптимальні значення критичної характеристики механічної стабільності при значеннях міцності $\sigma_{0,2}$ і $\sigma_{0,2c}$, відповідно, які визначаються для КС згідно із залежностями:

– для 1-го виду:

$$K_{ms}^{omn.} = a \cdot \ln \left[b + \frac{c}{(1 + d \cdot \sigma_{0,2})^m} \right], \quad (3)$$

де $a = -0,476$; $b = -2,87 \cdot 10^{-3}$; $c = 2,37 \cdot 10^{-3}$; $d = 5,40 \cdot 10^{-4}$ [МПа⁻¹]; $m = -4,673$ – емпіричні коефіцієнти;

– для 2-го виду: за залежністю (3), але з наступними емпіричними коефіцієнтами [2]:

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

а для КТС згідно із залежностями:

– для 1-го виду

$$K_{ms}^{omn.} = a - b \cdot \ln \left[\left(\frac{c - d \cdot \sigma_{0,2}}{e - k \cdot \sigma_{0,2}} \right)^m - 1 \right], \quad (5)$$

де $a = 2,157$; $b = 0,140$; $c = 75,745$; $d = 0,043$ [МПа⁻¹]; $e = 71,780$; $k = 0,037$ [МПа⁻¹]; $m = -2,448$ – емпіричні коефіцієнти;

– для 2-го виду

$$K_{ms}^{omn.} = a - b \cdot \sigma_{0,2}, \quad (6)$$

де $a = 3,922$; $b = 1,53 \cdot 10^{-3}$ [МПа⁻¹] – емпіричні коефіцієнти [3]. При цьому розрахунок показника $K_{msc}^{omn.}$ потребує заміни міцності металу $\sigma_{0,2}$ в умовах відсутності дії КН на його критичну міцність $\sigma_{0,2c}$ під дією КН.

В основу побудови моделей структурно-механічного окрихчення для досліджуваних конструкційних сплавів покладено закономірності співвідношення двох мір якості – за окрихченням

$\mu_{K_{msc}}^\sigma$ з мірою механічної якості металу як такого;

$\mu_{K_{ms}}^\sigma$ у вигляді показника ступеня зміни

конструкційної якості металу $\mu_{K_{msc}}^\sigma / \mu_{K_{ms}}^\sigma$ від співвідношення двох відповідних показників механічної стабільності – K_{msc} / K_{ms} , що характеризують метал при двох видах випробувань – з КН та без КН. Слід зазначити, що порівнюючи властивостей металу при двох різних способах випробувань (зразки з КН і без КН) треба звертати увагу на можливість зміни видової належності конструкційного сплаву в результаті цих випробувань, тобто на видовий перехід (ВП) тому, що при кожному випробуванні змінюються показники міцності металу. ВП впливає на зміну

показника конструкційної якості сплаву

$\mu_{K_{msc}}^\sigma / \mu_{K_{ms}}^\sigma$, тобто втрати його опірності переходу

в крихкий стан під окрихчуючою дією КН по відношенню до вихідних умов реалізації загального запасу опірності крихкості металу як такого (гладкий зразок). Таким чином, належність сплаву до початкового 1-го виду поведінки механічних характеристик при кімнатній температурі випробувань ($T_{KM} = 293$ К) зразків без КН та збереження цієї належності при критичній температурі крихкості T_c (або іншій) під дією КН має позначення 1-1, відповідно для сплавів 2-го початкового виду – 2-2, а зміна видової належності сплаву при зміні вказаних умов має позначення як ВП 1-2 або 2-1 [1–3].

Враховуючи те, що показник ступеню зміни

конструкційної якості металу $\mu_{K_{msc}}^\sigma / \mu_{K_{ms}}^\sigma$ за своїм

сенсом відображує зміну його структурного стану, а показник K_{msc} / K_{ms} – ступінь механічного окрихчення металу, тобто окрихчення під дією факторів механічного походження (КН), то логічним буде визначити вищезгадані закономірності як закономірності структурно-механічного окрихчення [2; 3].

З вищенаведеного випливає **мета цієї роботи**: встановити взаємозв'язок параметрів, що регулюють зміну інтенсивності закономірностей структурно-механічного окрихчення конструкційних сталей і титанових сплавів, для прогнозування цих закономірностей в будь-яких умовах дії неоднорідних силових полів.

Досліджувані матеріали

З метою побудови модельних закономірностей структурно-механічного окрихчення КС в [1; 2] були досліджені сплави, що належали до різних класів за структурним станом, якістю, складом та призначенням, а для поповнення ансамблю цих закономірностей були залучені дані [5]¹. Характеристики міцності досліджених КС за кімнатної температури випробувань ($T_{KM} = 293$ К) змінювались у межах від $\sigma_{0,2} = 194$ МПа до $\sigma_{0,2} = 1\,500$ МПа, а характеристики пластичності (за показником відносного звуження в момент руйнування зразка) – від $\psi_K = 30,9\%$ до $\psi_K = 85,5\%$.

Модельні закономірності структурно-механічного окрихчення КТС будували за результатами власних експериментів автора [3], при цьому характеристики міцності досліджених КТС за кімнатної температури випробувань ($T_{KM} = 293$ К) змінювались у межах від $\sigma_{0,2} = 313$ МПа до $\sigma_{0,2} = 1\,359$ МПа, а характеристики пластичності варіювались в межах від $\psi_K = 7,0\%$ до $\psi_K = 72,9\%$. При цьому проводили випробування на

¹ Випробування КС проводив аспірант відділу фізики міцності та руйнування ІМФ ім. Г. В. Курдюмова НАН України В. М. Грищенко.

однорічне розтягнення зразків з кільцевими КН (зовнішній діаметр $D = 8$ мм; діаметр під надрізом $d = 5,2$ мм; радіус $r = 0,25$ мм; кут розкриття $w = 45^\circ$ – далі концентратор типу К1), ($D = 12$ мм; $d = 8$ мм з тими ж показниками r і w – далі концентратор типу К2) і статичний трьохточковий згин зразків із втомною тріщиною (далі концентратор типу К3) та, відповідно, визначали критичні температури крихкості T_C за умови загальної текучості в околі КН, коли величина середнього номінального напруження руйнування зразка з КН σ_{NF} під час випробувань на розтягнення дорівнює величині напруження загальної текучості цього зразка σ_{GY} , а також T_0 за методикою «майстер кривої» [6]. Крім того, проводили випробування на квазістатичне однорічне розтягнення гладких циліндричних зразків за кімнатної температури $T_{KM} = 293$ К і критичної температури T_C з метою визначення відповідних базових механічних характеристик КС, побудови температурних залежностей $\sigma_{0,2} = f(T)$ і $\sigma_2 = f(T)$ та визначення характеристик крихкої міцності R_x для КС і КТС відповідно за методиками [7; 8].

Прогнозування закономірностей структурно-механічного окрихчення в заданих умовах дії неоднорідних силових полів

Принципи прогнозування закономірностей структурно-механічного окрихчення КС і КТС в заданих умовах дії неоднорідних силових полів засновані на моделях, побудованих в [1–3], де наведено експериментальні результати випробувань зразків без КН та за дії КН різної геометрії (типів К1, К2, К3) у різних умовах НДС (квазістатичне розтягнення і трьохточковий згин). Однак перед тим, як перейти до розроблення таких принципів, доцільно поповнити модельний набір закономірностей структурно-механічного окрихчення [1–3] додатковими, що мають бути побудовані за експериментальними результатами стандартних випробувань на ударну в'язкість (KCV) [9], які були отримані раніше в ІМФ ім. Г. В. Курдюмова НАН України [10]², а також за результатами випробувань зразків КС з КН типу К1 на квазістатичне розтягнення [5], які наведено в таблиці 1.

Це має сенс з огляду на те, що під час таких випробувань ми стикаємося з дією на зразки цілого комплексу факторів окрихчення (КН типу Шарпі, зниження температури, динаміка її умови (трьохточковий згин) навантаження), що важливо як для перевірки чутливості системи закономірностей структурно-механічного окрихчення до зміни умов дії неоднорідних силових полів, так і для подальшого її практичного використання, зокрема для визначення критичних параметрів міцності σ_{2C} , $\sigma_{0,2C}$, механічної стабільності K_{msc} і критичної температури крихкості

T_C^{KCV} під час випробувань на ударну в'язкість (KCV). При цьому критичну температуру крихкості T_C^{KCV} визначали на температурній залежності ударної в'язкості KCV(T) за величиною нормативного критичного рівня KCV [11], яка залежить від початкової міцності сплаву $\sigma_{0,2}$, після чого критичні міцності $\sigma_{0,2C}$ і σ_{2C} за T_C^{KCV} визначали за температурними залежностями $\sigma_{0,2}(T)$ і $\sigma_2(T)$ (рис. 1).

