

ПРО ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ КОМІРЧАСТОЇ СТРУКТУРИ У W-Th ДРОТІ ПРИ ЙОГО ДЕФОРМАЦІЇ

Вольфрам найбільш важкотопкий метал, що має максимальну міцність міжатомних зв'язків. Завдяки цьому він є перспективним як основа металевих жароміцних матеріалів, призначених для роботи в екстремальних умовах, коли сплави з іншими, більш легкоплавкими основами працювати не в змозі. Зокрема, з цієї причини вольфрамовий дріт використовується як волокна у високотемпературних композиційних матеріалах. Такі волокна характеризуються високими значеннями показників міцності і модуля пружності в широкому температурному діапазоні, випускаються промисловістю і мають певні переваги в порівнянні з іншими видами волокон, що мають зміцнювальні властивості. Крім того, великим споживачем вольфраму, зокрема вольфрамоторієвих сплавів, є електровакуумна промисловість. Дроти й стрічки з цих сплавів застосовуються для виготовлення найрізноманітніших деталей (тіл розжарення, пружин, гачків, катодів генераторних ламп і газорозрядних приладів), де використовують високу міцність, пружність і підвищені емісійні властивості вольфрамових сплавів з торієм.

Частинки двоокису торію в таких сплавах при рівномірному їх розподілі у вольфрамовій матриці, окрім підвищення емісійних властивостей стабілізують дислокаційну структуру, перешкоджають росту зерна, але при цьому сприяють їх розшаруванню.

Істотним недоліком вольфрамових сплавів є високий (300–600 °C) поріг холодноламкості (температури появи крихкості $T_{кр}$), що обмежує можливості використання цього металу. Згідно з даними роботи [1], однією з головних причин холодноламкості полікристалічного вольфраму є наявність атомних сегрегацій домішок впровадження й виділень надлишкових фаз по границях зерен, що різко знижує їх міцність і сприяє інтеркристалітному руйнуванню. Накопичуючись на границях зерен, елементи з малими атомними радіусами (наприклад, С й N) можуть підвищувати поріг холодноламкості вольфраму навіть при концентраціях у декілька тисячних часток відсотка.

Суттєве подолання вказаних вище недоліків, а саме зниження $T_{кр}$, можливе шляхом оптимізації технології виробництва вольфрамоторієвих сплавів.

Відповідно до теорії, що розвивається авторами роботи [2], зниження $T_{кр}$ і, відповідно, підвищення пластичності вольфраму при звичайних температурах (20 °C) може бути наслідком наклепу, при якому руйнуються плівки вторинних фаз по границях зерен та відбувається утворення комірчастої структури, яка призводить до перерозподілу домішок впровадження по границях комірок та зерен металу. Так, у металокерамічному молібденовому сплаві TZM (аналогу вольфрамових порошкових матеріалів), збільшення ступеня деформації до 95 % сприяє зниженню температури крихкості до від'ємних температур і підвищенню відносного подовження при звичайній температурі (до 15 %). Що ж стосується вольфраму, то його крихкість виражена ще сильніше у зв'язку з більш низькою розчинністю елементів впровадження (у порівнянні з молібденом), і при цьому крихкість обумовлена тією ж причиною – утворенням неміцних, слабо зв'язаних з матрицею фаз впровадження, а також оксидів вольфраму, які послабляють границі зерен.

Практичний досвід авторів даної роботи, накопичений при виробництві металокерамічного вольфрамового дроту, також свідчить про те, що зі збільшенням ступеня деформації вольфрамової заготовки волочінням, підвищується її відносне подовження при звичайній температурі (20 °C).

В. І. Трефілов зі співробітниками [3] запропонував рівняння, яке пов'язує дійсні напруження деформаційного процесу з параметрами структури

$$\sigma = \sigma'_y + K_3 \cdot \frac{0,2 \cdot G^2 \cdot b \cdot \sqrt{e_2}}{K_1^2 \cdot d_a}, \quad (1)$$

де $\sigma'_y = \sigma_y + (K_1 - K_2) \cdot \sqrt{e_1} + (K_2 - K_3) \cdot \sqrt{e_2}$; σ_y – напруження початку макроскопічного плину; K_1 , K_2 , K_3 – коефіцієнти деформаційного зміцнення трьох нелінійних стадій; e_1 – критична деформація, що відповідає кінцю стадії однорідного розподілу дислокацій; e_2 – критична деформація, що відповідає початку формування комірчастої структури; G – модуль зсуву; b – вектор Бюргерса; d_a – розмір комірчастої структури.

