



УКРАЇНА

(19) UA (11) 55848 (13) U  
(51) МПК (2009)  
G01N 3/00МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ПАТЕНТУ  
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під  
відповідальність  
власника  
патенту

## (54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ МАТЕРІАЛУ ЗА УМОВ ОДНОВІСНОГО СТАТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

1

2

(21) u201007809

(22) 21.06.2010

(24) 27.12.2010

(46) 27.12.2010, Бюл. № 24, 2010 р.

(72) ГОЛУБ ВЛАДИСЛАВ ПЕТРОВИЧ, ЖЕЛДУ-  
БОВСЬКИЙ ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ,  
ПОГРЕБНЯК АНАТОЛІЙ ДМИТРОВИЧ(73) ІНСТИТУТ МЕХАНІКИ ІМ. С.П.ТИМОШЕНКА  
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

(57) Спосіб визначення довговічності матеріалу за умов одновісного статичного навантаження, за котрим зразок матеріалу випробовують на короткотривалу міцність, а в процесі довготривалого статичного навантаження, через рівні проміжки часу вимірюють поточні величини накопиченого

пошкодження зразка і враховують характеристики короткотривалої міцності для розрахунку часу до руйнування, який **відрізняється** тим, що у процесі короткотривалого навантаження вимірюють величини пружної деформації для рівнів напружень, що відповідають межі пропорційності ( $\sigma_{pr}$ ), межі плинності ( $\sigma_y$ ) та межі міцності ( $\sigma_b$ ), завдяки яким визначають три рівні напружень, що відображують відповідно початок крихкого, в'язко-крихкого та в'язкого руйнування і три рівні напруження, при яких проводять довготривале статичне навантаження зразків і будують повну діаграму довготривалої міцності.

Запропоноване технічне рішення стосується галузі механічних випробувань матеріалів, а безпосередньо способів прискореної оцінки та прогнозування часу до руйнування за умов одновісного довготривалого статичного навантаження та високих гомологічних температур. Спосіб може бути використаним у практиці науково-дослідних установ та заводських лабораторій при дослідженнях довготривалої міцності матеріалів в широкому діапазоні варіювання температури, рівня напруження та часу до руйнування.

Відомим є спосіб визначення довговічності зразків матеріалу за умов довготривалого статичного навантаження, який полягає у тому, що партію зразків випробовують на декількох рівнях напруження до руйнування і на підставі отриманих результатів будують діаграму довготривалої міцності у координатах «напруження  $\sigma$  - час до руйнування  $t$ » [1].

Недолік цього способу полягає у необхідності витрат значної кількості матеріалу, енергії і часу з метою побудови діаграми для однієї температури. Крім того, з ростом рівня температури випробувань, коли структурні зміни в матеріалі стають суттєвими і механізм руйнування притерпає змін від в'язкого до в'язко-крихкого і крихкого, це супроводжується зламами кривої довготривалої міцності у бік менших довговічностей, що в [1] взагалі не розглядається і не враховується. У зв'язку з цим при

необхідності коректної ідентифікації повної діаграми довготривалої міцності постає питання: або значно збільшувати згадані витрати, або поступатися точністю і достовірністю отриманих результатів.

Найбільш близьким за технічною суттю та отриманим результатом є обраний як прототип спосіб визначення довговічності матеріалу, який полягає у тому, що зразок додатково випробовують на короткотривалу міцність, а у процесі довготривалого статичного навантаження через рівні проміжки часу вимірюють три поточні величини накопиченого пошкодження зразка і враховують характеристики короткотривалої міцності та виміряних величин накопиченого пошкодження при розрахунках часу довготривалого руйнування [2].

Недоліком способу є те, що можливість його використання стосується одного конкретного зразка на заданому рівні напруження і для побудови повної діаграми довготривалої міцності величини накопиченого пошкодження необхідно було б вимірювати для кожного зразка на кожному рівні напруження, який досліджувався.

В основу корисної моделі, що пропонується, поставлена задача розробки способу визначення довговічності матеріалу за умов одновісного статичного навантаження. Ця задача спрямована на суттєве скорочення обсягу необхідних для побудови повної діаграми довготривалої міцності дос-

(13) U

(11) 55848

(19) UA

ліджень і зведення до мінімуму розрахунків часу до руйнування при забезпеченні високого рівня точності визначення довговічності.