Таблиця 1

Результати визначення характеристик крихкої міцності R_x , початкової (за 293 К) і кінцевої (за T_C і T_C^{KCV}) міцності $\sigma_{0,2}$, $\sigma_{0,2C}$ та механічної стабільності K_{ms} , K_{msc} для деяких КС з КН типу К1 і Шарпі (KCV) / The results of fragile strength R_x characteristics determination, the initial (at 293 K) and final (at T_C and T_C^{KCV}) strength $\sigma_{0,2}$, $\sigma_{0,2C}$ and mechanical stability K_{ms} , K_{msc} for some constructional steels with K1-type and Charpy (KCV) stress concentrators

Тип КН	КС	№ п/п	Режим ТО	R_x , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	K_{ms}	$\sigma_{0,2C}$, МПа	K_{msc}	T_C , К	
К1	Сталь 40	1	Н 880°C	1 362	397	2,390	816	1,436	138	
		2	Г+ВД 560°C, 1 г.	1 621	620	2,044	1 103	1,310	98	
		3	Г, 0,5 г.	1 977	1 302	1,346	1 372	1,286	248	
		4	Г+ВД 400°C, 1 г.	1 696	660	2,008	945	1,482	145	
		5	ВДП 880°C	1 371	373	2,401	695	1,460	128	
	6	Г+ВД 300°C, 1 г.	2 723	1 502	1,552	1 639	1,466	172		
	30ХГСА	7	Н 920°C	1 631	663	1,567	836	1,271	143	
		8	ВДП 920°C, 1 г.	1 456	380	2,458	695	1,558	133	
		9	Г+ВД 400°C, 1 г.	2 281	1 263	1,614	1 355	1,521	186	
10		ВД (маятниковий)	1 532	609	2,147	948	1,417	98		
KCV	<i>Закінчення таблиці 1</i>									
	10Г2ФБ	11	ШТО 2-5 Кс ⁻¹	1259	440	2,371	569	1,854	170	
		12	НГ 435°C	1480	553	2,206	694	1,845	183	
	10ХСНД	13	Г+ВД 630°C	1396	455	2,399	535	2,109	222	
		14	НГ 1100°C, 2 г.	971	312	2,313	320	2,227	252	
	12ХНЗМФА	15	Г+ВД 630°C	1597	757	1,897	868	1,676	181	
		16	ТЦ+ВД 660°C	1904	1000	1,761	1088	1,611	153	
	15ГБ	17	стан постачання	1189	388	2,376	421	2,206	243	
	09Г2	18	НГ 355°C	1229	390	2,387	453	2,108	215	
	06Г2	19	НГ 375°C	1479	336	2,820	430	2,307	167	

Примітки : Г – гартування за 880 °С; Н – нормалізація; ВД – відпуск; ВДП – відпал; ШТО – швидкісна термічна обробка; НГ – нагрівання

Залежність KCV(T) доцільно апроксимувати однією із стандартних S-подібних функцій [12], яка в кожному конкретному випадку має описувати експериментальні дані в раціонально заданому температурному інтервалі з мінімальною залишковою дисперсією D або мінімальним вибірковим стандартом S із достатніми для практичних цілей достовірністю P і довірчим інтервалом DI .

У випадку, наведеному на рисунку 1, для сталі 10ХСНД раціональним температурним інтервалом, виходячи з чіткої тенденції падіння показника KCV за зниження температури, вважали інтервал $200 \text{ K} < T_{\text{вип.}} < 293 \text{ K}$, а критичним рівнем KCV = 49 Дж/см² при початковій міцності сплаву $\sigma_{0,2} = 455$ МПа [11]. Для апроксимації експериментальних даних використовували S-подібну функцію Річардса [12]:

² Випробування КС на ударну в'язкість проводив с. н. с. відділу фізики міцності та руйнування Д. Й. Никоненко.

$$KCV = a \cdot [1 + (d - 1) \cdot e^{-b(T_{\text{ан.}} - c)}]^{1-d}, \quad (7)$$

де $a = 220,85 \pm 12,90$; $b = 0,11 \pm 0,07$; $c = 241,27 \pm 6,48$; $d = 2,86 \pm 0,19$ – емпіричні коефіцієнти.

При цьому точність регресії, при якій вибірковий стандарт S не перевищує величини 6,0 % з достовірністю не нижче 0,905 в максимальному довірчому інтервалі $\pm 10,0$ %, є достатньою для коректної побудови залежностей $KCV(T)$ на практиці, коли розкид експериментальних даних КС зазвичай достатньо великий.

Слід зауважити, що, знаючи критичну температуру крихкості сплаву T_C^{KCV} , завжди можна визначити його температуру холодостійкості як різницю: $\Delta T = T_{\text{КМ}} - T_C^{KCV}$ [10; 13].

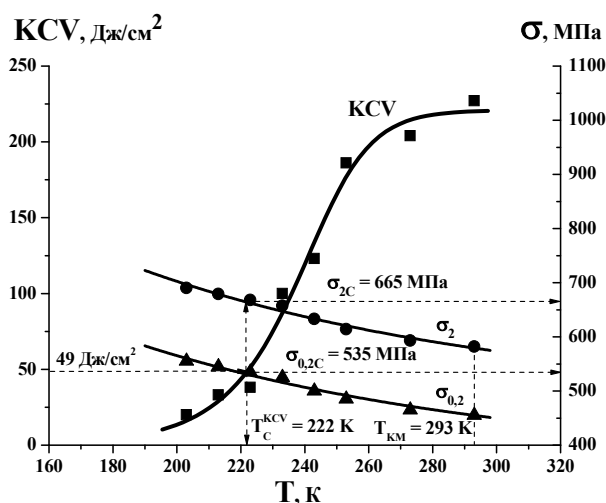
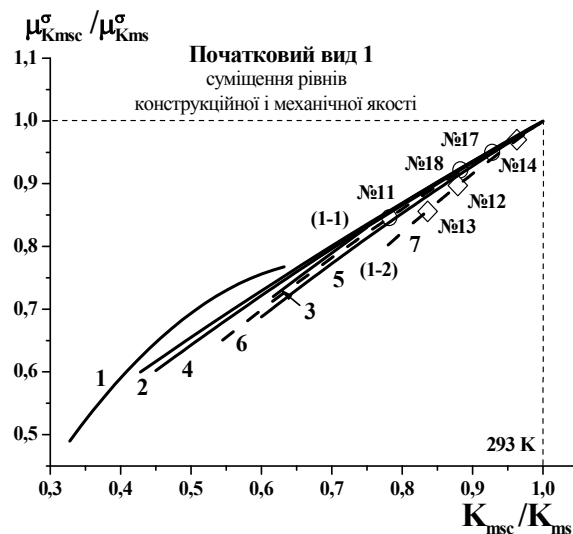


Рис. 1. Температурні залежності для сталі 10XCHD (T 880 °C + ВДП 630 °C – № 13 в таблиці 1) [10] : ударної в'язкості (KCV), міцності $\sigma_{0,2}$ і міцності σ_2 при критичній деформації $\epsilon_c = 2\%$ [1]; ▲, ●, ■ – експериментальні дані / Fig. 1. Temperature dependences for steel 10XCHD (quenching 880 °C + annealing 630 °C – № 13 in Table 1) [10] : impact toughness (KCV), strength $\sigma_{0,2}$ and strength σ_2 at critical deformation $\epsilon_c = 2\%$ [1]; ▲, ●, ■ – experimental data

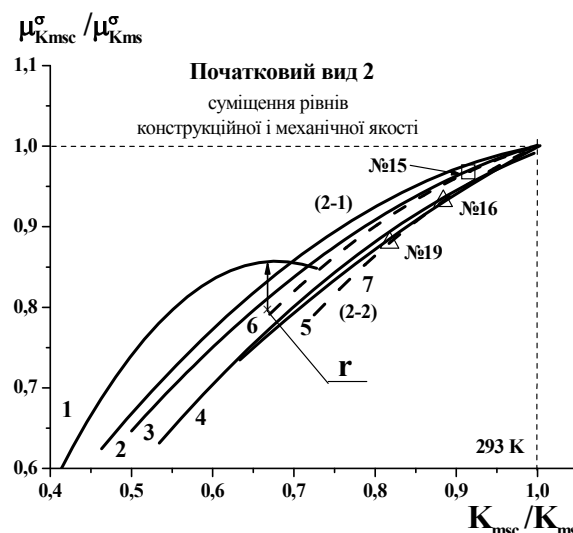
Закономірності структурно-механічного окрихнення за експериментальними даними випробувань зразків КС на ударну в'язкість із КН типу Шарпі (KCV) (табл. 1) для усіх ВП наведено на рисунку 2.

Із висновків праць [1–3] випливає, що в різних умовах дії неоднорідних силових полів інтенсивність структурно-механічного окрихнення, що описується залежностями $\mu_{K_{\text{msc}}}^\sigma / \mu_{K_{\text{ms}}}^\sigma = f(K_{\text{msc}}/K_{\text{ms}})$, для усіх досліджених металевих сплавів змінюється. Таким чином, доцільно проаналізувати поведінку параметра, що регулює зміну інтенсивності вказаних закономірностей, а саме – радіуса кривизни r у вершині параболічних залежностей $\mu_{K_{\text{msc}}}^\sigma / \mu_{K_{\text{ms}}}^\sigma = f(K_{\text{msc}}/K_{\text{ms}})$ (рис. 2 б), з метою віднаходження його

взаємозв'язку з коефіцієнтами згаданих залежностей, що дасть змогу прогнозувати структурно-механічне окрихнення зразків КС або КТС за дії будь-яких факторів окрихнення та в будь-яких умовах навантаження.



