



УКРАЇНА

(19) UA (11) 97081 (13) C2
(51) МПК (2011.01)
G01N 3/08 (2006.01)
G01N 3/18 (2006.01)
G01N 3/00

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

(54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ЗНАЧЕНЬ ХАРАКТЕРИСТИК КРИХКОГО РУЙНУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНОЇ СТАЛІ

1

(21) а201109687
(22) 03.08.2011
(24) 26.12.2011
(46) 26.12.2011, Бюл.№ 24, 2011 р.
(72) ШИЯН АРТУР ВІТАЛІЙОВИЧ
(73) ІНСТИТУТ МЕТАЛОФІЗИКИ ІМ. Г.В. КУРДЮ-
МОВА НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ
(56) UA 95870 C2, 10.01.2011.
UA 83197 C2, 15.12.2006.
UA 49501 U, 26.04.2010.
UA 62166 U, 10.08.2011, u201102398, 28.02.2011.
(57) Спосіб визначення оптимальних значень ха-
рактеристик крихкого руйнування конструкційної
сталі, при якому проводять випробування станда-
ртних гладких циліндричних зразків на одновісний
розтяг при температурах в інтервалі від 4 К до 293
К, визначають основні механічні характеристики

2

металу, характеристики крихкої міцності, механіч-
ної стабільності та оптимальної механічної стабі-
льності, який **відрізняється** тим, що визначають
наведене значення механічної стабільності за ве-
личиною міцності при температурі в'язкокрихкого
переходу, будують температурну залежність міц-
ності сплаву при пластичній деформації 2 %, після
чого визначають рівень оптимальної крихкої міц-
ності конструкційної сталі за величинами міцності
сплаву при пластичній деформації 2 % та наведе-
ного значення механічної стабільності в точці в'яз-
кокрихкого переходу, далі визначають оптимальне
значення температури в'язкокрихкого переходу
гладкого зразка в точці перетину температурної
залежності оптимального значення міцності спла-
ву при пластичній деформації 2 % з рівнем опти-
мальної крихкої міцності.

Винахід належить до галузі дослідження влас-
тливостей твердих матеріалів шляхом прикладання
статичних або динамічних навантажень, а саме, до
визначення оптимальних значень характеристик
крихкого руйнування гладких зразків конструкцій-
них сталей в інтервалі температур випробувань
від 77 К до 293 К.

Відомий спосіб визначення рівня характерис-
тики крихкого руйнування, а саме, крихкої міцності
конструкційних сталей при одновісному розтягу та
за допомогою локального опору відриву в області
дії концентраторів напружень з кінцевим радіусом
[1].

Недоліком даного способу є низька точність та
інформативність, оскільки в ньому не враховано
зв'язок характеристики крихкої міцності з парамет-
рами структури металу та не визначена її фізична
природа.

Відомий також спосіб визначення характерис-
тики крихкого руйнування - крихкої міцності R_{MC}
конструкційних сталей шляхом розтягування глад-
ких циліндричних зразків при температурах, бли-

зьких до температури киплячого азоту (77 К), коли
зразок втрачає пластичність до критичного рівня
деформації в місці розриву за показником віднос-
ного звуження $\psi_K = 2\%$ при руйнуванні зразка.

Такому рівню пластичності відповідає мінімальне
напруження в зоні крихкого руйнування, яке нази-
вається опором мікросколу R_{MC} або крихкою мі-
цністю. У випадках, коли при температурах випро-
бування значення ψ_K перевищує критичну
величину 2 %, використовують отримані при таких
випробуваннях значення дійсного напруження в
шийці S_K . При цьому, рівень крихкої міцності
 R_{MC} визначають шляхом екстраполяції поточних
значень напруження в шийці S_K на значення, від-
повідне критичній пластичності $\psi_K = 2\%$.

Рівень напруження в шийці S_K при цій дефо-
рмації приймають рівним величині крихкої міцності
 R_{MC} [2].

(13) C2

(11) 97081

(19) UA

Недоліком даного способу є наступне: значення крихкої міцності R_{MC} для сплавів з високим рівнем пластичності визначають за показником відносного звуження ψ_K при руйнуванні зразка при температурах, близьких до 77 K, та залишковою пластичною деформацією значно вище 2 %, а це робить метод екстраполяції та інші подібні методи математичних розрахунків для гладких зразків неефективними, тому що вони несуть в собі значні похибки.

