

УДК 539.23: 537.311

С.І. Проценко
**Про температурну залежність коефіцієнтів повздожньої і
поперечної тензочутливості металевих плівок**

Сумський державний університет
вул. Р.-Корсакова, 2, м. Суми, 40007 Україна
E-mail: kpf@ssu.sumy.ua

У роботі проаналізоване питання про температурну залежність коефіцієнтів повздожньої (Γ_1) і поперечної тензочутливості (Γ_t). Аналіз співвідношень для термічних коефіцієнтів Γ_1 і Γ_t дозволяє зробити висновок про те, що при збільшенні температури $\gamma_{1,t}$ у полікристалічних сильно дисперсних металевих плівках зростає. Отримані величини $\frac{\partial^2 c}{\partial e_{1,t} \partial T}$, які характеризують поведінку металевої плівки під дією механічних і температурних полів.

Ключові слова: тензоефект, коефіцієнти тензочутливості, температурна залежність, параметри тензочутливості.

Стаття постуила до редакції 27.08.2002; прийнята до друку 23.09.2002

Не дивлячись на те, що на даний момент відомо багато даних про температурну залежність опору (ρ) або температурного коефіцієнту опору (β), питання про температурну залежність коефіцієнтів повздожньої (γ_l) і поперечної (γ_t) тензочутливості залишається найбільш маловивченим. Поряд з цим, це питання залишається актуальним з точки зору прикладного аспекту явища тензочутливості [1].

Вперше відповідний теоретичний аналіз і порівняння із експериментальними даними здійснили Г. Вітт і Т. Коуттс та Б. Верма і Х. Юретчке (див., наприклад, роботу [2]). Г. Вітт і Т. Коуттс отримали, не акцентуючи уваги на можливій відмінності γ_l і γ_t , співвідношення, яке пов'язує між собою термічний коефіцієнт коефіцієнту тензочутливості (β_γ) і ТКО (β). Але, оскільки були зроблені помилкові

допущення при отриманні співвідношення і чисельній оцінці, то їх формула має дуже наближений характер:

$$\beta \cong -\beta_\gamma. \quad (1)$$

Автори [3] також прийшли до такого ж висновку. Згідно даних [2] формула (1) підтверджується на прикладі експериментальних даних для плівок Ag і Ta.

Поряд з цим, автори [4], виходячи із означення термічних коефіцієнтів для коефіцієнтів тензочутливості

$$v_{\pi 1} = \frac{1}{\Gamma_1} \left(\frac{\partial \Gamma_1}{\partial T} \right)_e \quad \text{і} \quad v_{\pi t} = \frac{1}{\Gamma_t} \left(\frac{\partial \Gamma_t}{\partial T} \right)_e \quad (2)$$

і співвідношень для γ_l і γ_t [2]:

$$\Gamma_1 = \frac{1}{R} \left(\frac{\partial R}{\partial e_1} \right)_T = \frac{1}{c} \left(\frac{\partial c}{\partial e_1} \right)_T + 1 + 2M_f, \quad (3)$$
$$\Gamma_t = \frac{1}{R} \left(\frac{\partial R}{\partial e_t} \right)_T = \frac{1}{c} \left(\frac{\partial c}{\partial e_t} \right)_T - 1,$$

отримали більш точні формули для V_{r1} і V_{rt} (де ϵ – деформація; R – опір; μ_f – коефіцієнт Пуассона для півки). Для цього необхідно підставити

співвідношення (3) в (2). В результаті для коефіцієнтів тензочутливості отримуємо:

$$V_{r1} = \frac{1}{\Gamma_1} \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial \epsilon_1} + 1 + 2M_f \right) = \frac{1}{\Gamma_1} \left(-\frac{1}{c^2} \frac{\partial c}{\partial T} \frac{\partial c}{\partial \epsilon_1} + \frac{1}{c} \frac{\partial^2 c}{\partial \epsilon_1 \partial T} \right),$$

$$V_{rt} = \frac{1}{\Gamma_t} \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial \epsilon_t} - 1 - M_f \right) = \frac{1}{\Gamma_t} \left(-\frac{1}{c^2} \frac{\partial c}{\partial T} \frac{\partial c}{\partial \epsilon_t} + \frac{1}{c} \frac{\partial^2 c}{\partial \epsilon_t \partial T} \right).$$