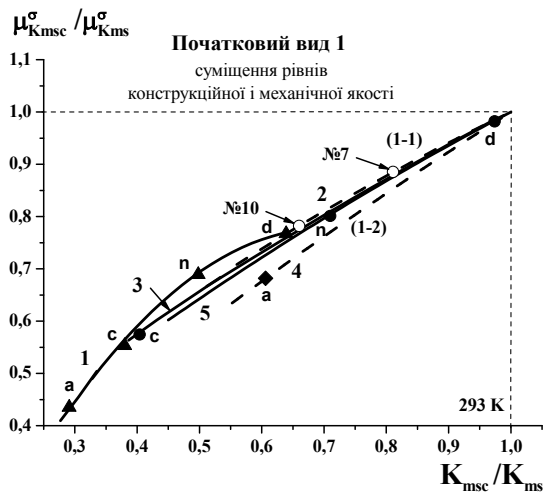
а



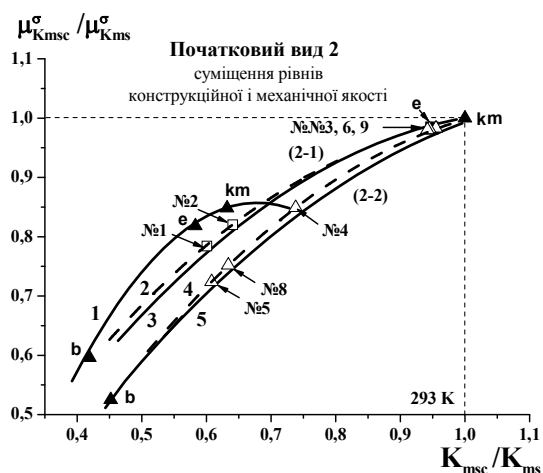
б (b)

Рис. 2. Закономірності структурно-механічного окрихнення для КС : а – 1-го початкового виду; б – 2-го початкового виду; модельні: 1 – зразки без КН; 2, 4 – зразки з КН типу К2; 3, 5 – зразки з КН типу К3; додаткові: 6, 7 – зразки з КН типу Шарпі (табл. 1) – штрихова лінія; експериментальні дані : ○ – ВП 1-1, ◇ – ВП 1-2, Δ – ВП 2-2, □ – ВП 2-1; №№ – позначення КС в таблиці 1 / Fig. 2. Patterns of structural and mechanical embrittlement for construction steels : а – 1st original form; б – 2nd original form; Models : 1 – sample without stress concentrators; 2, 4 – samples with K2-type stress concentrators; 3, 5 – samples with K3-type stress concentrators; additional : 6, 7 – samples with Charpy-type stress concentrators (Table 1) – dashed line; Experimental data : ○ – tempering 1-1, ◇ – tempering 1-2, Δ – tempering 2-2, □ – tempering 2-1; №№ – designation of stress concentrator in table 1

З метою підтвердження висновку щодо ідентичності закономірностей структурно-механічного окрихнення для КС і КТС, зробленого у праці [3], додатково були залучені експериментальні дані випробувань зразків КС з КН типу К1 (табл. 1) – (рис. 3).



a



б (b)

Рис. 3. Закономірності структурно-механічного окрихнення : а – 1-го початкового виду; б – 2-го початкового виду; 1 – зразки без КН; 2, 4 – зразки з КН типу К1 – штрихова лінія для КС і КТС; 3, 5 – зразки з КН типу К2; експериментальні дані : темні знаки – КТС (власний експеримент автора) [3], світлі знаки – КС [5]; (1-1), (1-2), (2-2), (2-1) – ВП; літери латинною – позначення КТС в [3], №№ – позначення КС в таблиці 1 / Fig. 3. Patterns of structural and mechanical embrittlement : a - 1st original form; b - 2nd original form; 1 - sample without stress concentrators; 2, 4 - samples with K1-type stress concentrators - dashed line for constructional steels and constructional titanium alloys; 3, 5 - samples with K2-type stress concentrators; experimental data : dark signs - constructional titanium alloys (author's own experiment) [3], light signs - constructional steels [5]; (1-1), (1-2), (2-2), (2-1) - SS; latin letters - designation of constructional titanium alloys in [3], №№ - designation of stress concentrator in table 1

З рисунка 3 видно, що закономірності структурно-механічного окрихнення для ВП 1-1, 2-2 і 2-1 КС і КТС повністю ідентичні, що свідчить про достовірність побудови модельних залежностей для КТС в [3].

Щодо ВП 1-2 для КН типу К1, то у вибірці досліджених КТС таких експериментальних даних немає, при цьому немає і підстав вважати опис структурно-механічного окрихнення таких потенціальних сплавів неідентичним КС, тим більше, що ВП 1-2 мають малоцікаві з практичної точки зору матеріали.

Таким чином, увесь комплекс параболічних закономірностей структурно-механічного окрихнення, наведених на рисунках 2, 3, отриманих на основі експериментальних даних, можна подати у такому вигляді:

$$\mu_{K_{msc}}^{\sigma} / \mu_{K_{ms}}^{\sigma} = A_{i,k} + B_{i,k} \cdot (K_{msc} / K_{ms}) - C_{i,k} \cdot (K_{msc} / K_{ms})^2, \quad (8)$$

де $A_{i,k}$, $B_{i,k}$, $C_{i,k}$, – емпіричні коефіцієнти, що залежать від типу КН і ВП; індекс i – ознака типу КН, індекс k – ознака ВП (табл. 2).

Таблиця 2

Значення емпіричних коефіцієнтів в залежності (8) для різних ВП КС і КТС / Values of the empirical coefficient depending (8) different temperings of constructional steels and constructional titanium alloys

Тип КН	Вид, ВП	Емпіричні коефіцієнти		
		$A_{i,k}$	$B_{i,k}$	$C_{i,k}$
Гладкий зразок	1	-0,1084	2,3095	1,4368
	2	-0,4898	3,6863	2,4876
К1	1-1	0,0441	1,4476	0,4912
	1-2	0,0033	1,5305	0,5297
	2-2	-0,3754	2,4956	1,0989
	2-1	-0,1823	2,2347	1,0571
К2	1-1	0,0578	1,3966	0,4600
	1-2	0,0127	1,4880	0,5025
	2-2	-0,3896	2,4286	1,0460
	2-1	-0,1712	2,1792	1,0142
К3	1-1	0,0681	1,3606	0,4386
	1-2	-0,0210	1,4528	0,4808
	2-2	-0,3555	2,3733	1,0101
	2-1	-0,1519	2,1211	0,9690
Типу Шарпі (KCV)	1-1	0,0205	1,5444	0,5537
	1-2	-0,0168	1,6315	0,5988
	2-2	-0,3966	2,6467	1,2166
	2-1	-0,2238	2,3949	1,1820
Кільцева тріщина	1-1	0,2277	0,9981	0,2259
	2-2	-0,1114	1,6458	0,5411

Зважаючи на те, що усі закономірності (8) для КС і КТС, що перебувають під дією різних факторів окрихнення та в різних умовах НДС, мають опуклий характер, величину радіуси кривизни r у вершині означених параболічних залежностей можна розрахувати, використовуючи відомий вираз [1] :

$$r = 0,5 / C_{i,k}, \quad (9)$$

де $C_{i,k}$, – емпіричний коефіцієнт з формули (8) (див. табл. 2).

Результати визначення параметру r для комплексу модельних параболічних закономірностей структурно-механічного окрихчення наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Результати визначення величини радіуса кривизни r у вершині параболічних закономірностей (8) для всіх ВП КС і КТС, що перебувають під дією різних КН /
The results of the determination of radius of curvature r at the top of parabolic dependences (8) for all temperings of constructional steels and constructional titanium alloys under the influence of various stress concentrators

Тип КН	Радіус кривизни у вершині залежностей (8)	Видові переходи			
		1-1	1-2	2-2	2-1
без КН	r	0,348	0,348	0,201	0,201
К1		1,018	0,944	0,455	0,473
К2		1,087	0,995	0,478	0,493
К3		1,140	1,040	0,495	0,516
КСV		0,903	0,835	0,411	0,423

Аналіз експериментальних даних емпіричних коефіцієнтів $A_{i,k}$, $B_{i,k}$, $C_{i,k}$, в залежності (8) і відповідних величин радіуса кривизни r у вершині цих параболічних закономірностей (табл. 3) дозволив установити для КС і КТС, що перебувають під дією різних факторів окрихчення та в різних умовах НДС, такий взаємозв'язок між цими параметрами:

$$A_{i,k} = a1_k + b1_k r - c1_k r^2; \tag{10}$$

$$B_{i,k} = a2_k \exp(-r/b2_k) + c2_k; \tag{11}$$

$$C_{i,k} = 0,5/r, \tag{12}$$

де $a1_k, 2_k, b1_k, 2_k, c1_k, 2_k$ – емпіричні коефіцієнти, що залежать від ВП (індекс k – ознака ВП) – наведені в таблиці 4.