Відповідно до рівняння [1] розмір d_a змінюється обернено пропорційно квадратному кореню з деформації, а напруження плину на третій (параболічній стадії) – обернено пропорційно середньому розміру комірок. З іншого боку, цілеспрямовано змінюючи параметри, що входять у зазначене рівняння, можна впливати, деякою мірою, на величину комірок і у такий спосіб, зокрема, змінювати значення $T_{кр}$. Тому у відповідності зі зазначеними припущеннями було експериментально вивчено вплив вказаних причин на структуру вольфрамоторієвих сплавів, склад яких наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад досліджених сплавів, % мас.

Марка сплаву	ThO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Mo
ВЧ	–	0,0015	0,0020	0,002	0,002	0,004
ВТ-7	0,5	0,0014	0,0019	0,002	0,002	0,003
ВТ-10	1,0	0,0016	0,0017	0,001	0,001	0,006
ВТ-15	1,5	0,0011	0,0015	0,003	0,003	0,005

Для введення частинок двоокису торію застосовували метод просочення [4] який дозволяє створити відповідний градієнт концентрації, який збільшується від серцевини до поверхні штабіка і тим самим забезпечується закриття пор при спіканні від серцевини штабіка до його поверхні, що, у свою чергу, дає можливість видалятися оксидам у процесі високотемпературного спікання.

Спікання штабиків здійснювали на модернізованих апаратах

ЦЭП 223А. Швидкість нагрівання при остаточному спіканні (зварюванні) штабиків кожного сплаву визначали користуючись попередньо побудованими залежностями між швидкістю підвищення температури і їх густиною [3]. Інші технологічні параметри виробництва штабиків визначали за допомогою математичної моделі, отриманої у роботі [4].

Після зварювання штабіки кували на ротаційних машинах до діаметра 2,75 мм. З отриманих прутків виготовляли зразки для випробування на розтяг. Його здійснювали при підвищених температурах на машині FM-1000 зі швидкістю 10^{-3} с^{-1} .

Закономірності зміни дислокаційної структури, що відбувається у вольфрамових сплавах у процесі деформації при різних температурах, досліджували, використовуючи перебудову машинних діаграм у координатах $S - e^{1/2}$ за методикою [3].

Дослідження виконували в області рівномірної деформації. Вважали, що об'єм металу при деформації у вказаній області є майже постійним. Істинну поточну деформацію зразків визначали за виразом

$$e = \ln(1 + \varepsilon), \quad (2)$$

де ε – відносна рівномірна деформація.

Істинні напруження визначали за формулою

$$S = S_{icm} = P_i / F_i = \frac{P \cdot (1 + \varepsilon)}{F_0}, \quad (3)$$

де P_i – поточне значення навантаження; F_i , F_0 – відповідно поточне і вихідне значення площі поперечного перерізу зразка.

При цьому, щоб користуватися машинними діаграмами для дослідження зміни структури в процесі пластичної деформації, провели співставлення результатів, отриманих при випробуванні окремих зразків, розтягнутих до різних значень деформації, і перебудованих машинних кривих у координатах $S - e^{1/2}$. Для цього на перебудовані машинні криві нанесли значення істинних напружень і деформацій, отриманих при випробуванні вказаних окремих зразків. Подовження на цих зразках вимірювали, наносячи мітки на робочу частину кожного окремого зразка. У результаті проведеного дослідження отримали залежність істинних нормальних напружень від істинних деформацій за машинною кривою та за випробуваннями зразків. При цьому встановили, що в границях експериментальних похибок точки, які характеризують подовження зразків при відповідних напруженнях, розташовані на перебудованій машинній діаграмі, а це свідчить про можливість використовувати такі діаграми без залучення інших способів вимірювання видовження зразків при їх розтягуванні.

За вказаною методикою було досліджено вплив температури випробування, концентрації окису торію та розміру зерна на кінетику зміцнення даних сплавів. Це дозволило виявити в області однорідної деформації дві прямолінійні ділянки, на границях яких відбувається зміна коефіцієнта деформаційного зміцнення. За даними В. І. Трефілова першій ділянці відповідає зона рівномірного розподілення дислокацій; другій – зона утворення дислокаційних накопичень з подальшим їх перетворенням у комірчасту структуру.

Залежності між істинними напруженнями (S) і істинними деформаціями в степені $1/2$ (\sqrt{e}), отримані при випробуванні вольфрамоторієвого сплаву ВТ-7 при різних температурах, подані на рисунку 1.

