

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ДУГОВОГО 3D ДРУКУ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ СПЛАВУ INCONEL 625

С.І. Мотруніч¹, О.В. Яровицин¹, І.Р. Волосатов¹, Д.С. Томко², Цзі Цзюньвень^{2,3}

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: motrunich@nas.gov.ua

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект, 37.

³Мюнхенський технічний університет. 80333, Мюнхен, Арцисштрассе, 21, Німеччина.

Досліджено вплив параметрів процесу дугового адитивного виробництва із застосуванням плавкого електрода у вигляді дроту в захисному газовому середовищі (WAAM) на механічні властивості багатошарового наплавленого металу нікелевого суперсплаву Inconel 625 у структурному стані «as built» у діапазоні температур 20...1100 °С. Із вирошеної заготовки типу «вертикальна стінка» виготовлено та випробувано повнорозмірні циліндричні зразки Ø5×M10 при 20 °С та мініатюрні плоскі пропорційні зразки з поперечним перерізом робочої частини 2,5×2,5 мм при 20...1100 °С. Наведено результати металографічних досліджень, виконаних растровою електронною мікроскопією, що показали особливості стовпчастої дендритної структури та морфології вторинних фаз у різних зонах вирошеної заготовки. Проаналізовано деформаційну здатність отриманого наплавленого металу сплаву Inconel 625 з точки зору відомої підвищеної опірності цього сплаву двом підвидам гарячих тріщин за механізмом «solid-state cracking». Показано, що перехід від захисного газу Ar до суміші 97,5 % Ar + 2,5 % CO₂ при застосуванні адитивної технології WAAM у діапазоні температур 600...900 °С суттєво знижує для отриманого наплавленого металу сплаву Inconel 625 значення границь міцності, плинності та пластичності, зокрема при температурі 800 °С – орієнтовно у 1,5 рази. Для сплаву Inconel 625 виконано порівняльний аналіз експериментальних даних із короткочасної міцності для наплавленого за адитивною технологією WAAM металу та відповідних опублікованих даних для промислових напівфабрикатів, виготовлених за традиційними технологіями. Бібліогр. 21, табл. 6, рис. 8.

Ключові слова: дугове адитивне виробництво, технологія WAAM, сплав Inconel 625, наплавлений метал, мікроструктура, короткочасні механічні властивості, підвищені температури

Вступ. Адитивне виробництво металевих деталей стає все важливішим напрямом сучасного машинобудування завдяки можливості створення складних геометричних форм, скорочення матеріальних витрат і часу виготовлення [1, 2]. Дугове адитивне виробництво із застосуванням плавкого електрода у вигляді дроту в захисному газовому середовищі (WAAM) займає особливе місце серед технологій 3D друку металів завдяки високій продуктивності процесу та можливості виготовлення великогабаритних деталей [3].

Сплав Inconel 625 є придатним до застосування в адитивному виробництві [4–8] через низьку ймовірність утворення дефектів у багатошаровому наплавленому металі, проте в певних умовах він може проявляти схильність до формування гарячих тріщин ліквідаційного та кристалізаційного типу [6–8].

Inconel 625 – це нікель-хром-молібденовий сплав із високим вмістом нікелю (58...69 %), який має достатньо високі експлуатаційні характеристики до 800 °С [7]. Сплав має високу темпера-

туру плавлення, підвищені міцність і стійкість до високих температур, зокрема антикорозійні властивості. Ці характеристики забезпечують широке використання сплаву Inconel 625 в ядерних реакторах, авіаційній та космічній техніці, морському обладнанні [5, 6, 9, 10]. Більшість елементів конструкцій у цих галузях мають складну геометрію, що робить їхнє виготовлення традиційними методами високовартісним через необхідність інтенсивної механічної обробки. Наприклад, виготовлення ребер жорсткості шасі літаків за дуговими адитивними технологіями дозволяє заощадити до 78 % вартості сировини порівняно з традиційними процесами послідовної механічної обробки [11].

