

УДК 620

Розглянуто і проаналізовано головні положення стандартів ASTM, ISO та ГОСТ, що встановлюють метод випробувань матеріалів на розтяг при температурі рідкого гелію. Виявлено головні чинники, які регламентують параметри деформування, навантаження та розміри зразків при випробуваннях металів та сплавів в умовах вказаної температури. Надано рекомендації щодо доповнень положень стандартів.

Ключові слова: випробування матеріалів, сила навантаження, деформування, рідкий гелій, випробувальний зразок, випробувальне обладнання

Рассмотрены и проанализированы главные положения стандартов ASTM, ISO и ГОСТ, которые устанавливают метод испытаний материалов на растяжение при температуре жидкого гелия. Определены главные, которые регламентируют параметры деформации, нагрузки и размеры образцов при испытании металлов и сплавов в условиях указанной температуры. Даны рекомендации относительно положений стандартов.

Ключевые слова: испытание материалов, силовое нагружение, деформация, жидкий гелий, испытательный образец, испытательное оборудование

Considered and analysed main positions of standards of ASTM, ISO and GOST, which set the method of tests of materials on tension at the temperature of liquid helium. The main are certain, which regulate the parameters of deformation, loadings and sizes of standards at the test of metals and alloys in the conditions of the indicated temperature. Recommendations are given in relation to additions of positions of standards.

Keywords: test materials, silonagruzhenie, deformstion, liquid helium, the test sample, the test equipment

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТАТИЧНОЇ МІЦНОСТІ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ ПРИ ТЕМПЕРАТУРІ 4,2К

Л.С. Новогрудський

Доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Інститут проблем потужностей ім. Г. С. Писаренко
Національної академії наук України
м. Київ

Контактний тел.: 8 (098) 795-01-65

М.А. Зенкін

Доктор технічних наук, професор*

Контактний тел.: 8 (050) 547-67-97

О.П. Майборода

Магістр*

*Кафедра метрології, стандартизації та сертифікації
Київський національний університет технологій та
дизайну

вул. Немировича-Данченка, 2, м. Київ, Україна, 01011

Контактний тел.: 8 (097) 918-62-26

1. Вступ

Дослідження механічних властивостей конструкційних металевих матеріалів за температур, близьких до абсолютного нуля, бурхливий розвиток яких спостерігався у 60–80 роках минулого століття, і дотепер не втратили свого значення, про що свідчать численні публікації як вітчизняних, так і закордонних дослідників [1–7]. Такий сталий інтерес до проблеми, яка, здається,

повинна викликати увагу лише фахівців у певних, досить вузьких, навіть специфічних галузях діяльності (освоєння космосу, військова техніка), пов'язаний з тим, що криогенні температури увійшли і щонайдалі ширше входять у реалії нашого повсякденного буття (енергетика, медицина, сільське господарство, електроніка). Відповідно розширюється спектр пристроїв, вузлів яких мають працювати в умовах наднизьких температур. Несівну здатність таких вузлів в основному за-

безпечують металеві матеріали. Про актуальність таких досліджень свідчить і той факт, що протягом останніх років У США та країнах Європейського співтовариства були розроблені стандарти ASTM E 1450 (2003 рік), ISO 19819 (2004 рік), які регламентують методи випробувань металевих матеріалів у рідкому гелії. У нашій країні метою уніфікації методів визначення механічних характеристик металевих матеріалів за криогенних температур ще у 1977 році було розроблено та у 1978 році введено в дію стандарт [8], який з деякими доповненнями та уточненнями діє на теренах України і до теперішнього часу Стандарт [8] по суті являє собою розширений у напрямку методики охолодження до температур 77 К і 4,2 К варіант стандарту [9] (наступна редакція у 1984 році СТ СЭВ471–77), що регламентує випробування при температурі 293 К, і практично не враховує особливості розвитку пружно-пластичної деформації металевих матеріалів при температурі рідкого гелію. Саме ці особливості – явище нестабільного накопичення пластичної деформації металами і сплавами при їх навантаженні у зазначених температурних умовах, так звана переривчаста течія (рис. 1, 2), – і зумовлюють головні вимоги до параметрів і режимів випробувань на розтяг металевих матеріалів при температурі 4,2 К.

