

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
АВТОМОБІЛЬНО – ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ**

ЯЩЕРЩИН Євген Володимирович



УДК 669.017.621.763

**СТРУКТУРА ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БАГАТОШАРОВИХ
КОМПОЗИТІВ МІДЬ –ТАНТАЛ, ОТРИМАНІХ МЕТОДОМ ДИФУЗІЙНОГО
ЗВАРЮВАННЯ**

05.02.01 – матеріалознавство

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків –2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі “Матеріалознавства” Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук, доцент

Терлецький Олександр Семенович, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, доцент кафедри “Матеріалознавства”.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Береснєв В’ячеслав Мартинович,
Науковий фізико-технологічний центр МОН
та НАН України, м. Харків

доктор фізико-математичних наук, старший
науковий співробітник

Соколенко Володимир Іванович,
завідуючий відділом “Фізика твердого тіла і
конденсованого стану речовини ”
ІНЦ “Харківський фізико-технічний інститут ”, м. Харків

Захист відбудеться “28” жовтня 2010 року о “____” годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.059.01 в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті за адресою:
61002, м. Харків, вул. Петровського, 25.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

Автореферат розісланий “____” вересня 2010 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради



Кияшко І.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток сучасної техніки вимагає розробки матеріалів, які б забезпечували підвищення тепло- й електропровідності в поєднанні з високими механічними характеристиками не тільки при кімнатній, але і при підвищених температурах, бажано – з невисокою вартістю виробництва. Таке поєднання властивостей необхідно для дрібних конструкційних та струмопровідних деталей електронних приладів, шин в електротехніці, теплопровідних покриттів формують поверхонь прес-форм для виготовлення пластмасових виробів. Одним з шляхів вирішення цієї наукової задачі є створення шаруватих композиційних матеріалів (ШКМ) на основі міді. Найчастіше як зміцнювальні шари використовуються тугоплавкі метали: вольфрам, молібден, реній, тантал, ніобій та інші. При цьому перевагу бажано віддавати металам, які практично нерозчинні в міді, пластичні при кімнатній температурі, а їхні хімічні сполуки нешкідливі для людини. Таке оптимальне поєднання властивостей має тантал, оскільки він хоча і дещо програє по температурі плавлення W, Os, Re, але є найбільш пластичним з усіх тугоплавких металів певної чистоти, а його сполуки, як і він сам, належать до нетоксичних. Відомий раніше волокнистий композит Cu-Ta виготовляли методом просочення, що є енерго-містким (потрібно розплавлення міді), трудомістким, а отже – неекономічним. Тому для вдосконалення технології одержання ШКМ Cu-Ta запропоновано менш складний метод – дифузійне зварювання фольги міді і танталу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Результати досліджень, що склали певну частину дисертаційної роботи, отримані при виконанні науково-дослідних робіт на кафедрі “Матеріалознавство” НТУ “ХП” в рамках держбюджетної тематики: д/б НДР № Т2012 “Функціональні властивості конденсованих у вакуумі дисперснозміцнених та багатошарових композитів з компонентами, які не розчиняються в твердому стані, та оптимізація їх параметрів в інтервалі температур застосування” № ДР0103U005319 та № Т2014 “Фізико-механічні та функціональні властивості конденсованих у вакуумі композиційних матеріалів з нанодисперсною структурою в інтервалі температур” № ДР0103U001494.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка технологічних параметрів створення багатошарових композитів мідь-тантал з високими механічними та провідниковими властивостями шляхом дифузійного зварювання.

Для досягнення поставленої мети виникла необхідність у вирішенні таких основних задач:

- вибір металу проміжного (між міддю та танталом) шару та методів виготовлення мідних та проміжних шарів;
- встановлення технологічних параметрів дифузійного зварювання, які забезпечували б надійний адгезійний зв'язок між Cu та Ta;
- визначення впливу газонасичення танталу при виготовленні композитів та відносної глибини дифузійного шару між нікелем та міддю на механічні властивості композитів Cu-Ta;

- дослідження особливостей руйнування шаруватих композитів мідь-тантал;
- визначення залежності механічних, в тому числі – релаксаційних, властивостей цих ШКМ від вмісту Та й кількості прошарків мідної фольги в кожному з шарів міді з метою їх оптимізації при кімнатних та високих температурах; виконання контролю провідникових властивостей композитів.

Об’єкт дослідження. Об’єктом дослідження є розробка технології виготовлення, оптимізація структури та механічних властивостей багатошарових композитів на мідній основі, отриманих шляхом дифузійного зварювання.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є багатошарові композити системи мідь-тантал.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети використовувалися такі методи:

- оптична та електронна мікроскопія для дослідження структури складових шарів та композитів;
- рентгенівський та рентгено-флюоресцентний методи для аналізу інтенсивності дифузійних процесів при зварюванні та компонентного складу зони дифузійного зварювання;
- механічні випробування для визначення властивостей ШКМ Cu-Ta і їхніх компонентів в режимах розтягання з постійною швидкістю і релаксації напружень при 20 і 600⁰C;
- виміри мікротвердості фольги та вакуумних конденсатів Cu і фольги Та за стандартною методикою на приладі ПМТ-3;
- контроль електропровідності ШКМ Cu-Ta методом чотирьох–точкового зонду.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Встановлені закономірності процесів деформування композитів багатошарової системи мідь-тантал при досліджених температурах (20 та 600⁰C), концентраціях (1 ÷ 25 % Та) та режимах деформування (розтягання та релаксація напружень) залежно від об’ємної долі Та. Показано, що зміна механічних властивостей для ШКМ Cu-Ta не відповідає відомій схемі для односпрямованого композита з пластичною матрицею та крихким зміцнювачем.

2. Визначено, що відносне звуження мідної матриці в зоні руйнування композитів при 20⁰C в усьому дослідженому інтервалі об’ємної концентрації танталу (1 ÷ 25 %) не змінюється та вдвічі менше у порівнянні з міддю у вільному стані, для якої це значення складає 80 %. Запропоновано трактування цього ефекту на основі різних термопружних властивостей складових шарів ШКМ.

3. Встановлено новий проміжний тип діаграми розтягування (в інтервалі 7÷11 % Та), який, поряд з традиційним пилкоподібним та лінійним видами, що характерні для ШКМ з пластичною матрицею та крихким волокном, реалізується в композитах Cu-Ta як при 20 так і при 600⁰C.

4. Виявлено, що при підвищенні температури випробування композитів Cu-Ta від 20 до 600⁰C для пилкоподібного типу діаграм розтягання характерно зниження пластичності, а для проміжного та лінійного типів – її збільшення, в той час як у

більшості ШКМ характер зміни пластичності для традиційного виду діаграм однаковий. Запропоновано трактування ефекту, яке враховує роль локалізованої деформації міді поблизу тріщин у танталі.

5. Вперше встановлений немонотонний характер концентраційної залежності релаксаційної стійкості композитів при 600⁰С. Дається трактування цього явища, згідно якого зі зростанням об'ємного вмісту танталу підвищується релаксаційна стійкість, а збільшення при цьому відносної глибини дифузійного шару в мідній матриці знижує релаксаційну стійкість.

Практична цінність роботи:

1. Запропонований новий і менш затратний спосіб виготовлення багат шарових композитів мідь-тантал та розроблені технологічні параметри їх дифузійного зварювання через прошарок нікелевої фольги (час зварювання, тиск на шари при зварюванні, ступінь вакууму).

2. Виявлено, що в досліджуваних композитах в інтервалі об'ємного вмісту танталу від 2,8 до 11,1 % досягається оптимальне поєднання низькотемпературної та високотемпературної міцності й пластичності, а також електропровідності.

3. Надані рекомендації по реалізації додаткового зміцнення при меншому об'ємному вмісті танталу, - починаючи з 1%. Зокрема, при промисловому виробництві перспективних шаруватих композитів Cu-Ta пропонується застосовувати фольги міді товщиною не 45-50, а 300 мкм. Наведені рекомендації ефективні при використанні у виробництві струмонесучих конструкційних матеріалів, жароміцних елементів конструкцій, теплопровідних покриттів поверхонь прес-форм для виготовлення пластмасових виробів.