За даними [8] сплав Inconel 625 вирізняється вмістом у нікелевій матриці 20...23 ваг. % Cr, 8...10 ваг. % Mo та 3,15...4,15 ваг. % (Ta + Nb). Легування Nb і Mo зміцнює твердий розчин його матриці Ni-Cr. При кристалізації цього сплаву в матриці та по границях зерен виділяються карбіди типу MeC, також можливе виділення фаз Лавеса. Після термічної обробки за режимами старіння сплав Inconel 625 дисперсно зміцнюється γ' - та δ - фазами на основі Ni₃Nb і карбідами переважно типу MeC, Me₆C на основі Nb і Ta, а також значно меншою мірою – фазами Лавеса та γ' -фазою. На-

Авторське право © Автор(и)

© Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026

Це стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

явність ніобію в сплаві сприяє стабілізації матриці та підвищенню її міцності й стійкості до деформації, а дисперсія частинок Ni_3Nb забезпечує додаткове зміцнення та підвищує характеристики опору повзучості й опору втомі.

Якість кінцевих виробів, отриманих WAAM, безпосередньо залежить від технологічних параметрів процесу [12–14]. Ключовими факторами є: режими зварювання (струм, напруга, швидкість), тип захисного газу, температурні умови та геометричні параметри наплавлення. Також важливим є вплив захисного газового середовища на процеси формування мікроструктури та механічні властивості наплавленого металу Inconel 686, обумовлений зміною складу захисного газу від Ar до He та відповідно зміною швидкості охолодження наплавленого металу в температурному діапазоні 500...800 °C [14].

Через значно більші загальні витрати захисних газів в умовах адитивного виробництва способом WAAM виробів із жаростійких нікелевих сплавів порівняно зі співмірною за вагою «класичною» зварною конструкцією з метою зниження собівартості процесу доцільним видається застосування «чистого» аргону або його сумішей з недорогими активними газами, наприклад – CO_2 . Тому актуальними є дослідження такого багатопарового наплавленого металу з метою оцінки умов його формування, мікроструктури та механічних властивостей.

Дослідження поведінки матеріалів при підвищених температурах є критично важливим для жароміцних сплавів, оскільки вони повинні зберігати механічні характеристики в широкому діапазоні робочих температур. Структура, сформована під час адитивного виробництва, може суттєво відрізнятися від структури традиційно обробленого матеріалу, що впливає на температурну стабільність механічних властивостей.

Метою роботи є дослідження мікроструктури та механічних властивостей наплавленого металу сплаву Inconel 625, отриманого за адитивною технологією WAAM, у структурному стані «as welded»/«as deposited»/«as built» згідно з ISO/ASTM 52900:2015 та ISO/TR 25901-1:2016 (без термічної обробки), а саме:

– оцінка короточасних механічних властивостей у діапазоні температур 20...1100 °C, які значною мірою визначають технологічну спадковість матеріалу після наступних термічних обробок;

– аналіз деформаційної здатності наплавленого металу сплаву Inconel 625 з точки зору відомої його підвищеної опірності гарячим тріщинам типу «ductility dip crack» згідно з ISO 17641-1:2004 та ISO/TR 25901-1:2016 («solid-state cracking» за [4, 5, 15]);

– оцінка впливу виду захисного газу на механічні властивості наплавленого металу сплаву Inconel 625 при нормальних і підвищених температурах;

– порівняння отриманих експериментальних даних показників короточасної міцності з опублікованими для промислових напівфабрикатів зі сплаву Inconel 625, виготовлених за традиційними технологіями.

Наукова новизна наведеного матеріалу полягає в комплексному вивченні впливу захисного газового середовища при технології WAAM на механічні властивості наплавленого металу сплаву Inconel 625 без додаткової термічної обробки з особливою увагою до високотемпературної поведінки матеріалу.

Методика проведення досліджень. Для дугового адитивного 3D друку використовували присадний дріт INCONEL Filler Metal 625 (UNS N06625, ISO 15156-3:2020) діаметром 1,2 мм для дугового зварювання в середовищі захисних газів (табл. 1).

