



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **105845** (13) **C2**
(51) МПК (2014.01)
G01N 3/00
G01N 3/08 (2006.01)
G01N 3/18 (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

- (21) Номер заявки: **а 2012 12242**
(22) Дата подання заявки: **25.10.2012**
(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: **25.06.2014**
(41) Публікація відомостей про заявку: **25.04.2014, Бюл.№ 8**
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **25.06.2014, Бюл.№ 12**
(72) Винахідник(и):
Івасишин Орест Михайлович (UA),
Марковський Павло Євгенович (UA),
Котречко Сергій Олексійович (UA),
Мешков Юрій Якович (UA),
Шиян Артур Віталійович (UA)
(73) Власник(и):
ІНСТИТУТ МЕТАЛОФІЗИКИ ІМ. Г.В.
КУРДЮМОВА НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ
НАУК УКРАЇНИ,
бул. Вернадського, 36, м. Київ-142, 03680 (UA)

- (56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою:
SU 976 340 A; 25.11.1982
UA 97 226 C2; 10.01.2012
UA a201112151; 12.03.2012
UA a201212233; 10.04.2012
UA a201202272; 25.05.2012
UA a201202271; 25.06.2012
RU 2 324 162 C2; 10.04.2008
JP 2009-068919 A; 02.04.2009
Котречко С.А., Мешков Ю.Я., Шиян А.В., Озерский М.В. Применение экспресс-метода для определения хрупкой прочности металлических сплавов, используемых в криогенной технике//Металлофизика и новейшие технологии, 2011, т. 33, № 3. – С. 407-422
Котречко С.А., Мешков Ю.Я., Шиян А.В. Механическая стабильность – универсальная мера сопротивления переходу в хрупкое состояние металла//Успехи физики металлов, 2009, т. 10, № 2. - С. 207-228

(54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕХАНІЧНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ КОНСТРУКЦІЙНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВУ**(57) Реферат:**

Винахід належить до галузі кольорової металургії, а саме - до способу визначення характеристики механічної стабільності конструкційного титанового сплаву (КТС). Спосіб визначення характеристики механічної стабільності конструкційного титанового сплаву включає операції розтягування стандартного гладкого циліндричного зразка вздовж однієї осі в інтервалі температур від 77 К до 293 К, визначення при цьому базових механічних характеристик, розрахунку величин інтенсивності напружень руйнування σ_i^k та відносного рівномірного звуження зразка ψ_p , побудови експериментальних залежностей опору пластичній деформації в області нерівномірної деформації $\lg \sigma = f(\lg \epsilon)$, що характеризуються зберіганням властивості лінійності або наявністю зламу, при якому кут нахилу цієї залежності підвищується, встановлення групи сплаву залежно від співвідношення величин показників деформаційного зміцнення при деформаціях, менших та більших за рівномірну, визначення показників деформаційного зміцнення для кожної групи КТС, побудови додаткових залежностей, що пов'язують наведене значення еквівалентної деформації $\bar{\epsilon}_{\text{екв}}$ з показниками деформаційного зміцнення або їх комбінацією в області рівномірної та нерівномірної деформації для кожної групи конструкційних титанових сплавів та визначення характеристики механічної стабільності

UA 105845 C2

K_{ms} конструкційного титанового сплаву відповідно до його належності певній групі за величинами базових механічних характеристик, таких як:

$\sigma_{0,2}$ - умовна межа текучості КТС, МПа,

σ_B - межа міцності КТС, МПа,

ψ_K - відносне звуження після руйнування зразка КТС, в частках:

- для конструкційних титанових сплавів I-ої групи:

$$K_{ms}^I = 10^{A \cdot n^2},$$

$$\text{де: } n = \frac{\lg \left[\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2} \cdot (1 - \psi_p)} \right]}{\lg [-500 \cdot \ln(1 - \psi_p)]} - \text{показник деформаційного зміцнення КТС:}$$

$$\psi_p = \psi_K \cdot \frac{1 - \sigma_{0,2} / \sigma_B}{\sigma_i^K / \sigma_B - \sigma_{0,2} / \sigma_B} - \text{відносне рівномірне звуження зразка КТС, в частках,}$$

$$\sigma_i^K / \sigma_B = 1 + B \cdot \psi_K,$$

$A = 38,497; B = 0,684$ - емпіричні коефіцієнти;

- для конструкційних титанових сплавів II-ої групи:

$$K_{ms}^{II} = \frac{S_B}{\sigma_{0,2}} \cdot 10^m,$$

$$\text{де: } S_B = \frac{\sigma_B}{1 - \psi_p} - \text{дійсне напруження на межі міцності КТС, МПа,}$$

$$m = n^{II} \cdot \lg \bar{e}_{\text{екв.}}^{II} - n,$$

$$\lg \bar{e}_{\text{екв.}}^{II} = a \cdot \left(\frac{n^{II}}{n} - 1 \right)^b,$$

$$a = \frac{A \cdot T_{\text{вип.}} - B}{T_{\text{вип.}} - C},$$

$$b = D - F \cdot T_{\text{вип.}} + N \cdot T_{\text{вип.}}^2,$$

$A = 4,52; B = 191,34; C = 97,19; D = 0,445; F = 0,0003 [K^{-1}]; N = 6,0 \cdot 10^{-7} [K^{-2}]$ - емпіричні коефіцієнти, $T_{\text{вип.}}$ - температура випробувань КТС, К, при цьому:

$$n^{II} = \frac{\lg(S_B / \sigma_{0,2})}{\lg(e_K / e_p)} \cdot \left\{ a - \frac{b}{1 + c \cdot \left[\frac{\lg(e_K / e_p)}{\lg(500 \cdot e_p)} \right]^d} \right\} - \text{показник деформаційного зміцнення КТС,}$$