Вказана задача досягається за рахунок того, що у відповідному способі визначення довговічності матеріалу, згідно якому зразок матеріалу випробовують на короткотривалу міцність, а у процесі довготривалого статичного навантаження через рівні проміжки часу вимірюють три поточні величини накопиченого пошкодження зразка і враховують характеристики короткотривалої міцності та вимірних величин накопиченого пошкодження при розрахунках часу до руйнування, у процесі короткотривалого навантаження вимірюють величини пружної деформації, що відповідають напруженням межі пропорційності  $\sigma_{pr} - \varepsilon_{pr}^e$ , межі плин-

ності  $\sigma_y - \varepsilon_y^e$  та межі міцності  $\sigma_B - \varepsilon_B^e$ , завдяки яким визначають три рівні напружень, що відображують відповідно початок крихкого, в'язко-крихкого та в'язкого руйнування, і три рівні напруження, за умов дії яких проводять довготривале статичне навантаження зразків і будують повну діаграму довготривалої міцності.

Позитивний ефект за умов реалізації запропонованого способу досягається за рахунок достовірного визначення рівнів напруження, що відповідають змінам механізмів руйнування в процесі високотемпературного довготривалого статичного навантаження.

Фіг.1 - Схема визначення величин напружень, що відповідають змінам механізму довготривалого руйнування.

Фіг.2 - Схема реалізації способу: незатоновані точки - розрахунок; затоновані - експеримент.

Фіг.3-5 - Порівняння характеристик довготривалої міцності різних матеріалів з результатами, отриманими запропонованим способом: позначення ті, що прийняті на фіг.2.

Спосіб реалізується наступним чином. Зразок матеріалу, що досліджується, піддають короткотривалому статичному навантаженню за дії того рівня температури, для якого має бути побудована діаграма довготривалої міцності. В процесі навантаження вимірюються та розраховуються величини пружної деформації, що відповідають рівням напруження на кривій короткотривалої міцності  $\sigma - \varepsilon$  послідовно  $\sigma_{pr}$ ,  $\sigma_y$  та  $\sigma_B$ . Випробування на короткотривалу міцність з метою визначення величин  $\sigma_{pr}$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_B$ ,  $\varepsilon_{pr}^e$ ,  $\varepsilon_y^e$  та  $\varepsilon_B^e$  проводилися з урахуванням рекомендацій ГОСТ 1497-73. Для подальшої реалізації способу авторами постулюється, як складова його частина експериментально обґрунтована закономірність - величини напружень, що відповідають ординатам точок перетину вектора навантаження, відображеними і зміщеними на величину пластичної деформації векторами розвантаження від рівнів напруження  $\sigma_B$ ,  $\sigma_y$  і  $\sigma_{pr}$  визначають відповідно рівні напружень діаграми довготривалої міцності:  $\sigma_v$  - напруження початку в'язкого руйнування, яке дорівнює напруженню довготривалої міцності на протязі однієї години,  $\sigma_{vb}$  - напруження, що відповідає зміні механізму

руйнування з в'язкого до в'язко-крихкого та  $\sigma_b$  - напруження, що відповідає зміні механізму руйнування з в'язко-крихкого до крихкого (фіг. 1).

З трьох отриманих таким чином величин напружень діаграми довготривалої міцності тільки одна -  $\sigma_v$  має визначеними обидві координати в площині діаграми довготривалої міцності ( $\sigma - t$ ), тому для побудови повної діаграми необхідно визначити ще три рівня напружень, які б, з одного боку, визначали абсцису напружень  $\sigma_{vb}$  і  $\sigma_b$ , а з іншого - характеризували експериментальні величини напружень, що відповідають довготривалій міцності в області в'язкого, в'язко-крихкого та крихкого руйнування. Величини цих напружень мають складати (фіг.2)

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{\sigma_v + \sigma_{vb}}{2}; \\ \sigma_2 &= \frac{\sigma_{vb} + \sigma_b}{2}; \\ \sigma_3 &= 0,85\sigma_b;\end{aligned}\quad (1)$$

Схема реалізації способу (фіг.2) демонструє, що проведення експериментальних досліджень довготривалої міцності на вказаних рівнях напружень має бути виконаним послідовно, починаючи з  $\sigma_1$  з метою коректного визначення координати  $t$  для  $\sigma_{vb}$ , потім на рівні напруження  $\sigma_2$  метою визначення кута нахилу ділянки діаграми довготривалої міцності, що описує в'язко-крихке руйнування, а також визначає координату  $t$  напруження  $\sigma_b$ . І на останньому етапі має бути проведеним випробування довготривалої міцності при напруженні, що менше за  $\sigma_b$  з метою визначення кута нахилу ділянки діаграми, що описує крихке руйнування для цілей подальшої екстраполяції на більші величини довговічності. Ділення осі абсцис на фіг.2 мають умовний характер і пов'язані з необхідністю відображення величини абсциси  $\sigma_v$ .