Дугове адитивне виробництво здійснювали з використанням джерела живлення Fronius TPS 5000 та роботизованої системи ABB2600 [16]. У ролі підкладки використовували катану пластину з низьковуглецевої сталі завтовшки 20 мм. Режими зварювання було вибрано відповідно до специфікації Fronius для конкретних зварювальних витратних матеріалів (табл. 2). Кожен наступний шар накладався після охолодження попереднього до температури 100 °C для забезпечення контрольованого термічного циклу. Товщина отриманого елемента стінки становила 15 мм.

Досліджували вплив двох технологічних режимів, що відрізнялися складом захисного газу: режим 1 із використанням чистого аргону (99,99 %) та режим 2 з газовою сумішшю аргону з 2,5 % діоксиду вуглецю. Для систематизації результатів використовували систему координат: BD (Build Direction) – напрямок по висоті 3D друку, SD (Scanning Direction) – напрямок сканування, TD (Transverse Direction) – поперечний напрямок.

Таблиця 1. Хімічний склад присадного дроту INCONEL Filler Metal 625 (UNS N06625, ISO 15156-3:2020) діаметром 1,2 мм, мас. %

Ni	Cr	Mo	Nb + Ta	Fe	Co	Al	Ti	C	Si	Mn	P	S
>58	20...23	8...10	3,15...4,15	<5,0	<1,0	<0,4	<0,4	<0,1	<0,5	<0,5	<0,015	<0,015

Таблиця 2. Технологічні параметри 3D друку сплаву Inconel 625

№ режиму	Швидкість зварювання, мм/с	Швидкість подачі дроту, м/хв	Захисний газ	Витрати газу, л/хв	Зварювальний струм, А	Зварювальна напруга, В
1	10	4,3	99,99 % Ar	15	107	15,9
2			97,5 % Ar + 2,5 % CO ₂		92	10,3

Для структурного аналізу використовували електронну сканувальну мікроскопію (SEM) на установці 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) з подальшим остаточним поліруванням на алмазній суспензії з розміром полірувальних частинок 1 мкм. Для виявлення та ідентифікації морфології мікроструктури зразків використовували електрохімічне травлення 14 %-м водним розчином хромового ангідриду з параметрами: анодна густина струму 1 А/см², напруга 23 В, час витримки 19 с з подальшим промиванням і сушінням.

Враховуючи розміри 3D друкованої стінки (рис. 1) металу, були проведенні дослідження впливу типорозміру зразків на механічні характеристики при кімнатній температурі. Порівняння проводили на двох типах зразків для випробувань: стандартні циліндричні зразки відповідно до ДСТУ ISO 6892-1:2019 (рис. 2, а) і спеціально спроєктовані з урахуванням вимог діючих стандартів [17] плоскі пропорційні мініатюрні зразки (рис. 2, б) для випробувань обмеженого об'єму наявного матеріалу при кімнатній та підвищених температурах.

Із виготовлених заготовок багат шарового наплавленого металу «вертикальна стінка» електроерозійною різкою вирізали заготовки зразків у різних напрямках (рис. 1, а) та з різних частин заготовки для комплексного дослідження анізотропії властивостей. Частини №№ 1–4 призначалися для повнорозмірних циліндричних зразків для ви-

значення механічних властивостей, частина № 5 – для металографічних досліджень. Зразки №№ 1–3 вирізані в повздовжньому напрямку з різних висотних зон (низ, середина, верх заготовки), зразок № 4 – у поперечному напрямку перпендикулярно лінії сплавлення між наплавленими шарами для дослідження анізотропії властивостей.

Циліндричні зразки з отриманих заготовок були виготовлені згідно до вимог стандарту ДСТУ ISO 6892-1:2019 (тип II з діаметром робочої частини 5 мм, рис. 2, а). У зразках витримано співвідношення між початковою розрахунковою довжиною зразка (l_0) та початковою площею поперечного перерізу зразка (F_0), за рівнянням $l_0 = 5,65\sqrt{F_0}$. Зразки виготовляли на токарному верстаті з прямокутних призматичних заготовок розміром 12×12×75 мм, вирізаних за допомогою електроерозійного устаткування. Шорсткість поверхні робочої частини зразка після токарної обробки з мінімальною глибиною різання та шліфування не перевищувала 1,25 мкм. Перед випробуванням проводили вимірювання розмірів робочої частини з точністю до 0,01 мм.