Ці співвідношення перетворюються до виду:

$$V_{r1} = \frac{1}{\Gamma_1} \left(-V \frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial \epsilon_1} + \frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial \epsilon_1} \frac{\partial \epsilon_1}{\partial c} \frac{\partial^2 c}{\partial \epsilon_1 \partial T} \right) = \frac{\Gamma_1 - 1 - 2M_f}{\Gamma_1} \left(-V + \frac{1}{\Gamma_1 - 1 - 2M_f} \frac{1}{c} \frac{\partial^2 c}{\partial \epsilon_1 \partial T} \right),$$

$$V_{rt} = \frac{1}{\Gamma_t} \left(-V \frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial \epsilon_t} + \frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial \epsilon_t} \frac{\partial \epsilon_t}{\partial c} \frac{\partial^2 c}{\partial \epsilon_t \partial T} \right) = \frac{\Gamma_t + 1}{\Gamma_t} \left(-V + \frac{1}{\Gamma_t + 1} \frac{1}{c} \frac{\partial^2 c}{\partial \epsilon_t \partial T} \right).$$

Підкреслимо, що (4') більш точна у порівнянні із напівемпіричним співвідношенням (1).

У випадку великих значень Γ_1 і Γ_t ($\Gamma_1, \Gamma_t \gg 1$) формули (4') спрощуються до виду:

$$V_{r1} \cong -V + \frac{1}{c\Gamma_1} \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial \epsilon_1 \partial T},$$

$$V_{rt} \cong -V + \frac{1}{c\Gamma_t} \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial \epsilon_t \partial T},$$

де друга похідна є важливою характеристикою, яка описує поведінку питомого опору в умовах дії механічних і температурних полів.

Оскільки величини V_{r1} і V_{rt} є кількісними характеристиками, то, виходячи із (4) і (4'), можна проаналізувати питання про температурну залежність Γ_1 і Γ_t . При аналізі ми розглянемо два випадки: полікристалічна металева півка (а) із $\beta > 0$ і аморфна або сильнодисперсна півка (б) із $\beta < 0$.

а) При умові $V < \frac{1}{c\Gamma_{1,t}} \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial \epsilon_{1,t} \partial T}$ величина $V_{r1,t}$ буде більше нуля, тобто при збільшенні температури буде спостерігатися зростання $\Gamma_{1,t}$.

Таблиця

Параметри тензочутливості півок у різному структурному стані

Метал	$V \cdot 10^3, K^{-1}$	$V_{r1} \cdot 10^3, K^{-1}$	$\frac{\partial^2 c}{\partial \epsilon_1 \partial T} \cdot 10^9, \frac{Om \cdot m}{K}$	$V_{rt} \cdot 10^3, K^{-1}$	$\frac{\partial^2 c}{\partial \epsilon_t \partial T} \cdot 10^9, \frac{Om \cdot m}{K}$
Cr (полікр.)	0,70	6,0	4,5	6,2	12,1
V (полікр.)	0,23	0,28	7,0	-	-
Mo (дисп.)	-0,09	9,9	11,4	5,6	17,9
W (дисп.)	-0,20	4,0	16,0	5,8	23,5
W (ам.)	-0,30	4,2	8,6	5,7	22,6

Відзначимо, що автори [2,3], виходячи із одиночних експериментів, помилково прийшли до висновку, що похідна $\frac{\partial^2 c}{\partial \epsilon \partial T} \cong 0$, хоча згідно експериментальних даних [4] доданок $\frac{1}{c\Gamma_{1,t}} \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial \epsilon_{1,t} \partial T}$ має величину одного порядку із ТКО.