Особистий внесок здобувача:

– розробив та обґрунтував технологічний процес виготовлення шаруватих композитів мідь-тантал методом дифузійного зварювання через прошарок нікелевої фольги [1, 2, 3, 4, 7, 9];

– виявив ефект додаткового зміцнення ШКМ мідь-тантал при 20 та 600⁰С [3, 8];

– дослідив електропровідність ШКМ Cu-Ta та їх складових [10];

– встановив зниження відносного звуження мідної матриці в складі ШКМ мідь-тантал у порівнянні з вільним станом міді [3, 5, 6];

– визначив наявність проміжного типу діаграм розтягування у композитах, що вивчаються, при кімнатній температурі [3];

– виявив немонотонну залежність релаксаційної стійкості ШКМ мідь-тантал при 600⁰С та виявив причини цього явища [11].

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідалися й обговорювалися на п'яти конференціях: Міській науково-методичній конференції “Техносфера та її безпека”, 15 жовтня 2003 р., м. Харків, НТУ “ХПІ”; ХЛП Международной конференции “Актуальные проблемы прочности”, 26-29 мая 2004 г., Россия, г. Калуга; XIV Міжнародній науково-практичній конференції “Інформаційні технології (наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я)”, MicroCaD – 2006, 18-19 травня 2006 р., м. Харків, НТУ “ХПІ”; 6-ій науково-методичній конференції “Безпе-

ка життєдіяльності”, 7–8 грудня 2006 р., м. Харків, НТУ “ХПІ”; 8-й науково-методичній конференції “Безпека життєдіяльності”, 4–5 грудня 2008 р., м. Харків, НТУ “ХПІ”.

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковані в одинадцяти наукових працях (6 статей у фахових журналах і збірниках наукових праць, 1 патент України на корисну модель, 4 тези доповідей міжнародних конференцій).

Структура і обсяг роботи. Дисертація містить: вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел (134 найменування) і один додаток. Повний обсяг дисертації складає 161 сторінку. Основна частина викладена на 129 сторінках тексту і містить в тому числі 69 рисунків і 24 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність теми дослідження, його наукова новизна і практична цінність, сформульовано мету і завдання дослідження, наведено основні наукові результати, одержані здобувачем, показано їх практичне значення.

У першому розділі «Стан питання та задачі дослідження» міститься аналіз найбільш значущих робіт, присвячених існуючим волокнистим та багатошаровим композитам на основі міді, методам їх отримання, перевагам та недолікам у порівнянні одне з іншим. На основі відомих даних про властивості міді й танталу у вільному стані, їх взаємодії між собою встановлено, що використання цих металів як компонентів шаруватого композита приведе до отримання в композиті оптимального поєднання міцності й пластичності. Відомий волокнистий композит мідь-тантал виготовляється методом просочення, котрий є енергоємним (потрібно розплавлення міді), трудомістким, а отже, – витратним. Тому були розглянуті інші методи виготовлення композитів для вибору серед них оптимального (динамічне гаряче пресування, зварювання вибухом, дифузійне зварювання).

З метою вивчення механізмів, які приводять до найбільшого ефекту зміцнення в шаруватих композитах на основі міді, розглянуто їх механічні властивості при кімнатній та підвищених температурах, а також динаміку процесу руйнування.

У другому розділі «Методика дослідження» розглянуті методики виготовлення шаруватих композитів мідь-тантал та дослідження структури і механічних властивостей композитів і складових їх матеріалів. При вдосконаленні технології виготовлення ШКМ застосовували фольги та конденсати міді. Останні були отримані методом електронно-променевого випаровування при температурі підкладки 80–90⁰С.

Основною технологією виготовлення багатошарових композитів мідь-тантал у представлений дисертації є дифузійне зварювання шарів фольг Cu і Та через прошарок нікелевої фольги.

Технологічними параметрами цього процесу є: температура – 1000⁰С, тривалість – 1 година, тиск у пристосуванні – близько 40 МПа і вакуум $\sim 1,3 \cdot 10^{-2}$ Па. Структурно всі композити складалися з трьох шарів міді, чотирьох шарів нікелю і двох шарів танталу (рис. 1).

За цією технологією були отримані сім партій композиційних матеріалів Cu-Ta (з шаром фольги Ni між міддю та танталом):

- 1) 1% Ta; 1,8 % Ni; 97,2 % Cu.
- 2) 2,8% Ta; 4,8 % Ni; 93,2 % Cu.
- 3) 7% Ta; 10 % Ni; 83 % Cu.
- 4) 11,1 % Ta; 22,2 % Ni; 66,7 % Cu.
- 5) 12,4 % Ta; 20,8 % Ni; 66,8 % Cu.
- 6) 15,8 % Ta; 24,4 % Ni; 59,8 % Cu.
- 7) 25 % Ta; 22,7 % Ni; 52,3 % Cu.

Об'ємний вміст компонентів у композитах регулювався товщиною шарів міді. Для

виготовлення цих партій композитів використовувалася наклепана мідна фольга металургійного виробництва товщиною 45мкм і чистотою 99,96 %. Для одержання потрібної об'ємної долі складових з неї набиралися пакети, або вона проковчувалася до необхідної товщини. Товщина фольги Та чистотою 99,99 % складала 15 мкм. Нікелева фольга товщиною 10 мкм і чистотою 99,98 % була отримана холодною прокаткою зливків нікелю з проміжними рекристалізаційними відпалами при 900⁰С.

Для дослідження мікроструктури фольги міді, нікелю, танталу, композитів мідь-тантал, визначення середнього розміру зерен, розмірів тріщин у композитах, якості дифузійного зварювання використовувався мікроскоп МИМ-7 та растровий електронний мікроскоп РЭММА-101. Для визначення періоду ґратки шарів нікелю і танталу, що знаходилися в композиті, було проведено їхнє дослідження на установці ДРОН-3. Оцінка вмісту нікелю в шарах танталу й танталу в шарах нікелю здійснювалась за допомогою рентгено-флюоресцентного методу на приладі СПРУТ-4.

Механічні випробування фольги танталу, міді, нікелю і ШКМ мідь-тантал при кімнатній температурі здійснювали в режимі розтягання з відносною швидкістю $3 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ і релаксації напружень на мікромашині оригінальної конструкції (жорсткість $3 \cdot 10^7 \text{ Н/м}$) для випробувань фольги, плівок, а також на універсальній установці TIRATEST-2200 (жорсткість $8 \cdot 10^9 \text{ Н/м}$).

При підвищених температурах випробування в режимах розтягання і релаксації напружень здійснювали на мікромашині (жорсткість $\sim 5 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$) при температурі 600⁰С, вакуумі $\sim 10^{-2} \text{ Па}$. Для випробувань в режимі розтягання і релаксації напружень, відповідно до ГОСТ 1497-84 та ГОСТ 11701-84, використовували плоскі зразки другого типу. Після випробувань досліджуваних матеріалів у режимі розтягання за первинними діаграмами визначали значення $\sigma_{0,05}$; $\sigma_{0,2}$; σ_B та δ .

Вивчення досліджуваних матеріалів у режимі релаксації напружень при розтяганні проводили таким чином: перша крива знімалася при деформаціях зразка близьких 0,05 %, кількість наступних кривих залежала від пластичності матеріалу. Отримані дані дозволили одержати залежності швидкості релаксації від часу і



Рис. 1. Структурна будова ШКМ Cu-Ta (11,1%Ta): 1- шар міді; 2 - шар танталу; 3 - шар нікелю

поточного напруження.

Виміри мікротвердості здійснювали на приладі ПМТ-3 за стандартною методикою при навантаженнях 0,49 Н для фольги Cu та 0,196 Н для фольги Ta.

Для вимірювання електричного опору ШКМ Cu-Ta та їх компонентів використовували метод чотирьох-точкового зонду при послідовному розташуванні зразка та еталонного резистора.

У третьому розділі «Дослідження структури та механічних властивостей компонентів ШКМ мідь – тантал у початковому та відпалених станах» розглянуто вплив відпалів на структуру і механічні (у тому числі релаксаційні) властивості складових ШКМ у вільному стані, який для них був нерівноважним. Це дозволяло прогнозувати властивості складових шарів після виготовлення композитів, провести аналіз переваг відповідних складових за такими параметрами як міцність та структурна стабільність, а в подальшому – з урахуванням їх адгезійного зв'язку.