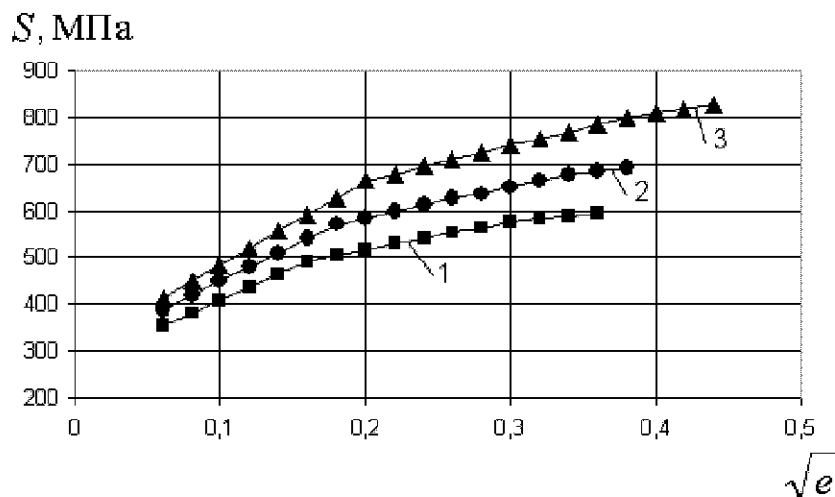


Рис. 1. Вплив температури випробування на залежності між істинними напруженнями та істинними деформаціями для сплаву VT-7: 1 – 1000 °С; 2 – 900 °С; 3 – 800 °С

Як витікає із приведених графіків, підвищення температури випробування призводить до зменшення коефіцієнта деформаційного зміцнення. Зменшуються критичні деформації e_1 , при яких відбувається зміна коефіцієнта деформаційного зміцнення, що, ймовірно, пов'язано з переходом від відносно однорідного розподілу дислокацій до утворення дислокаційних накопичень [3]. Тобто, чим вище температура, тим легше утворюється комірчаста структура (при менших деформаціях).

На рисунку 2 наведено графіки, що описують вплив концентрації ThO_2 у вольфрамовому сплаві на процес його деформації при температурі 1000 °С.

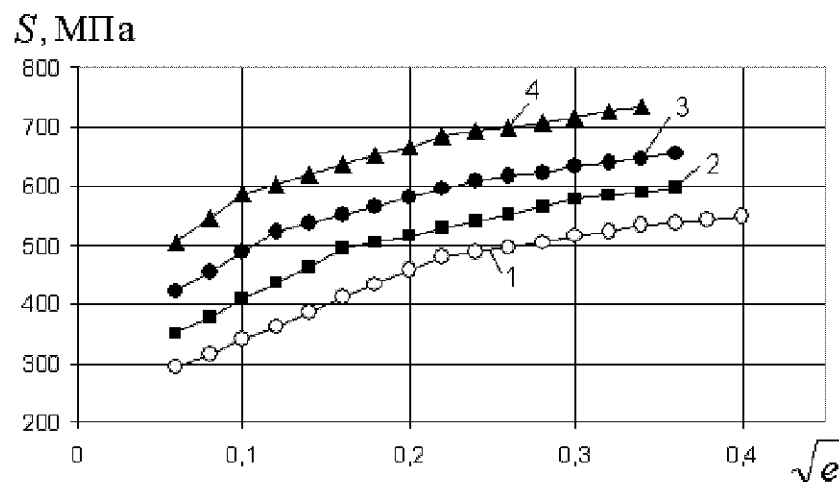


Рис. 2. Вплив концентрації ThO_2 у вольфрамовому сплаві на залежності між істинними напруженнями й істинними деформаціями при температурі випробування 1000 °С: 1 – ВЧ; 2 – VT-7; 3 – VT-10; 4 – VT-15

Як видно з даного рисунка, зі збільшення вмісту ThO_2 у сплавах підвищуються коефіцієнти зміцнення і зменшується значення деформації e_1 . Дані результати можна пояснити тим, що зі збільшенням кількості частинок двоокису торію швидше у часі утворюється комірчаста структура, оскільки дані частинки, ймовірно, є центрами локалізації дислокацій, що, мабуть, і є причиною утворення комірчастої структури.

Залежності між істинними напруженнями (S) і істинними деформаціями в степені $1/2$ отримані при випробуванні зразків з вольфрамового сплаву ВЧ із середнім розміром зерен 82 мкм та 24 мкм представлені на рисунку 3.