$$e_p = -\ln(1 - \psi_p) - \text{дійсна рівномірна деформація КТС,}$$

$$e_K = -\ln(1 - \psi_K) - \text{дійсна деформація руйнування зразка КТС,}$$

$a = 82,23; b = 82,156; c = 0,041; d = 1,692$ - емпіричні коефіцієнти. Винахід забезпечує розробку загальної методики визначення характеристики механічної стабільності для широкого кола конструкційних титанових сплавів відповідно до їх належності певній групі в інтервалі температур випробувань від 77К до 293К, підвищення точності оцінки спроможності КТС опиратись переходу в крижкий стан та більш інформативно здійснювати комплексну оцінку їх властивостей в широкому діапазоні змін показників міцності і пластичності. Точність визначення характеристики механічної стабільності за запропонованим способом достатня як для інженерних розрахунків, так і для наукових досліджень, а отримані залежності для визначення механічної стабільності інваріантні до різних сполучень властивостей міцності і пластичності КТС і також режимам термічної обробки та температури їх випробувань.

Винахід належить до галузі кольорової металургії, а саме - до дослідження властивостей твердих матеріалів шляхом прикладання статичних навантажень в інтервалі температур випробувань гладких зразків від 77 К до 293 К, а саме - до визначення характеристики механічної стабільності конструкційного титанового сплаву - далі КТС.

5 Під конструкційними титановими сплавами розуміють промислові матеріали, що використовують в авіакосмічній та криогенній техніці, машинобудуванні, медицині тощо. При цьому ефективність використання КТС в багатьох призначеннях можливо значною мірою підвищити легуванням та методами термічної обробки.

10 Найбільш близьким за технічною суттю та результатом, що досягається, до способу, що заявляється, є спосіб визначення характеристики механічної стабільності КТС - K_{ms} , при якому проводять випробування стандартних гладких циліндричних зразків на одновісне розтягнення в інтервалі температур від 4 К до 293 К, визначають при цьому базові механічні характеристики та розраховують величину характеристики крихкої міцності R_{mc} металевих, у тому числі титанових, сплавів за наступною відомою залежністю [1]:

$$15 \quad R_{mc} = \sigma_{0,2} \cdot 10^{n \lg(\bar{e}_{екв.})}, \text{ МПа,}$$

а величину характеристики механічної стабільності K_{ms} розраховують за похідною формулою:

$$K_{ms} = \frac{R_{mc}}{\sigma_{0,2} \cdot 10^n} = 10^{n(\lg \bar{e}_{екв.} - 1)},$$

де: n - показник деформаційного зміцнення КТС,

20 $\sigma_{0,2}$ - умовна межа текучості КТС, МПа,

$$\bar{e}_{екв.} = \frac{e_{екв.}}{0.002} - \text{наведене значення еквівалентної деформації.}$$

Разом з тим, спосіб визначення характеристики механічної стабільності K_{ms} має наступні недоліки: а) необхідність ранжування металевих сплавів за показниками $\sigma_{0,2}$ та n , б) наявність великої кількості "категорій" при ранжуванні, в) відсутність залежностей, що пов'язують
25 приведені значення еквівалентної деформації, г) відсутність загальної методики для визначення характеристики механічної стабільності K_{ms} для широкого кола КТС в інтервалі температур випробувань від 77 К до 293 К.

В основу винаходу поставлено задачу вдосконалення способу визначення характеристики механічної стабільності КТС з урахуванням особливостей поведінки залежності опору
30 пластичній деформації $\lg \sigma = f(\lg e)$ в області нерівномірної деформації шляхом отримання авторами достатньої кількості експериментальних даних для розрахунку величини інтенсивності напружень руйнування зразка σ_i^k та відносного рівномірного звуження зразка ψ_p , додатково побудови залежностей $\lg \sigma = f(\lg e)$ в області нерівномірної деформації, які характеризуються:

- зберіганням властивості лінійності залежності опору пластичній деформації в інтервалі
35 змін міцності від умовної межі текучості $\sigma_{0,2}$ до величини інтенсивності напружень руйнування зразка σ_i^k ;

- наявністю зламу залежності опору пластичній деформації в інтервалі змін міцності від дійсного напруження на межі міцності S_b до величини інтенсивності напружень руйнування зразка σ_i^k і підвищенням кута нахилу цієї залежності,

40 встановлення відповідної групи конструктивного титанового сплаву залежно від співвідношення величин показників деформаційного зміцнення при деформаціях, менших та більших за рівномірну, та визначення показників деформаційного зміцнення для кожної групи сплавів. Це дозволило на основі отриманих результатів побудувати залежності, що пов'язують наведене значення еквівалентної деформації $\bar{e}_{екв.}$ з показниками деформаційного зміцнення
45 або їх комбінацією в області рівномірної та нерівномірної деформації для кожної групи КТС та розробити загальну методику визначення характеристики механічної стабільності K_{ms} для широкого кола конструкційних титанових сплавів відповідно до їх належності певній групі за

величинами базових механічних характеристик $\sigma_{0,2}, \sigma_B, \psi_K$ в інтервалі температур випробувань від 77 К до 293 К. Запропонований спосіб дозволяє більш точно оцінювати спроможність конструкційних титанових сплавів опиратись переходу в крихкий стан та є більш інформативним внаслідок можливості здійснювати комплексну оцінку їх властивостей в широкому діапазоні змін показників міцності і пластичності.