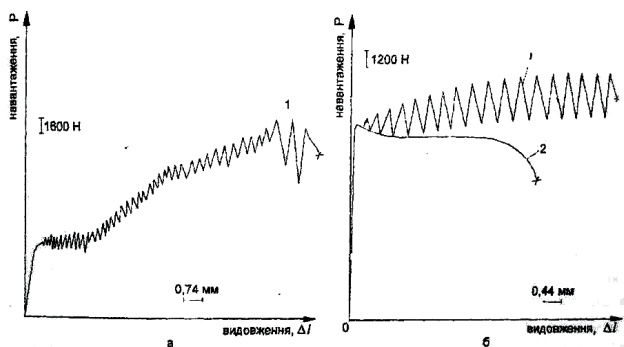


Рис. 1. Діаграми деформування сталей 12X18ШОТ (а) і 03X20H16АГ6 (б) при температурі 4,2 К:
1 — постійна швидкість деформування;
2 — постійна (на пружній ділянці) швидкість навантажування; зразок \varnothing_0 — 4 мм, $l_0 = 20$ мм

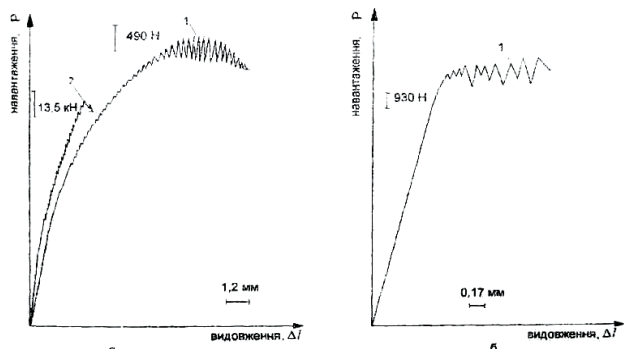


Рис. 2. Діаграми деформування сплавів: алюмінієвого АМг6 (а) і титанового 19 (б) при температурі 4,2 К постійній швидкості деформування: 1 — зразок $\varnothing_0 = 4$ мм, $l_0 = 20$ мм; 2 — зразок (12x20) мм, $l_0 = 80$ мм

Далі буде проведено аналіз головних чинників регламентованих або неврахованих у положеннях

стандартів АЗТМ Е 1450:03, 180 19819:04 та [8], які визначають кінетику переривчастої течії матеріалів і сплавів і, як наслідок, значення їх механічних характеристик.

2. Аналіз головних чинників регламентованих або неврахованих у положеннях стандартів АЗТМ Е 1450:03, 180 19819:04 та ГОСТ 22706–77

У таблиці наведено значення механічних характеристик сталей та алюмінієвих сплавів [7], отриманих в однакових температурних умовах (у середовищі рідкого гелію), але на зразках різної геометричної форми та розмірів, за різних умов навантажування (постійна швидкість переміщення траверси або постійна швидкість навантажування), за різних співвідношень пружних енергій зразка і системи силонавантажування дослідної установки (далі – машини).

Таблиця

Механічні характеристики сталей та сплавів при температурі 4,2 К

Матеріал	$S_0, \varnothing_0,$ мм	$Y_{0,2},$ МПа	$Y_E,$ МПа	д, %	ш, %	n	$J_C,$ кДж/м ²
АМг5	$S_0=12,0$ мм	192	465	11,0	10,0	235	17,0*
	$\varnothing_0 4,0$ мм	(170)	(405)	(32)	(40,0)	93	
АМг6	$S_0=12,5$ мм	197	517	18,5	14,5	203	5,0*
	$\varnothing_0 4,0$ мм	(135)	(470)	(22,5)	(27,2)	74	
АМпС	$S_0=10,0$ мм	150	400	32,0	33,0	272	44,5
	$\varnothing_0 4,0$ мм	(140)	(340)	(28,0)	(30,0)	103	
03X20H16АГ6	$S_0=9,0$ мм	1150	1620	34,0	40,0	34	150*
	$\varnothing_0 4,0$ мм	(1293)	(1305)	(22,5)	(51,0)	22 (1)	
0Н9	$S_0=10,0$ мм	1040	1481	19,5	48,0	21	18**
	$\varnothing_0 4,0$ мм	(1240)	(1300)	(16,0)	(67,5)	14 (1)	
12X18H10T	$\varnothing_0 4,0$ мм	770	1680	44,5	34,5	94	101,0
		(775)	(1415)	(39,0)	(60,5)	(11)	

Примітка. У дужках наведено значення характеристики при $W_M > W_{зразка}$;

* – J_{IC} ;

** – значення J_C розраховано по J_K ;

S_0 – товщина, \varnothing_0 – діаметр зразка;

$Y_{0,2}$ – межа плинності;

Y_E – границя міцності;

д – відносне видовження після руйнування;

ш – відносне звуження після руйнування;

n – кількість актів переривчастої течії.