Таким чином, координата  $t$  для рівня напруження  $\sigma_{vb}$  визначається як абсциса точки перетину ділянкою в'язкого руйнування діаграми довготривалої міцності рівня напруження  $\sigma_{vb}$ , і відповідно, координата  $t$  для напруження  $\sigma_b$  - як абсциса точки перетину ділянкою в'язко-крихкого руйнування рівня напруження  $\sigma_b$ .

Як приклад застосування запропонованого способу, аналізуються довідкові дані з довготривалої міцності декількох жароміцних матеріалів, що наведені в [3]. В деяких випадках ці дані доповнюються аналогічними матеріалами досліджень, запозиченими з інших джерел. В таблиці наводяться експериментальні дані для сплавів ЭП109, ЖС6КП та ЭИ617, що отримані в результаті випробувань на короткотривалу міцність за вказаних температур, а також величини напружень  $\sigma_v$ ,  $\sigma_{vb}$  та  $\sigma_b$ , визначені на підставі отриманих результатів. Величини напружень  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  і  $\sigma_3$  розраховуються за допомогою рівнянь (1) з використанням даних колонок 9-11 наведеної таблиці.

Таблиця

Матеріал	$\theta, ^\circ\text{C}$	Дані експерименту						Розраховані дані		
		$\sigma_{\text{pr}}^*$	$\sigma_y$	$\sigma_B$	$\varepsilon_{\text{pr}}^e$	$\varepsilon_y^e$	$\varepsilon_B^e$	$\sigma_v$	$\sigma_{vb}$	$^\circ\sigma_b$
1	2	3	4	5	6	1	8	9	10	11
Сплав ЭП109	900	360	550	725	0,26	0,39	0,52	570	280	180
	950	250	450	575	0,18	0,33	0,43	440	220	140
Сплав ЖС6КП	800	640	775	1025	0,41	0,50	0,66	750	370	310
	900	270	475	775	0,21	0,38	0,61	500	240	150
	950	240	365	625	0,20	0,30	0,51	370	180	130
Сплав ЭИ617	700	560	650	900	0,37	0,43	0,60	690	330	280
	800	460	580	750	0,32	0,40	0,52	580	270	240
	850	370	470	590	0,26	0,34	0,42	370	250	190

- Всі напруження наведені у МПа; деформації – у %

На фіг.3-5 проілюстровано використання знайдених величин напружень, відповідальних за зміну механізму руйнування стосовно довідкових даних з довготривалої міцності сплавів ЭП109 (а), ЖС6КП (б) та ЭИ617 (в), які з високою точністю відображують злами на діаграмі довготривалої міцності, що є наслідком зміни механізму руйнування. По температурі випробування номери кривих довготривалої міцності відповідають: 700°C - 6; 800 - 3,7; 850 - 8; 900 - 1,4; 950 - 2,5.

Фізичне обґрунтування того факту, що величини критеріальних напружень довготривало руйнування визначаються за допомогою ділянки пружного деформування кривої короткотривало навантаження полягає в тому, що превалюючим механізмом цього руйнування, згідно з результатами багатьох досліджень, є механізми накопичення пошкодження, які в залежності від рівня напруження і температури довготривало навантаження можуть мати деформаційний, змішаний або ж бездеформаційний характер. В той же час, відомо, що найбільш ефективними критеріями ідентифікації і побудови методів підсумування накопиченого пошкодження є величини ефективного напруження та пружної деформації.

Авторами обґрунтовано, що величини пружної деформації  $\varepsilon_{\text{pr}}^e$ ,  $\varepsilon_y^e$  та  $\varepsilon_B^e$  характеризують максимальні рівні накопиченого пошкодження на ділянках діаграми довготривалої міцності, що описують відповідно крихкий, в'язко-крихкий та в'язкий механізми руйнування. А також той факт, що напруження  $\sigma_{vb}$  та  $\sigma_b$  знаходяться у теоретично і експериментально обґрунтованому співвідношенні з величинами ефективних напружень, тобто напружень руйнування за умов довготривало наван-

таження. До того ж вищенаведеним аргументується кількісний коефіцієнт в третій формулі співвідношення (1), що пов'язаний зі встановленим рівнем неруйнівного напруження за умов довготривало статичного навантаження.