У якості заготовок для мініатюрних плоских пропорційних зразків (рис. 2, б) використовувалися проміжки матеріалу між заготовками повнорозмірних зразків №№ 1–3. Мініатюрні плоскі пропорційні зразки вирізалися в повздовжньому напрямку електроерозійною різкою з об'єму заготовки, надалі всі їхні поверхні підлягали чистовому шліфуванню та поліруванню.

Випробування на одновісний статичний розтяг повнорозмірних циліндричних зразків (рис 2, а) проводили на універсальному сервогідравлічному випробувальному комплексі MTS 318.25 з максимальним зусиллям 250 кН. Визначали основні

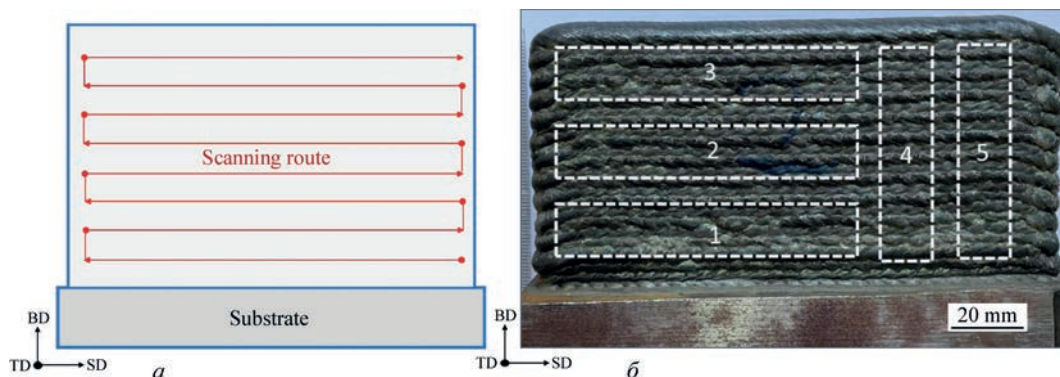


Рис. 1. Схематичне зображення процесу 3D друку (а) та виготовленого елемента стінки (б): BD – напрямок по висоті 3D друку, SD – напрямок сканування, TD – поперечний напрямок [16]

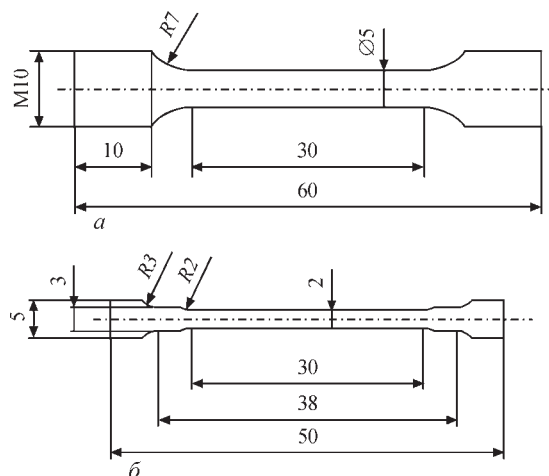


Рис. 2. Зразки для механічних випробувань: *a* – циліндричний для кімнатних температур відповідно до ДСТУ ISO 6892-1:2019, *б* – мініатюрний плоский пропорційний зразок завтовшки 2,5 мм для випробувань при кімнатній та підвищеній температурі

механічні властивості: границю міцності (UTS), умовну границю плинності (YS), рівномірне видовження після розриву (δ_5) та відносне звуження (ψ). Даний комплекс забезпечує жорстке навантаження зразка, що особливо актуально при визначенні границі плинності. Контроль параметрів при випробуваннях здійснювався за допомогою стандартного програмного забезпечення TestWorks 4 системи MTS 318.25. Дане спеціалізоване ліцензійне програмне забезпечення дає можливість відслідковувати в реальному часі обрані параметри експерименту та отримувати в електронному форматі значення стандартних характеристик, що описують поведінку матеріалу в процесі деформування.

