

УДК 621.326

**Святослав Мотруніч, к.т.н., с.д.; Джі Джунвень; Анатолій Завдовеев, к.т.н., с.д.;
Маріанна Димань, к.т.н., с.д.; Іван Волосатов; Віталій Книш, д.т.н., проф.**
Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ, ОТРИМАНИХ 3D ДРУКОМ ДУГОВИМИ АДДИТИВНИМ ТЕХНОЛОГІЯМИ З НИКЕЛЕВОГО СПЛАВУ INCONEL 625

Анотація. Дані дослідження показують вплив захисного газу на механічні та структурні властивості 3D надрукованих елементів, отриманих за технологією холодного перенесення металу при використанні дугового адитивного виробництва жароміцного сплаву Inconel 625, який має високу корозійну стійкість.

Ключові слова: дугове адитивне виробництво, Inconel 625, мікроструктура, електронна мікроскопія, механічні властивості.

Sviatoslav Motrunich, Ph.D.; Ji Junwen; Anatoly Zavdovcev, Ph.D.; Marianna Dyman, Ph.D.; Ivan Volosatov; Vitaliy Knysh, Ph.D., Prof.

MECHANICAL PROPERTIES OF 3D PRINTED INCONEL 625 ELEMENTS OBTAINED BY WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING

Abstract. Present study discusses influence of shield gas influence on mechanical and structural properties of 3D printed elements, obtained by cold metal transfer technology of wire arc additive manufacturing of refractory high corrosion resistant Inconel 625 alloy.

Keywords: wire arc additive manufacturing, Inconel 625, microstructure, electron microscopy, mechanical properties

Inconel 625 – це нікель-хром-молібденовий сплав із високим вмістом нікелю, в порівнянні з іншими сплавами Inconel. Він має високу температуру плавлення, міцність і стійкість до високих температур. Крім того, він має високими антикорозійним та антиокислювальними властивості. Це робить його широко використовуваним в ядерних реакторах, авіації та морській техніці. Форми більшості елементів та конструкцій в цих галузях мають складну форму, що робить їх виготовлення дуже дорогим традиційними методами, через необхідність інтенсивної механічної обробки. Наприклад, літературний огляд показав, що виготовлення ребер жорсткості шасі літаків за дуговими адитивними технологіями (WAAM) дозволяє зекономити до 78% вартості сировини порівняно з іншими традиційними процесами послідовної механічної обробки. Також показано, що показники міцності елементів конструкцій отриманих методом WAAM мають співставні з литими деталями з Inconel 625.

Мікроструктуру Inconel 625 можна додатково описати як двофазну структуру, що складається з матриці твердого розчину та дисперсії тонкодисперсних когерентних частинок інтерметалічної сполуки Ni₃Nb. Матриця твердого розчину складається в основному з нікелю та хрому з меншою кількістю молібдену, заліза та інших елементів, таких як ніобій, вуглець і кремній, залежно від конкретного складу. Наявність ніобію в сплаві сприяє стабілізації матриці та підвищенню її міцності та стійкості до деформації, тоді як дисперсія частинок Ni₃Nb забезпечує додаткове зміцнення та підвищує характеристики повзучості та опору втомі.

Для дугового адитивного 3D друку, використовували джерело живлення Fronius TPS 5000. Присадковий матеріал INCONEL Filler Metal 625 (UNS N06625, ISO 15156-3) діаметром 1,2 мм, для дугового зварювання в середовищі захисних газів, використовувався для WAAM. Процедuru плавлення металу реалізувалася за

допомогою роботизованої руки ABB2600. Режим зварювання наплавленням було прийнято як оптимальний відповідно до специфікації Fronius для конкретних зварювальних витратних матеріалів і представлено в Таблиці 1. В ролі підкладки використовували катану пластину з низьковуглецевої сталі товщиною 20 мм. Кожен наступний шар накладався після охолодження попереднього до 100°C. Маршрут сканування та виготовлений елемент стіни схематично показані на Рис. 1а, товщина отриманого елемента стінки становить 15 мм. На Рис 1.б виділені місця вирізки зразків для дослідження механічних властивостей (№1-4) та металографічних досліджень (№5).

Таблиця 1 – Технологічні параметри 3Д друку сплаву Inconel 625

№	Швидкість зварювання, мм/с	Швидкість подачі дроту, м/хв	Захисний газ	Подача газу, л/хв	Зварювальний струм, А	Зварювальна напруга, V
1	10	4.3	Ar, 99,99%	15	107	15,9
2			Ar+2.5%CO		92	10,3