Порівняння структурної стабільності фольги та вакуумних конденсатів Cu, фольги Ni, Ta. Дослідження структурної стабільності фольги Cu виявило, що після їхнього відпалу в інтервалі $300\div 1000^{\circ}\text{C}$ через протікання процесів первинної і збиральної рекристалізації розмір зерна зазнає істотних змін і після відпалу при 1000°C досягає понад 70 мкм. У вакуумних конденсатах Cu (температура підкладки $\sim 80\div 90^{\circ}\text{C}$), які, як передбачалось, будуть мати кращий адгезійний зв'язок із складовими шарами, лише після проведення відпалу при 900°C в результаті активного протікання збиральної рекристалізації розмір зерен зростає до $\sim 4,5$ мкм. Таким чином, вакуумні конденсати Cu мають більш високу структурну стабільність у порівнянні з фольгою Cu, що, імовірно, пов'язано з впливом залишкових газів (O_2 , N_2) при отриманні конденсатів. Більш тугоплавка, у порівнянні з фольгою Cu, фольга Ni товщиною 10 мкм після відпалу при 1000°C має менший розмір зерна – 42 мкм.

Фользі танталу притаманна у досліджуваному інтервалі температур (до 1300°C) набагато вища структурна стабільність. Окрім тугоплавкості, на неї істотно впливає мікроструктура у стані постачання та чистота. Для досліджень були використані як чисті фольги танталу (99,99 % Ta), так і такі, що містили ніобій (99,47 % Ta, 0,53 % Nb) для поліпшення, як передбачалось, адгезійного зв'язку між шарами ШКМ. Так, мікроструктура фольги танталу чистотою 99,47 % у стані постачання складалася як з нових рекристалізованих, так і старих деформованих зерен. Тільки після відпалу при 1000°C відбувається повне заміщення деформаційної структури новими рекристалізованими зернами. Мікроструктура фольги танталу чистотою 99,99 % у стані постачання складалася з практично рівноосних зерен, що говорить про завершення в ній первинної рекристалізації, тому мікроструктура фольги не зазнала помітних змін аж до відпалу при 1300°C .

Міцність компонентів ШКМ Cu-Ta. Вибір компонентів залежить від їх механічних властивостей, зокрема – при кімнатній температурі. Так, наклепана мідна фольга та вакуумні конденсати у початковому стані мали високі властивості міцності (σ_{B} дорівнювала ~ 500 МПа та ~ 300 МПа відповідно), але при цьому ж – низьку пластичність ($\delta \sim 0,5$ %). У відпаленому при 900°C стані механічні властивості обох

матеріалів практично вирівнюються ($\sigma_B \sim 100$ МПа, $\delta \sim 10$ %). Отже, з огляду на цю обставину, а також більш складну технологію виготовлення вакуумних конденсатів, фольги Cu в якості матриці ШКМ вже мали перевагу. Нікель, який використовувався як прошарок між Cu і Ta через необмежену розчинність у Cu й обмежену – до 3 % у Ta, після відпалу при 1000°C мав $\sigma_B \sim 133$ МПа, $\delta \sim 11$ %.

Дослідження двох партій танталу, різних за чистотою і структурним станом, після відпалів в інтервалі $400\text{--}1300^\circ\text{C}$ й вакуумі $\sim 10^{-2}$ Па показало помітну відмінність їхніх механічних властивостей. Так, дослідження фольги Ta (99,47 %) свідчили, що спостерігається зростання характеристик міцності аж до максимальної температури відпалу 1000°C ($\sigma_B \sim 1150$ МПа), пластичність при цьому знижується до $\sim 0,3$ %. В свою чергу, у фольги Ta (99,99 %) властивості міцності ведуть себе аналогічно тільки до відпалу при 800°C ($\sigma_B \sim 910$ МПа). Після цього (1000°C) відбувається різкий спад міцності ($\sigma_B \sim 300$ МПа), і пластичність падає практично до нуля. Настільки вражаючі відмінності обумовлені тим, що у фользі Ta (99,47 %) первинна рекристалізація не завершилася на відміну від більш чистої фольги. Тому розмір зерна в них був у кілька разів більше, ніж у фользі (99,99 %). Це привело до того, що домішки в процесі газонасичення при відпалах у фользі Ta (99,47 %) розміщувались рівно-мірніше, та ставали крихкими менше, ніж фольги Ta (99,99 %).

Релаксаційні властивості компонентів ШКМ мідь-тантал. Релаксаційні властивості досліджувалися як у зоні пружних, так і розвинутих пластичних деформацій. Релаксація напруження оцінювалася через відносне падіння напруження релаксації $\Delta\sigma_i$, а також швидкість релаксації. Дослідженнями релаксаційної стійкості фольги і вакуумних конденсатів Cu було показано, що в цілому фольги міді мають вищу релаксаційну стійкість, ніж вакуумні конденсати, що пояснюється більш крупним зерном у фользі після відпалів при 300 і 600°C , яке не дозволяє реалізовуватися механізму зернограничного ковзання. Після відпалів у 900°C релаксаційна стійкість цих матеріалів стає більш близькою, що пояснюється укрупненням зерен в останніх через протікання збиральної рекристалізації. На релаксаційну стійкість фольги Ta як чистотою 99,99 %, так і 99,47 % помітно впливало газонасичення при відпалах, яке із підвищенням температури збільшується. Внаслідок цього спостерігається підвищення релаксаційної стійкості у порівнянні з вихідним станом. При цьому у фользі Ta (99,47 %) через протікання рекристалізації вищезгадана характеристика зростала повільніше, ніж у більш чистої фользі (99,99 % Ta). Релаксаційну стійкість фольги Ni вивчали після відпалів при 1000°C , по цій властивості вона займає проміжне місце між фольгою, вакуумними конденсатами Cu та фольгою Ta.

Спираючись на результати, отримані в третьому розділі, було встановлено, що в якості основних компонентів композита мідні фольги й фольги танталу (99,99 %) мають певну перевагу перед вакуумними конденсатами міді і фольгою Ta (99,47 %).

У четвертому розділі «Дослідження механічних та провідникових властивостей ШКМ мідь – тантал» наведені результати дослідження структури і механічних властивостей ШКМ Cu-Ta з різною схемою утворення адгезійного зв'язку складових при температурах 20 і 600°C .

Дослідження ШКМ Cu-Ta без шарів Ni. Окрім вибору основних складових шаруватих композитів Cu-Ta, проводився також порівнювальний аналіз для різних схем

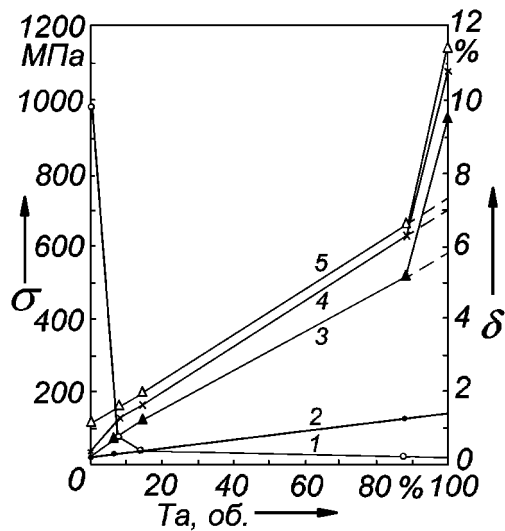


Рис. 2. Залежність механічних властивостей ШКМ Cu-Ta (без нікелевих прошарків) від об'ємної частки танталу: 1 – відносне подовження δ ; 2 – розрахункова границя пружності $\sigma_{0,05розр}$; 3 – експериментальна границя пружності $\sigma_{0,05}$; 4 – умовна границя текучості $\sigma_{0,2}$; 5 – границя міцності σ_B

будови і особливостей технології їх одержання. Так, була досліджена можливість дифузійного зварювання міді і танталу без прошарку нікелевої фольги. Для цього були отримані ШКМ Cu-Ta з матрицями із фольги і вакуумного конденсату міді, в яких була однакова об'ємна доля Ta – 18 %. Дослідження їх механічних властивостей показали, що композити з матрицею із фольги Cu по $\sigma_{0,05}$, $\sigma_{0,2}$, σ_B відрізняються мало, а по відносному подовженню δ та адгезії, яку оцінювали по відносній долі розшарування після механічних іспитів, перевищують композити з матрицею з вакуумного конденсату Cu. Тому в подальшому при виготовленні ШКМ Cu-Ta (окрім ШКМ з 88 % Ta) всі композити виготовляли з матрицями із мідної фольги. Для досягнення задовільної адгезії між міддю та танталом використовували фольги Ta (99,47 % Ta, 0,53 % Nb) та збільшили термін дифузійного зварювання до двох

годин, щоб забезпечити дифузію ніобію в мідь. Аналіз експериментальних залежностей механічних характеристик від об'ємної долі зміцнювача (рис. 2) показав відсутність характерного для ШКМ із пластичною матрицею і крихким волокном падіння міцності із точкою мінімуму, що обумовлено тим, що точка V_{min} знаходиться в області концентрацій, менших 7,5 % танталу.