Найбільш близьким за технічною суттю та результатом, що досягається, є спосіб визначення оптимального значення однієї з характеристик крихкого руйнування, а саме, оптимальної механічної стабільності конструкційної сталі K_{ms}^{opt} , при якому проводять випробування стандартних гладких циліндричних зразків на одновісний розтяг при температурах в інтервалі від 4 K до 293 K, визначення основних механічних характеристик сплаву та характеристик крихкої міцності R_{MC} механічної

стабільності K_{ms} з наступною побудовою узагальненої діаграми взаємозв'язку властивостей "пластичність - міцність - механічна стабільність", яка обмежена кривою оптимізації, що характеризує оптимальні сполучення властивостей пластичності ψ_K , міцності $\sigma_{0.2}$ і механічної стабільності

K_{ms} [3].

Разом з тим, спосіб визначення оптимального значення тільки характеристики механічної стабільності K_{ms}^{opt} конструкційної сталі шляхом побудови узагальненої діаграми взаємозв'язку властивостей "пластичність - міцність - механічна стабільність" та кривої оптимізації за прототипом має наступний суттєвий недолік - неможливість прямого визначення оптимальних значень таких характеристик крихкого руйнування, як крихка міцність та критична температура в'язко-крихкого переходу, що робить цей спосіб недостатньо інформативним.

В основу винаходу поставлено задачу вдосконалення способу визначення оптимальних значень характеристик крихкого руйнування конструкційної сталі шляхом введення автором наведеного значення механічної стабільності K_{ms}^{pr} , яке характеризує ступінь перевищення величини оптимальної крихкої міцності R_{MC}^{opt} над величиною крихкої міцності вибраного металу R_{MC} при критичній температурі в'язко-крихкого переходу гладкого зразка T_{BK} . Таким чином, величину K_{ms}^{pr} розраховують за відомою формулою, як оптимальну механічну стабільність сплаву при відповідному значенні міцності $\sigma_{0.2}$ в точці T_{BK} . Для визначення міцності сплаву σ_2 при пластичній деформації $e = 2\%$ в точці T_{BK} будують температурну залежність

$\sigma_2(T_i)$ у відповідності до температурної залежності умовної границі текучості $\sigma_{0.2}(T_i)$. Після цього визначають величину оптимальної крихкої міцності конструкційної сталі R_{MC}^{opt} за величинами

$\sigma_2(T_{BK})$ та K_{ms}^{pr} при температурі в'язко-крихкого переходу гладкого зразка T_{BK} . Далі визначають

оптимальне значення міцності сплаву σ_2^{opt} при пластичній деформації $e = 2\%$ для кімнатної температури випробувань 293 K за відомою формулою:

$$\sigma_2^{opt} = \frac{R_{MC}^{opt}}{K_{ms}^{opt}},$$

та будують температурну залежність цієї характеристики до перетину з рівнем оптимальної крихкої міцності R_{MC}^{opt} . Точка перетину температурної

залежності $\sigma_2^{opt}(T_i)$ з рівнем R_{MC}^{opt} дає оптимальне значення критичної температури в'язко-крихкого переходу гладкого зразка конструкційної сталі T_{BK}^{opt} .

Поставлена задача вирішується тим, що у відомому способі визначення оптимальних значень характеристик крихкого руйнування конструкційної сталі, при якому проводять випробування стандартних гладких циліндричних зразків на одновісний розтяг при температурах в інтервалі від 4 K до 293 K, визначають основні механічні характеристики металу, характеристики крихкої міцності, механічної стабільності та оптимальної механічної стабільності, згідно з винаходом, визначають наведене значення механічної стабільності за величиною міцності при температурі в'язко-крихкого переходу, будують температурну залежність міцності сплаву при пластичній деформації 2 %, після чого визначають рівень оптимальної крихкої міцності конструкційної сталі за величинами міцності сплаву при пластичній деформації 2 % та наведеного значення механічної стабільності в точці в'язко-крихкого переходу, далі визначають оптимальне значення температури в'язко-крихкого переходу гладкого зразка в точці перетину температурної залежності оптимального значення міцності сплаву при пластичній деформації 2 % з рівнем оптимальної крихкої міцності.