Таблиця 4

Значення емпіричних коефіцієнтів у залежностях (10) і (11) для різних ВП КС і КТС /
The values of empirical coefficients according to (10) and (11) for different temperings of constructional steels and constructional titanium alloys

Емпіричні коефіцієнти в (10) і (11)	Видові переходи			
	1-1	1-2	2-2	2-1
a1	-0,20172	-0,17556	-0,56613	-0,84474
b1	0,28195	0,19495	0,34856	2,03728
c1	0,03972	0,00575	-0,15535	1,34602
a2	2,32827	2,26670	4,10994	4,93761
b2	0,68937	0,76194	0,36148	0,24151
c2	0,90412	0,87390	1,32832	1,53815

Таким чином, за залежностями (8), (10)–(12) можна числовими методами визначити величину параметра r для КС і КТС, що перебувають під дією будь-яких факторів окрихчення та в будь-яких умовах НДС, а потім, за залежностями (10)–(12)

вирахувати параболічні коефіцієнти $A_{i,k}$, $B_{i,k}$, $C_{i,k}$ і побудувати закономірності структурно-механічного окрихчення за (8) для шуканого сплаву. Для цього треба знати величини параметрів K_{ms} , K_{msc} [1–3],

$\mu_{K_{ms}}^\sigma$, $\mu_{K_{msc}}^\sigma$ та ВП, які можна визначити за результатами випробувань лише одного сплаву (для кожного ВП) в заданих умовах дії неоднорідних силових полів, а саме за базовими характеристиками $\sigma_{0,2}$, σ_B і ψ_K , застосовуючи при цьому залежності (3), (4) для КС та залежності (5), (6) для КТС, а також загальні залежності для обох сплавів – (1) і (2).

Приклад визначення параметра r числовими методами за результатами власного експерименту автора для зразка із сталі 10Г2ФБ (стан постачання, $R_X = 1\ 445$ МПа, $\sigma_{0,2} = 620$ МПа, $\sigma_B = 685$ МПа, $\psi_K = 79,5\%$, $T_C = 77$ К) з КН, аналогічним типу К1, але з радіусом надрізу $r = 2$ мм, що має ВП 1-1, наведений на рисунку 4.

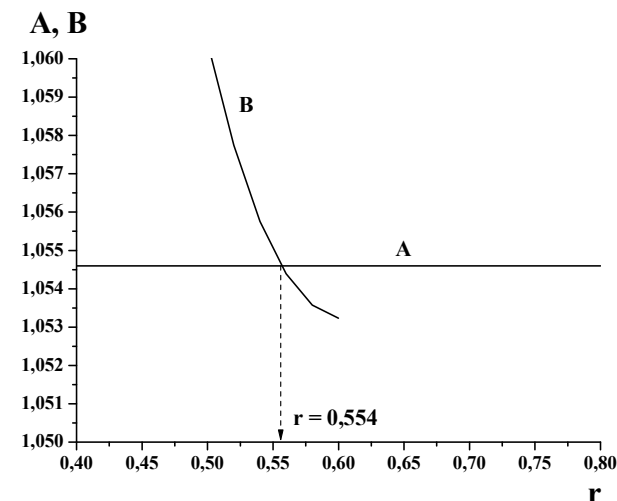


Рис. 4. Визначення параметра r для зразка із сталі 10Г2ФБ за результатами розв'язання системи рівнянь (13) числовими методами /
Fig. 4. Determination of parameter r for sample of 10Г2ФБ steel according to the results of solving the system of equations (13) by numerical methods

Із врахуванням залежностей (8), (10)–(12) в приведеному вигляді маємо :

$$A = Y - a1_k, \tag{13}$$

$$B = b1_k r - c1_k r^2 + a2_k \exp(-r/b2_k) \cdot X + c2_k \cdot X - (0,5/r) \cdot X^2,$$

де для дослідженої сталі 10Г2ФБ : $X = K_{msc}/K_{ms} = 0,603$; $Y = \mu_{K_{msc}}^\sigma / \mu_{K_{ms}}^\sigma = 0,749$; $a1_k, 2_k, b1_k, 2_k, c1_k, 2_k$ – емпіричні коефіцієнти, що залежать від ВП (індекс k – 1-1) – наведені в таблиці 4.

Далі, за результатами визначення параметра $r = 0,554$ (рис. 4), будували закономірність структурно-механічного окрихчення для будь-яких КС і КТС з ВП 1-1 та КН ($r = 2$ мм), застосовуючи для розрахунку параболічних коефіцієнтів залежності (10)–(12). Приклад побудови такої закономірності

$$\mu_{K_{msc}}^\sigma / \mu_{K_{ms}}^\sigma = f(K_{msc}/K_{ms}) \text{ за результатами}$$

випробувань лише однієї сталі наведений на рисунку 5 (крива 6), для якої значення параболічних коефіцієнтів у (8) складають: $A_{i,k} = -0,0577$, $B_{i,k} = 1,9546$, $C_{i,k} = 0,9025$.

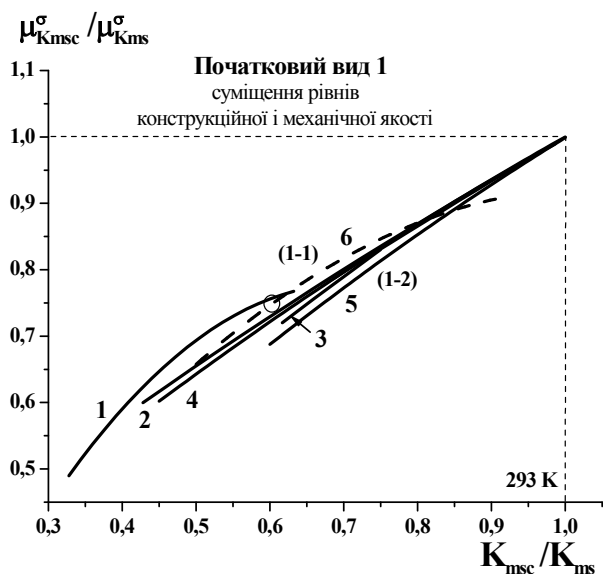


Рис. 5. Закономірності структурно-механічного окрихнення для КС 1-го початкового виду: 1 – зразки без КН; 2, 4 – зразки з КН типу К2; 3, 5 – зразки з КН типу К3; 6 – зразок з КН ($r = 2$ мм) – штрихова лінія (розрахунок за (8), (10) – (12)); (1-1), (1-2) – ВП; експериментальні дані: \circ – для ВП 1-1 / \odot – для ВП 1-1 /

Fig. 5. Dependences of structural and mechanical embrittlement for 1st original type constructional steels: 1 – sample without stress concentrator; 2, 4 – samples with K2-type stress concentrator; 3, 5 – with K3-type stress concentrator; 6 – sample with stress concentrator ($r = 2$ mm.) – dashed line (calculated by (8) (10) – (12)); (1-1), (1-2) – tempering; experimental data: \circ – for 1-1 tempering

Із цього рисунка видно, що закономірність структурно-механічного окрихнення для зразка з КН ($r = 2$ мм) в ансамблі аналогічних залежностей займає проміжне положення між кривою 1 (для зразка без КН) і кривою 2 (для зразка з КН типу К1 з $r = 0,25$ мм), а рівень вершини параболі, що її описує, зміщується в напрямку суміщення рівнів механічної і конструкційної якості ($\mu_{K_{msc}}^\sigma / \mu_{K_{ms}}^\sigma = 1$). Це свідчить про високу чутливість закономірностей структурно-механічного окрихнення до зміни умов дії неоднорідних силових полів навіть у межах одного ВП.

На завершення треба підкреслити, що побудова закономірностей структурно-механічного окрихнення за результатами випробувань лише одного зразка шуканого сплаву в заданих умовах дії неоднорідних силових полів дає змогу визначити параметри окрихнення, тобто оцінити схильність до окрихнення, будь-якого іншого сплаву, що перебуває в тих же умовах навантаження та має такий же ВП. Це дає змогу ранжувати КС і КТС за ознакою властивості

окрихчуваності та за величиною їх конструкційної якості [1].

Аналіз результатів

З рисунків 2, 3, 5 видно, що, будуючи закономірності структурно-механічного окрихнення, необхідно враховувати як початковий вид, так і ВП шуканого сплаву. Аналіз отриманих результатів показав, що суттєвий вплив на зміну поведінки механічних характеристик конструкційних металевих сплавів у системі взаємозв'язку властивостей «пластичність – міцність – механічна стабільність», тобто на формування ВП, має інтенсивність зміни деформаційного зміцнення, що може бути визначена за відношенням показників n (без дії КН) і n_c (за дії КН) при відповідній зміні відношення їх кінцевої міцності $\sigma_{0,2c}$ (за критичних температур крихкості) до початкової міцності $\sigma_{0,2}$ за кімнатної температури випробувань (рис. 6).