Випробування проводили у жорсткому режимі зі швидкістю навантаження відповідно до ДСТУ ISO 6892-1:2019. Швидкість навантаження контролювали за переміщенням активного захвату випробувальної машини. Для точнішого визначення умовної границі плинності металу швидкість руху захвату на лінійній ділянці діаграми «напруження–деформація» і в зоні пружно-пластичної деформації становила 2 мм/хв. На цьому етапі використовувався екстензометричний датчик MTS 632.27F-20 з базою вимірювання деформації 25 мм. Точність вимірювання становила 0,001 мм, база вимірювань 25 мм. У подальшому швидкість навантаження до руйнування зразка становила 10 мм/хв. Механічні характеристики металу визначали автоматично шляхом обробки діаграм деформування за методикою, яка передбачена стандартом ДСТУ ISO 6892-1:2019.

Випробування мініатюрних плоских пропорційних зразків (рис. 2, *б*) на одновісний статичний розтяг проводили на випробувальній машині

MTS 810.50 при температурах 20, 600, 700, 800, 900, 1000 та 1100 °C для встановлення температурної залежності міцнісних характеристик матеріалу та попередньої оцінки працездатності сплаву в умовах підвищених температур. Визначали наступні механічні властивості: границю міцності (UTS), умовну границю плинності (YS), рівномірне видовження після розриву (δ_5). До складу випробувальної машини MTS 810.50 входили: динамометр MTS 661.20F-02 з осевим навантаженням до 50 кН із дискретністю 0,1 Н; екстензометр для роботи з підвищеними і високими температурами MTS 632.53F-11 з базою 25 мм та дискретністю вимірювання 0,00001 %; піч MTS 653 Furnace з максимальною температурою нагріву зразків при випробуванні до 1100 °C та тризонним контролем із градієнтом температури до 5 °C.

Результати досліджень. *Мікроструктурний аналіз.* Мікроструктурні дослідження виготовлених зразків (рис. 3) показали формування характерної для адитивного виробництва структури з чітко вираженими шарами та межами розплавленої ванни. Мікроструктура демонструє дендритний характер, орієнтований у напрямку температурного градієнта, з відносно дрібною зернистістю на межах кожного шару. Структура не є комірчатою, але має подібність до зварної мікроструктури, що типова для процесів WAAM [7, 9, 12].

Основна особливість мікроструктури полягає у формуванні стовпчастих дендритів, орієнтованих у напрямку нормального температурного градієнту. Спостерігається тенденція до деформації дендритних гілок у точках переходу між послідовними шарами на лініях сплавлення. При наближенні до верхньої частини виготовленого елемента дендритні гілки стають більш видовженими і розгалуженими, що пов'язано з багаторазовим термічним впливом на попередні шари під час багат шарового наплавлення.

Металографічний аналіз показав, що при багат шаровому наплавленні попередні шари зазнають зварювального відпуску внаслідок термічного впливу наступних шарів, що призводить до додаткового дисперсійного зміцнення та модифікації структури. Верхні шари наплавлення мають структуру, близьку до литої, оскільки вони не піддаються подальшому термічному впливу.

Міждендритні проміжки являють собою збагачені Nb зони [16], у середині та в околі яких виділяються кілька видів вторинних високодисперсних фаз (рис. 3). Спираючись на відомий аналіз мікроструктури в [8, 15, 18] можна констатувати, що це – карбіди типу MeC (рис. 3, *h, j*) та фази Лавеса (рис. 3, *p*).