Відповідно до наведених результатів (рис. 3) випробувань зазначених зразків збільшення розміру зерна підвищує ступінь деформації, необхідний для формування дезорієнтованих комірчастих структур. Оскільки у сплаві з розміром зерна 82 мкм вільний пробіг дислокацій, більший ніж у сплаві з розміром зерна 24 мкм.

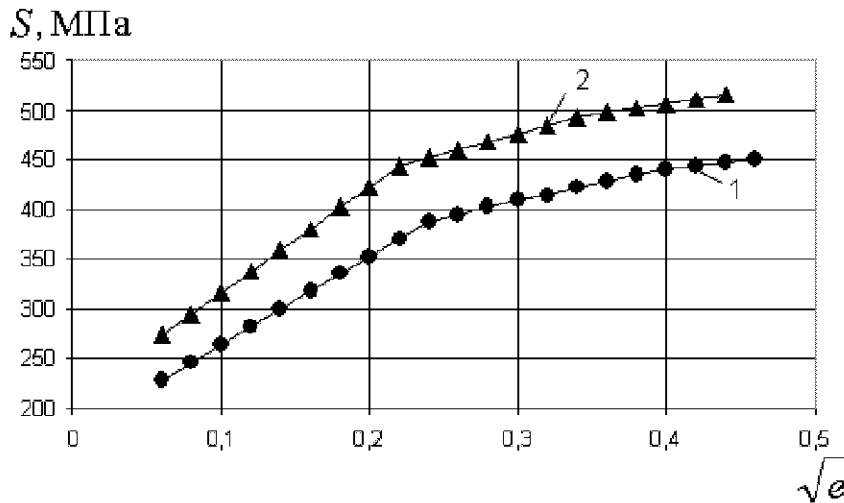


Рис. 3. Вплив розміру зерна у вольфрамовому сплаві ВЧ на залежності між істинними напруженнями і істинними деформаціями при температурі випробування 800 °С: 1 – \varnothing 82 мкм; 2 – \varnothing 24 мкм

Отже встановлено, що для вольфрамоторієвих сплавів підвищення температури випробування спричиняє зміни у дислокаційній структурі з подальшим утворенням комірчастої структури.

На основі аналізу впливу концентрації оксиду торію у вольфрамовому сплаві визначено, що швидкість утворення комірчастої структури підвищується зі збільшенням вмісту оксиду торію. Вважається, що частинки ThO_2 є центрами локалізації дислокацій і тому можуть сприяти утворенню комірчастої структури.

У результаті досліджень впливу розміру зерна у вольфрамових сплавах показано, що дрібне зерно полегшує утворення комірчастої структури, передусім завдяки зменшенню довжини вільного пробігу дислокацій з поступовим перетворенням утворюваних при цьому накопичень у границі комірок.

Список літератури

1. Савицкий Е. М. Металловедение сплавов тугоплавких и редких металлов / Е. М. Савицкий, Г. С. Бурханов. – М.: Наука, 1971. – 356 с.
2. Трефилов В.И. Фирстов Физические основы прочности тугоплавких металлов / В. И. Трефилов, Ю. В. Мильман, С. А. Фирстов. – К.: Наук. думка, 1975. – 316 с.
3. Деформационное упрочнение и развитие дислокационной структуры в поликристаллических ОЦК-металлах / [В. И. Трефилов, В. Ф. Моисеев, Э. П. Печковский и др.] // Металлофизика. – 1986. – Т. 8. – № 2. – С. 89–96.
4. Виниченко В. С. Исследование возможности использования присадки двуокиси тория методом пропитки в производстве торированных вольфрамовых сплавов / В. С. Виниченко, В. Е. Ольшанецкий, А. В. Ткаченко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2010. – № 2. – С. 95–99.
5. Исследование влияния технологии производства штабиков на склонность проволоки из торированных вольфрамометаллических сплавов к расслаиванию / [Виниченко В. С., Кононенко Ю. И., Ольшанецкий В. Е., Орлов М. Р.] // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2004. – № 1. – С. 84–88.
6. Виниченко В. С. Исследование влияния структуры на свойства вольфрамометаллического сплава ВР10Т2 / В. С. Виниченко, В. Е. Ольшанецкий, Т. М. Кесаев // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2004. – № 2. – С. 34–37.

Одержано 26.03.2012

© Канд. техн. наук В. С. Вініченко, д-р техн. наук В. Ю. Ольшанецкий, М. М. Перепьолкіна

Національний технічний університет, м. Запоріжжя

Vinichenko V., Ol'shanetskiy V., Perepiolkina M. About the features of forming of cellular structure in W-Th wire during its deformation