За рахунок визначення введенного автором наведеного значення механічної стабільності K_{ms}^{pr} запропонований спосіб дозволяє отримати повну інформацію про значення характеристик крихкого руйнування конструкційної сталі шляхом визначення не тільки оптимальної механічної стабільності K_{ms}^{opt} , але й оптимальних значень крихкої міцності R_{MC}^{opt} критичної температури в'язко-крихкого переходу гладких зразків T_{BK}^{opt} . При цьому вико-

ристовують експериментальні значення основних механічних характеристик сплаву, а саме: умовної границі текучості $\sigma_{0,2}$; міцності сплаву σ_2 при пластичній деформації 2 %; відносного звуження після руйнування зразка ψ_K ; характеристики ме-

ханічної стабільності гладкого зразка K_{ms} ; показника деформаційного зміцнення n . Після цього визначають наведене значення механічної стабільності K_{ms}^{pr} , яке характеризує механічну стабільність сплаву оптимальної (найвищої) якості по відношенню до механічної стабільності вибраного сплаву з тим же показником міцності $\sigma_{0,2}$ в точці в'язко-крихкого переходу гладких зразків T_{BK} , тобто ступінь перевищення величини оптимальної крихкої міцності $R_{MC}^{opt.}$ над величиною крихкої міцності вибраного металу R_{MC} при критичній температурі в'язко-крихкого переходу гладкого зразка T_{BK} . Далі будують температурну залежність міцності сплаву $\sigma_2(T_i)$ при пластичній деформації 2 % у відповідності до температурної залежності умовної границі текучості $\sigma_{0,2}(T_i)$, беручи за основу отриману залежність $\sigma_2(T_{BK})/\sigma_2(293) - \sigma_{0,2}(T_{BK})/\sigma_{0,2}(293)$. Згідно з температурною залежністю $\sigma_2(T_i)$ визначають рівень оптимальної крихкої міцності конструкційної сталі $R_{MC}^{opt.}$ за величинами $\sigma_2(T_{BK})$ в точці критичної температури в'язко-крихкого переходу гладкого зразка T_{BK} . На завершення визначають оптимальне значення міцності сплаву $\sigma_2^{opt.}$ при пластичній деформації 2 % при кімнатній температурі 293 K та будують температурну залежність цієї характеристики до перетину з рівнем оптимальної крихкої міцності $R_{MC}^{opt.}$. Точка перетину температурної залежності $\sigma_2^{opt.}(T_i)$ з рівнем $R_{MC}^{opt.}$ визначає оптимальне значення критичної температури в'язко-крихкого переходу гладкого зразка конструкційної сталі $T_{BK}^{opt.}$.

Винахід пояснюється графіками і таблицею, а саме:

в таблиці 1 наведені результати визначення основних механічних характеристик $\sigma_{0,2}$, σ_2 ; характеристик крихкого руйнування R_{MC} , K_{ms} , T_{BK} , наведеного значення механічної стабільності K_{ms}^{pr} та оптимальних значень характеристик крихкого руйнування $R_{MC}^{opt.}$, $K_{ms}^{opt.}$ і $T_{BK}^{opt.}$ для деяких з досліджених конструкційних сталей (дані наведені у міру підвищення міцності $\sigma_{0,2}$);

на фіг.1 - зображені температурні залежності характеристик $\sigma_{0,2}$, σ_2 , $\sigma_2^{opt.}$ реакторної сталі 15 × 2НМФА та схема способу визначення наведеного значення механічної стабільності K_{ms}^{pr} та оптимальних значень характеристик крихкого руйнування: $R_{MC}^{opt.}$, $K_{ms}^{opt.}$, і $T_{BK}^{opt.}$;

на фіг.2 зображена залежність $\sigma_2(T_{BK})/\sigma_2(293) - \sigma_{0,2}(T_{BK})/\sigma_{0,2}(293)$, де $\sigma_2(T_{BK})$ і $\sigma_{0,2}(T_{BK})$ - міцність сплаву при пластичній деформації $\epsilon = 2\%$ і умовна границя текучості при критичній температурі в'язко-крихкого переходу гладкого зразка конструкційної сталі T_{BK} відповідно; $\sigma_2(293)$ і $\sigma_{0,2}(293)$ - ті ж самі характеристики при кімнатній температурі випробувань $T_{вип.} = 293$ K.