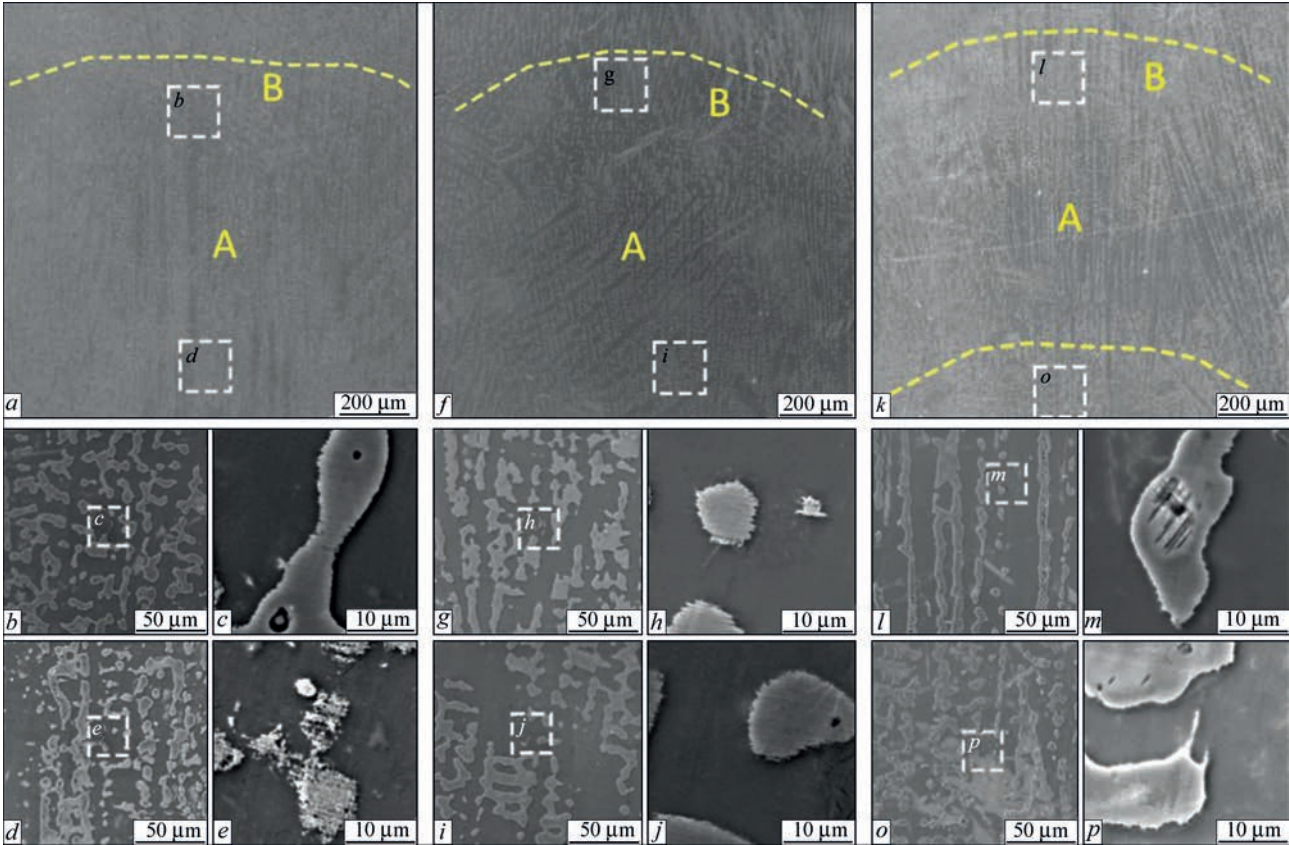


Рис. 3. Мікроструктура елемента стінки Inconel 625: (a–e) – верхня частина, (f–j) – середня частина (k–p) – нижня частина заготовки. «А» – позначає середину наплавленого шару, «В» – перехід від шару до шару [16]. Мікроструктура відповідає режиму 1

Механічні властивості повнорозмірних зразків за нормальної температури. Результати випробувань на розтяг при кімнатній температурі наведено в табл. 3. Аналіз показує, що технологічний режим 1 (99,99 % чистий аргон) забезпечує дещо вищі показники міцності порівняно з режимом 2 (Ag + 2,5 % CO₂), проте вирізняється нижчими показниками пластичності.