Поставлена задача вирішується тим, що у відомому способі визначення характеристики механічної стабільності конструкційного титанового сплаву, при якому проводять випробування стандартних гладких циліндричних зразків на одновісне розтягнення в інтервалі температур від 77 К до 293 К та визначення при цьому базових механічних характеристик, в основу розрахунку характеристики крихкої міцності R_{MC} беруть базову залежність, а характеристики механічної стабільності K_{ms} - похідну формулу, згідно з винаходом, розраховують величини інтенсивності напружень руйнування σ_i^K та відносного рівномірного звуження зразка ψ_p , будують дві експериментальні залежності опору пластичній деформації в області нерівномірної деформації $lg \sigma = f(lg \epsilon)$, що характеризуються зберіганням властивості лінійності або наявністю зламу, при якому кут нахилу цієї залежності підвищується, встановлюють групу конструкційного титанового сплаву залежно від співвідношення величин показників деформаційного зміцнення при деформаціях, менших та більших за рівномірну, визначають показники деформаційного зміцнення для кожної групи КТС, на основі даних будують залежності, які пов'язують наведене значення еквівалентної деформації $\bar{\epsilon}_{екв.}$ з показниками деформаційного зміцнення або їх комбінацією в областях рівномірної та нерівномірної деформації для кожної групи конструкційних титанових сплавів та визначають характеристику механічної стабільності K_{ms} конструкційного титанового сплаву відповідно до його належності певній групі за величинами базових механічних характеристик, таких як:

$\sigma_{0,2}$ - умовна межа текучості КТС, МПа;

σ_B - межа міцності КТС, МПа;

ψ_K - відносне звуження після руйнування зразка КТС, в частках:

- для конструкційних титанових сплавів I-ої групи:

$$K_{ms}^I = 10^{A \cdot n^2},$$

$$\text{де: } n = \frac{\lg \left[\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2} \cdot (1 - \psi_p)} \right]}{\lg [-500 \cdot \ln(1 - \psi_p)]} - \text{показник деформаційного зміцнення КТС,}$$

$$\psi_p = \psi_K \cdot \frac{1 - \sigma_{0,2} / \sigma_B}{\sigma_i^K / \sigma_B - \sigma_{0,2} / \sigma_B} - \text{відносне рівномірне звуження зразка КТС, в частках,}$$

$$\sigma_i^K / \sigma_B = 1 + B \cdot \psi_K,$$

$A = 38,497; B = 0,684$ - емпіричні коефіцієнти,

- для конструкційних титанових сплавів II-ої групи:

$$K_{ms}^{II} = \frac{S_B}{\sigma_{0,2}} \cdot 10^m,$$

$$\text{де: } S_B = \frac{\sigma_B}{1 - \psi_p} - \text{дійсне напруження на межі міцності КТС, МПа;}$$

$$m = n^{II} \cdot \lg \bar{\epsilon}_{екв.}^{II} - n;$$

$$\lg \bar{\epsilon}_{екв.}^{II} = a \cdot \left(\frac{n^{II}}{n} - 1 \right)^b;$$

$$a = \frac{A \cdot T_{вип.} - B}{T_{вип.} - C};$$

$$b = D - F \cdot T_{\text{вип.}} + N \cdot T_{\text{вип.}}^2 ;$$

$$A = 4,52; B = 191,34; C = 97,19; D = 0,445; F = 0,0003 [K^{-1}] N = 6,0 \cdot 10^{-7} [K^{-2}]$$

емпіричні коефіцієнти; $T_{\text{вип.}}$ - температура випробувань, К, при цьому:

$$n^{\text{II}} = \frac{\lg(S_B / \sigma_{0,2})}{\lg(e_K / e_p)} \cdot \left\{ a - \frac{b}{1 + c \cdot \left[\frac{\lg(e_K / e_p)}{\lg(500 \cdot e_p)} \right]^d} \right\} - \text{показник деформаційного зміцнення КТС};$$

5 $e_p = -\ln(1 - \psi_p)$ - дійсна рівномірна деформація КТС;

$e_K = -\ln(1 - \psi_K)$ - дійсна деформація руйнування зразка КТС;

$a = 82,23; b = 82,156; c = 0,041; d = 1,692$ - емпіричні коефіцієнти.

За рахунок отримання авторами експериментальних залежностей, що пов'язують наведене значення еквівалентної деформації $\bar{e}_{\text{екв.}}$ з показниками деформаційного зміцнення або їх

10 комбінацією в області рівномірної та нерівномірної деформації і розрахунку на їх основі емпіричних коефіцієнтів для сплавів кожної групи, запропонований спосіб дозволив розробити загальну методику більш інформативного і точного визначення характеристики механічної стабільності $K_{\text{мс}}$ для широкого кола КТС за величинами базових механічних характеристик.

При цьому автори використовують достатньо велику базу експериментальних даних механічних характеристик конструкційних титанових сплавів з різними рівнями пластичності ψ_K та міцності $\sigma_{0,2}$, отриманих за результатами випробувань в широкому інтервалі температур від 77 К до 293

15 К, а саме: значень відносного звуження після руйнування зразка ψ_K ; умовної межі текучості $\sigma_{0,2}$ та межі міцності σ_B . Це дозволило віднайти залежності для визначення характеристики механічної стабільності $K_{\text{мс}}$ КТС відповідно до його належності певній групі за величинами

20 базових механічних характеристик, що, в свою чергу, дало змогу здійснювати комплексний аналіз його властивостей, у тому числі оцінювати властивість опору переходу у крихкий стан. Запропонований спосіб пояснюється таблицями та графіками, а саме:

в таблиці 1 наведені значення коефіцієнтів a і b та оцінка точності залежності (8) для ряду

фіксованих значень $T_{\text{вип.}}$ в інтервалі $77\text{K} \leq T_{\text{вип.}} \leq 293\text{K}$ для КТС II групи;

25 в таблиці 2 наведені значення механічних характеристик $\sigma_{0,2}, \sigma_B, \psi_K$, а також результати розрахунку та оцінка точності визначення характеристики $K_{\text{мс}}$ у відповідності до залежностей (11) і (12) для I-ої і II-ої груп КТС в інтервалі $77\text{K} \leq T_{\text{вип.}} \leq 293\text{K}$.

Суть винаходу пояснює креслення.