Вплив інтенсивності зміни деформаційного зміцнення $d(n/n_c)/d(\sigma_{0,2c}/\sigma_{0,2})$ на формування ВП досліджених конструкційних сплавів показує, що залежності $n/n_c = f(\sigma_{0,2c}/\sigma_{0,2})$ для усіх ВП КС (рис. 6 а) можуть бути описані типовими S-подібними функціями такого вигляду:

$$\frac{n}{n_c} = a + b \cdot \left\{ 1 + \left[\frac{\sigma_{0,2c}}{c \cdot \sigma_{0,2}} \right]^d \right\}^{-1}, \quad (14)$$

а природа впливу фактора $d(n/n_c)/d(\sigma_{0,2c}/\sigma_{0,2})$ на формування ВП КТС (рис. 6 б) інша – факт збереження виду поведінки механічних характеристик у результаті дії неоднорідних силових полів (ВП 1-1 і 2-2) може бути описаний параболічними залежностями з віссю симетрії, паралельною вісі абсцис:

$$\frac{n}{n_c} = \frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4 \cdot c \cdot (a - \sigma_{0,2c}/\sigma_{0,2})}}{2 \cdot c}, \quad (15)$$

де знак «+» перед квадратним коренем треба використовувати для ВП 1-1 при величині показника $\sigma_{0,2c}/\sigma_{0,2} > 0,93$, для ВП 2-2 – при $\sigma_{0,2c}/\sigma_{0,2} > 1,83$, а знак «-», відповідно, для ВП 1-1 при величині показника $\sigma_{0,2c}/\sigma_{0,2} \leq 0,93$, а для ВП 2-2 – при $\sigma_{0,2c}/\sigma_{0,2} \leq 1,83$, а факт зміни виду поведінки механічних характеристик в результаті дії неоднорідних силових полів (ВП 1-2 і 2-1) може бути описаний параболічними залежностями³:

$$\frac{n}{n_c} = a + b \cdot \frac{\sigma_{0,2c}}{\sigma_{0,2}} - c \cdot \left(\frac{\sigma_{0,2c}}{\sigma_{0,2}} \right)^2, \quad (16)$$

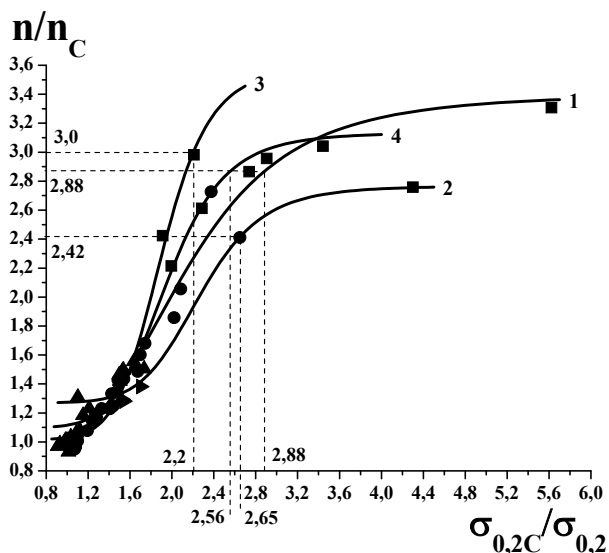
де a , b , c , d – емпіричні коефіцієнти, наведені в таблиці 5 для кожного ВП КС і КТС.

³ Для ВП 2-1 залежність $n/n_c = f(\sigma_{0,2c}/\sigma_{0,2})$ недобудована з причини відсутності достатньої кількості експериментальних даних.

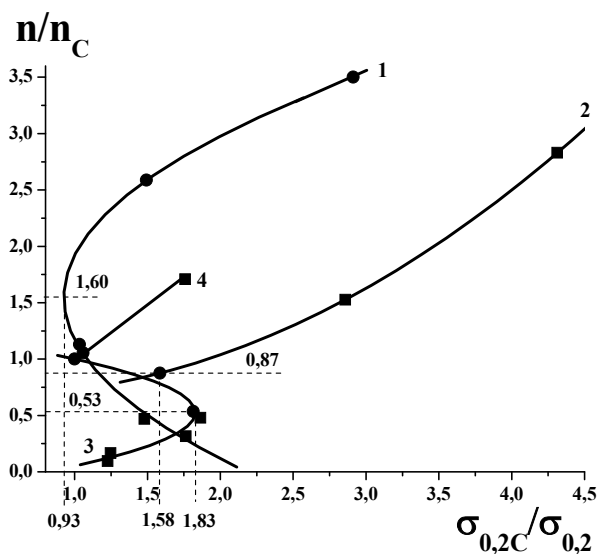
Таблиця 5

Значення емпіричних коефіцієнтів у залежностях (14)–(16) для різних ВП КС і КТС / The values of empirical coefficients according to (14)–(16) for different temperings of constructional steels and constructional titanium alloys

Сплав	Видовий перехід	Емпіричні коефіцієнти			
		a	b	c	d
КС	1-1	3,402	-2,514	2,103	4,152
	1-2	2,767	-1,496	2,273	7,697
	2-2	3,591	-2,574	1,907	8,339
	2-1	3,134	-2,035	1,961	7,155
КТС	1-1	2,177	-1,612	0,521	--
	1-2	0,699	-0,111	-0,140	--
	2-2	0,816	-3,849	-3,667	--
	2-1	0,069	0,933	--	--



a



б (b)

Рис. 6. Залежності відношення показників деформаційного зміцнення n (без дії КН) і n_C (за дії КН) від відповідного відношення характеристик міцності за критичних $\sigma_{0,2C}$ та кімнатній $\sigma_{0,2}$ температур: а – для КС; б – для КТС; видові переходи – криві: 1 – 1-1; 2 – 1-2; 3 – 2-2; 4 – 2-1; експериментальні дані за критичних температур крихкості: ● – T_C ; ▲ – T_0 ;

■ – $T_{BK}(T_K)$ [1-3]; ► – T_C^{KCV} / Fig. 6. Dependencies of strain hardening n (no action of stress concentrator) and n_C (under action of stress concentrator) indicators on the ratio of the respective characteristics of strength at critical $\sigma_{0,2C}$ and normal $\sigma_{0,2}$ temperatures: а – for constructional steels; б – for constructional titanium alloys; specific transitions – curves: 1 – 1-1; 2 – 1-2; 3 – 2-2; 4 – 2-1; experimental data at critical temperatures of fragility: ● – T_C ; ▲ – T_0 ;

■ – $T_{BK}(T_K)$ [1-3]; ► – T_C^{KCV}

Порівняння впливу фактора $d(n/n_C)/d(\sigma_{0,2C}/\sigma_{0,2})$ на формування ВП КС і КТС на рисунку 6 а і б дозволяє дослідити деякі особливості поведінки механічних характеристик цих сплавів в умовах дії неоднорідних силових полів:

– для КС найбільша інтенсивність зміни деформаційного зміцнення із зміною критичної міцності спостерігається у сплавів з ВП 2-2 (крива 3 на рисунку 6 а), що пояснюється порівняно низькими властивостями пластичності, характерними для таких КС, і є причиною їх найбільшого скупчення на нижньому шельфі залежності $n/n_C = f(\sigma_{0,2C}/\sigma_{0,2})$, що свідчить про близькість їх критичних температур крихкості (T_C та інших) до кімнатної T_{KM} при $\sigma_{0,2C} \rightarrow \sigma_{0,2}$. У сплавів з ВП 2-1 (крива 4 на рисунку 6 а), що характеризуються підвищеними властивостями пластичності за дії КН, фактор $d(n/n_C)/d(\sigma_{0,2C}/\sigma_{0,2})$ зменшується, а для сплавів із високими пластичними характеристиками (ВП 1-1 і 1-2 – криві 1 і 2 на рисунку 6 а відповідно) тенденція до зменшення $d(n/n_C)/d(\sigma_{0,2C}/\sigma_{0,2})$ зберігається.

Сходження залежностей $n/n_C = f(\sigma_{0,2C}/\sigma_{0,2})$ на нижньому шельфі для ВП 1-1 і 2-2 КС, тобто в області відносно низьких значень показника $\sigma_{0,2C}/\sigma_{0,2} (\leq 1,83$ – рис. 6 а), пов'язане з приблизно однаковими значеннями інтенсивності зміни характеристики пластичності ψ_K при зміні міцності $\sigma_{0,2}$ на високих рівнях механічної стабільності $K_{ms} \geq 1,7$ для цих видів поведінки механічних характеристик, що було відмічено раніше в [1]. При цьому деяке підвищення рівня нижнього шельфу для ВП 1-2 і 2-1 пов'язане із зміною величини впливу фактора $d\psi_K/d\sigma_{0,2}$ під час формування цих ВП.

Треба відмітити також закономірний вихід усіх залежностей $n/n_C = f(\sigma_{0,2C}/\sigma_{0,2})$ для КС на верхній шельфі, що характеризується суттєвим зменшенням показника n_C ($n_C \rightarrow 0$) при підвищенні критичної міцності $\sigma_{0,2C}$ ($\sigma_{0,2C} \rightarrow R_x$) і відповідному зниженні критичної температури крихкості T_C або іншої. При цьому координати початку суттєвого зниження показника інтенсивності зміни деформаційного зміцнення n/n_C із зміною показника міцності $\sigma_{0,2C}/\sigma_{0,2}$ з наведених вище причин різні для кожного ВП і характеризуються зменшенням величини першого з

відповідним підвищенням величини другого у разі підвищення властивостей пластичності, починаючи з ВП 2-2 до ВП 1-2: 2-2 (3,0; 2,2), 2-1 (2,88; 2,56), і, навпаки, зменшенням величини першого з відповідним зниженням величини другого у разі падіння властивостей пластичності, починаючи з ВП 1-1 до ВП 1-2: 1-1 (2,88; 2,88) і 1-2 (2,42; 2,65) – див. рисунок 6 а;

– для КТС спостерігається зовсім інша картина (рис. 6 б), яка має неоднозначний характер: для сплавів із ВП 1-1 із збільшенням величини $\sigma_{0,2C}/\sigma_{0,2}$ від значення 0,93 показник n/n_C зростає, починаючи від граничної величини 1,60, а при $n/n_C \leq 1,60$ спостерігається зворотна тенденція (крива 1 на рисунку 6 б); для сплавів з ВП 2-2 із збільшенням $\sigma_{0,2C}/\sigma_{0,2}$ показник n/n_C знижується до граничних значень $n/n_C = 0,53$ і $\sigma_{0,2C}/\sigma_{0,2} = 1,83$, а при $n/n_C \leq 0,53$, навпаки, спостерігається зростання показника n/n_C до граничної величини $\sigma_{0,2C}/\sigma_{0,2} = 1,83$ (крива 3 на рисунку 6 б). Різний вплив фактора $d(n/n_C)/d(\sigma_{0,2C}/\sigma_{0,2})$ на формування ВП 1-1 і 2-2 КТС в області відносно низьких значень показника $\sigma_{0,2C}/\sigma_{0,2} \leq 1,83$ пов'язаний з протилежними тенденціями інтенсивності зміни характеристики пластичності ψ_K при зміні міцності $\sigma_{0,2}$ на усіх рівнях механічної стабільності K_{ms} для сплавів цих видів, що було відмічено в [1].