Режим 1 показав границю плинності в діапазоні 370,5...384,5 МПа та границю міцності 661,5...712,1 МПа. Режим 2 демонстрував дещо вищу границю плинності (390,2...400,7 МПа) при практично співставних значеннях границі міцності (677,4...701,1 МПа). Для режиму 2 порівняно з режимом 1 зазначається певне підвищення пластичності, де відносне видовження становило

31...35 % порівняно з 25...28 %, а також збільшення орієнтовно на 20 МПа величини границі плинності.

Рівномірний розподіл значень видовження спостерігається для всіх досліджуваних технологічних режимів, що свідчить про достатньо однорідну структуру зразків по висоті заготовки. Така закономірність механічних властивостей визначається особливостями структуроутворення при багат шаровому наплавленні та контрольованим термічним циклом з охолодженням між шарами до 100 °С.

Експериментальні дані границь плинності та міцності для наплавленого за технологією WAAM металу (табл. 2) є близькими до відповідних показників для литого сплаву Inconel 625 [8], проте

Таблиця 2. Механічні властивості повнорозмірних циліндричних зразків зі сплаву Inconel 625 за кімнатної температури

Технологічний режим	Місце вирізки зразка	Умовна границя плинності YS, МПа	Границя міцності UTS, МПа	Відносне видовження δ, %	Відносне звуження ψ, %
1 (99,9 % Ar)	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 (97,5 % Ar + 2,5 % CO 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

у 1,4...1,8 рази поступаються йому за показником пластичності.

Механічні властивості мініатюрних плоских пропорційних зразків за нормальних і підвищених температур. Результати випробувань на повздовжній статичний розтяг мініатюрних плоских пропорційних зразків у діапазоні температур 20...1100 °С для режимів 1 та 2 наведено в табл. 3, 4 та на рис. 4, 5 відповідно. Порівняння результатів випробувань за кімнатної температури мініатюрних плоских пропорційних зразків (рис. 2, б) показало, що, порівняно з повнорозмірними циліндричними зразками (рис. 2, а), як правило, спостерігається збільшення показників границь плинності, міцності та пластичності у 1,08...1,21 рази. Даний факт можна пояснити меншим поперечним перерізом робочої частини мініатюрного плоского пропорційного зразка та меншою кількістю в ній зерен і, відповідно, меншою сумарною довжиною їхніх границь.

Дослідження наплавленого металу сплаву Inconel 625, отриманого за технологією WAAM,

при підвищених температурах показало закономірне зниження характеристик міцності зі збільшенням температури випробування до 1100 °С.

При температурі 600 °С обидва режими демонструють зниження границі плинності приблизно на 35...40 % від значень при кімнатній температурі. При температурі 800 °С спостерігається аномальне підвищення міцності для режиму 1, що може бути пов'язано з дисперсійним зміцненням унаслідок виділення певних інтерметалідних фаз.

При температурі 900 °С і вище відбувається різке зниження характеристик міцності для обох режимів 3D друку, що вирізняється зближенням значень границь плинності та міцності. При температурі 1000 °С границя плинності знижується до 98...106 МПа, що становить лише 23...28 % від значень при кімнатній температурі. Режим 2 показав результати при температурі 1100 °С з границею плинності 63,5 МПа, що свідчить про збереження певного рівня міцності навіть при екстремально високих температурах, наближених до