Для порівняння експериментальних значень $\sigma_{0,05}$ і відповідних теорій був проведений розрахунок на підставі співвідношення адитивності. При цьому використовувалося припущення, що в силу низького рівня $\sigma_{0,05}$ фольги Cu в порівнянні з Ta, пластична деформація композитів до 0,05 % обумовлена тільки міддю. Отже, відносну пружну деформацію танталу можна оцінити як:

$$\varepsilon_{пр} = \varepsilon_{пр Cu} + \varepsilon_{0,05 Cu} = \sigma_{0,05 Cu} / E_{Cu} + 5 \cdot 10^{-4}, \quad (1)$$

де $\varepsilon_{пр}$ – пружна деформація Ta; $\varepsilon_{пр Cu}$ – пружна деформація міді на границі пружності; $\varepsilon_{0,05 Cu}$ – пластична деформація міді на границі пружності ($5 \cdot 10^{-4}$); $\sigma_{0,05 Cu}$ – границя пружності міді після відпалу (1000°C); E_{Cu} – модуль нормальної пружності міді.

Далі, використовуючи співвідношення адитивності, можна записати :

$$\sigma_{0,05\text{розр}} = \sigma_{0,05\text{Cu}} \cdot f_{\text{Cu}} + \varepsilon_{\text{пр}} \cdot E_{\text{Ta}} \cdot f_{\text{Ta}}, \quad (2)$$

де $\sigma_{0,05\text{розр}}$ - розрахункова границя пружності композитів; E_{Ta} – модуль нормальної пружності танталу; f_{Cu} , f_{Ta} – об'ємний вміст міді і танталу відповідно.

Отримані на підставі цієї формули оцінки $\sigma_{0,05\text{розр}}$ показали, що експериментальні значення $\sigma_{0,05}$ суттєво перевершують розрахункові. Ця розбіжність викликана спільною дією таких факторів: більш високими значеннями $\sigma_{0,05}$ міді в складі композиту; складним напруженим станом, у якому знаходяться складові композита; структурним станом і наявністю домішок у танталі.

Адгезійний же зв'язок складових шарів, як і в раніше розглянутих композитах, був явно недостатнім, що призвело до необхідності подальшого удосконалювання технології виготовлення композитів мідь-тантал, тобто використання нікелевого прошарку між шарами основних компонентів і застосування фольги танталу чистотою 99,99 % для посилення адгезійного зв'язку.

Дослідження ШКМ мідь-тантал з прошарками нікелю при кімнатній температурі. Ефективність дифузійного зварювання міді і танталу через нікелевий прошарок була підтверджена дослідженнями періодів кристалічних ґраток Ni й Ta, які у складі композиту межували один з іншим. Так, період ґратки нікелю в складі композиту змінився на $0,0008\text{\AA}$ у порівнянні з вихідним станом, а період ґратки танталу в порівнянні з вихідним змінився відповідно на $0,0025\text{\AA}$. Це свідчить, що деяка кількість атомів танталу розчинилась у ґратці нікелю, і, в свою чергу, атоми Ni розчинились в Ta. Певну відмінність в ефекті можна пояснити як різним рівнем гомологічних температур для нікелю і танталу, так і неоднаковими атомними радіусами цих металів. Дослідження ШКМ Cu-Ta, отриманих дифузійним зварюванням через прошарок нікелевої фольги, з об'ємними долями 1; 2,8; 7; 11,1; 15,8 і 25% Ta показало, що залежність їх механічних характеристик від об'ємної долі танталу (рис. 3) помітно відрізняється від аналогічних кривих для ШКМ Cu-Ta без шарів нікелю. Спираючись на рис. 3, можна вказати на певну подібність кривих $\sigma_{0,05}$, $\sigma_{0,2}$ і $\sigma_{\text{в}}$. Так, починаючи з об'ємної долі в 2,8 % Ta спостерігається різке зростання цих характеристик, але з 7 % Ta – слабкий темп їхнього підвищення. Для пояснення не монотонності графіків властивостей міцності були визначені мінімальний і критичний об'ємний вміст зміцнювальних шарів Ta, а також значення $\sigma_{0,05\text{розр}}$ для всіх ШКМ. Було розраховано, що $V_{\text{min}} = 2,9\%$ Ta, а $V_{\text{кр}} = 4,2\%$ Ta, отже, характеристики міцності композитів з 1 і 2,8 % Ta повинні бути менше, ніж у матриці, однак цього не спостерігається. Оцінка розрахункової межі пружності, яка була проведена за аналогією з безнікелевими композитами, але з урахуванням Ni, показала, що спостерігається її гарний збіг з експериментальними значеннями тільки для композитів з 1 і 2,8 % Ta. Для інших же спостерігається 2-3 разове перевищення експериментальних значень над розрахунковими. Проведений аналіз свідчить про те, що це обумовлене кількістю зерен по товщині мідної матриці. Так,

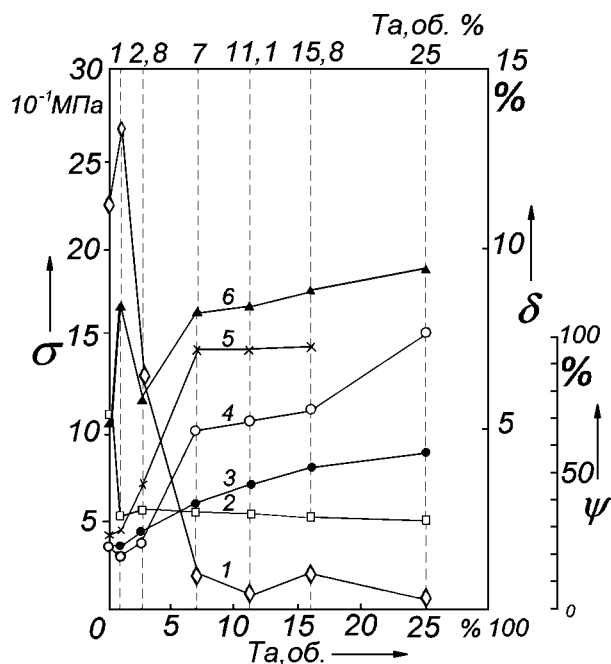


Рис. 3. Залежність механічних характеристик шаруватих композитів Cu-Ta (з нікелевими шарами) від об'ємної долі танталу: 1 – відносьне подовження δ ; 2 – відносьне звуження ψ шарів міді; 3 – розрахункова границя пружності $\sigma_{0,05\text{розр}}$; 4 – границя пружності $\sigma_{0,05}$; 5 – умовна границя текучості $\sigma_{0,2}$; 6 – границя міцності σ_B

у композиті з 1 % Ta в ній укладається 16 зерен; для 2,8 % Ta – 7 зерен; при 7 % Ta – 3 зерна; у композитах з 11,1; 15,8 і 25 % Ta одне зерно відповідно. Саме тому в композитах з малими об'ємними долями танталу (1 і 2,8 % Ta) ковзання протікає по звичайній для полікристалів схемі, а зміцнення за рахунок здійснення ковзання по несприятливо-орієнтованих площинах (модель Явора А.А.) не реалізується. В "стілниковій" же структурі матриці (ШКМ від 7 до 25 % Ta) ковзання, після заблокування звичайно орієнтованих площин, здійснюється саме по моделі Явора А.А. Це приводить до додаткового зміцнення, яке зростає в інтервалі від 2,8 до 7 % Ta, а потім є постійною складовою. Потрібно також додати, що, як видно з рис. 3, додаткове зміцнення досягає максимуму у ШКМ з 7 % Ta, у яких по товщині мідного шару знаходиться 2-3 зерна, але для них характерна низька пластичність. Тому у перспективних ШКМ для поєднання ефекту зміцнення

та пластичності, виходячи з розміру зерна міді після відпалу при 1000°C , потрібно в шарах Cu замість фольги з товщиною 45 мкм застосовувати фольги товщиною 300 мкм. Це дасть змогу, наприклад, у ШКМ з 2,8 % Ta, підвищити міцність при збереженні притаманній ним пластичності.

