



ШАПОВАЛОВ

Віктор Олександрович – член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, завідувач відділу плазмово-шлакової металургії Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

НАУКОВІ ОСНОВИ ДУГОВИХ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У СПЕЦЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЇ ТА ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННІ

Стенограма наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 30 травня 2018 року

У доповіді проаналізовано сучасний стан розвитку дугових адитивних технологій у світі, показано роль української науки у впровадженні у вітчизняну промисловість розробок і досягнень з цього напрямку. Відзначено важливість та актуальність проведених в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України робіт у галузі спеціальної металургії, зварювання та матеріалознавства, за результатами яких створено і експериментально підтверджено новітню наукову концепцію управління структурою металів та сплавів при їх кристалізації, а також розроблено технологічні основи виробництва металевих матеріалів з монокристалічною та керованою полікристалічною структурою.

Шановні члени Президії!

Шановні колеги!

Зараз у всьому світі прискореними темпами розвиваються адитивні технології (additive manufacturing). По суті, це пошарове нарощування і синтез об'єкта за допомогою комп'ютерних 3D-технологій.

Для роботи з металами широко використовуються кілька різновидів таких технологій, які можна класифікувати за типом нагріву та за типом вихідного матеріалу. Джерелами нагріву можуть бути: лазерний промінь, електронний промінь та електрична дуга. Як витратний матеріал зазвичай використовують або порошок, або дріт. Кожна з цих технологій має свої переваги і недоліки. Найпоширенішою є порошково-лазерна технологія. Її суть полягає в тому, що промінь, переміщуючись поверхнею плити, визначає зону сплавлення порошку, і в такий спосіб формуються задані вироби (рис. 1).

Ще в 1995 р. у китайському Північно-західному політехнічному університеті (NPU) було започатковано програму досліджень «Лазерне адитивне виробництво» (LAM). Розробки,

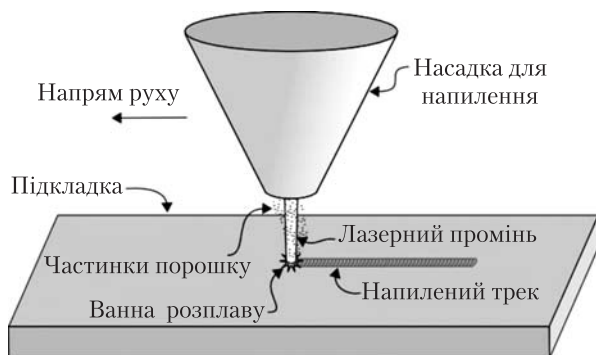


Рис. 1. Схема порошково-лазерної адитивної технології

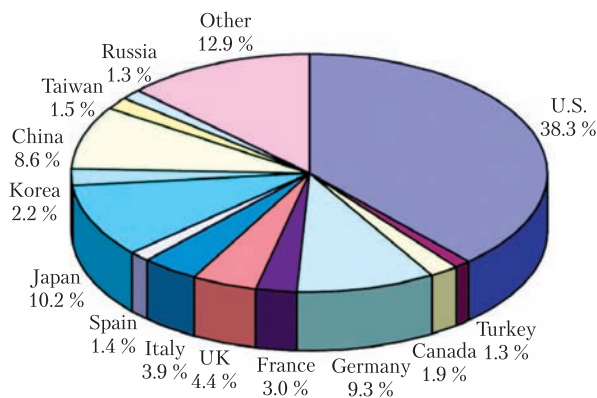


Рис. 2. Розподіл кількості наявного у світі обладнання для 3D-технологій по різних країнах

отримані в результаті виконання цієї програми, сьогодні широко використовуються у промисловості. Так, вражаючим прикладом застосування адитивних технологій є той факт, що для створення перспективного пасажирського літака Сокас С-919, що розробляється у КНР, у 2013 р. в лабораторії NPU було надруковано 5-метровий центральний лонжерон крила. Деталь має масу всього 136 кг (для порівняння: заготовка аналогічної деталі під ковку важить 1607 кг). При цьому економія матеріалу становила 91,5% (тобто витрати матеріалу знижуються майже в 10 разів), а проведені випробування показали, що технічні характеристики 3D-друкованих деталей, як мінімум, не гірші, ніж у деталей, отриманих традиційними способами.