Як видно, рівень впливу вказаних факторів на значення характеристик неоднозначний. За ступенем впливу їх можна розташувати в такому порядку: форма зразка, його розміри; умови і швидкість навантажування; співвідношення енергоємності зразка і запасу пружної енергії машини. Форма зразка (круг або прямокутник у перетині) в умовах переривчастої течії повинна забезпечувати максимальне наближення до лінійного напруженого стану. Розміри зразків, з одного боку, визначають вимоги до системи навантажування, охолодження, збудника механічної сили та ін., а з іншого — регламентують розвиток пружно-пластичної деформації — кількість та амплітуду стрибків навантажування та енергоємність зразків. За даними, наведеними у [3, 10], швидкість деформування, що менша ніж $7 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$, не впливає на параметри процесу переривчастої течії металів та сплавів. При цьому в роботах аналізується вплив швидкості деформування лише на переривчасту течію: кількість стрибків, їх амплітуду та форму. Систематичних даних про те, як змінюються механічні характеристики металів і технічних сплавів при зміні швидкості деформування, немає.

Оскільки кінетика переривчастої течії визначає і рівень характеристик міцності й пластичності матеріалів, то можна стверджувати, що при швидкості деформування $\epsilon \leq 10^{-3} \text{ c}^{-1}$, яку встановлено в стандартах ASTM 1450 і ISO 19819, значення механічних характеристик також не залежатимуть від швидкості деформування.

Положення усіх трьох стандартів регламентують лише швидкість деформування (переміщення траверси). Стандарт ASTM навіть особливо підкреслює це. Проте, при достатній жорсткості випробувального устаткування значення механічних характеристик, отриманих у режимі постійної швидкості навантажування, збігаються з аналогічними в режимі постійної швидкості деформування [11]. Тобто стандарти повинні встановлювати режими навантажування зразка і зі сталюю швидкістю навантажування при обумовленні жорсткості (податливості) випробувальної машини.

Найбільшою мірою розвиток переривчастої течії залежить від запасу пружної енергії системи силозбудження і силованапруги випробувальної установки (далі - машини), що утворюється при навантажуванні зразка, а точніше, від співвідношення енергоємності зразка і цього запасу енергії, а також від швидкості її відтворення. Наприклад, у сталі зі стабільним аустенітом 03X20H16AG6 кількість стрибків навантажування зменшується від 22 за постійної швидкості деформування (незначний запас пружної енергії машини) до 1 при неконтрольованому зростанні швидкості навантажування (значний запас енергії і велика швидкість її відтворення) при стрибку. Відповідно границя міцності сталі зменшується у 1,20 рази, відносне видовження після руйнування — у 1,34 рази, а відносне звуження після руйнування внаслідок локалізації деформації збільшується у 1,40 рази.

Пружна енергія, що її накопичують системи силозбудження і силованапруги випробувальної машини W_M , при навантажуванні зразка в загальному вигляді може бути представлена так:

$$W_M = \sum_{i=1}^n W_i(L_i, F_i, E_i, P) + W_{с.з.}(P), \quad (1)$$

де W_i — пружна енергія, накопичена i -м елементом ланцюга силозбудження при його навантажуванні до рівня навантаження P :

E — модуль пружності матеріалу,

L_i — довжина,

F_i — площа перетину елемента;

n — кількість елементів в ланцюзі силозбудження;

$W_{сз}$ — пружна енергія збудника, накопичена при навантажуванні до рівня P .