Аналіз відносного подовження і звуження досліджуваних композитів показав, що на ці характеристики значний вплив, як і в безнікелевих композитах, здійснює складний напружений стан. Причому наявність шарів нікелю, у якого модуль нормальної пружності, коефіцієнт Пуассона, температурний коефіцієнт лінійного розширення й інші характеристики відмінні від Cu і Ta, ще сильніше віддаляє композит від одноосової схеми напруженого стану до плоскої. Головну роль у цьому явищі грає саме Ni через найменший, чим в міді і танталі, коефіцієнт Пуассона та більший в порівнянні з танталом вміст. Отже, знаходячись у складі ШКМ, Cu у поперечному напрямку буде розтягуватися, а Ni – стискуватися. Тому відносьне звуження шарів міді складає близько 40 %, що в 2 рази менше, ніж у вільному стані (рис. 3). Дослідження видів діаграм розтягання композитів свідчать про те, що поряд з їхніми

класичними видами для ШКМ із крихкими шарами і пластичною матрицею

– «пилкоподібним» і лінійним, також є і проміжний тип. Він характеризується наявністю ділянки пластичної деформації при одиничному руйнуванні (рис. 4, крива 2). Існування його пояснюється тим, що при передачі ковзання по несприятливо-орієнтованих площинах мідь у складі ШКМ має більш високу міцність, ніж звичайно у вільному стані. Тому з появою тріщини в танталі мідь руйнується не відразу, а якийсь час несе частину навантаження, наслідком чого є збереження відносного подовження в межах 1 % в композиті з 7 % Та. З підвищенням об'ємної долі Та мідь вже значно менше компенсує навантаження, тому діаграма розтягання має лінійний вигляд.

Дослідження особливостей руйнування композитів на прикладі ШКМ із 1 % Та показало, що тріщини в шарах танталу неоднакові по довжині, розподілу і кількості, причому найбільш розповсюдженими є тріщини довжиною від 10 до 20 мкм. Розташування великих тріщин поблизу зони руйнування дозволяє стверджувати, що воно відбувається по одній з перших тріщин у момент вичерпання ресурсів пластичності міді.

Дослідженнями релаксаційних властивостей було встановлено, що складові композитів у вільному стані характеризуються близькими рівнями спадання напруження та взагалі виявлена загальна слабка тенденція на зниження відношення $\Delta\sigma/\sigma_0$ (σ_0 - початкове напруження релаксації) зі зростанням об'ємного вмісту танталу. Окрім того є невеликі локальні мінімуми і максимуми, що не дозволяють судити про перевагу того чи іншого концентраційного інтервалу.

В цілому слід зазначити, що оптимальні механічні властивості ($\sigma_{0,05}$; $\sigma_{0,2}$; σ_B та δ) при кімнатній температурі мають композити з об'ємним вмістом від 2,8 до 7 % Та.

Дослідження механічних та релаксаційних властивостей ШКМ Cu-Ta при 600°C. Дослідження механічних властивостей при підвищених температурах проводили при 600°C у вакуумі. Класичні механічні характеристики наведені на рис. 5. Відзначимо, що ця температура є гомологічно високою для Cu (0,65 $T_{пл}$), Ni (0,5 $T_{пл}$), а для Та вона є порівняно низькою (0,27 $T_{пл}$). Через це створений в процесі випробування на розтягання наклеп в Cu та Ni знімається в результаті рекристалізаційних процесів, а передача напружень здійснюється в основному не ковзанням, а переповзанням. Аналізуючи рис.5, необхідно відзначити, що механічні властивості ШКМ до об'ємної долі 2,8 % Та мало перевищують властивості чистої міді, що пов'язано з тим, що структура мідної матриці в цих ШКМ близька до полікристалічної.

У концентраційному інтервалі від 2,8 до 11,1 % танталу в цілому повторюються тенденції росту механічних характеристик, що характерні для кімнатної температури і пов'язані з реалізацією ініціювання ковзання по несприятливо-орієнтованих

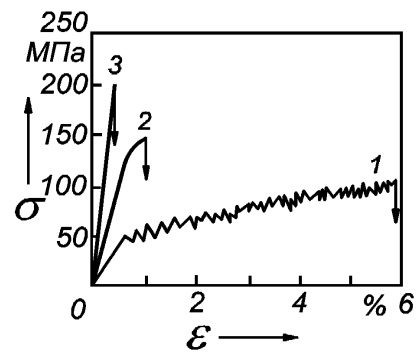


Рис. 4. Типові види діаграм розтягання шаруватих композитів Cu-Ta при 20°C: 1 – 1 і 2,8 % Та; 2 – 7 і 11,1 % Та; 3 – 15,8 і 25 % Та

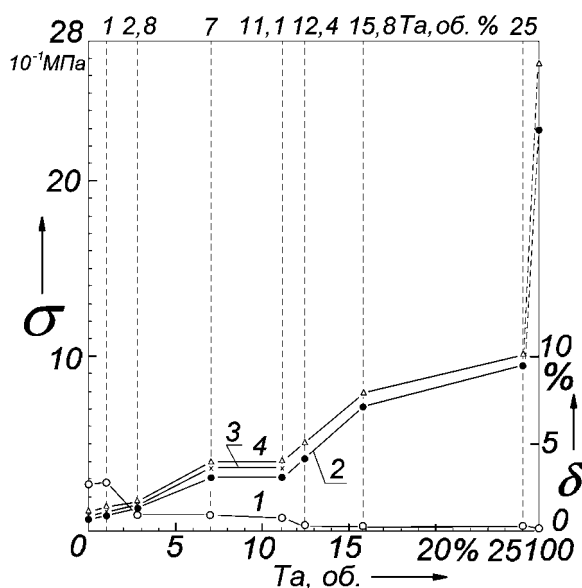


Рис. 5. Залежність механічних властивостей ШКМ Cu-Ta від об'ємної долі танталу, які випробовувались у вакуумі при 600°C: 1, 2, 3 і 4 – криві залежності δ , $\sigma_{0,05}$; $\sigma_{0,2}$; і σ_B відповідно

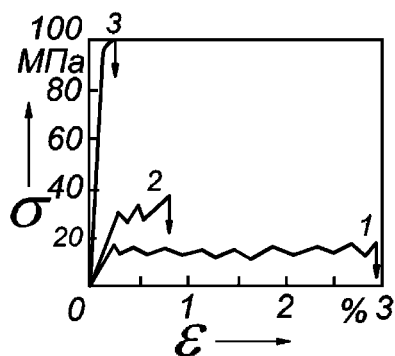


Рис. 6. Типові види діаграм розтягання ШКМ Cu-Ta після випробування при температурі 600°C у вакуумі: 1 – 1 і 2,8 % Ta; 2 – 7 і 11,1 % Ta; 3 – 15,8 і 25% Ta

ця відмінність виявляється в наявності «пилкоподібності» при 600°C. У свою чергу, на діаграмах розтягання ШКМ із 15,8 і 25 % Ta після випробувань при 600°C відзначена не тільки ділянка пружної деформації (як при кімнатній температурі), але й пружно-пластичної. Є також і кількісні відмінності. Як відомо, причиною «пилко-

площинах і при підвищених температурах (модель Явора А.А.). У концентраційному інтервалі від 11,1 до 15,8 % танталу спостерігається різке, а потім до 25% танталу більш помірне зростання механічних характеристик, що пояснюється мікроструктурою мідної матриці. По-перше, необхідно відзначити, що ширина дифузійної зони між шарами нікелю і міді, виміряна при дослідженнях мікроструктури композитів, складає 15 мкм. Отже, у композитах з 15,8 і 25 % танталу ширина дифузійної зони порівнянна із шириною шарів міді, а це спричиняє як гальмування росту зерен міді, так і підвищення міцності за рахунок твердорозчинного зміцнення. Крім того, у цих ШКМ, на відміну від всіх інших, у дослідженій системі мідна матриця складається з одного шару фольги.