Іншим показовим прикладом актуальності розвитку адитивних технологій є те, що фахівці Бейханського університету (Пекін, КНР) під керівництвом професора Ванга Хуамінга за допомогою 3D-принтингу надрукували шасі і величезну несучу деталь для того самого літака Сокас С-919. Вони розробили нове обладнання для адитивного виробництва і відповідне програмне забезпечення, завдяки чому було вирішено багато проблем, які зазвичай супроводжують процес 3D-друку. За словами професора Ванга Хуамінга, тепер Китаю потрібно всього лише 55 днів і менш ніж 200 тис. доларів США, щоб надрукувати раму кабіни пілота літака С-919. Раніше їм доводилося замовляти такі деталі у європейських виробників, і весь процес тривав близько двох років, а остаточна вартість рами, виготовленої традиційними промисловими методами, становила близько 2 млн доларів США.

Отже, зважаючи на вражаючі приклади успішного застосування адитивних технологій у різних галузях промисловості, майже всі країни світу більшою чи меншою мірою приділяють увагу розвитку цього напрямку. Найбільшу кількість обладнання для 3D-технологій зосереджено у Сполучених Штатах Америки (38,3%), Японії (10,2%), Німеччині (9,3%), Китаї (8,6%) (рис. 2). На жаль, Україна в цьому рейтингу входить до категорії «Інші».

Однак повернемося до суті адитивних технологій. Технологічні завдання, які вирішують адитивні технології, можна поділити на дві основні групи:

1) формоутворення (отримана заготовка має бути якомога ближчою за формою до готового виробу);

2) керування структурою металу.

При цьому над першою групою завдань зі створення форми виробу працюють багато різних дослідницьких груп, тоді як робіт, пов'язаних з керуванням структурою металу, обмаль.

У процесі тверднення металу можуть утворюватися монокристалічні, крупно- і дрібнокристалічні або аморфні структури. Ми працюємо з технологіями, які дозволяють отримати будь-які з цих структур.

Що стосується отримання монокристалічних структур металу, то в цьому разі найпоширенішим є використання плазово-дугових адитивних технологій для вирощування надвеликих монокристалів вольфраму і молібдену. Сферами застосування монокристалів цих тугоплавких металів можуть бути:

- рентгенотехніка (екрани, електроди);
- електроніка (мішені для розпилення, тиглі);
- електротехнічна промисловість (контакти і дроти);
- лазерна техніка (дзеркала для оптичних і рентгенівських лазерів);
- ядерна енергетика (термоемісійні перетворювачі для космічних електростанцій, конструкції елементів активної частини реактора);
- аерокосмічна техніка (сопла).

Є традиційні способи вирощування монокристалів тугоплавких металів з рідкої фази — це електронно-променеве зонне плавлення і плазово-дугове зонне плавлення. Отримані монокристали, як правило, мають вигляд прутків круглого або прямокутного перерізу діаметром 25–35 мм. На жаль, ці методи не дозволяють одержувати великі монокристали, і цьому є дві причини: 1) зі збільшенням розміру кристала зростає об'єм ванни розплаву, що збільшує ймовірність проливання металу, оскільки ванна утримується лише силами поверхневого натягу; 2) зі зростанням розміру в кристалі виникає термічне напруження, яке призводить до зниження якості структури і зрештою до руйнування зливка.

Зазначені проблеми вдалося успішно подолати в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Ми запропонували для вирощування великих кристалів використовувати два джерела нагрівання: плазово-дугове і височастотне (рис. 3). При цьому плазово-дугове джерело нагрівання безпосередньо формує монокристал, а височастотне джерело, підігріваючи тіло монокристала, дозволяє гарантовано запобігти проливанню ванни розплаву. Крім того, ми відмовилися від застосування великої металевої ванни, яка покриває весь поперечний переріз кристала, і використовуємо локальну ванну. Це

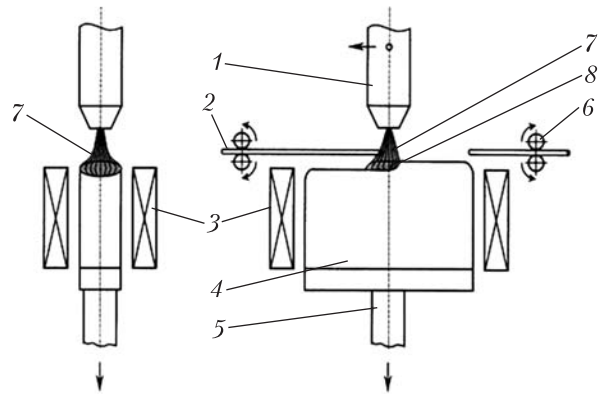


Рис. 3. Схема технології плазово-індукційного зонного плавлення для вирощування монокристалів тугоплавких металів: 1 — плазовий факел; 2 — пруток; 3 — індуктор; 4 — монокристал; 5 — піддон; 6 — механізм подавання; 7 — крапля; 8 — ванна