30 на фіг. 1 зображені залежності опору пластичній деформації конструкційних титанових сплавів в логарифмічних координатах (схема): сплавів, що характеризуються зберіганням властивості лінійності $\text{tg} \alpha = n = n^{\text{I}}$ - сплави I-ої групи (крива 1); сплавів, що характеризуються наявністю зламу, при якому кут нахилу цієї залежності підвищується $\text{tg} \beta = n^{\text{II}}$ - сплави II-ої групи (крива 2);

на фіг. 2 зображена залежність $\lg \bar{e}_{\text{екв.}}^{\text{I}} = f(n)$; ▲ - експериментальні дані в інтервалі

35 $77\text{K} \leq T_{\text{вип.}} \leq 293\text{K}$;

на фіг. 3 зображені залежності $\lg \bar{e}_{\text{екв.}}^{\text{II}} = f(\Delta n / n)$ при певних температурах випробувань сплавів II-ої групи; експериментальні дані: о - при $T_{\text{вип.}} = 293\text{K}$ (крива 1); ▲ - при $T_{\text{вип.}} = 200\text{K}$ (крива 2); □ - при $T_{\text{вип.}} = 77\text{K}$ (крива 3);

40 на фіг. 4 зображені температурні залежності коефіцієнтів a (крива 1) і b (крива 2) в формулі (8).

Спосіб реалізується наступним чином.

3 метою побудови експериментальних залежностей $\lg \bar{e}_{\text{екв.}}^I = f(n)$ та $\lg \bar{e}_{\text{екв.}}^{II} = f(\Delta n/n)$ для різних груп досліджених конструкційних титанових сплавів матеріали для досліджень добирали за принципом максимально широкого охоплення різноманітних комбінацій властивостей міцності та пластичності, при цьому діапазон характеристик міцності складав: від $\sigma_{0,2} = 570$ МПа до $\sigma_{0,2} = 1925$ МПа, а діапазон характеристик пластичності складав $1,0\% \leq \psi_k \leq 81,0\%$.

Крім цього, за об'єкти досліджень вибирали конструкційні титанові сплави, що відносяться до різних класів за структурою, якістю, складом та призначенням, у тому числі особливого призначення, які використовують у криогенній техніці та для створення відповідальних конструкцій. Змінювали також різні режими термічної обробки і температуру випробувань в інтервалі від 77 К до 293 К. Всього в цих дослідженнях використовували результати більш ніж 300 вимірів деформаційних характеристик та характеристик міцності, отриманих при випробуванні стандартних гладких циліндричних зразків на одновісний статичний розтяг більш ніж 200 видів конструкційних титанових сплавів.

Проводять розтягування повздовж однієї осі стандартних гладких циліндричних зразків та визначають базові механічні характеристики сплаву, такі як: ψ_k - відносне звуження після руйнування зразка; $\sigma_{0,2}$ - умовна межа текучості, та σ_B - межа міцності, при різних температурах випробувань в інтервалі $77\text{K} \leq T_{\text{вип.}} \leq 293\text{K}$.

Загальна методика визначення характеристики механічної стабільності конструкційного титанового сплаву полягає у наступному:

1) В основу розрахунку характеристики крихкої міцності $R_{\text{мс}}$ беруть відому залежність [1]:

$$R_{\text{мс}} = \sigma_{0,2} \cdot 10^{n \cdot \lg(\bar{e}_{\text{екв.}})}, \text{ МПа, (1)}$$

а величину характеристики механічної стабільності $K_{\text{мс}}$ розраховують за похідною формулою [2]:

$$K_{\text{мс}} = \frac{R_{\text{мс}}}{\sigma_{0,2} \cdot 10^n} = 10^{n \cdot (\lg \bar{e}_{\text{екв.}} - 1)}, \text{ (2)}$$

де: n - показник деформаційного зміцнення КТС,

$\sigma_{0,2}$ - умовна межа текучості КТС, МПа,

$\bar{e}_{\text{екв.}} = \frac{e_{\text{екв.}}}{0.002}$ - наведене значення еквівалентної деформації;

2) з метою урахування особливостей поведінки залежності опору пластичної деформації $\lg \sigma = f(\lg e)$ в області нерівномірної деформації розраховують величини інтенсивності напружень руйнування σ_i^k та відносного рівномірного звуження ψ_p зразка за відомими формулами:

$$\sigma_i^k = \sigma_B \cdot (1 + B \cdot \psi_k), \text{ МПа, (3)}$$

$$\psi_p = \psi_k \cdot \frac{1 - \sigma_{0,2} / \sigma_B}{\sigma_i^k / \sigma_B - \sigma_{0,2} / \sigma_B}, \text{ в частках; (4)}$$

де: $B = 0,684$ - емпіричний коефіцієнт;

3) будують експериментальні залежності опору пластичній деформації в області нерівномірної деформації $\lg \sigma = f(\lg e)$, що характеризуються зберіганням властивості лінійності (фіг. 1, крива 1) або наявністю зламу, при якому кут нахилу цієї залежності підвищується (фіг. 1, крива 2);

4) встановлюють групу сплаву в залежності від співвідношення величин показників деформаційного зміцнення при деформаціях менших та більших за рівномірну за умовами:

- до I-ої групи сплавів відносяться конструкційні титанові сплави, що характеризуються зберіганням властивості лінійності залежності опору пластичній деформації $\lg \sigma = f(\lg e)$ в

інтервалі змін міцності від умовної межі текучості $\sigma_{0,2}$ до величини інтенсивності напружень руйнування зразка σ_i^k (див. фіг. 1, крива 1), для яких $\operatorname{tg} \alpha = n \approx n^I$ та виконується рівність [3]:

$$\frac{\lg(\sigma_i^k / S_B)}{\lg(S_B / \sigma_{0,2})} = \frac{\lg(e_k / e_p)}{\lg(500 \cdot e_p)} \pm 5\%; \quad (5)$$