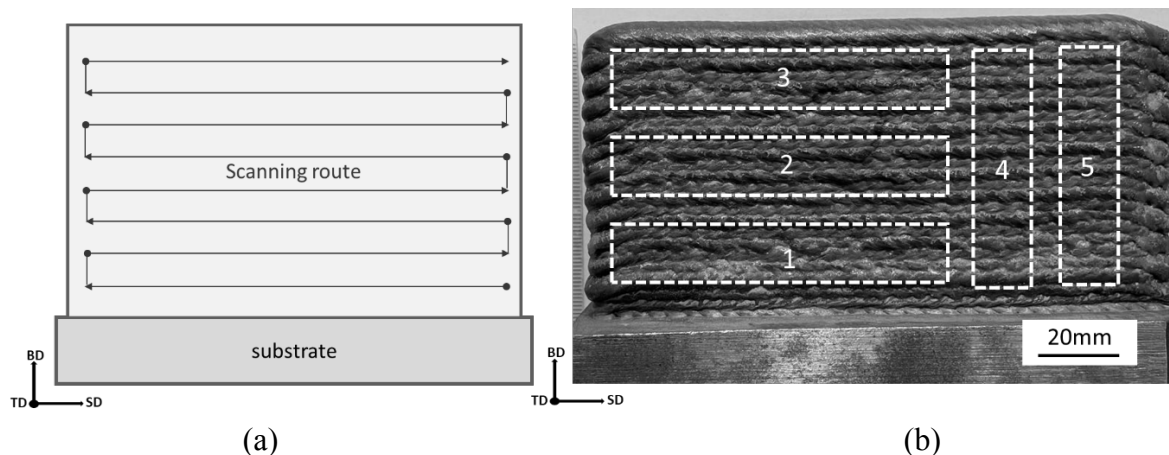


Рисунок 1. Схематичне зображення процесу 3Д друку (а) та виготовленого елемента стінки (б); BD – напрямок по висоті 3Д друку, SD - напрямок сканування, TD-поперечний напрямок.

Випробування на розтяг проводили при кімнатній температурі відповідно до ISO 6892-1 та визначали основні механічні властивості металу зразків: границю міцності (UTS), умовну границю плинності (YS) та характеристики пластичності (δ_5 - рівномірне видовження після розриву та ψ - відносне звуження). З заготовок виготовляли циліндричні зразки з діаметром робочої частини 6 мм (тип II відповідно до ISO 6892). Випробування на розтяг проводили на універсальному сервогідролічному комплексі MTS 318.25 з максимальним зусиллям 250 кН. Додатково для встановлення температурного впливу технології на міцність матеріалу проводили дослідження твердості за Віккерсом з навантаженням 100 г протягом 10 с, по 3 вимірювання на точку.

Для структурного аналізу було використано декілька методів: електронної скануючої мікроскопії (SEM, використовуючи установку Tscan Mira 3 LMU) та енергодисперсійний рентгенівський аналіз (EDX, від Oxford Instruments). Підготовку металографічних зразків для мікроструктурних досліджень проводили за стандартними методиками з використанням шліфувальних паперів різної шорсткості (P240, P400, P600, P1200, P2000). Остаточне полірування проводили на алмазній суспензії з розміром полірувальних частинок 1 мкм. Для виявлення та ідентифікації морфології мікроструктури зразка використовували електрохімічне травлення 14% водним

розчином хромового ангідриду. Параметри травлення: анодна густина струму 1 A/cm^2 , напруга 23 В, час витримки 19 с з подальшим промиванням і сушінням.

Мікроструктура металу (Рис. 2), отримані з витравлених зразків, показали чіткі шари, типові для технологій адитивного виробництва, а також межі розплавленої ванни. Мікроструктура демонструє дендритний характер, орієнтований у тому самому напрямку, з відносно дрібною зернистістю на межах кожного шару. Хоча мікроструктура не комірчаста, вона схожа на зварну мікроструктуру.