дало нам можливість вирощування профільованих кристалів, наприклад у вигляді пластин. Швидкість переміщення розплавленої зони у традиційних технологіях зазвичай становить 2–4 мм/хв, при використанні плазово-дугової технології вона значно вища — 17–20 мм/хв. Проте навіть за такої швидкості переміщення розплавленої зони час вирощування кристала становить 22–24 год. Дослідження теплових умов і термонапружених станів дозволили нам підвищити швидкість переміщення металевої ванни поверхнею кристала до 70 мм/хв. Випробування показали, що якісні характеристики монокристала при цьому практично не погіршилися. Головне запитання, на яке ми зараз шукаємо відповідь: якою є гранично допустима швидкість переміщення металевої ванни.

У розробленому нами методі плазово-індукційного зонного плавлення в результаті проведених досліджень було вирішено проблему спільної стабільної роботи двох джерел нагрівання; подолано проблему проливання металевої ванни; встановлено мінімальну температуру підігріву монокристала — 1800 К ($>0,5T_{пл}$); скорочено час вирощування монокристала в 4 рази; знижено витрати електроенергії з 7200 до 1800 кВт·год, зменшено витрати аргону і гелію в 4–5 разів за маси монокристала 12–13 кг. Слід зазначити, що знижен-

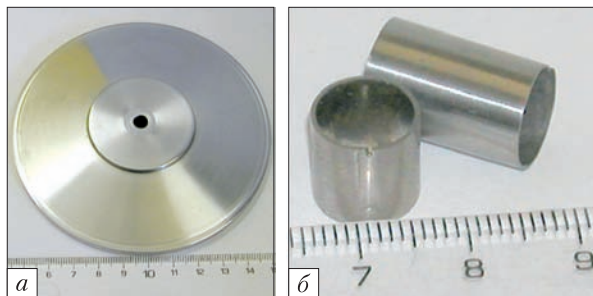


Рис. 4. Продукція з надвеликих профільованих монокристалів тугоплавких металів, отриманих методом плазово-індукційного зонного плавлення: *a* — молібденовий анод потужної рентгенівської трубки; *б* — зварні вольфрамові моногранні трубки для термоємисійних перетворювачів



Рис. 5. Надвеликі монокристали вольфраму у вигляді пластин

ня енергомосткості процесу є дуже важливим, оскільки за традиційних технологій на отримання 1 кг монокристала тугоплавкого металу витрачається стільки ж електроенергії, скільки й на одержання 1 т сталі.

Нам вдалося виростити монокристали різних кристалографічних орієнтацій. З огляду на новий спосіб вирощування (локальна металева ванна) потрібно було показати, що ці зливки являють собою суцільне монокристалічне тіло. Однією з відмінностей металевих монокристалів від напівпровідникових є те, що металеві монокристали складаються з субблоків з максимально допустимою дезорієнтацією субструктури до 5° . Монокристалічність отри-

маних злиwkів (матеріал технічної чистоти) було підтверджено порівнянням рентгенограм за Лауе — усі рентгенограми, зняті за різними перерізами, виявилися ідентичними одна одній. За результатами дослідження було встановлено, що максимальний кут дезорієнтації субструктури не перевищує 5° , а максимальний кут повороту кристалографічних площин становить менш як 3° . Мікротвердість монокристалів вольфраму — 325 HV (за навантаження 200 г), молібдену — 230 HV (за навантаження 100 г). Отже, зливки вольфраму і молібдену, отримані нами з використанням адитивних технологій, є суцільним монокристалічним тілом з досить досконалою структурою.