Здатність елемента накопичувати пружну енергію характеризується його податливістю, Π_i — відношенням абсолютного пружного видовження елемента $\Delta_{ипр}$ до значення навантаження P , що викликає це видовження:

$$\Pi_i = \frac{\Delta_{ипр}}{P}. \quad (2)$$

Чим вища податливість системи, тим більший запас її пружної енергії при однакових навантаженнях. При розтязі енергія елемента буде:

$$W_i = \frac{P \cdot \Delta_{ипр}}{2} = \Pi_i \frac{P^2}{2}. \quad (3)$$

Вплив запасу пружної енергії переважно проявляється після зниження опору матеріалу деформуванню у закритичній стадії [12]. Переривчаста течія металевих матеріалів при температурі 4,2 К формується рядом послідовних актів локального деформування частини робочої довжини зразка, що приводить до виникнення місцевого звуження — шийки. При цьому вивільняється пружна енергія, яка накопичується машиною (1) і частиною зразка поза шийкою. Ця енергія підтримує локальну деформацію. Тобто кожний акт переривчастої течії можна розглядати як перехід матеріалу у закритичну стадію. Зупинка розвитку локальної деформації можлива за умови відповідності залишкової (після акту переривчастої течії) пружної енергії системи машина-зразок залишковій енергоємності матеріалу зразка:

$$W'_{пр.зр.} = W'_M + W'_{нед.зр.}, \quad (4)$$

де $W'_{пр.зр.}$ — залишкова пружна енергоємність зразка у локальній зоні;

W'_M — залишкова пружна енергія машини;

$W'_{нед.зр.}$ — залишкова пружна енергія недеформованої частини зразка.

Залишкова енергоємність матеріалу зразка зменшується з кожним актом переривчастої течії. Тому, чим менша сумарна податливість елементів ланцюга силованапруги і силозбуджувача, тим менша вірогідність передчасного руйнування зразка після чергового стрибка деформації. При $W'_M \rightarrow 0$ ($\Pi_M \rightarrow 0$) можна виявити повну деформаційну здатність матеріалу, втіленого в зразки певного розміру. При випробуваннях зразків таких же розмірів на машині з більшою податливістю руйнування відбудеться раніше. Ступінь передчасного руйнування залежить від розмірів зразка, властивостей матеріалу (енергоємності), податливості системи навантажування та збудника, швидкості підводу механічної енергії до зразка. Як було зазначено, розвиток переривчастої течії визначає значення характеристик міцності та пластичності металевих матеріалів, тому

при формуванні вимог до випробувального обладнання необхідно не лише регламентувати швидкість деформування, як це зроблено в досліджуваних документах, а й нормувати податливість машини (4). При цьому необхідно також враховувати, що стандартні машини, які використовують для випробувань металів на статичний розтяг при температурі 4,2 К, мають три типи збудників: механічний, гідравлічний та гервогідравлічний (гідромеханічний). Машини з механічним збудником головним чином реалізують деформування з постійною швидкістю, з гідравлічним – з постійною швидкістю навантажування (зазвичай постійність забезпечується у зоні пружного деформування зразка), сервогідравлічні – обидва режими (причому сучасні машини цього типу з малою податливістю забезпечують постійність швидкості навантажування практично до моменту руйнування зразка). Для машин першого і третього типів головними накопичувачами пружної енергії є елементи силонавантаження машини. Енергія, що акумулюється збудником, незначна і, як правило, $W_{с.з.} = \sum_{i=1}^n W_i$. У гідравлічних машин, особливо прямої дії, її значення суттєве і може значно перевищувати $\sum_{i=1}^n W_i$. Приклад наведено далі.

Величина пружної енергії, що її накопичує гідравлічний збудник, пропорційна стисливості β рідини, яка використовується в якості робочого тіла збудника. Стисливість β є оберненою величиною до модуля об'ємної пружності матеріалу K . Для сталі за температури 293 К модуль об'ємної пружності дорівнює:

$$K = \frac{1}{\beta} = \frac{E}{3(1-\mu)} = 1,52 \cdot 10^6 \left(\frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \right).$$

Тут E – модуль пружності; μ – коефіцієнт Пуасона. Тобто $\beta = 0,66 \cdot 10^{-6} \text{ атм}^{-1}$.