Як зазначалося, спосіб має застосування до оцінки довготривалої міцності за умов високих гомологічних температур ( $\theta > 0,6\theta_{\text{пл}}$ ), де мають місце суттєві структурні перетворення, що призводять до змін механізму руйнування. В тому випадку, коли температура дослідження не сягає вказаного рівня, діаграма довготривалої міцності не має зламів і винайдені запропонованим способом напруження  $\sigma_v$ ,  $\sigma_{vb}$  та  $\sigma_b$  розташовані на одній прямій (фіг.4, крива 3). Тобто в даному випадку реалізується механізм в'язкого руйнування незалежно від рівня діючого напруження.

Використання запропонованого способу дозволяє суттєво знизити обсяг необхідних досліджень довготривалої міцності для побудови повної діаграми та забезпечити високий рівень точності їх визначення. Наведений приклад підтверджує отримання технічного результату від реалізації запропонованого способу.

Джерела інформації:

- ГОСТ 10145-81. Металлы. Метод испытания на длительную прочность. - М.: Изд-во стандартов, 1981. - 10 с.
- Патент України № 32880 А G01N 3/00, 2001, бюл. № 1.
- Справочник по авиационным материалам. Изд. 5-е, т.3 / Отв. ред. А. Т. Туманов. - М.: Машиностроение, 1965. - 632 с.