- 5 - до II-ої групи сплавів відносяться конструкційні титанові сплави, що характеризуються наявністю зламу залежності опору пластичній деформації $\lg \sigma = f(\lg e)$ в інтервалі змін міцності від дійсного напруження на границі міцності S_B до величини інтенсивності напружень руйнування зразка σ_i^k і підвищенням кута нахилу цієї залежності (див. фіг. 1, крива 2), для яких $\operatorname{tg} \beta = n^{II} (n^{II} > n)$ та виконується нерівність [3]:

$$\frac{\lg(\sigma_i^k / S_B)}{\lg(S_B / \sigma_{0,2})} > \frac{\lg(e_k / e_p)}{\lg(500 \cdot e_p)} + 5\%; \quad (6)$$

- 10 5) визначають показники деформаційного зміцнення для кожної групи сплавів за відомими формулами [3]:

- для сплавів I-ої групи:

$$n^I = n = \frac{\lg \left[\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2} \cdot (1 - \psi_p)} \right]}{\lg [-500 \cdot \ln(1 - \psi_p)]}; \quad (7)$$

- для сплавів II-ої групи:

$$15 \quad n^{II} = \frac{\lg(S_B / \sigma_{0,2})}{\lg(e_k / e_p)} \cdot \left\{ a - \frac{b}{1 + c \cdot \left[\frac{\lg(e_k / e_p)}{\lg(500 \cdot e_p)} \right]^d} \right\}, \quad (8)$$

де: $S_B = \frac{\sigma_B}{1 - \psi_p}$ - дійсне напруження на межі міцності КТС, МПа,

$e_p = -\ln(1 - \psi_p)$ - дійсна рівномірна деформація КТС,

$e_k = -\ln(1 - \psi_k)$ - дійсна деформація руйнування зразка КТС; ψ_k , в частках,

$a = 82,23; b = 82,156; c = 0,041; d = 1,692$ - емпіричні коефіцієнти;

- 20 6) будують залежності, що пов'язують наведене значення еквівалентної деформації $\bar{e}_{\text{екв.}}$ з показниками деформаційного зміцнення або їх комбінацією в області рівномірної та нерівномірної деформації для кожної групи сплавів:

- для сплавів I-ої групи будують залежність $\lg \bar{e}_{\text{екв.}}^I = f(n)$, яку апроксимують наступною функцією (фіг. 2):

$$25 \quad \lg \bar{e}_{\text{екв.}}^I = 1 + a \cdot n, \quad (9)$$

де: $\bar{e}_{\text{екв.}}^I = e_{\text{екв.}}^I / 0,002$ - приведені значення еквівалентної деформації КТС,

$a = 38,497$ - емпіричний коефіцієнт;

- для сплавів II-ої групи будують залежності $\lg \bar{e}_{\text{екв.}}^{II} = f(\Delta n / n)$ для певних фіксованих температур випробувань в інтервалі $77\text{K} \leq T_{\text{вип.}} \leq 293\text{K}$, які апроксимують наступною функцією (фіг. 3):

$$30 \quad \lg \bar{e}_{\text{екв.}}^{II} = a \cdot \left(\frac{n^{II}}{n} - 1 \right)^b, \quad (10)$$

де: $\bar{e}_{\text{екв.}}^{\text{II}} = e_{\text{екв.}}^{\text{II}} / e_p$ - приведенне значення еквівалентної деформації,

значення коефіцієнтів a і b наведені в таблиці 1;

На основі даних таблиці 1 відносять температурні залежності коефіцієнтів a і b в формулі (10). З достатньою точністю залежність $a = f(T_{\text{вип.}})$ апроксимують функцією (фіг. 4, крива 1):

$$a = \frac{A \cdot T_{\text{вип.}} - B}{T_{\text{вип.}} - C}, \quad (11)$$

де: $A = 4,52; B = 191,34; C = 97,19$; - емпіричні коефіцієнти,

a залежність $b = f(T_{\text{вип.}})$ функцією (фіг. 4, крива 2):

$$b = D - F \cdot T_{\text{вип.}} + N \cdot T_{\text{вип.}}^2, \quad (12)$$

де: $D = 0,445; F = 0,0003 [K^{-1}]; N = 6,0 \cdot 10^{-7} [K^{-2}]$ - емпіричні коефіцієнти;

7) далі визначають характеристику механічної стабільності K_{ms} конструкційного титанового сплаву відповідно до його належності певній групі за величинами базових механічних характеристик:

- для сплавів I-ої групи (фіг. 1, крива 1):

$$K_{\text{ms}}^{\text{I}} = 10^{n \cdot (\lg \bar{e}_{\text{екв.}}^{\text{I}} - 1)} = 10^{A \cdot n^2}, \quad (13)$$

де: показник деформаційного зміцнення $n^{\text{I}} = n$ розраховують за формулою (5) з урахуванням (1) і (2), а величину параметра $\lg \bar{e}_{\text{екв.}}^{\text{I}}$ визначають згідно (9):

$$\lg \bar{e}_{\text{екв.}}^{\text{I}} = 1 + 38,497 \cdot n, \text{ звідки:}$$

$A = 38,497$ - емпіричний коефіцієнт;

- для сплавів II-ої групи (фіг. 1, крива 2):

$$K_{\text{ms}}^{\text{II}} = \frac{S_{\text{в}}}{\sigma_{0,2}} \cdot 10^m, \quad (14)$$

$$\text{де: } m = n^{\text{II}} \cdot \lg \bar{e}_{\text{екв.}}^{\text{II}} - n;$$

показники деформаційного зміцнення n і n^{II} розраховують за формулами (7) і (8) з урахуванням (3), (4);

величину параметра $\lg \bar{e}_{\text{екв.}}^{\text{II}}$ визначають згідно (10) з урахуванням (11), (12).