Такою поведінкою зміни інтенсивності $d\psi_K/d\sigma_{0,2}$ при формуванні видів 1 і 2 КТС можна пояснити і однакову тенденцію до зростання показника n/n_C при підвищенні $\sigma_{0,2C}/\sigma_{0,2}$ при зміні кінцевого виду у ВП 1-2 і 2-1 (криві 2 і 4 на рисунку 6 б відповідно), коли відбувається певна «компенсація» впливу показника $d\psi_K/d\sigma_{0,2}$. Важливо відмітити існування низькотемпературної області ($n/n_C \leq 1$), де показник $n_C \geq n$, яка, згідно з [14; 15], характерна тільки для КТС з ГЦУ-граткою (α -сплави) або двофазних ($\alpha + \beta$ -сплавів) з переважним вмістом α -фази (рис. 6 б). Із цього рисунка видно, що така область характерна для усіх КТС з ВП 2-2 за температур крихкості T_C і T_K (сплави «б», «к» і «т» в [3]), а також для більш пластичних КТС з ВП 1-1 за температури крихкості T_K (сплави «с», «д» і «п» в [3] – нижня частина кривої 1 на рисунку 6 б).

Важливо зазначити, що отримані залежності (14) – (16) можуть мати практичне застосування, яке підлягає перевірці визначення або безпосередньому визначенню кінцевого виду поведінки механічних характеристик досліджених конструкційних сплавів в умовах дії неоднорідних силових полів, тобто встановленні їх ВП. Така допоміжна методика має актуальність у разі відсутності з будь-яких причин експериментальних даних величин показників пластичності ψ_K за критичної температури крихкості, які необхідні для застосування експрес-способу щодо визначення початкової і кінцевої видової належності КС і КТС [1]. Особливе значення це має у випадку КС, коли, зважаючи на великий розкид експериментальних даних, доволі складно визначити величину ψ_K за T_C та інших критичних температур

або побудувати температурну залежність $\psi_K(T)$ з достатньою достовірністю.

Для ефективного застосування згаданої допоміжної методики необхідно мати температурні залежності характеристик міцності $\sigma_{0,2}(T)$ і $\sigma_2(T)$, а також знати критичні значення характеристик міцності $\sigma_{0,2C}$ і σ_{2C} [2; 3], за допомогою яких легко встановити показники деформаційного зміцнення n і n_C , використовуючи залежності :

$$n = \lg(\sigma_2/\sigma_{0,2}); n_C = \lg(\sigma_{2C}/\sigma_{0,2C}). \quad (17)$$

Подальше використання залежностей (14) – (16) дозволить визначити ВП для шуканого сплаву за відношенням n/n_C .

Не менш важливий для практичного використання аналіз впливу на закономірності структурно-механічного окрихчення параметрів, що характеризують ефект концентрації напружень.

Відомо, що різноманітні технологічні КН (отвори, пази, вирізи, порожнини, виточки, різьби тощо), а також КН у вигляді тріщин та тріщиноподібних дефектів викликають різке локальне підвищення внутрішніх напружень в умовах навантаження, тобто концентрацію напружень [16; 17]. Для визначення ступеня концентрації напружень в області пружних деформацій зазвичай приймають теоретичний коефіцієнт концентрації α_σ :

$$\alpha_\sigma = \sigma_{\max}/\sigma_N, \quad (18)$$

де σ_{\max} – максимальне (локальне) напруження в умовах концентрації напружень; σ_N – середнє номінальне напруження.

При цьому суттєве значення має той факт, що величина α_σ залежить тільки від геометрії несного елемента конструкції (НЕК), відносних розмірів КН та способу навантаження, але практично не залежить від рівня номінальних напружень, модуля пружності E та незначно варіюється у випадку зміни коефіцієнта Пуассона μ [16].

Однак у разі навантаження в області пружно-пластичних деформацій відбувається перерозподіл напружень і деформацій, що зумовлює зміни коефіцієнтів концентрації напружень K_σ і деформацій K_ϵ та їх залежності від величин межі текучості $\sigma_T(\sigma_{0,2})$, показника деформаційного зміцнення n , теоретичного коефіцієнта концентрації напружень α_σ та рівня середнього номінального напруження σ_N [16]:

$$K_\sigma = \alpha_\sigma^{2n/(1+n)} \quad (\text{при } \sigma_N/\sigma_{0,2} \geq 1), \quad (19)$$

$$K_\epsilon = \alpha_\sigma^{2/(1+n)} \quad (\text{при } \sigma_N/\sigma_{0,2} \geq 1). \quad (20)$$

Зважаючи на широке використання параметра α_σ в науково-технічній [16; 18] та інженерній [17; 19] практиці та передбачуваний його взаємозв'язок із параметром радіуса кривизни r у вершині параболічних закономірностей структурно-механічного окрихчення, який також залежить від геометрії КН та способу навантаження НЕК, було доцільним спрямувати пошук у цьому напрямку. Такий аналіз допоміг установити залежності $1/\alpha_\sigma = f(r)$, які є загальними принаймні для досліджених КС і КТС з причини констатованої вище ідентичності

закономірностей структурно-механічного окрихчення для цих сплавів. Указані залежності наведені на рисунку 7 для усіх ВП КС і КТС та мають принципове значення як для формулювання принципів прогнозування ступеню окрихчення металу за показником r за дії будь-яких КН у будь-яких заданих умовах навантаження за даними параметра α_σ [17], так і для розв'язання оберненої задачі – розрахунку коефіцієнтів концентрації напружень із використанням значень r , отриманих у результаті випробувань лише одного зразка шуканого сплаву в заданих умовах дії неоднорідних силових полів.

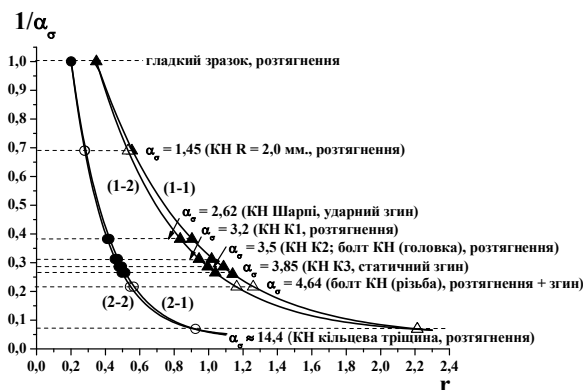


Рис. 7. Залежності оберненої величини параметра теоретичного коефіцієнта концентрації напружень α_σ від параметра радіуса кривизни r у вершині параболічних закономірностей структурно-механічного окрихчення для зразків КС і КТС, що перебувають у різних умовах дії неоднорідних силових полів; (1-1), (1-2), (2-2), (2-1) – ВП; темні знаки – експеримент, світлі знаки – розрахунок / Fig. 7. Dependences of the reciprocal parameter of theoretical stress concentration factor α_σ the parameter of curvature radius r at the top of the parabolic patterns of structural and mechanical embrittlement samples of constructional steels and constructional titanium alloys that are in different conditions of non-uniform force fields; (1-1), (1-2), (2-2), (2-1) – tempering; dark marks – experiment, light marks – calculation

Залежності $1/\alpha_\sigma = f(r)$, показані на рисунку 7, добре апроксимуються експоненціальною функцією: $\alpha_\sigma = [a \cdot \exp(r/b) + c]^{-1}$, (21) де a, b, c – емпіричні коефіцієнти, що залежать від ВП (табл. 6).

Таблиця 6

Значення емпіричних коефіцієнтів у залежності (21) для різних ВП КС і КТС / The values of empirical coefficients according to (21) for different temperings of constructional steels and constructional titanium alloys

Емпіричні коефіцієнти	Видові переходи			
	1-1	1-2	2-2	2-1
a	1,828	2,007	2,572	2,403
b	0,539	0,464	0,204	0,221
c	0,039	0,051	0,041	0,032

Важливо зазначити, що точність регресії залежностей $1/\alpha_\sigma = f(r)$, при якій залишкова дисперсія D не вища $1 \cdot 10^{-5}$, дозволяє, як і у випадку модельних закономірностей структурно-механічного окрихчення [1–3], вважати їх функціональними.