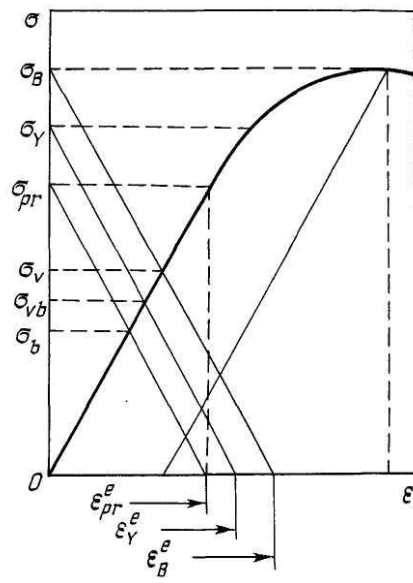


Fig. 1

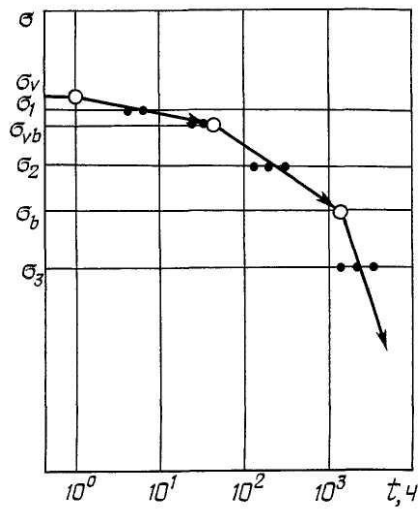


Fig. 2

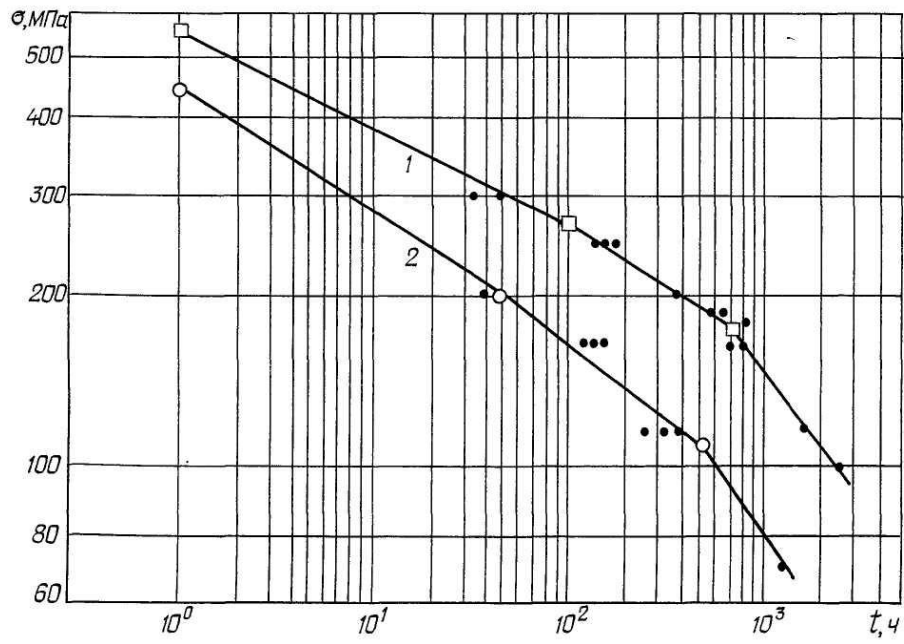
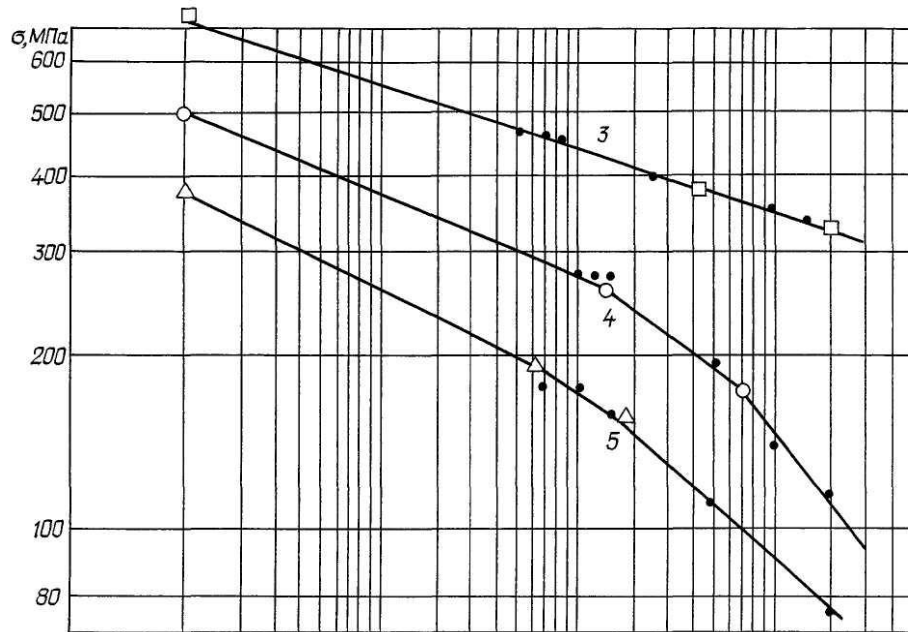
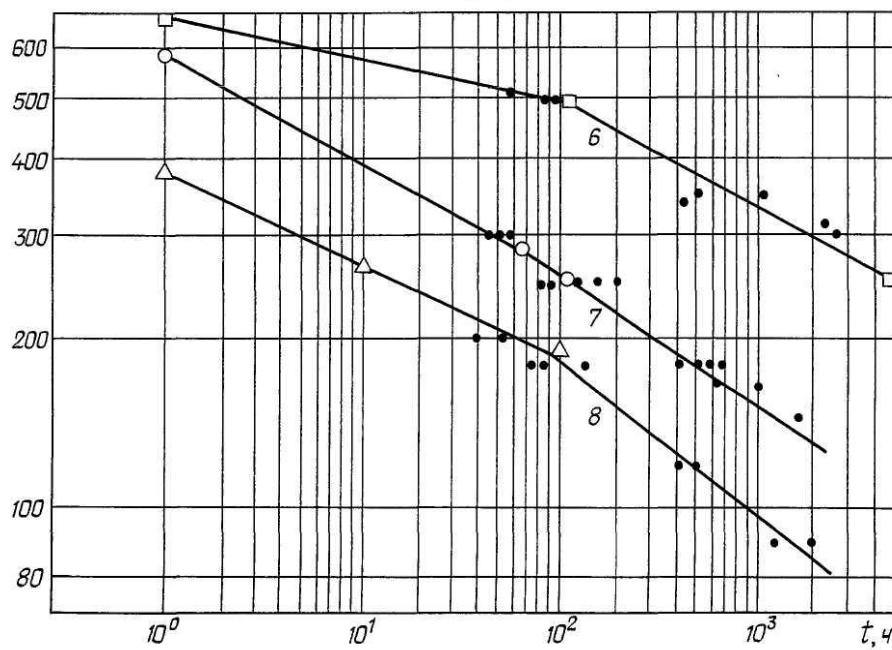


Fig. 3



фiг. 4



фiг. 5