Стисливість масла, що використовується у збудниках гідравлічних машин, в інтервалі тиску від 1 до 10 атм лежить у діапазоні $(47,2-63,3) \cdot 10^{-7} \text{ атм}^{-1}$. Таким чином, податливість масла у $(60-100)$ разів більша, ніж у сталі. Відповідно запасена гідравлічним збудником пружна енергія буде більшою у $\sim (60-100)$ разів порівняно з металевими елементами ланцюга силонавантажування за інших рівних умов (температури, обсягу матеріалу тощо). Наявність таких значних запасів пружної енергії в системах машин зовсім не означає, що їх не можна використовувати для випробувань металів та сплавів на розтяг при температурі 4,2 К. Адже відомо, що ряд конструкцій, наприклад, сосуди під тиском, працюють в умовах нестационарних навантажень. Саме для розрахунків на міцність подібних конструкцій, що експлуатуються при температурах, близьких до 4,2 К, оцінки їх тримальної здатності, довговічності тощо механічні характеристики матеріалів необхідно визначати при певних рівнях пружної енергії систем випробувальної машини.

Отже стандарти повинні регламентувати не лише швидкості деформування або навантаження (чого не робить жоден з аналізованих), але й податливість випробувальної машини.

Зразки. Розмір та геометрія зразків при випробуваннях у середовищах рідкого гелію визначають не тільки конструктивні особливості систем охолоджу-

вання, кріостату, захватів, максимальне навантаження випробувальної машини, але й кінетику деформування матеріалу, зумовлюючи швидкість деформації, жорсткість напруженого стану в шийках, співвідношення пружних енергій машина-зразок. Тобто значення механічних характеристик матеріалу, які визначають при випробуваннях (див. таблицю).

Як видно з наведених даних, від розміру і форми зразка, навіть якщо він відповідає вимогам [8], суттєво залежить і кількість актів переривчастої течії, і їх амплітуда, і як наслідок - значення характеристик міцності і пластичності матеріалу. Тому доцільно вимогами НД обмежити (на відміну від [8]) розміри зразків для випробувань при температурі рідкого гелію. Для отримання достовірних значень механічних характеристик та їх порівнянні НД повинні регламентувати один базовий типорозмір циліндричного зразка. Ним може бути малий стандартний зразок, рекомендований ASTM 1450:03. Для листових матеріалів малих товщин, з яких неможливо виготовити подібний зразок, зорієнтувавши його поперек напрямку прокату, можна рекомендувати плоский зразок, наведений в ISO 19819. Саме значення механічних характеристик матеріалів, отримані за допомогою таких уніфікованих зразків, повинні включатися у довідники, саме такі значення повинні бути об'єктом зрівняння. З метою мінімізації впливу енергії машини на кінетику деформування зразка його розміри необхідно вибирати таким чином, щоб забезпечити певне співвідношення між його енергоемністю і запасом пружної енергії машини:

$$\frac{W_{\text{зразка}}}{W_M} = n, \quad n > 1. \quad (5)$$

Чим більше значення n , тим менший при переході у закритичну стадію вплив накопиченої машиною пружної енергії на кінетику подальшого деформування зразка. Якщо при використанні уніфікованих зразків вимога (5) не виконується, необхідно скорегувати податливість елементів машини.

Враховуючи (3), енергію, накопичену машиною при навантаженні P , можна визначити так:

$$W_M = \sum_{i=1}^n W_i = \sum_{i=1}^n \Pi_i \frac{P^2}{2}. \quad (6)$$

Тут Π_i – податливість елементів машини: складових частин ланцюга замикання, їх з'єднань, збудника.

Оскільки після кожного акту переривчастої течії зразок деформується пружно, то у першому наближенні для забезпечення вимоги (5) достатньо витримати умову:

$$W_M = \sum_{i=1}^n W_i = \sum_{i=1}^n \Pi_i \frac{P^2}{2}, \quad (7)$$

$$\text{де } \Pi_M = \sum_{i=1}^n \Pi_i.$$

Якщо робоча частина зразка – геометрично однорідний стержень, то:

$$\Pi_{\text{зразка}} = \frac{\Delta_{\text{зразка}}}{P} = \frac{l_0}{F_0 E}, \quad (8)$$

де l_0 , F_0 – початкові розрахункова довжина робочої частини і площа перетину зразка відповідно;

E – модуль пружності матеріалу при температурі випробувань;