Таким чином, запропонований спосіб дозволяє розробити загальну методику визначення характеристики механічної стабільності K_{ms} для широкого кола конструкційних титанових сплавів відповідно до їх належності певній групі в інтервалі температур випробувань від 77 К до 293 К за величинами базових механічних характеристик $\sigma_{0,2}, \sigma_{\text{в}}, \psi_{\text{к}}$. При цьому для

визначення характеристики K_{ms} сплавів I-ої групи використовують залежність (13), а II-ої групи - залежність (14).

Результати оцінки точності апроксимації залежності (10), яку використовують для розрахунку характеристики механічної стабільності, наведені в таблиці 1, з якої видно, що точність згаданої залежності, при якій вибіркового стандарт не перевищує 5,1 % з вірогідністю не нижче 0,95 в довірчому інтервалі $\pm 10,0$ %, достатня щодо її використання для подальших висновків та розрахунків. Результати розрахунків характеристики механічної стабільності для деяких конструкційних титанових сплавів у відповідності до залежностей (13) і (14) для кожної групи сплавів в інтервалі $77\text{K} \leq T_{\text{вип.}} \leq 293\text{K}$ наведені в таблиці 2, з якої видно, що точність визначення характеристики K_{ms} за запропонованим способом достатня як для інженерних розрахунків, так і для наукових досліджень, а саме, вибіркового стандарт складає $S = 3,61\%$ при вірогідності $P(K_{\text{ms}}^{\text{розн.}} \pm 6,0\%) = 0,903$.

Отже, запропонований спосіб дозволяє більш точно оцінювати спроможність конструкційних титанових сплавів опиратись переходу в крихкий стан та є більш інформативним внаслідок

можливості здійснювати комплексну оцінку їх властивостей в широкому діапазоні змін показників міцності і пластичності. При цьому отримані залежності для визначення характеристики механічної стабільності K_{ms} інваріантні до різних сполучень властивостей міцності і пластичності сплавів та режимам термічної обробки в межах відповідної групи.

5

Таблица 1

Значення емпіричних коефіцієнтів a і b та оцінка точності залежності (98) для ряду фіксованих значень $T_{вип.}$ в інтервалі $77 \text{ K} \leq T_{вип.} \leq 293 \text{ K}$ для КТС II-ої групи

№ п/п	$T_{вип.}, \text{ K}$	a	b	Вибірковий стандарт S , %	Довірчий інтервал, %	Вірогідність P
1	293	2,906	0,407	5,1	10,0	0,950
2*	200	2,40	2,0	0,003	0,04	0,950
3*	77	0,901	0,424	4,2	10,0	0,900

Примітка: * - розрахунок проведено з використанням розподілу Стюдента. ВС - вибірковий стандарт (середня квадратична похибка).

Таблица 2

Значення механічних характеристик $\sigma_{0,2}$, σ_B , ψ_K а також результати розрахунку та оцінка точності визначення характеристики K_{ms} у відповідності до залежностей (11) і (12) для I-ої і II-ої груп КТС $77 \text{ K} \leq T_{вип.} \leq 293 \text{ K}$

№ п/п	Титанові сплави	Обробка	Група	T _{вип.} , К	σ _{0,2} , МПа	σ _в , МПа	ψ _к , %	K _{мс} ^{експ.}	K _{мс} ^{розр.}	Δ, %
1	BT16	Нагрів 700 °С, 5 год.	I	293	680	860	68,0	2,518	2,494	-0,98
2				77	1260	1470	49,0	1,448	1,438	-0,65
3		Нагрів 800 °С, 1 год., охол. з піччю 500 °С, 8 год.		77	1500	1680	16,0	1,299	1,278	-1,60
4		Нагрів 800 °С, 1 год., охол. з піччю 600 °С, 8 год.		77	1400	1560	16,0	1,270	1,260	-0,80
5	BT16	Нагрів 800 °С, 1 год., охол. з піччю 500 °С, 8 год.	II	293	980	1070	40,0	2,011	2,060	+2,45
6		Нагрів 800 °С, 1 год., охол. з піччю 600 °С, 8 год.		293	900	960	57,0	2,028	2,112	+4,10
7		Нагрів 920 °С, 0,5 год., 80 °С с ⁻¹ +750 °С, 0,5 год., 40 °С г ⁻¹		293	800	840	54,0	2,390	2,286	-4,32
8		Нагрів 1050 °С, 0,5 год., 80 °С с ⁻¹ +830 °С, 3год., 40 °С ч ⁻¹		293	780	820	50,0	2,140	2,118	-1,00
9		Нагрів 1050 °С, 0,5 год., охол. з піччю + 830 °С, 4 год., 40 °С ч ⁻¹		293	770	800	36,0	1,805	1,859	+2,97
10	AT2	Стан постачання	293	570	660	62,2	2,687	2,895	+7,83	
11			200	700	775	60,0	2,270	2,230	-1,72	
12			77	940	1077	67,0	1,641	1,548	-5,67	
13	BT5-1 кт.	Стан постачання	293	770	835	26,4	1,819	1,757	-3,42	
14			200	950	984	23,7	1,539	1,525	-0,90	
15			77	1230	1325	21,6	1,146	1,210	+5,48	
S=										3,61
P(K _{мс} ^{розр.} ± 6,0%) =										0,903

Примітка: Δ - відносна похибка розрахунку величини характеристики $K_{ms}^{розн.}$ відносно до експериментальних значень $K_{ms}^{експ.}$.

Джерела інформації:

1. Котречко С.А., Мешков Ю.Я., Шиян А.В., Озерский М.В. Применение экспресс-метода для определения хрупкой прочности металлических сплавов, используемых в криогенной технике // Металлофизика и новейшие технологии. - 2011, т. 33, № 3. - С. 409-418.

5 2. Котречко С.А., Мешков Ю.Я., Шиян А.В... Механическая стабильность - универсальная мера сопротивления переходу в хрупкое состояние металлов // Успехи физики металлов. - 2009, т. 10, № 2. - С. 207-228.