Цей висновок підтверджується даними [4] для півок Cr і V в температурному інтервалі $T = 110-300$ K (таблиця).

б) При умові $\beta < 0$ і $\frac{1}{c\Gamma_{1,t}} \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial \epsilon_{1,t} \partial T} > 0$ (або $\left| \frac{1}{c\Gamma_{1,t}} \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial \epsilon_{1,t} \partial T} \right| < V$ при від'ємному значенні

$\frac{1}{\sigma_{\Gamma_{1,t}}} \cdot \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial \epsilon_{1,t} \partial T}$ величина $V_{\Gamma_{1,t}}$ також буде більше

нуля, як це має місце у випадку сильнодисперсних плівок Mo і W (таблиця), тобто при збільшенні температури величина $\Gamma_{1,t}$ буде також зростати.

Термічний коефіцієнт $V_{\Gamma_{1,t}}$ буде мати від'ємне

значення, якщо величина $\frac{1}{\sigma_{\Gamma_{1,t}}} \cdot \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial \epsilon_{1,t} \partial T} < 0$

виявиться по модулю більшою $|V|$. Скоріше за все це буде мати місце у напівпровідникових плівках.

Оскільки величина $V_{\Gamma_{1,t}}$ виявилася додатною, то це означає, що при збільшенні температури Γ_1 і Γ_t будуть зростати і, виходячи із (2), можна записати

рівняння для температурної залежності Γ_1 і Γ_t :

$$\begin{aligned} \Gamma_1(T) &= \Gamma_1(0) \cdot e^{b_{\Gamma_1} T}, \\ \Gamma_t(T) &= \Gamma_t(0) \cdot e^{b_{\Gamma_t} T}, \end{aligned} \quad (6)$$

де $\Gamma_1(0)$ і $\Gamma_t(0)$ – асимптотичне значення Γ_1 і Γ_t при $T \rightarrow 0$ К (згідно даних [4] у випадку плівок Cr $\Gamma_1(0) \cong 0,20$ і $\Gamma_t(0) \cong 0,15$). Очевидно, що у вузькому температурному інтервалі $\Delta T \sim 100$ К рівняння (6) будуть з великою точністю екстраполюватися прямою лінією.

Автор виражає подяку докторанту Чорноусу А.М. за обговорення змісту цієї роботи.

С.І. Проценко – аспірант кафедри прикладної фізики

- [1] Н.П. Клокова. *Тензорезисторы*. Машиностроение, М., 222 с. (1990).
- [2] З.Г. Мейксин. Несплошные и керметные пленки // *Физика тонких пленок. Том VIII*. Мир, М., сс. 106-179. (1978).
- [3] C.R. Tellier, A.J. Tosser. *Size effects in thin films. Ch. 2.*- ESPS, Amsterdam-Oxford-New-York. p. 158. (1982).
- [4] С.В. Петренко, И.Е. Проценко, В.Г. Шамоля. Эффект тензочувствительности в дисперсных металлических пленках // *Металлы*, **1**, сс. 180-186. (1989).

S.I. Procenko

About temperature dependence of the coefficient of longitudinal and transverse tensorsensitivity of metal films

Sumy State University
2 R.-Korsakov st., 40007 Sumy Ukraine
e-mail: kpf@ssu.sumy.ua

The problem of temperature dependence of the coefficient of longitudinal (Γ_1) and transverse (Γ_t) tensorsensitivity has been studied. From analysis of equations for thermal coefficient of Γ_1 and Γ_t follow that Γ_1 and Γ_t increase with temperature increase in polycrystalline and strong dispersed metal films. The values

$\frac{\partial^2 \epsilon}{\partial \epsilon_{1,t} \partial T}$ has been received.