Запропонований спосіб реалізується наступним чином.

З метою побудови залежності $\sigma_2(T_{BK})/\sigma_2(293) - \sigma_{0,2}(T_{BK})/\sigma_{0,2}(293)$ матеріали для досліджень добирали за принципом широкого охоплення різноманітних комбінацій властивостей міцності та пластичності конструкційних сталей, при цьому діапазон характеристик міцності складав: від $\sigma_{0,2} = 300$ МПа до $\sigma_{0,2} = 2000$ МПа, а діапазон характеристик пластичності складав $80,0\% \leq \psi_K \leq 10,0\%$.

Крім цього, як об'єкти досліджень використовували зварні шви, виконані із застосуванням різних технологій зварювання, спеціальні конструкційні сталі, що використовуються в ядерній енергетиці, а також конструкційні сталі, що використовуються в криогенній техніці. У деяких випадках змінювали також і режими термічної обробки сталей та температури випробувань в діапазоні $77K \leq T_{вип.} \leq 293K$. Всього в цих дослідженнях використовували результати випробувань стандартних гладких циліндричних зразків на одновісний статичний розтяг більш ніж 50-ти видів сталей та сплавів.

Проводять випробування на розтяг вздовж однієї осі стандартних гладких циліндричних зразків та визначають основні механічні характеристики при різних температурах випробувань в інтервалі $77K \leq T_{вип.} \leq 293K$, такі як: ψ_K - відносне звуження після руйнування зразка; $\sigma_{0,2}$ - умовна границя текучості; σ_2 - міцність сплаву при пластичній деформації 2 %; n - показник деформаційного зміцнення. Характеристики крихкої міцності

R_{MC} та механічної стабільності K_{ms} визначають експериментальним шляхом або розраховують за відомими залежностями при $T_{вип.} = 293$ K, після

чого визначають величину оптимальної механічної стабільності $K_{ms}^{opt.}$ при заданій міцності $\sigma_{0.2}$.

Визначення оптимальних значень характеристик крихкого руйнування конструкційної сталі проводять наступним чином:

- значення характеристики механічної стабільності K_{ms} при $T_{вип.} = 293$ К визначають експериментальним шляхом за відомою залежністю [3]:

$$K_{ms} = \frac{R_{MC}}{\sigma_{0.2} \cdot 10^n},$$

або розраховують за відомою формулою [4]:

$$K_{ms} = 10^p,$$

$$p = \frac{a \cdot \lg \psi_K - b}{c - \lg \psi_K},$$

де: $a = 0,164$; $b = 0,15$; $c = 1,95$,

- визначають наведене значення механічної стабільності $K_{ms}^{pr.}$ (фіг.1) як оптимальну механічну стабільність при величині міцності $\sigma_{0.2}$ при температурі в'язко-крихкого переходу гладкого зразка T_{BK} за відомою формулою [3]:

$$K_{ms}^{pr.} = 1 - \frac{a \cdot \psi_K^{pr.} + b}{\psi_K^{pr.} - c}, \quad (1)$$

де: $a = 0,086$; $b = 1,310$; $c = 89,478$;

$$\psi_K^{pr.} = a - \frac{b}{(1 + c \cdot \sigma_{0.2})^d},$$

де: $a = 84,52$; $b = 1,42$; $c = 0,0001$ [1/МПа]; $d = -19,58$,

для цього будують температурну залежність міцності $\sigma_{0.2}(T_i)$, використовуючи відому формулу [5]:

$$\sigma_{0.2}(T_i) = \sigma_{0.2}(293) + a \cdot \exp(b \cdot T_i) - c, \quad (2)$$

