

позаковшових пізніх методів модифікування у ливарній формі. в результаті скорочення до мінімуму проміжку часу між модифікуванням розплаву та його кристалізацією досягається більш високий ефект модифікувального впливу на структуроутворення і механічні властивості високоміцного чавуну, усувається проблема втрати ефекту модифікування і досягається висока стабільність структури та фізико-механічних властивостей виливків, оскільки кожна форма вміщує певну кількість розплаву, який обробляється дозованою кількістю модифікатора. до основних технологічних вимог цього методу відносяться:

– використання шихтових матеріалів із вмістом сірки менше 0,02% та фосфору менше 0,1%;

– використання високоякісних модифікаторів.

За рахунок використання вказаних технологічних рішень був розроблений економнолегований високоміцний чавун із зменшеним у 2-2,5 рази вмістом міді та підвищеним (0,70-0,85%) вмістом марганцю. Аналіз результатів механічних випробувань показав, що при зміні вмісту вуглецю від 3,1 до 3,4% та кремнію від 2,0 до 2,6% технологія забезпечує отримання тимчасового опору під час розтягування $\sigma_B = 726-820$ МПа, умовної границі плинності $\sigma_{0,2} = 560-680$ МПа при відносному видовженні $\delta = 3,2-6,4\%$. Технологія забезпечує отримання високоміцного чавуну з перлітною (П90-П95) металевою основою без структурно-вільного цементиту із заданим рівнем механічних властивостей в литому стані.

Никитенко Ю.О., Шаповалов В.О., Якуша В.В., Гніздило О.М.

(ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ)

РОЗВИТОК ПЛАЗМОВО-ІНДУКЦІЙНОЇ 3-D ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ СУПЕРВЕЛИКИХ МОНОКРИСТАЛІВ ВОЛЬФРАМУ

E-mail: nikyu80@gmail.com

Вольфрам характеризується стабільними механічними і фізичними властивостями в широкому діапазоні температур при тому, що він є одним із самих тугоплавких елементів. Висока теплостійкість з низьким коефіцієнтом

теплового розширення, хімічна стійкість до агресивних середовищ, стабільність при нейтронному навантаженні, значна щільність та відсутність схильності до поглинання газів дає перспективу на застосування в багатьох сферах. Вироби з вольфраму знайшли впровадження як широкоформатний прокат (лист, теплові екрани, заготовки для виробів), у рентгенотехніці (антикатоди), електроніці (мішені для розпилення, тиглі для вирощування активних н/п), електротехнічній промисловості (контакти та провід), лазерній техніці (дзеркала для оптичних та рентгенівських лазерів), ядерній енергетиці (термоємні перетворювачі космічних станцій та супутників, конструкції елементів активної частини реакторів), аерокосмічній техніці (сопла).

Особливо яскраво деякі властивості вольфраму виявляються, коли метал знаходиться у монокристалічному стані. Традиційно монокристали вольфраму вирощують у вигляді стержнів діаметром до 25 мм. Спроби виростити якісні кристали більшого діаметра закінчилися невдачею. Причина – негативний вплив масштабного фактора, який неможливо знівелювати існуючими технологіями.

Ураховуючи високу температуру плавлення W (3690 K), для вирощування монокристалів з вольфраму застосовують висококонцентровані джерела електронагріву – електронний промінь або низькотемпературну плазмову дугу. При збільшенні лінійних розмірів монокристалів з'являються дві проблеми – утримання на поверхні ванни розплаву, яка наплавляється та високі термомеханічні напруження в тілі монокристала. Температурні градієнти створюють у кристалі термічні напруження, які в критичних випадках можуть зруйнувати кристал. Високі термомеханічні напруження сприяють генерації додаткової кількості дислокацій (щільність дислокацій може досягати 10^7 – 10^8 см⁻²) та дезорієнтації субзерен, що значно погіршує якість структури монокристалів.

Для розв'язання проблеми вирощування великих та якісних монокристалів вольфраму була поставлено завдання створення відповідної технології. Ідея одночасного застосування двох різних джерел електронагріву – плазмового та індукційного вперше була запропонована спеціалістами Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Кожне з указаних джерел

нагріву виконує свої функції: 1 – плазмово-дугове створює на грані кристала, що наплавляється, рухому локальну металеву ванну, переплавляє витратні прутки, які подаються в зону плавлення, та формує тіло монокристала заданої конфігурації; 2 – індукційне утримує локальну металеву ванну від проливів і створює задане температурне поле в тілі кристала.

Додатковий нагрів кристала значно зменшує радіальний та осьовий температурні градієнти, що сприяє зниженню щільності дислокацій та внутрішніх напружень та формуванню більш досконалої структури.