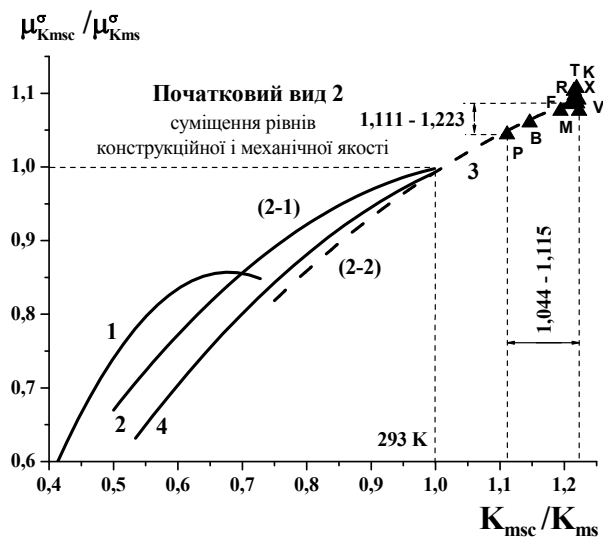
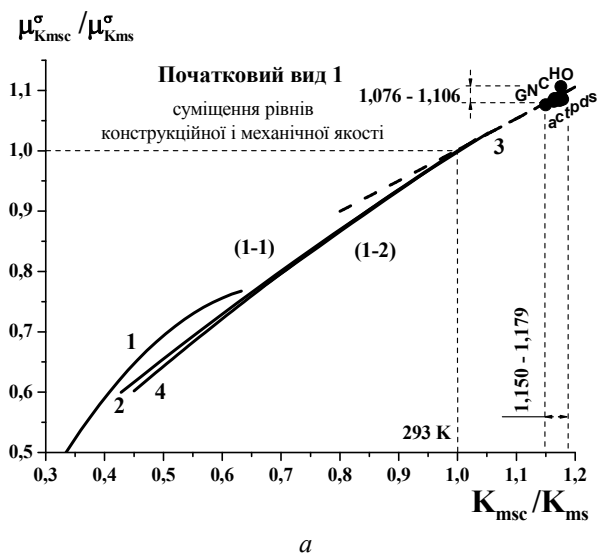
Використання (21) для прогнозування закономірностей структурно-механічного окрихчення шляхом визначення параметра r має певну наукову, так і практичну цінність. Одним з таких прикладів може бути інформація про закономірності структурно-механічного окрихчення в умовах максимально жорсткої дії неоднорідних силових полів. Уявлення про такі закономірності

$\mu_{K_{msc}}^\sigma / \mu_{K_{ms}}^\sigma = f(K_{msc}/K_{ms})$ може дати їх значення параметра r для зразка з максимально гострою кільцевою тріщиною, нанесення якої механічним шляхом із метою отримання експериментальних даних має певні технічні складнощі, а наведена шляхом циклічного навантаження кільцева втомна тріщина, як правило, несиметрична відносно вісі розтягнення, що робить подальший експеримент некоректним. Приклад такого дослідження за даними [17] наведений на рисунку 8 для вибірки КС, дослідженої у працях [1; 2].

На рисунку 8 показано закономірності структурно-механічного окрихчення для зразка з основними геометричними розмірами (D, d), аналогічними типу К2, що має КН – максимально гостра кільцева тріщина з $\alpha_\sigma = 14,4$ в умовах розтягнення (рис. 7) за даними [17]. При цьому треба зазначити, що радіус вістря такої тріщини має складати $r = 0,012$ мм, тобто порядок величини його діаметра (~ 25 мкм) можна порівнювати з розміром структурного елемента КС (зерна, мартенситного пакета тощо), що дає підстави вважати таку тріщину ідеально гострою.

Закономірності на рисунку 8 для зразка з таким КН побудовані з використанням (8), (10) – (12) при величині параметра r , розрахованого за (21) для кожного ВП при $\alpha_\sigma = 14,4$ (величини радіусів кривизни r у вершині побудованих параболічних закономірностей структурно-механічного окрихчення складають: для ВП 1-1 $r = 2,213$, для ВП 2-2 $r = 0,924$, а значення параболічних коефіцієнтів у (8) наведені в таблиці 2). З цього рисунка видно, що усі досліджені сплави за дії вищевказаного КН, незалежно від свого структурного стану і значень вихідних базових механічних характеристик [1; 2], скупчуються в певних досить вузьких інтервалах

зміни показників K_{msc}/K_{ms} і $\mu_{K_{msc}}^\sigma / \mu_{K_{ms}}^\sigma$, що лежать в області температур крихкості $T_C > 293$ К (з цієї причини значення вказаних показників > 1): для ВП 1-1 ці інтервали змін складають $K_{msc}/K_{ms} = 1,150$ «а» – $1,176$ «О»; $\mu_{K_{msc}}^\sigma / \mu_{K_{ms}}^\sigma = 1,076$ «а» – $1,106$ «О», а для ВП 2-2 – $K_{msc}/K_{ms} = 1,111$ «Р» – $1,223$ «V»; $\mu_{K_{msc}}^\sigma / \mu_{K_{ms}}^\sigma = 1,044$ «Р» – $1,115$ «Т» – в лапках позначення КС в [1; 2].



б (b)

Рис. 8. Закономірності структурно-механічного окрихчення для КС з КН кільцева тріщина (розтягнення): а – для початкового виду 1; б – для початкового виду 2; модельні (суцільні лінії): 1 – зразки без КН; 2, 4 – зразки з КН типу К2; 3, 5 – (штрихові лінії) розраховані за параметром r (21) і залежностями (8), (10)–(12) /

Fig. 8. Dependences of structural and mechanical embrittlement for constructional steels with split ring-type stress concentrator (stretching): a – for the 1st original type; b – for the 2nd original type; models (solid lines): 1 – samples without stress concentrators; 2, 4 – samples with K2-type stress concentrators; 3, 5 – (dashed lines) calculated by the parameter r (21) and dependencies (8) (10)–(12)

Цікаво зауважити, що найбільше скупчення досліджених сплавів наближається до певної межі (рис. 8), що, на думку автора, свідчить про існування границі окрихчення КС, яку можна визначити за характеристикою механічної стабільності K_{msc} , використовуючи вищезначені інтервали змін показника K_{msc}/K_{ms} і дані [1; 2]. Таким чином, для ВП

1-1 гранична міра окрихчення металу за дії КН (кільцева тріщина) в умовах одновісного розтягнення буде складати $K_{msc} = 3,340$ для сплаву «О», а для ВП 2-2 – $K_{msc} = 2,243$ для сплаву «V», що перевищує міру окрихчення тих же КС за дії КН (втомна тріщина – КН типу К3) в умовах трьохточкового згину: для ВП 1-1 в 1,76 раза, а для ВП 2-2 – в 1,35 раза.

Висновки

1. Закономірності структурно-механічного окрихчення для конструкційних сталей і титанових сплавів ідентичні і залежать тільки від впливу таких трьох факторів:

- геометрії концентратора напружень та умов напружено-деформованого стану, тобто умов неоднорідних силових полів;

- структурного стану, що визначається режимами обробки і формує базові механічні характеристики сплаву ($\sigma_{0.2}$, σ_B , ψ_K);

- видового переходу, який характеризує збереження або зміну виду поведінки механічних характеристик у початкових (без дії неоднорідних силових полів) та кінцевих (за дії неоднорідних силових полів) умовах.

2. Основним фактором, що регулює видовий перехід у системі взаємозв'язку властивостей «пластичність – міцність – механічна стабільність» в умовах дії неоднорідних силових полів, є інтенсивність зміни деформаційного зміцнення n/n_c при зміні міцності $\sigma_{0.2c}/\sigma_{0.2}$. Вплив цього фактора на формування видових переходів залежить від інтенсивності зміни пластичності ψ_K сплаву при зміні його міцності $\sigma_{0.2}$ на різних рівнях механічної стабільності K_{ms} , але має свої особливості для конструкційних сталей і титанових сплавів:

- для конструкційних сталей інтенсивність зміни деформаційного зміцнення n/n_c зростає у разі підвищення показника зміни міцності $\sigma_{0.2c}/\sigma_{0.2}$ при формуванні усіх видових переходів;

- для конструкційних титанових сплавів вплив фактора $d(n/n_c)/d(\sigma_{0.2c}/\sigma_{0.2})$ на формування видових переходів неоднозначний: для сплавів із видовим переходом 1-1 із збільшенням величини $\sigma_{0.2c}/\sigma_{0.2}$ від значення 0,93 показник n/n_c зростає, починаючи від граничної величини 1,60, а при $n/n_c \leq 1,60$ спостерігається зворотна тенденція; для сплавів із ВП 2-2 із збільшенням $\sigma_{0.2c}/\sigma_{0.2}$ показник n/n_c знижується до граничних значень $n/n_c = 0,53$ і $\sigma_{0.2c}/\sigma_{0.2} = 1,83$, а при $n/n_c \leq 0,53$, навпаки, спостерігається зростання показника n/n_c до граничної величини $\sigma_{0.2c}/\sigma_{0.2} = 1,83$. Це пов'язано з протилежними тенденціями зміни властивості пластичності ψ_K із зміною міцності $\sigma_{0.2}$ на усіх рівнях механічної стабільності K_{ms} для 1 і 2-го видів поведінки механічних характеристик цих сплавів. У конструкційних титанових сплавах з ГЩУ-граткою існує низькотемпературна область, де $n_c \geq n$.

3. Існує функціональний взаємозв'язок між величиною радіуса кривизни r у вершині параболічної залежності структурно-механічного

окрихнення і значенням теоретичного коефіцієнта концентрації напружень α_σ . Цей взаємозв'язок визначається певним видовим переходом і дозволяє сформулювати принципи прогнозування закономірностей структурно-механічного окрихнення для конструкційних сталей і титанових сплавів у

будь-яких заданих умовах дії неоднорідних силових полів за відомим показником α_σ або, навпаки, за відомою експериментальною закономірністю структурно-механічного окрихнення визначити величину показника α_σ .