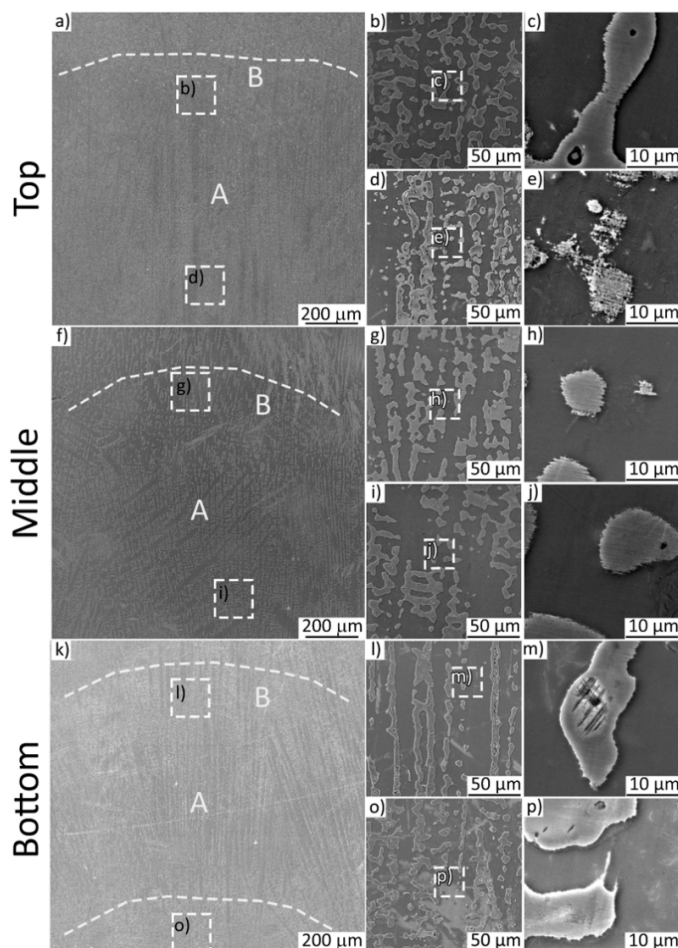


Рисунок 2. Мікроструктура елемента стінки Inconel 625. (a-e) – верхня частина, (f-j) – середня частина (k-p) – нижня частина заготовки. «А» - позначає середину наплавленого шару, «В» - перехід від шару до шару.

В основному мікроструктура складається зі стовпчастих дендритів, як зображено на малюнку 6. Існує тенденція до роздавнення дендритних гілок у точках переходу на сплавлені лінії між послідовними шарами. Крім того, при наближенні до верхньої частини отриманого елемента дендритні гілки стають більш видовженими і розгалуженими. Це пов'язано з тим, що при багат шаровому осадженні попередні шари зазнавали багаторазового термічного впливу і метал піддавався зварювальному відпуску, що, ймовірно, викликало додаткове дисперсійне зміцнення та модифікацію структури. При цьому верхні шари наплавлення мають характерну/близьку до литої структуру

Результати випробувань на розтягування при температурі навколишнього середовища приведені в Таблиці 2. Показано, що 1ий режим 3Д друку (Ar, 99,99%) має дещо нижчі показники пластичності чим 2ий технологічний режим (Ar+2.5%CO). Проте 1ий режим має дещо вищі показники міцності. Рівномірний розподіл значень

видовження спостерігається для всіх досліджуваних технологічних режимів, що свідчить про однорідну структуру зразків. Така закономірність механічних властивостей визначається особливостями структуроутворення при багатошаровому наплавленні.

Таблиця 2 – Механічні властивості досліджуваних зразків із сплаву Inconel 625

Технологія	Місце вирізки зразка	YS, МПа	UTS, МПа	δ_5 , %	ψ , %
1	Низ	383,1	712,1	27%	56%
	Середина	384,5	688,6	26%	59%
	Верх	370,5	671,4	25%	53%
	По висоті	371,9	661,5	28%	76%
2	Низ	400,7	701,1	31%	60%
	Середина	394,9	686,1	35%	59%
	Верх	390,2	679,3	34%	62%
	По висоті	399,6	677,4	34%	78%

Відповідні фрактограми для зразків на розтяг представлені на Рис. 3. Жовтими пунктирними лініями виділено положення дендритних плечей. Загальний характер руйнування пластичний зі змішаною морфологією для горизонтальних зразків (Рис. 3 а-б), а саме одночасне існування зон з ямками невеликого розміру, а також великими ямками, переважно міждендритними. Вертикальний (по висоті) зразок (Рис. 5 d) має різну морфологію, без явних слідів дендритної структури, а ямочки однорідні та розподілені однорідно. Це пояснюється підвищеним рівнем пластичності у вертикальному (поперечному) напрямку елемента стіни. Такий характер поверхонь зламу добре узгоджується з даними механічних випробувань.

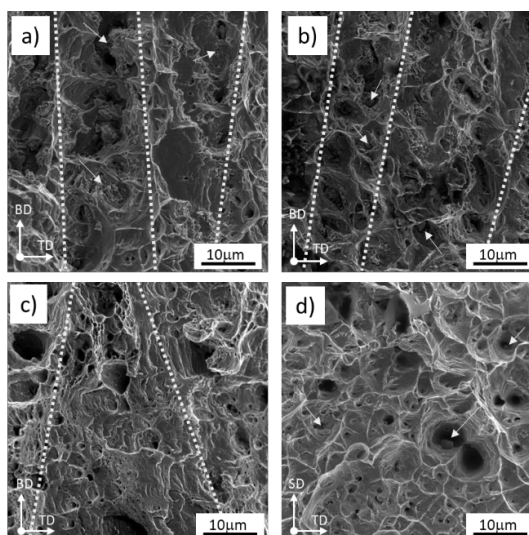


Рисунок 3. Поверхня зламів зразків елемента Inconel 625: нижня (а), середня (б), верхня (с) по висоті (d)

Acknowledgment. Дана робота виконана в рамках Гранту НАН України дослідницьким лабораторіям/групам молодих вчених НАН України для проведення досліджень за пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки 2024-2025 рр. (№ д/р 0124U0021749).