Наслідком цього є додаткове зміцнення при переході від полікристалічної до стільникової структури мідної матриці, бо в цьому випадку в ній гальмується зернограничне ковзання. При подальшому аналізі механічних характеристик були розглянуті діаграми розтягання досліджуваних композитів при 600°C за аналогією з кімнатною температурою (рис.4). Діаграми розтягання при 600°C мають наступний вигляд (рис. 6). Порівнюючи відповідні діаграми розтягання композитів Cu-Ta при кімнатній температурі і при 600°C не можна не відзначити їхню подібність і відмінність. Так, подібним є вид діаграм розтягання для композитів з 1 і 2,8 % Ta, якість яких не змінилася. Відмінним же є якість діаграм розтягання у композитів з 7 та 11,1 % Ta й 15,8 та 25 % Ta. Так, у композитів з 7 і 11,1 % Ta

подібного» виду діаграм є формування тріщин у шарах зміцнювача, причому після випробувань ШКМ з 1 % Та при 600⁰С їхнє число (10) суттєво менше ніж при 20⁰С (380). Подальше порівняння видів діаграм розтягання та мікроструктури дозволяє стверджувати, що якщо руйнування ШКМ Cu-Ta при кімнатній температурі, починаючи з 7 % Та, відбувається вже після першої тріщини, то при 600⁰С перехід до одиничного руйнування (після появи першої тріщини) чиниться з 15,8 % Та (рис. 6).

Цю відмінність можна пояснити двома факторами. По-перше, при підвищених температурах випробувань мідна матриця в момент появи тріщини в шарах танталу в цій зоні (поруч з тріщиною) має підвищену несучу здатність унаслідок локалізації деформації і високої швидкісної чутливості опору високотемпературному деформуванню. Підкреслимо, що “питома вага” цієї зони в шарах міді збільшується з підвищенням об’ємної долі танталу. По-друге, в порівнянні з кімнатною температурою загальна несуча здатність міді при 600⁰С значно зменшилась внаслідок протікання процесів повзучості. Однак зі збільшенням об’ємної долі танталу роль цього фактору знижується, тому що зростає “питома вага” локалізованих зон в міді. Саме тому при високій об’ємній долі танталу (15,8 та 25 %) та низькій для міді, руйнування композиту відбувається відразу після появи першої тріщини в шарах танталу. Наслідком же високої локальної несучої здатності матриці в момент появи першої тріщини є наявність на діаграмах розтягання пружно-пластичної ділянки.

Як і у випробуваннях в режимі розтягання, релаксацію напружень композитів досліджували при 600⁰С (рис.7), причому мідь при 600⁰С має майже в два рази меншу релаксаційну стійкість, ніж тантал. Сама ж залежність $\Delta\sigma/\sigma_0$ від об’ємної долі танталу має виражену зону мінімуму – від 2,8 до 11,1 % Та. Таким чином, у цьому концентраційному інтервалі релаксаційна стійкість досліджуваних ШКМ найкраща. Потім зі збільшенням об’ємної долі Та криві піднімаються, досягаючи у своєму максимумі (25 % Та)

значень, близьких для чистої міді. Погіршення релаксаційної стійкості композитів відбувається тому, що в композитах з об’ємними долями 15,8 і 25 % танталу глибина дифузійного шару між нікелем і міддю є порівняною з товщиною самого шару міді. Як було відзначено, нікель встигає проникнути за час дифузійного зварювання на глибину близько 15 мкм, викликаючи при цьому в шарі міді, що граничить з ним, не

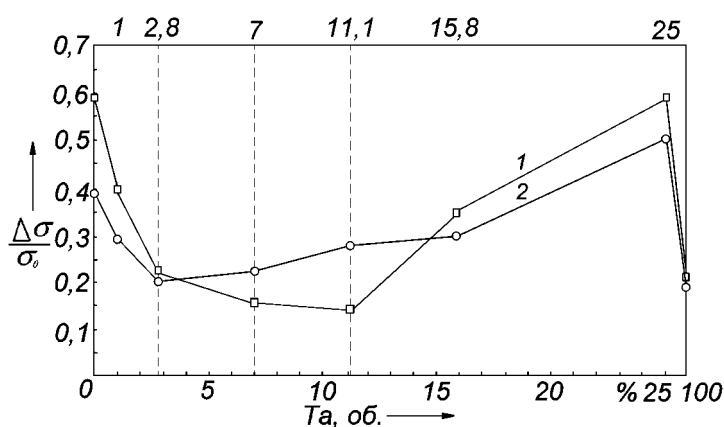


Рис.7. Залежність $\Delta\sigma/\sigma_0$ від об’ємної долі Та для ШКМ Cu-Ta при 600⁰С за 100 с.: 1 – перша релаксаційна крива; 2 – друга релаксаційна крива

тільки збереження дрібного зерна, але і зміну кольору. В зв'язку з тим, що товщина шарів міді змінюється в композитах з різними об'ємними долями Та, для оцінки впливу дифузійної зони на релаксаційні властивості композитів необхідно знати відношення глибини дифузії до товщини шарів міді. Було встановлено, що якщо у композитах з об'ємними долями 1-11,1 % Та відношення глибини дифузійної зони між міддю і нікелем до ширини самого шару міді знаходиться в інтервалі від 2,3 до 30 %, то для композитів з 15,8 і 25 % Та воно складає 50 і 100 % відповідно. Аналізуючи ці дані та рис.7, можна відзначити, що дифузійна зона значно не впливає на релаксаційну стійкість доти, поки її відношення до загальної товщини одного шару міді не перевищує 30 % (11,1 % Та). Отже, якщо дрібнозерниста будова дифузійної зони між міддю і нікелем підвищила міцність ШКМ Cu-Ta з 15,8 і 25 % Та (рис. 5), то в даному випадку навпаки – релаксаційна стійкість погіршилася. Тому на підставі рис. 5 і 7 необхідно відзначити, що оптимальні механічні властивості для роботи при підвищеній температурі є у ШКМ з об'ємними долями від 2,8 до 11,1 % Та.

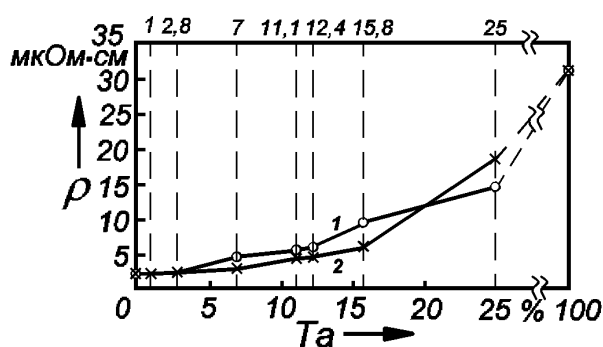


Рис. 8. Концентраційна залежність питомого електричного опору ШКМ Cu-Ta при 20°C: 1 – експеримент; 2 – розрахункова оцінка

Дослідження електричного опору ШКМ мідь-тантал.

Експериментальна крива питомого електричного опору (рис.8) характеризується близьким до лінійного зростанням. Попередні оцінки ρ композиту по цьому параметру для Cu, Ta і Ni, що з'єднані паралельно, показали, що розрахункові значення в 2-3 рази менше експериментальних. Це, як і у випадку релаксаційних властивостей, обумовлено дифузійною зоною в Cu, яка збагачена нікелем. Відношення адитивності для питомого електроопору композита

приймає наступний вигляд:

$$\frac{1}{\rho_k} = \frac{f_{Cu}}{\rho_{Cu}} + \frac{f_{Ta}}{\rho_{Ta}} + \frac{f_{Ni}}{\rho_{Ni}} + \frac{f_{(Cu+Ni)}}{\rho_{(Cu+Ni)}} \quad (3)$$

де ρ_k , ρ_{Cu} , ρ_{Ta} , ρ_{Ni} и $\rho_{(Cu+Ni)}$ – питомий електричний опір композиту, міді, танталу, нікелю та дифузійної зони (Cu + Ni) відповідно; f_{Cu} , f_{Ta} , f_{Ni} и $f_{(Cu+Ni)}$ – об'ємна доля Cu, Ta, Ni та дифузійної зони (Cu + Ni) відповідно.

Як видно з рис. 8, якщо враховувати дифузійну зону в 15 мкм з питомим електричним опором 25 мкОм·см, відмінність розрахункової оцінки від експерименту не перевищує 20 %. Зважаючи, що у ШКМ Cu-Ta з 1 та 2,8 % Та питомий електричний опір є близьким до чистої міді, доцільно використовувати їх в якості елект-

ротехнічних матеріалів при кімнатних температурах та невеликих навантаженнях, а ШКМ від 3 до 11% Та для елементів конструкцій, які несуть як струмове, так і силове навантаження, в умовах високих температур експлуатації.