$\Delta_{\text{зразка}}$ – абсолютне пружне видовження зразка при навантаженні P . Видно, що зміна розмірів зразка призводить до зміни його податливості, тобто може бути порушено співвідношення пружних енергій машин і зразка, тому умову (7) треба записати так:

$$P_M \leq \frac{l_0}{F_0 E}.$$

Необхідно також враховувати, що при переривчастій течії значення l_0 відповідає частині початкової розрахункової довжини зразка l_0 , яка деформується при кожному акті деформації. Користуючись підходом, викладеним у [13], можна показати, що для п'ятикратного циліндричного зразка $l_0' \cong \frac{2}{15} l_0$. Інші $\frac{13}{15}$ початкової розрахункової довжини зразка є джерелом пружної енергії, яка сприяє течії матеріалу в локалізованій зоні l_0 . Тобто податливість зразка визначається лише частиною його робочої довжини. Саме в об'ємі цієї частини зразка при акті переривчастої течії вивільняється пружна енергія, накопичувана машиною і зразком поза цією частиною. В остаточному вигляді умову (7) для циліндричних п'ятикратних зразків можна записати так:

$$P_M \leq \frac{2 \cdot l_0}{15 \cdot F_0 E}.$$

У той же час НД повинні дозволяти визначення механічних характеристик матеріалів на зразках інших розмірів (відповідно до ASTM E8 або [9]), або при запасі пружної енергії машини, відмінному від умови (7), або при інших режимах навантаження, якщо це обумовлено умовами експлуатації матеріалів у конструкціях або вимогами на металопродукцію. Такі положення мають бути закріплені окремими пунктами документів.

Ще декілька зауважень до стандартів. Швидкість деформування в інтервалі, зазначеному в стандарті, не повинна впливати на значення характеристик, які визначаються згідно зі стандартизованою методикою. Тому положення п. 9.5.4 ASTM 1450:03 і п. 8.3.3 150 19819:2004 необхідно скасувати. По-перше, якщо варіації швидкості деформування в регламентованому діапазоні призводять до зміни характеру деформування або значень механічних характеристик, отже вибраний діапазон швидкостей не забезпечує ідентичності умов випробувань. По-друге, викладені у п.п. 9.5.4 і 8.3.3 відповідних стандартів вимоги зміни швидкості деформування з метою визначення умовної границі плинності в разі, якщо перший акт переривчастої течії має місце при залишковій деформації меншій ніж 0,2 %, помилкові по суті. На нашу думку, в цьому разі границю плинності треба встановлювати по напруженню, що відповідає початку першого зриву навантаження. Це властивість матеріалу – починати свою течію таким проявом, тобто, це його фізична границя плинності за даних умов випробування, зокрема, швидкості деформування.

Має сенс у нормативних документах рекомендувати експериментально визначати податливість систем силонавантажсння та силозбудження випробувальної машини. Для цього треба скористуватися методом малоподатливого зразка [14]. До речі – отримана за допомогою такого методу інформація про податливість машини дає можливість корегувати кут нахилу пружної лінії діаграм розтягу в разі вимірювання видовження зразка не безпосередньо на його робочій частині. Такий підхід слід рекомендувати до внесення у НД, адже вимірювання видовження зразка безпосередньо на робочій частині в середовищі рідкого гелію – досить складна задача і при значних обсягах досліджень практично не виконується.

Висновки

НД, що регламентують методи випробувань на розтяг металевих матеріалів при температурі рідкого гелію (ASTM E 1450:03, ISO 19819:2004, [8]) мають спільні суттєві недоліки, які треба усунути, розробляючи відповідний стандарт України:

- регламентувати податливість випробувальної машини (співвідношення податливостей машин і зразка);
- встановити обов'язковість випробування зразків єдиного стандартного розміру;
- границю плинності визначати як фізичну – за напруженням, з якого починається перший акт переривчастої течії, або як умовну – за напруженням, яке відповідає нормованому рівню залишкової деформації (загальноприйнятний рівень 0,2 %) за обраної стандартної швидкості деформації.