Сутність методу полягає в тому, що плазмотрон, здійснюючи зворотно-поступальний рух, переміщує металеву ванну, яка, отримуючи підживлення від переплавлення прутків, формує кристал шар за шаром, нагадуючи за своєю суттю адитивне дугове наплавлення. Після кожного проходу плазмотрона монокристал опускається униз на висоту наплавленого шару, забезпечуючи, таким чином, стабільні умови процесу нарощування (рис.1).

Раніше, використовуючи цей спосіб, було створено обладнання (рис. 2) та технологію вирощування профільованих монокристалів тугоплавких металів (вольфраму та молібдену) у вигляді пластин (рис. 3).

Кристал формується в умовах нагріву високочастотним полем індуктора до температур, характерних для діапазону гарячої деформації. Як відомо, при цих температурах переміщення дислокацій відбувається під дією одночасно зовнішніх напружень і температурного впливу. Дислокації виявляються не прив'язані жорстко до «своїї» площини ковзання і можуть переходити з однієї площини в іншу, вибираючи собі найлегший шлях. Це розглядається, як додатковий ступінь свободи у дислокацій.

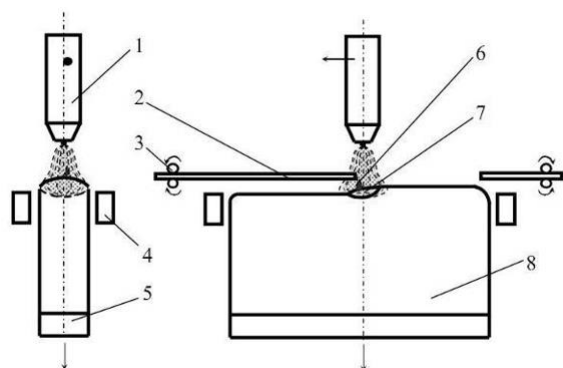


Рис. 1. Схема установки для адитивного вирощування монокристалів тугоплавких металів із застосуванням плазмово-індукційного способу: 1 – плазмотрон; 2 – витратний пруток; 3 – механізм подачі прутків; 4 – індуктор; 5 – зародковий кристал; 6 – плазмова дуга; 7 – локальна ванна; 8 – монокристал



Рис. 2 Установка для вирощування монокристалів тугоплавких металів у вигляді пластин

Розроблена адитивна технологія вирощування великих монокристалів тугоплавких металів технічної чистоти базується на проведених тривалих ґрунтовних дослідженнях, які дозволили встановити та вивчити:

При такому нерегульованому русі дислокацій збільшується ймовірність їх зустрічей і тому зростає, з одного боку, кількість випадків їх анігіляції (зменшується щільність дислокацій), а з іншого – схильність до утворення регулярних дислокаційних структур, для яких характерне об'єднання дислокацій в малокутові межі. Умови, в яких відбувається формування монокристала, забезпечують більш високу якість монокристалічної структури, ніж при способах, в яких не використовується додатковий підігрів (електронно-променевий та плазмово-дуговий).

Кристали, вирощені із застосуванням указанного способу, мають менш гладку бічну поверхню, але це не перешкоджає їх використанню без додаткової механічної обробки як заготовок для широкоформатного прокату.



Рис. 3. Зовнішній вигляд плоских монокристалів вольфраму 170x160x20 мм

- розподіл теплових полів монокристалів з використанням математичних моделей і експериментальних даних;
- робочі діапазони зміни технологічних параметрів процесу росту кристалів;
- структурні характеристики та закономірності структуроутворення вирощених монокристалів.

Подальше вивчення процесу дозволило на тих же засадах створити новітню установку для 3-D вирощування супервеликих монокристалів вольфраму у вигляді тіл обертання (рис. 4).

Створене обладнання є якісно новим поколінням устаткування, що відрізняється повністю комп'ютеризованою системою керування виконуючими механізмами, датчиками переміщення та контролю процесом росту монокристалу. При проектуванні закладено можливість вирощування монокристалів у вигляді тіл обертання (циліндр або пустотілий циліндр) зовнішнім діаметром до 100 мм. Зараз створено тепловий вузол та йде відпрацювання технології вирощування монокристалів вольфраму діаметром 85 мм.