3. Ивасишин О.М., марковский П.Е., Котречко С.А, Мешков Б.Я., Шиян А.В. Закономерности изменения показателя деформационного упрочнения конструкционных титановых сплавов в области неравномерной деформации // Металлофизика и новейшие технологии. - 2013, т. 35, № 1. - С. 129-149.

ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

15 Спосіб визначення характеристики механічної стабільності конструкційного титанового сплаву (КТС), при якому проводять випробування стандартних гладких циліндричних зразків на одночасне розтягнення в інтервалі температур від 77 К до 293 К та визначення при цьому базових механічних характеристик, в основу розрахунку характеристики крихкої міцності R_{ms} беруть базову залежність, а як характеристику механічної стабільності K_{ms} КТС - похідну формулу, який **відрізняється** тим, що розраховують величини інтенсивності напружень руйнування σ_i^k та відносного рівномірного звуження ψ_p зразка, будують дві експериментальні залежності опору пластичній деформації в області його нерівномірної деформації $\lg \sigma = f(\lg e)$, що характеризуються зберіганням властивості лінійності або наявністю зламу, при якому кут нахилу цієї залежності підвищується, встановлюють групу конструкційного титанового сплаву залежно від співвідношення величин показників деформацийного зміцнення при деформаціях, менших та більших за рівномірну, визначають показники деформацийного зміцнення для кожної групи КТС, на основі одержаних даних будують залежності, які пов'язують наведене значення еквівалентної деформації $\bar{e}_{екв.}$ з показниками деформацийного зміцнення або їх комбінацією в областях рівномірної та нерівномірної деформації для кожної групи КТС та визначають характеристику механічної стабільності K_{ms} конструкційного титанового сплаву, відповідно до його належності певній групі, за величинами базових механічних характеристик, таких як:

$\sigma_{0,2}$ - умовна межа текучості, МПа,

σ_B - межа міцності, МПа,

ψ_K - відносне звуження після руйнування зразка КТС, в частках:

35 - для сплавів I-ої групи:

$$K_{ms}^I = 10^{A \cdot n^2},$$

$$\text{де: } n = \frac{\lg \left[\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2} \cdot (1 - \psi_p)} \right]}{\lg [-500 \cdot \ln(1 - \psi_p)]} - \text{показник деформацийного зміцнення КТС,}$$

$$\psi_p = \psi_K \cdot \frac{1 - \sigma_{0,2} / \sigma_B}{\sigma_i^k / \sigma_B - \sigma_{0,2} / \sigma_B} - \text{відносне рівномірне звуження зразка КТС, в частках,}$$

$$\sigma_i^k / \sigma_B = 1 + B \cdot \psi_K,$$

40 $A = 38,497; B = 0,684$ - емпіричні коефіцієнти,

- для сплавів II-ої групи:

$$K_{ms}^{II} = \frac{S_B}{\sigma_{0,2}} \cdot 10^m,$$

$$\text{де: } S_B = \frac{\sigma_B}{1 - \psi_p} - \text{дійсне напруження на границі міцності КТС, МПа,}$$

$$m = n^{II} \cdot \lg \bar{e}_{екв.}^{II} - n,$$

$$\lg \bar{e}_{\text{екв.}}^{\text{II}} = a \cdot \left(\frac{n^{\text{II}}}{n} - 1 \right)^b,$$

$$a = \frac{A \cdot T_{\text{вип.}} - B}{T_{\text{вип.}} - C},$$

$$b = D - F \cdot T_{\text{вип.}} + N \cdot T_{\text{вип.}}^2,$$

$$A = 4,52; B = 191,34; C = 97,19; D = 0,445; F = 0,0003 [K^{-1}]; N = 6,0 \cdot 10^{-7} [K^{-2}]$$

5 емпіричні коефіцієнти; $T_{\text{вип.}}$ - температура випробувань, К, при цьому:

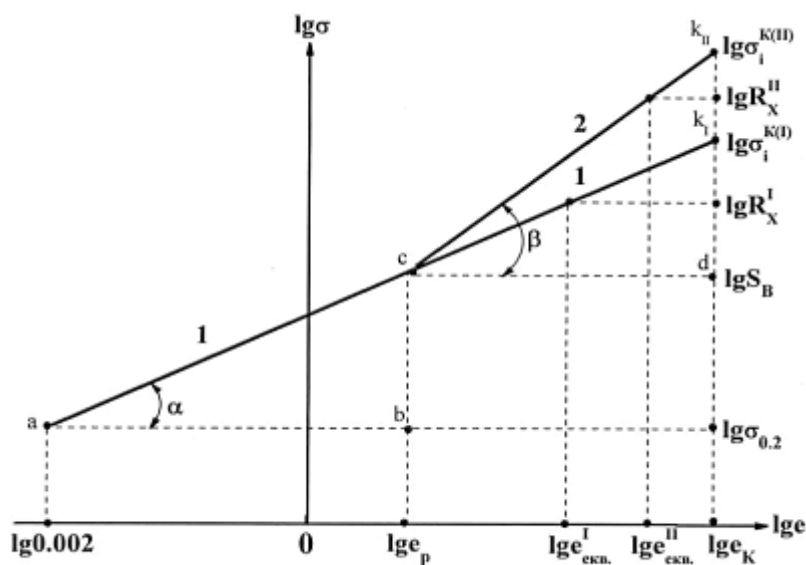
$$n^{\text{II}} = \frac{\lg(S_B / \sigma_{0,2})}{\lg(e_K / e_p)} \cdot \left\{ a - \frac{b}{1 + c \cdot \left[\frac{\lg(e_K / e_p)}{\lg(500 \cdot e_p)} \right]^d} \right\} - \text{показник деформаційного зміцнення КТС},$$