Отримані монокристали можна піддавати різним способам обробки, зокрема зварюванню. При цьому утворюється монокристалічний шов із субграницею посередині. З великих монокристалів тугоплавких металів було виготовлено різноманітні вироби, наприклад молібденовий анод потужної (порядку 100 кВт) рентгенівської трубки, зварні вольфрамові моногранні трубки для термоємисійних перетворювачів тощо (рис. 4). На замовлення американської фірми «Crystal Is» було виготовлено 300 кг надвеликих монокристалів вольфраму у вигляді пластин (рис. 5) та експортовано їх до США.

Отже, в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України запропоновано гібридний плазово-індукційний спосіб, розроблено адитивну технологію світового рівня і створено єдину у світі ділянку з вирощування надвеликих профільованих монокристалів вольфраму і молібдену.

Крім вирощування надвеликих монокристалів тугоплавких металів, адитивні технології можна використовувати для вирішення проблеми пригнічення ліквациї у великих зливках. Під час обробки зливка звичайної розливки до 30% металу — донна і головна частина — звичай видаляються в обрізь. Ми розробили новітній науково-технологічний підхід до подолання цієї проблеми. Традиційні шляхи боротьби з ліквациєю у великих зливках широко відомі і розроблені вже досить давно. Це:

- регулювання температури металу, що заливається;
- регулювання теплового поля на поверхні ванни;
- введення холодильників;
- електромагнітне перемішування;
- віброобробка;
- реверсивне обертання металу;
- обробка ультразвуком;
- електрогідроімпульсна обробка;
- обробка розплаву занурюванням стрижня, що коливається.

Втім, на жаль, проблема ліквідації й досі залишається далекою від вирішення. Хочу нагадати добре відому всім металургам і матеріалознавцям формулу для визначення в реальних умовах ефективного коефіцієнта розподілу домішок або легуючих елементів між рідкою і твердою фазами:

$$K = \frac{K_0}{K_0 + (1 - K_0)e^{-f\delta/D}}$$

де f — швидкість кристалізації, см/с; δ — товщина дифузійного шару, який прилягає до фронту кристалізації і збагачений домішками, см; D — коефіцієнт дифузії домішки, см²/с.

Реальний коефіцієнт розподілу залежить від швидкості кристалізації. Якщо збільшити швидкість кристалізації до певної величини, можна отримати склад твердого тіла, близький до складу рідини, тобто коефіцієнт розподілу наблизитиметься до одиниці. У реальних переплавних металургічних процесах настільки збільшити швидкості кристалізації неможливо — потрібен стік тепла, який з використанням традиційних шляхів організувати не можна. Ми вирішили цю проблему, застосувавши локальну металеву ванну (рис. 6б), при цьому вільна поверхня, по суті, і є стоком тепла. Локальна ванна, переміщуючись поверхнею і підживлюючись надходженням матеріалу, формує великий зливок.

Зіставлення макроструктури зливка, отриманого традиційним методом виплавки за допомогою плазово-дугової технології, і зливка, отриманого з використанням адитивної технології, переконливо свідчить на користь

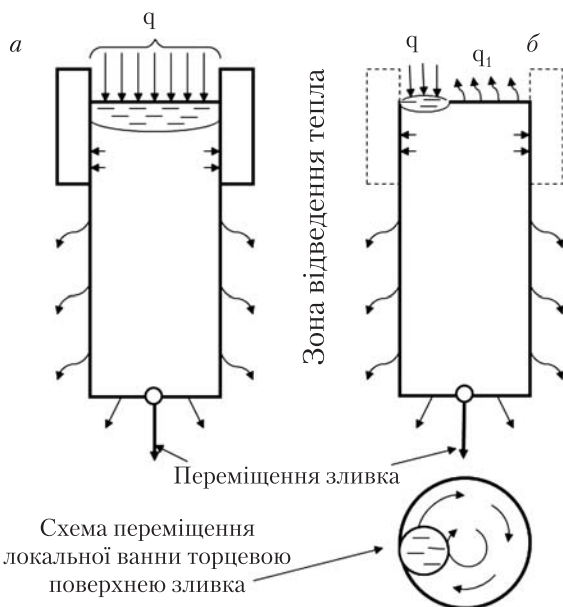


Рис. 6. Схема відведення тепла від зливка: *a* — діаметр ванни і діаметр зливка є рівними; *б* — застосування локальної металеві ванни

запропонованого нами методу — абсолютно рівномірний розподіл зерен; структура дуже дрібнозерниста. У такий спосіб можна отримувати зливки будь-якого розміру з гарантованою величиною зерна. Виключається вплив на структуру масштабного фактора, що особливо важливо для одержання великих зливків. Дослідження механічних характеристик зливків, отриманих за адитивною технологією, зокрема випробування зразків на ударну в'язкість і розрив, показали, що вони на 10–50% кращі за нормативні показники.