Виходячи з цього, запропоновано використовувати ШКМ Cu-Ta як матеріал шинопроводів, що було апробовано у ТОВ “Ініос”, та в якості електро- та теплопровідних покриттів формують формуючих поверхонь прес-форм у ВАТ “Салют” м. Харкова. Зокрема, термін використання прес-форми збільшився в 1,65 рази.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Виявлено, що раніш відомий метод створення композитів на основі міді, армованих танталом, – просочення – є більш складним та не дозволяє регулювати механічні властивості міді як складової. Замість цього запропоновано отримання багат шарових композитів мідь-тантал методом дифузійного зварювання через прошарок фольги нікелю.

2. Встановлені закономірності процесів деформування композитів багат шарової системи мідь-тантал при досліджених температурах (20 та 600⁰С), концентраціях (1 ÷ 25 % Та) та режимах деформування (розтягання та релаксація напружень) залежно від об’ємної долі Та. Показано, що зміна механічних властивостей для ШКМ Cu-Ta не відповідає відомій схемі для односпрямованого композита з пластичною матрицею та крихким зміцнювачем.

3. Запропоновані технологічні режими більш простого і менш затратного способу виготовлення шаруватих композитів мідь-тантал з прошарком нікелевої фольги методом дифузійного зварювання (час зварювання, тиск на шари при зварюванні, ступінь вакууму). Проведено комплексне дослідження структури, механічних властивостей при 20 та 600⁰С та електропровідності цих композитів в інтервалі об’ємної долі танталу від 1 до 25 %.

4. Виявлено, що оптимальні механічні властивості ($\sigma_{0,05}$; $\sigma_{0,2}$; σ_B та δ) при кімнатній температурі мають композити з об’ємним вмістом танталу від 2,8 до 7 %. Це пов’язано з переходом від полікристалічної структури мідної матриці (7 зерен по товщині кожного шару міді) до стільникової (2-3 зерна та менше) і реалізацією додаткового зміцнення внаслідок ініціювання ковзання в міді по несприятливо-орієнтованим площинам.

5. Показано, що при 20⁰С відносне звуження мідної матриці в композитах в усьому дослідженому інтервалі об’ємної долі Та становить близько 40 %, що в ~ 2 рази менше, ніж у Cu в вільному стані. Це обумовлено знаходженням складових ШКМ при випробуваннях на розтягання не в одноосовому, а в більш жорсткому напруженому стані двохосового розтягання.

6. В інтервалі об’ємної долі Та від 7 до 11,1 % встановлений новий проміжний тип діаграми розтягання, який, поряд з традиційним пилкоподібним та лінійним видами, характерними для ШКМ з пластичною матрицею і крихким волокном, реалізується в композитах Cu-Ta як при 20 так і при 600⁰С. Це обумовлено тим, що

через здійснення ковзання за несприятливо-орієнтованими площинами мідь у складі ШКМ має міцність вищу, ніж у вільному стані.

7. Виявлено, що при 600°C в інтервалі від 11,1 до 15,8 % об'ємної долі танталу підвищені темпи зростання характеристик міцності обумовлені ефектом стримання зернограничного ковзання при переході до стільникової структури в мідній матриці.

8. Встановлено, що при підвищенні температури випробування ШКМ Cu-Ta від 20 до 600°C для «пилкоподібного» типу діаграм розтягання характерно зниження пластичності, а для проміжного і лінійного типів – її збільшення, в той час як у більшості ШКМ характер зміни пластичності для традиційного виду діаграм однаковий. Це можна пояснити зниженням несучої здатності міді при невеликому об'ємному вмісті танталу та компенсуванням цього фактору локалізованою деформацією в мідній матриці при збільшенні об'ємного вмісту танталу. Локалізована деформація виникає поблизу тріщини в Та, має підвищену несучу здатність, роль якої зростає із збільшенням об'ємної долі танталу.

9. Вперше встановлений немонотонний характер концентраційної залежності релаксаційної стійкості композитів при підвищених температурах (600°C) в інтервалі $1 \div 25$ % об'ємної долі Та. Показано, що підвищення релаксаційної стійкості до 11,1 % Та обумовлено зростанням його об'ємної долі, а її зниження при подальшому рості вмісту танталу пов'язано зі збільшенням відносної глибини дифузійної зони між Ni і Cu з низькою релаксаційною стійкістю.

10. Показано, що концентраційна залежність питомого електричного опору ШКМ близька до лінійної та обумовлена зіставленим внеском шарів Cu, Ni, Та, а також перехідного дифузійного шару. При цьому в якості електротехнічних матеріалів для кімнатних температур можна рекомендувати інтервал до 3 % Та, а для високих температур – від 3 до 11 %.

11. Прогнозується, що для розширення концентраційного інтервалу дії додаткового зміцнення в перспективних шаруватих композитах необхідно використовувати фольги міді товщиною ~ 300 мкм, тобто порівняною з розміром рекристалізаційного зерна міді при температурах виготовлення композитів.

12. Комплекс проведених досліджень свідчить, що оптимальне поєднання характеристик конструкційної міцності як при 20, так і при 600°C досягається в композитах з об'ємною долею Та від 2,8 до 11,1 %. Виходячи з цього, запропоновано використовувати ШКМ Cu-Ta як матеріал шинопроводів, що було апробовано у ТОВ “Ініос” та в якості електро- та теплопровідних покриттів формують поверхонь прес-форм у ВАТ “Салют” м. Харкова. Зокрема, термін використання прес-форми при цьому збільшився в 1,65 рази.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДІСЕРТАЦІЇ:

1. Terletsky A.S. Effect of recrystallizing anneals on the structure and relaxation properties of copper foils and vacuum condensates / A.S. Terletsky, E.V. Yascheritsyn // Functional Materials. – 2001. – Vol. 8, №3. – P. 539-543.

2. Лябук С.И. Релаксация напряжений в дисперсно-упрочненных вакуумных пленках Ni / С.И. Лябук, Е.В. Ящерицын, С.Н. Топтунова // Вестник ХГПУ. Сборник трудов. Тематич. выпуск: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: ХГПУ. – 2000. – Вып.82. – С. 31-33.

3. Ящерицын Е.В. Механические свойства слоистых композитов Cu-Ta с различной толщиной медных слоев / Е.В. Ящерицын // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематич. випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2002. – Т2, №6. – С. 69-73.

4. Ящерицын Е.В. Оптимизация количества упрочняющей фазы в слоистых композитах Cu-Ta на основе сопоставления вида кривой разрушения с микроструктурой / Е.В. Ящерицын // Тези доп. наук.-метод. конф. "Техносфера та її безпека". Харків, 15 жовт. 2003р. – Х., 2003. – С. 33-35.

5. Терлецкий А.С. Прочность и пластичность многослойных композитов Cu-Ta / А.С. Терлецкий, Е.В. Ящерицын // XLII Международная конф. "Актуальные проблемы прочности". Калуга, 26-29 мая 2004г., материалы XLII Междунар. конф. "Актуальные проблемы прочности". – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – С.79-80.

6. Терлецкий А.С. Прочность и пластичность многослойных композитов Cu-Ta / А.С. Терлецкий, Е.В. Ящерицын // Деформация и разрушение материалов. – Москва: ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН. – 2005. – №8. – С. 45-47.

7. Деклараційний патент України на корисну модель, 7 C22C47/20, B23K20/00. Шаруватий композиційний матеріал. Ящерицин Є.В., Терлецький О.С. НТУ "Харківський політехнічний інститут", (UA) – №5575; заявл. 12.07.2004; опубл. 15.03.2005 р. Бюл.№3.

8. Ящерицын Е.В. Механические свойства слоистых композитов медь-тантал при 600⁰С, полученных диффузионной сваркой через прослойку никелевой фольги/ Е.В. Ящерицын, А.С. Терлецкий // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2005. – №24. – С. 262-269.

9. Ящерицин Є.В. Обґрунтування вибору матеріалу – зміцнювача шаруватого композиційного матеріалу мідь-тантал в залежності від температури плавлення та ГДК / Є.В. Ящерицин, О.С. Терлецький // Тези доповідей конференції "Безпека життєдіяльності". Харків, 7-8 груд. 2006р., – Х., 2006. – С. 65-66.

10. Ящерицин Є.В. Електричний опір шаруватого композиційного матеріалу мідь-тантал / Є.В. Ящерицин, О.С. Терлецький // Тези доп. 8-ї міжвуз. наук.-метод. конф. "Безпека людини в сучасних умовах життєдіяльності".- Харків, 4-5 груд. 2008 р., CD-R80, 2008. – 1електрон.опт.диск.- Систем вимоги. Pentium; 80Mb; Windows 98/2000/NT/XT. –Заг. з титул. екрану.