$e_p = -\ln(1 - \psi_p)$ - дійсна рівномірна деформація КТС,

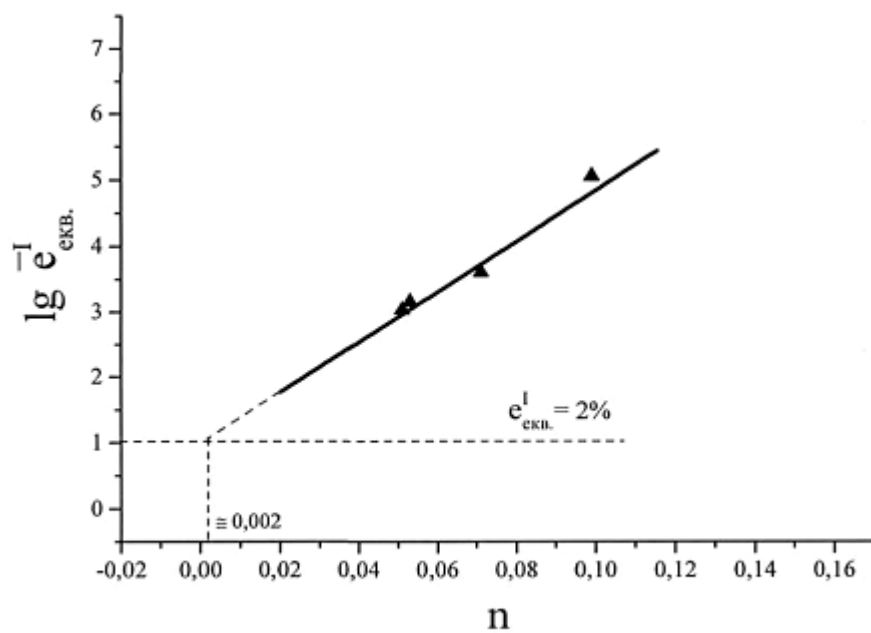
$e_K = -\ln(1 - \psi_K)$ - дійсна деформація руйнування зразка КТС,

$a = 82,23; b = 82,156; c = 0,041; d = 1,692$ - емпіричні коефіцієнти.

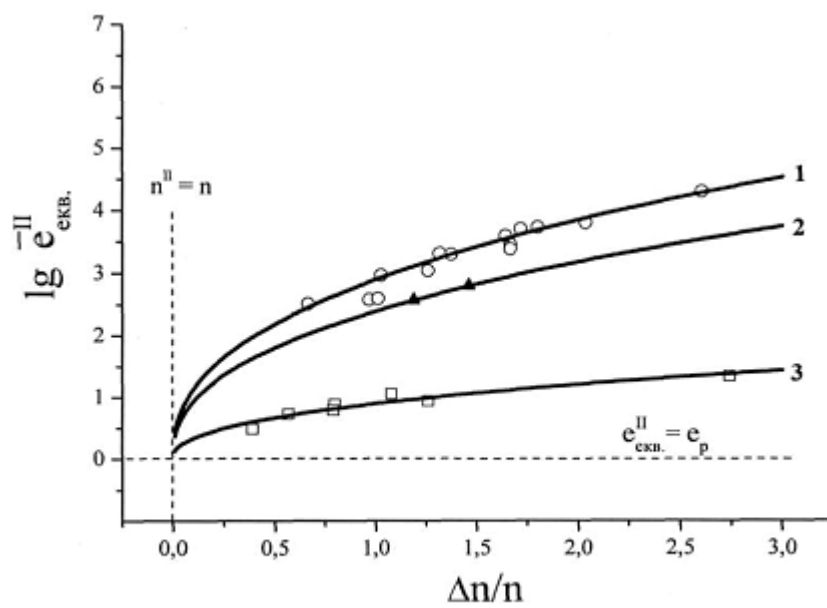
10



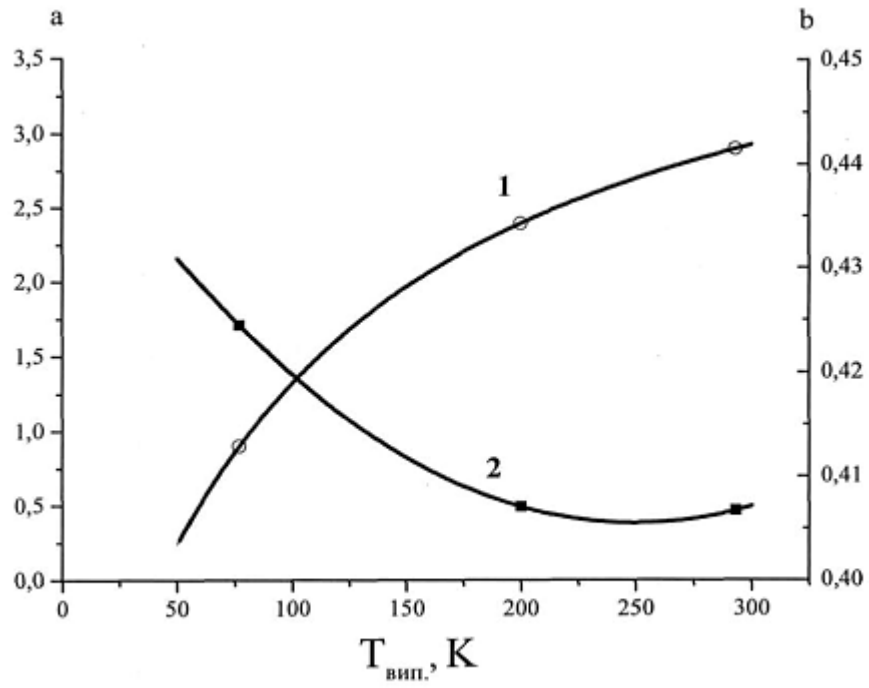
Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

Комп'ютерна верстка Г. Паяльніков

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

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