де $a = 1033$; $b = -0,0102$; $c = 49,6$,

та температурну залежність міцності сплаву $\sigma_2(T_i)$ при пластичній деформації 2 % згідно отриманої залежності (фіг.2) при умові $T_{BK} = T_i$ за формулою:

$$\sigma_2(T_i) = \sigma_2(293) \cdot \left[A + B \cdot \frac{\sigma_{0.2}(T_i)}{\sigma_{0.2}(293)} \right], \quad (3)$$

де температурну залежність $\sigma_{0.2}(T_i)$ розраховують згідно з формули (2);

$A = 0,3826$;

$B = 0,6735$,

- визначають оптимальну крихку міцність конструкційної сталі $R_{MC}^{opt.}$ за величинами $\sigma_2(T_{BK})$ та

$K_{ms}^{pr.}$ при критичній температурі в'язко-крихкого переходу гладкого зразка T_{BK} , як ступінь перевищення величини оптимальної крихкої міцності

$R_{MC}^{opt.}$ над величиною крихкої міцності вибраного

сплаву R_{MC} (фіг.1) за формулою:

$$R_{MC}^{opt.} = K_{ms}^{pr.} \cdot \sigma_2(T_{BK}) = K_{ms}^{pr.} \cdot R_{MC}, \quad (4)$$

- значення оптимальної механічної стабільності $K_{ms}^{opt.}(293)$ при величині міцності $\sigma_{0.2}$ при температурі $T_{вип.} = 293$ К розраховують за формулою

(1), замінюючи $K_{ms}^{pr.}$ та $\psi_K^{pr.}$ на $\psi_K^{opt.}$, а температурну залежність $K_{ms}^{opt.}(T_i)$ будують, підставляючи формулу (2) у вираз (1).

- після цього визначають оптимальне значення міцності сплаву $\sigma_2^{opt.}(293)$ при пластичній деформації $\epsilon = 2$ % при кімнатній температурі випробувань 293 К через оптимальну крихку міцність конструкційної сталі $R_{MC}^{opt.}$, визначену за формулою (4), використовуючи відому залежність [3]:

$$\sigma_2^{opt.}(293) = \frac{R_{MC}^{opt.}}{K_{ms}^{opt.}(293)},$$

та будують температурну залежність цієї характеристики $\sigma_2^{opt.}(T_i)$ до перетину з рівнем оптимальної крихкої міцності $R_{MC}^{opt.}$, використовуючи формулу (3),

- точка перетину температурної залежності $\sigma_2^{opt.}(T_i)$ з рівнем $R_{MC}^{opt.}$ визначає оптимальне значення критичної температури в'язко-крихкого переходу гладкого зразка конструкційної сталі $T_{BK}^{opt.}$.

Таким чином, запропонований спосіб дає можливість прямого визначення оптимальних значень усіх характеристик крихкого руйнування - крихкої міцності, механічної стабільності та критичної температури в'язко-крихкого переходу, тобто є повністю інформативним щодо оцінки властивості опірності крихкості даної конструкційної сталі в певних умовах експлуатації, що є важливим для інженерних та технологічних потреб.

Джерела інформації:

1. Копельман Л.А. Сопротивляемость сварных узлов хрупкому разрушению. - Л.: Машиностроение, 1978. - С. 42.

2. Мешков Ю.Я., Пахаренко Г.А. Структура металла и хрупкость стальных изделий. - К.: Наукова думка, 1985. - С. 82.

3. Науковий твір "Оптимизация свойств пластичности, прочности и механической стабильности сталей и сплавов в виде обобщенной диаграммы", автори: Мешков Ю.Я., Котречко С.О., Шиян А.В., Стеценко Н.М. Свідectво про реєстрацію авторського права № 39291 від 22.07.2011 (Україна). Опубл. бюл. № 25, С. 3, 6, 11-14.