11. Ящерицин Є.В. Релаксація напружень у шаруватих композитах мідь-тантал при кімнатній температурі і 600 °С / Є.В. Ящерицин, О.С.Терлецький // Вісник НТУ "ХПІ". Збірн. наук. праць. Тем. випуск:Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2007. – №11. – с. 58-64.

АНОТАЦІЯ

Ящерицин Є. В. Структура та механічні властивості багат шарових композитів мідь-тантал, отриманих методом дифузійного зварювання. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство. Харківський національний автомобільно-дорожній університет. Харків, 2010.

Запропонований новий і менш затратний спосіб виготовлення багат шарових композитів мідь-тантал та розроблені технологічні параметри їх дифузійного зварювання через прошарок нікелевої фольги (час зварювання, тиск на шари при зварюванні, ступінь вакууму) та досліджено їх структуру, механічні та струмопровідні властивості в інтервалі концентрацій від 1 до 25 % об'ємної долі Та при 20 та 600⁰С.

Встановлено, що оптимальні механічні властивості при кімнатній температурі мають композити з об'ємним вмістом Та від 2,8 до 7 %, в яких передача деформацій у шарах Сu здійснюється ковзанням по несприятливо-орієнтованим площинам, що викликає додаткове зміцнення.

В композитах від 7 до 11,1 % Та встановлено проміжний тип діаграм розтягання, який не відповідає двом видам традиційних діаграм для шаруватих композитів з пластичною матрицею і крихким волокном. Виявлено, що при підвищених температурах в інтервалі від 11,1 до 15,8 % об'ємної долі Та підвищені темпи росту характеристик міцності обумовлені ефектом пригнічення зернограничного ковзання при переході до стільникової структури в мідній матриці.

Вперше встановлений немонотонний характер концентраційної залежності релаксаційної стійкості композитів Сu-Та при підвищених температурах в інтервалі 0 ÷ 25 % об'ємної долі Та.

Дослідження свідчать, що оптимальне поєднання механічних властивостей при кімнатній і підвищених температурах мають ШКМ з об'ємним вмістом від 2,8 до 11,1 % Та.

Ключові слова: шаруваті композиційні матеріали, дифузійне зварювання, характеристики міцності, концентраційна залежність, релаксаційна стійкість.

АННОТАЦИЯ

Ящерицын Е.В. Структура и механические свойства многослойных композитов медь-тантал, полученных методом диффузионной сварки. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.01 – материаловедение. Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет. Харьков, 2010.

Предложен новый и менее затратный способ изготовления слоистых композиционных материалов (СКМ) Сu-Та и разработаны технологические параметры их диффузионной сварки через прослойку никелевой фольги (время сварки, давление на слои при сварке, степень вакуума).

Проведено комплексное исследование структуры, механических и токопроводящих свойств этих композитов в интервале от 1 до 25 % объемных долей тантала при 20 и 600⁰С.

Установлено, что оптимальные механические свойства при комнатной температуре имеют СКМ с объемным содержанием Та от 2,8 до 7 %. Это связано со структурой матрицы, в которой при переходе от поликристаллической структуры (7 зерен по толщине каждого слоя Cu) к почти сотовой (2-3 зерна) реализуется дополнительное упрочнение. Причем его прирост, обусловленный иницированием скольжения по неблагоприятно-ориентированным плоскостям в слоях Cu, составляет по сравнению с расчетными оценками прочности ~100 %.

Показано, что при испытаниях на растяжение относительное сужение медной матрицы в СКМ во всем исследованном интервале объемных долей Та составляет около 40 %, в то время эта же характеристика для меди в свободном состоянии составляет 80 %. Это объясняется нахождением композита при растяжении не в одноосном, а в более жестком напряженном состоянии двухосного растяжения из-за различия значений коэффициента Пуассона, модуля нормальной упругости, температурного коэффициента линейного расширения.

В интервале объемных долей тантала от 7 до 11,1 % установлен промежуточный тип диаграммы растяжения, не соответствующий традиционным видам диаграмм для композитов с пластичной матрицей и хрупким волокном. Его реализация в данной системе композитов обусловлена более высокой прочностью меди в составе композита, которая объясняется микроструктурой медной матрицы, где развитие деформации осуществляется скольжением по неблагоприятно-ориентированным плоскостям. При повышенных температурах в интервале от 11,1 до 15,8 % Та повышенные темпы роста прочностных характеристик обусловлены эффектом подавления зернограницного скольжения при переходе к сотовой структуре в медной матрице.

Установлено, что для пилообразного, а для промежуточного и для линейного типа диаграмм (при увеличении объемной доли Та) в условиях повышенных температур характерно понижение и увеличение пластичности соответственно.

Впервые установлен немонотонный характер концентрационной зависимости релаксационной стойкости исследуемых композитов при повышенных температурах в интервале 0÷25 % объемных долей Та. Так, рост релаксационной стойкости до 11,1% Та обусловлен доминированием увеличения его объемной доли, а дальнейшее снижение сопротивления релаксации связано с подавлением первого фактора возрастанием относительной глубины диффузионной зоны между Ni и Cu с низкой релаксационной стойкостью. Причем, если в СКМ с небольшими объемными долями тантала относительная ширина диффузионной зоны составляет несколько процентов от толщины слоя матрицы, то в композите с максимальной исследованной объемной долей (25 % Та) она занимает практически весь слой меди. Проведенные исследования позволяют утверждать, что оптимальным сочетанием характеристик конструкционной прочности и пластичности как при комнатной, так и повышенных

температурах обладают композиты с объёмным содержанием тантала от 2,8 до 11,1 %. Для расширения контрационного интервала действия дополнительного упрочнения в перспективных слоистых композитах необходимо использовать фольги меди толщиной ~300 мкм, что сравнимо с размерами зерна Cu при температуре изготовления композитов.

Показано, что концентрационная зависимость удельного электросопротивления СКМ близка к линейной и обусловлена сопоставимым вкладом слоев Cu, Ni и Ta, а также переходного диффузионного слоя. В качестве проводниковых материалов для комнатных температур можно рекомендовать интервал объёмных долей Ta до 3%, а для высоких температур – от 3 до 11%.

Ключевые слова: слоистые композиты, диффузионная сварка, характеристики прочности, концентрационная зависимость, релаксационная стойкость.

ABSTRACT

Yascheritsin E. V. The structure and mechanical properties of multi-layer copper-tantalum composites obtained by the diffusive-welding method. – Manuscript.

Thesis on receiving Candidate degree of engineering sciences on the specialty 05.02.01 – the material science. Kharkov National Automobile and Highway University. Kharkov, 2010.

The new and more cheap method of preparing multilayer Cu-Ta composites is suggested and technological regime (welding time, pressure on layer by welding, vacuum degree) diffusive welding method through the Ni-foil layer is elaborated. Complex research of the structure, mechanical and conductical properties of these composites in the concentration range from 1 to 25 % of volume Ta parts carried out by 20 and 600⁰C.

It has been found that 2,8 ÷ 7 % tantalum composites have optimal mechanical properties at room temperature. This is due to the fact, that deformation transmission of these composites is made by sliding on the unfavorable-oriented planes that results in additional strengthening.

On the 7-11,1 % tantalum range the intermediate stretching diagrams type that does not correspond to two traditional diagram types for multilayer composites with plastic matrix and fragile fibre has been found. It is determined that at the high temperatures in the 11,1-15,8 % tantalum rang the increased rates of strengthening characteristics growth are due to the decreasing effect of grain-boundary sliding in the transition to the cellular structure in the copper matrix.

Unmonotonous behavior in concentration dependence of relaxation firmness of the composites understudy at the increased temperature in the 0-25 % tantalum range has been first set.

The researches made show that 2,8 - 11,1 % tantalum composite have optimal combinations of construction-durability characteristics at room temperature as well as the increased ones.

Key words: multilayer compositions, diffusive welding, strength characteristics, concentration dependence, relaxation firmness.

Підписано до друку 21.09.2010р. Формат 60х84 ¹/₁₆
Обсяг 1,25 ум. друк. аркушів. Папір офсетний. Наклад 110 прим. Зам. 687.
Друк РІЗО.

КП "Міська друкарня, м. Харків, 61002, вул. Артема, 44.
Свідоцтво про державну реєстрацію серія ДК, № 3613,
від 29.10. 2009 р.