Отже, нами було показано обмеженість традиційних технологій щодо керування ліквідаційними процесами при кристалізації великих зливків. Обґрунтовано, що отримання великих зливків шляхом пошарового формування з локальної металеві ванни зі швидкістю кристалізації, яка в 5–10 разів перевищує швидкість, характерну для переплавних процесів, дозволяє уникнути зональної ліквідації і виключити масштабний фактор. Підтверджено можливість отримання однорідної структури

по всьому перерізу зливка, в тому числі в його донній і головній частинах. Економія металу при цьому становить близько 30%, оскільки немає необхідності обрізати донну і головну частини зливка. Встановлено, що механічні характеристики злиwkів, отриманих за адитивною технологією, на 10–50% перевищують характеристики, наведені в ДСТУ для тієї самої марки сталі.

Адитивні технології можна також використовувати в процесі зварювання. Відверто кажучи, їх уже давно застосовують в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України для керування структурою зварного шва, але раніше увага просто не акцентувалася на тому, що це саме адитивні технології. За традиційної технології зварювання структура шва складається з великих зерен і має чітко виражену зону транскристалізації посередині. Зварний шов, отриманий за адитивною технологією, характеризується рівномірною дрібнозернистою структурою. В Інституті є робот, який із застосуванням дугової дротової технології зварювання може формувати деталі будь-якої форми.

Вже сьогодні є зацікавленість з боку ПАТ «Мотор Січ» у виготовленні окремих деталей саме за дротовою, а не порошковою адитивною технологією. Зараз ми відпрацьовуємо програмне забезпечення для виготовлення виробів дуже складної форми.

З огляду на значний вплив теплового джерела, постає питання щодо напружень у металі, які виникають у технологічному процесі. Для дослідження теплового і напружено-деформованого станів зразків ми використовуємо методи математичного моделювання. Наприклад, під час багат шарового формування зразків таврового перерізу з досить великими лінійними розмірами виникають значні температурні градієнти, що може призвести до небажаної деформації в певних частинах виробу. Як резуль-

тат моделювання ми вивчали залишковий прогин виробу в певній площині. За результатами досліджень було розроблено рекомендації, які дозволяють встановити оптимальні температури попереднього підігріву підкладки, що зменшує величину залишкового прогину.

Таким чином за допомогою методів математичного моделювання можна оцінити теплонапружений стан виробів, отриманих за адитивною технологією. Встановлено, що попередній підігрів виробів до температури, вищої за $0,5T_{пл}$, на 2–3% знижує рівень деформацій, які виникають у результаті термічних впливів, а постійний підігрів повністю усуває деформацію виробів.

Розроблені в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України адитивні технології мають перспективи застосування в таких галузях промисловості, як важке та енергетичне машинобудування, авіакосмічна сфера, транспортне машинобудування, зокрема суднобудування.

На нашу думку, подальший розвиток адитивних технологій у цьому напрямку неможливий без проведення теоретичних досліджень і виконання практичних випробувань. Основні напрями досліджень мають бути такі:

- створення теоретичних основ керування структуроутворенням при кристалізації металів і сплавів;
- розроблення новітніх адитивних технологій для отримання металевих матеріалів із заданою структурою (монокристалічною і дрібнозернистою) при виробництві злиwkів і виконанні зварних швів;
- створення математичних моделей для прогнозування теплонапруженого стану виробів і оптимізації технологічних процесів.

Дякую за увагу!

За матеріалами засідання підготувала О.О. Мележик

V.O. Shapovalov

Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv)

SCIENTIFIC FOUNDATIONS OF ARC ADDITIVE TECHNOLOGIES
IN SPECIAL ELECTROMETALLURGY AND WELDING

Transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, May 30, 2018

The report analyzes the current state of development of arc additive technologies in the world, shows the role of Ukrainian science in the implementation of achievements and developments in the domestic industry in this direction. The importance and urgency of research in the field of special metallurgy, welding and materials science conducted at the Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine is noted. On the basis of these results, a new concept for controlling the structure of metals and alloys during crystallization is created and experimentally tested. Technological bases of production of metal materials with a single-crystal and controlled polycrystalline structure is developed.