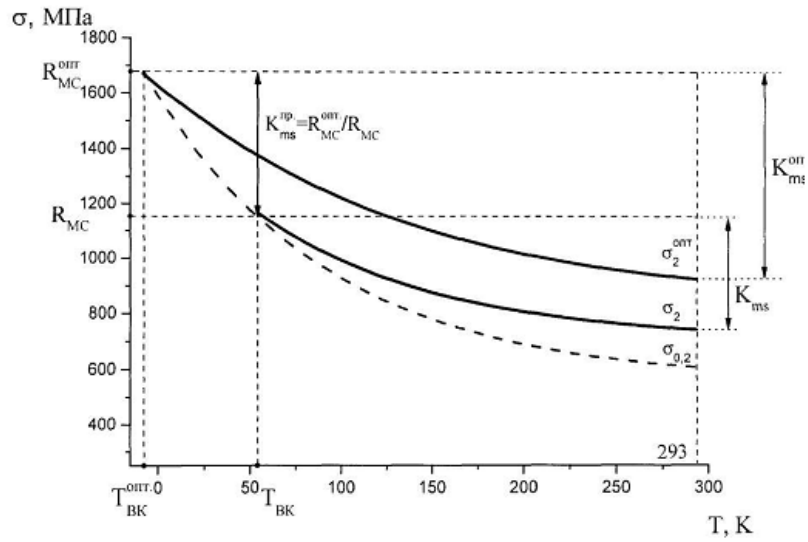
4. Мешков Ю.Я., Котречко С.А., Шиян А.В., Стеценко Н.Н. Физические основы методики определения хрупкой прочности и механической стабильности сплавов на основе железа при комнатной температуре // Металлофизика и новейшие технологии, 2011, т. 33, № 4, С. 1001-1017.

5. Zerilli F.J. and Armstrong R.W. Dislocation mechanics-based constitutive relations for materials dynamics calculations// J. Appl. Phys. 1987, vol. 65, N 5, p. 1816-1825.

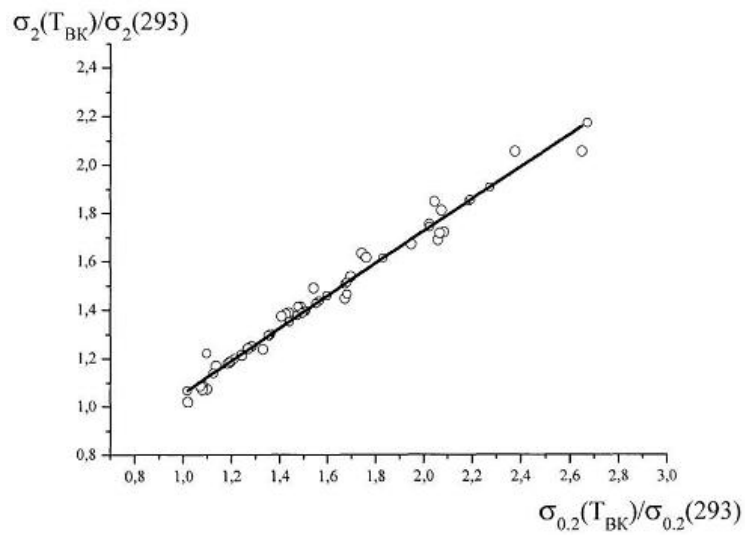
Таблица 1

Сталі і сплави	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_2 , МПа	R_{MC} , МПа	K_{ms}	T_{BK} , К	$K_{ms}^{пр.}$	$R_{MC}^{опт.}$, МПа	$K_{ms}^{опт.}$	$T_{BK}^{опт.}$, К
X75 (ЗШ)	361	591	866	1,465	61	1,865	1615	2,068	-22*
15ГБ	368	519	675	1,301	85	1,955	1320	2,063	3
09Г2	378	527	711	1,349	80	1,917	1363	2,055	0
40Х	460	741	1054	1,422	68	1,778	1874	1,988	-33*
10ГН2МФА	480	631	925	1,466	72	1,729	1599	1,972	-12*
20ХГС2	540	773	1000	1,294	69	1,761	1761	1,922	-20*
15Х2НМФА	760	914	1384	1,514	42	1,368	1893	1,739	-13*
35ХМФА	770	952	1086	1,141	80	1,655	1797	1,731	-4*
АК-35	1027	1207	1687	1,398	37	1,225	2067	1,531	-5*
15Х2МФА	1100	1257	1480	1,177	86	1,354	2004	1,480	8
20Х	1150	1270	1356	1,068	63	1,434	1944	1,446	20
40С2Х	1560	2066	2454	1,188	9	1,113	2731	1,222	-16*

Примітка: * - умовні значення



Фиг. 1



Фиг. 2