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Мешков Ю. Я. Механическая стабильность металлов и сплавов / Ю. Я. Мешков, С. А. Котречко, А. В. Шиян. – Киев : Наук. думка, 2014. – 278 с.

Meshkov Yu. Ya., Kotrechko S. A., Shiyani A. V. *Mechanicheskaya stabilnost metallov i splovov.* – Kiev : Nauk. dumka, 2014. – 278 s.

<http://koha.tntu.edu.ua/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=176355>

2. Шиян А. В. Методические основы определения критической температуры хрупкости сталей в условиях концентрации напряжений / А. В. Шиян, Е. Ф. Сорока, О. П. Носенко // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Вып. 73. – Днепропетровск : ГВУЗ ПГАСА, 2014. – С. 53–64.

Shiyani A. V., Soroka E. F., Nosenko O. P. *Metodicheskie osnovyi opredeleniya kriticheskoy temperatury i hrupkosti staley v usloviyah kontsentratsii napryazheniy* / Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie, Vyp. 73, Dnepropetrovsk : GVUZ PGASA, 2014. – S. 53–64.

<http://pgasa.dp.ua/a/international%20conferences/starodubov/archive/referats%20of%20starodubov%202014-73.pdf>

3. Шиян А. В. Структурно-механическое охрупчивание титановых сплавов в условиях концентрации напряжений / А. В. Шиян // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Вып. 80. Днепропетровск : ГВУЗ ПГАСА, 2014. – С. 350–357.

Shiyani A. V. *Strukturno-mechanicheskoe ohрупchivanie titanovyih splovov v usloviyah kontsentratsii napryazheniy* / Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie, Vyp. 80, Dnepropetrovsk : GVUZ PGASA, 2014. – S. 350–357.

http://www.cgnb.dp.ua/podborka_94.html

4. Шиян А. В. Взаимосвязь свойств прочности, пластичности и механической стабильности конструкционных титановых сплавов / А. В. Шиян, Ю. Я. Мешков // Металлознавство та термічна обробка металів. – Дніпропетровськ : ДВНЗ ПДАБА, 2014. – № 4. – С. 54–75.

Shiyani A. V. *Vzaimosvyaz svoystv prochnosti, plastichnosti i mehanicheskoy stabilnosti konstruksionnyih titanovyih splovov* / A. V. Shiyani, Yu. Ya. Meshkov // *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metalliv.* – Dnepropetrovsk : GVUZ PGASA, 2014. – № 4. – S. 54–75.

<http://tinyurl.com/q765ld3>

5. Мешков Ю. Я. Прочность как основа конструкционной надежности сталей и сплавов / Ю. Я. Мешков // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Вып. 80. – Днепропетровск : ГВУЗ ПГАСА, 2015. – С. 204–209.

Meshkov Yu. Ya. *Prochnost kak osnova konstruksionnoy nadezhnosti staley i splovov* // Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie, Vyp. 80, Dnepropetrovsk : GVUZ PGASA, 2015. – S. 204–209.

<http://pgasa.dp.ua/science/Starodubov/archive/>

6. ASTM E 1921 : Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range. 2005.

<http://www.astm.org/Standards/E1921.htm>

7. Shiyani A. V. Determining the brittle strength and mechanical stability of structural steels, *Steel Transl.*, 2013, vol. 43, no. 11, P. 762–772.

<http://link.springer.com/article/10.3103%2FS096709121310193>

8. Ивасишин О. М. Связь характеристик «хрупкой» прочности и механической стабильности с базовыми механическими характеристиками конструкционных титановых сплавов / О. М. Ивасишин, П. Е. Марковский, С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян // Металлофизика и новейшие технологии. – 2013. – № 4. – С. 479–496.

Ivasishin O. M., Markovskiy P. E., Kotrechko S. A., Meshkov Yu. Ya., Shiyani A. V. *Svyaz harakteristik «hrupkoy» prochnosti i mehanicheskoy stabilnosti s bazovymi mehanicheskimi harakteristikami konstruksionnyih titanovyih splovov* // *Metallofizika i noveyshie tehnologii.* – 2013. – № 4. – S. 479–496.

<http://mfint.imp.kiev.ua/ru/toc/v35/i04.html>

9. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. – Москва : Изд-во стандартов, 1978. – 15 с.

GOST 9454-78. *Metallyi. Metod ispytaniya na udarnyy izgib pri ponizhennyih, komnatnoy i povyshennyih temperaturah.* – Moskva : Izd-vo standartov, 1978. – 15 s.

<http://vsegest.com/Catalog/24/24683.shtml>

10. Мешков Ю. Я. Физическая природа охрупчивающего действия надрезов в металлических материалах / Ю. Я. Мешков // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов. – Т. 1. – Харьков, 2006. – С. 213–222.

Meshkov Yu. Ya. *Fizicheskaya priroda ohрупchivayuscheho deystviya nadrezov v metallicheskih materialah* / *Oborudovanie i tehnologii termicheskoy obrabotki metallov i splovov*, T. 1, Kharkov, 2006. – S. 213–222.

11. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.

PNAE G-7-002-86. *Normyi rascheta na prochnost oborudovaniya i truboprovodov atomnyih energeticheskikh ustanovok.* – Moskva : Energoatomizdat, 1989. – 525 s.

http://www.seogan.ru/Doc/PNAE_G-7-002-86-part1.pdf

12. Ceber G. A. F., Wild C. J. *Nonlinear Regression* // John Wiley & Sons. – 1989. – P. 332–337.

<http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/0471725315>

13. Котречко С. А. Пластичность и хладостойкость конструкционных сталей / С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков, А. В. Шиян // Проблемы прочности. – 2010. – № 1. – С. 112–119.

Kotrechko S. A., Meshkov Yu. Ya., Shiyani A. V. *Plastichnost i hladostoykost konstruksionnyih staley / Problemy prochnosti.* – 2010. – № 1. – S. 112–119.

http://www.ipp.kiev.ua/journal/2010_r.htm

14. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов / Под ред. В. И. Трефилова. – Киев : Наук. думка, 1987. – 248 с.

Deformatsionnoe uprochnenie i razrushenie polikristallicheskih metallov / Pod red. V. I. Trefilova. – Kiev : Nauk. dumka, 1987. – 248 s.

<http://www.twirpx.com/file/964458/>

15. Вигли Д. А. Механические свойства материалов при низких температурах / Д. А. Вигли. – Москва : Мир, 1974. – 374 с.

Vigli D. A. Mehanicheskie svoystva materialov pri nizkih temperaturah. – Moskva : Mir, 1974. – 374 s.

<http://www.twirpx.com/file/809662/>

16. Когаев В. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность / В. П. Когаев, Н. А. Махутов, А. П. Гусенков // Москва : Машиностроение, 1985. – 223 с.

Kogaev V. P., Mahutov N. A., Gusenkov A. P. Rascheti detalей mashin i konstruktсий na prochnost i dolgovechnost / Moskva : Mashinostroenie, 1985. – 223 s.

<http://dwg.ru/dn/4395>

17. Савін Г. М. Довідник з концентрації напружень / Г. М. Савін, В. І. Тульчій. – Київ : ВО «Вища школа», 1976. – 412 с.

Savin G. M., Tulchiy V. I. Dovldnik z kontsentratsiyi napruzhen. – Kiyiv : VO «Vischa shkola», 1976. – 412 s.

Статтю рекомендовано до публікації д-ром техн. наук, проф. В. С. Вахрушевою (Україна); д-ром техн. наук, проф. В. З. Куцовою (Україна)

Стаття надійшла до редколегії 28.09.2015

<http://lib.istu.edu.ua/index.php?p=34&id=5718&par=16>

18. Панасюк В. В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами / В. В. Панасюк. – Киев : Наукова думка, 1968. – 246 с.

Panasyuk V. V. Predelnoe ravnovesie hrupkih tel s treschinami. – Kiev : Naukova dumka, 1968. – 246 s.

<http://www.twirpx.com/file/877412/>

19. ДБН В.2.6.-163:2010 Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу. – Мінрегіонбуд України, 2011. – 202 с.

DBN V.2.6.-163:2010 Konstruktsii budivvel i sporud. Stalevi konstruktsii. Normi proektuvannya, vgotovlennya i montazhu. – Minregionbud Ukraini, 2011. – 202 s.

<http://www.uscc.com.ua/files/14/dbn-v26-xxx-proekt-druga-redakciya-stalevi-konstrukcij.pdf>

Наукове видання

Металознавство та термічна обробка металів

Науковий та інформаційний журнал
№ 3 (70) 2015 р.

Українською, російською та англійською мовами

Відповідальні за випуск:

к. т. н., доц. *Тимошенко О. А.*, к. т. н. *Ротт Н. О.*

Відповідальний секретар

к. т. н., доц. *Тимошенко О. А.*

Технічний редактор к. т. н., доц. *Тимошенко О. А.*

Редактор *Маловик В. Д.*

Комп'ютерна верстка:

к. т. н., доц. *Тимошенко О. А.*

Підп. до друку 28.10.2015 р. згідно з рішенням вченої ради ДВНЗ ПДАБА,
(протокол № 5 від 27.10.2015 р.). Формат А4. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.
Друк офсетний. Ум. друк. арк. 4,0. Наклад 300 прим. Зам. № 130.