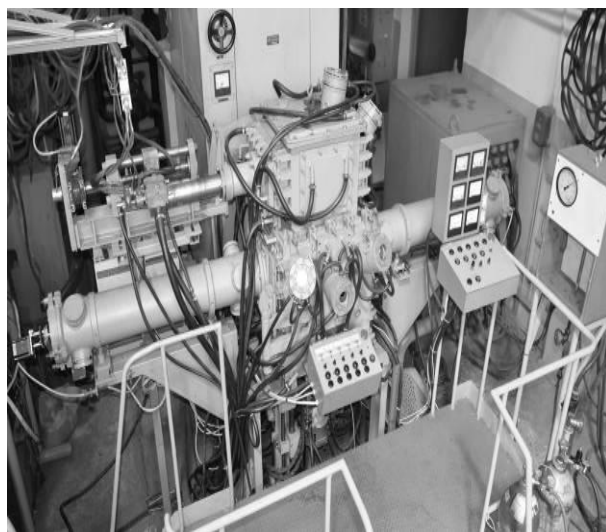


Рис. 4. Новітня установка з комп'ютерним керуванням для вирощування монокристалів тугоплавких металів у вигляді тіл обертання

Принципово технологія вирощування циліндричних монокристалів базується на технології вирощування плоских монокристалів, однак у новітній установці кристал безперервно обертається навколо вертикальної осі. У якості

зародкового кристала використовується циліндрична заготовка, виготовлена з

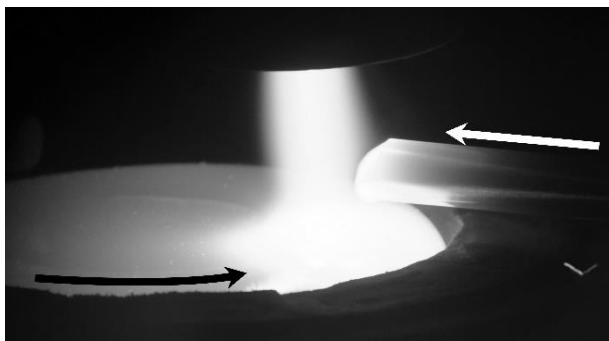


Рис. 5. Процес вирощування монокристала вольфраму у вигляді тіла обертання

плоского монокристалу заданої орієнтації. На рис. 5 представлено фото процесу вирощування монокристала, де стрілками наведено напрямок подачі витратного прутка у зону плавлення плазмової дуги та напрямок обертання монокристала.

Нарощування відбувається пошарово за рахунок переміщення локальної ванни і плазмотрона з

центральної частини до периферійної таким чином щоб рідка ванна перекривала всю поверхню та попередній наплавлений шар. Після наплавлення шару на всю верхню поверхню кристала він опускається до низу. Устаткування дозволяє подавати прутки з обох боків, як по центру злитка, так і з радіальним зміщенням відносно центра. На рис. 6 наведено кристал вольфраму \varnothing 85 мм, з нарощеними

шарами 90 мм.



Рис. 6. Зовнішній вигляд кристалу вольфраму діаметром 85 мм

На даному етапі після відпрацювання технології було проведено попередню оцінку монокристальності отриманого злитка за допомогою хімічного травлення поверхні у суміші рівних об'ємних частин плавикової та азотної кислот. Протравлена у такий спосіб поверхня злитка мала характерні для монокристалів повздовжні (вертикальні) матові та блискучі смуги, які змінювали одна одну. Характер розподілу

смуг засвідчив про задану зародковим кристалом спадковість монокристалічної структури та відсутність на бічній поверхні зливка субблоків з іншою кристалографічною орієнтацією.

Наступним етапом розвитку технологій вирощування супервеликих монокристалів вольфраму стала спроба виростити кристал у вигляді порожнистого циліндра, як заготовка для виготовлення тиглів та труб. Результатом стало, що уперше в Світі за новітньою 3D-технологією, вирощено кристал вольфраму у вигляді порожнистого циліндра на суцільному монокристалічному зародковому кристалі діаметром 85 мм. Вирощений кристал має заввишки 68 мм наплавленої стінки, товщиною 20-22 мм (рис. 7).

Поверхневий огляд після травлення хімічними реагентами злитка показав спадковість структури від монокристалічного зародкового кристала та всі ознаки монокристалічної структури у всьому кристалі.



Рис. 7. Загальний вигляд монокристалу вольфраму у вигляді порожнистого тіла обертання \varnothing 85 мм

Висновки:

- використання наукових і технологічних засад процесу вирощування крупних монокристалічних пластин дозволило створити обладнання і отримати перші великогабаритні злитки у вигляді тіл обертання – стрижні і тиглі;
- попереднє дослідження виробів показало, що стрижні і тиглі мають монокристалічну структуру;
- наступні дослідження мають бути направлені на вивчення умов формоутворення циліндричних монокристалів при збільшенні їх розмірів – вплив масштабного фактору на форму поверхні, що нарощується, і досконалість структури кристалів.