Література

1. Bums T. J. A simple criterion for the onset of discontinuous deformations in metals at very low temperatures // J. Mech. and Phys. Solids. – 1994. – 42. – №5.-P. 897-811.
2. Криштал М. М. Скоростная чувствительность сопротивления деформированию и макрореализация деформации при прерывистой текучести Al-Mg– сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1997. – № 9. – С. 26-30.
3. Пустовалов В. В. Влияние сверхпроводящего перехода на низкотемпературную скачкообразную деформацию металлов и сплавов (обзор) // Физика низких температур. - 2000. – № 6. – С. 515–535.
4. Емалетдинов А. К. Автоколебательные режимы пластической деформации металлов при гелиевых температурах // Физика металлов и металловедение. - 2001. - 91. - № 4. – С. 3-9.
5. Воложаниш С. А., Солнцев Ю. П., Ермакова Т. В. Влияние структурных изменений на надежность и ресурс материала криогенного оборудования // Прочность материалов и конструкций при низких температурах: Сб. трудов. – С. Пб-г. СПбГУНиПТ. - 2002. - С. 7-25.
6. Воробьев Е. В., Анпилогова Т. В. Особенности проявления эффекта низкотемпературной скачкообразной деформации // Надійність і довговічність машин і споруд. - 2006. – Вип. 26. - С. 166-174.

7. Новогрудский Л. С. Оценка низкотемпературного упрочнения конструкционных материалов при температуре 4,2 К // Надійність і довговічність машин і споруд. — 2006. - Вип. 26. - С. 319–325.
8. ГОСТ 22706–77. Металлы. Метод испытания на растяжение при температурах от минус 100 до минус 269 град. С.
9. ГОСТ 1497–73. Металлы. Методы испытаний на растяжение.
10. Старцев В. И., Ильичев В. Я., Пустовалов В. В. Пластичность и прочность металлов и сплавов при низких температурах. — М.: Металлургия, 1976.— 264 с.
11. Прочность материалов и конструкций при криогенных температурах / Стрижало В. А., Филин Н. В., Куранов Б. А. и др. — Киев: Наук, думка, 1988. — 240 с.
12. Фридман Я. Б., Зилова Т. К., Дроздовский Б. А. Кинетика деформирования и разрушения. — М.: ВНИИАМ, 1960. — 103 с.
13. Еремин В. И. Геометрия области локализованной деформации при низкотемпературном скачкообразном течении металлов // Проблемы прочности. — 1987. - № 2. - С. 37-39.
14. Спосіб визначення енергетичних та деформаційних характеристик конструкційного матеріалу. Пат. 69351 А. Україна, МК1 G01N3/00/ В. О. Стрижало, Л. С. Новогрудський, М. П. Земцов (Україна). — № 20031212975; Заявлено 30.12.2003; Видан. 16.08.2004; Бюл. № 8. — С 194.

Показана перспективність поруватого кремнію (ПК), як матеріалу фотоелектричних перетворювачів (ФЕП). Використання мультитекстури, як ефективного та рентабельного покриття, на основі ПК повинно бути максимально адаптоване до процесів створення кремнієвих сонячних елементів (СЕ)

Ключові слова: фотоелектричні перетворювачі, сонячні елементи, текстура, поруватий кремній, електрохімічна технологія

Показана перспективність пористого кремнію (ПК), як матеріала фотоелектричних преобразователей (ФЕП). Использование мультитекстуры как эффективного и рентабельного покрытия на основе ПК, должно быть максимально адаптировано к процессам создания кремниевых солнечных элементов (СЕ)

Ключевые слова: фотоэлектрические преобразователи, солнечные элементы, текстура, пористый кремний, электрохимическая технология

The availability of porous silicon (PS), as material of photoelectric converters (PEC) is shown. The effective and profitable coating of PS multirexture should adapted to processes of creation of the silicon solar cells

Key-words: photoelectric converters, solar cells, texture, porous silicon, electrochemical technology

УДК 621.315.592

ПОВЕРХНЕВА ФУНКЦІОНАЛЬНА МУЛЬТИТЕКСТУРА ДЛЯ ФОТО- ЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

В. Ю. Єрохов

Кандидат фізико-математичних наук, доцент
Кафедра „Напівпровідникова електроніка”
Національний університет „Львівська політехніка”
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013
Контактний тел.: 8 (097) 131-88-48
E-mail: verohov@polynet.lviv.ua

1. Вступ

Кремній, а також різні функціональні пористі матеріали і сполуки на його основі, які створені за останнє десятиріччя, перспективні для фотовольтаїчного використання, мають незаперечну перевагу над іншими

напівпровідниками, як з точки зору оптичних властивостей, так і з точки зору їх вартості, доступності та промислової освоєності.

Використання кремнієвих СЕ у системах генерації електрики зможе стати економічно доцільним тільки за умови підвищення їх коефіцієнта корисної дії