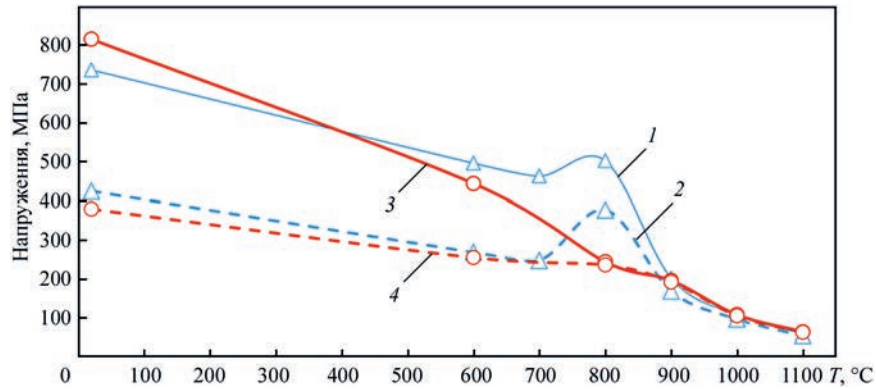


Рис. 4. Залежність показників короточасної міцності (суцільна лінія – границя міцності UTS; штрихова лінія – умовна границя плинності YS) від температури випробувань T для мініатюрних плоских пропорційних зразків із наплавленого металу сплаву Inconel 625, що відповідає режимам 1 та 2 технології WAAM: 1 – UTS (99,9 % Ar), 2 – YS (99,9 % Ar), 3 – UTS (97,5 % Ar + 2,5 % CO₂), 4 – YS (97,5 % Ar + 2,5 % CO₂)

Таблиця 3. Механічні властивості мініатюрних зразків при нормальних і підвищених температурах (режим 1; 99,99 % Ar)

Температура випробувань, °С	Умовна границя плинності YS, МПа	Границя міцності UTS, МПа	Відносне видовження δ , %
20	426	737	32
600	269,5	497	52
700	249	464	38,2
800	378	503	32,8
900	170	203	39,32
1000	98	109	25,3
1100	55	60	15

Таблиця 4. Механічні властивості мініатюрних зразків при нормальних і підвищених температурах (режим 2; 97,5 % Ar + 2,5 % CO₂)

Температура випробувань, °С	Умовна границя плинності YS, МПа	Границя міцності UTS, МПа	Відносне видовження δ , %
20	380	816	37,52
600	256	445	37,28
800	237	245	19,2
900	193	197	23,52
1000	106	109	26,8
1100	63,5	65	15,8

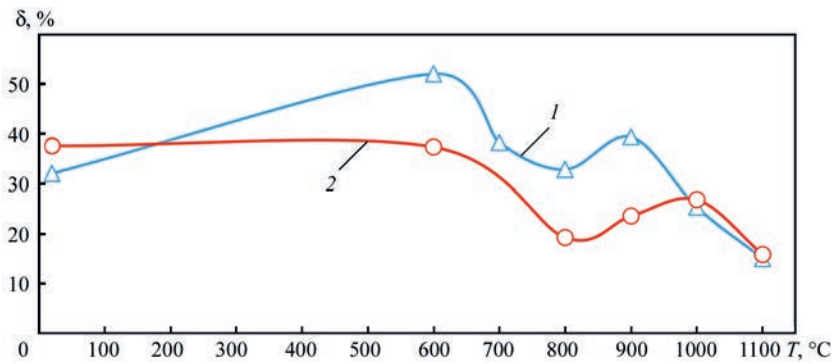


Рис. 5. Залежність відносного видовження δ від температури випробувань T для мініатюрних плоских пропорційних зразків із наплавленого металу сплаву Inconel 625, що відповідає режимам 1 та 2 технології WAAM: 1 – режим 1 (99,9 % Ar), 2 – режим 2 (97,5 % Ar + 2,5 % CO₂)

температурного діапазону кристалізації сплаву – 1148...1246 °C за даними [8].

Схильність наплавленого за технологією WAAM металу сплаву Inconel 625 у структурному стані «as built» до утворення гарячих тріщин типу «solid-state cracking» оцінювали за викладеним у [15] підходом, що базується на аналізі мінімальної пластичності нікелевого сплаву в локальних температурних інтервалах (рис. 6). При 600...900 °C наплавлений метал сплаву Inconel 625 демонструє схожі ознаки наявності інтервалу провалу пластичності з відомим «ductility-dip temperature range» (рис. 5, 6), зокрема характерним для гомогенних нікелевих жаростійких сплавів із вмістом 14...23 % Cr та 8...16 % Mo [19]. Проте експериментально визначені мінімальні значення пластичності наплавленого металу сплаву Inconel 625 у цьому температурному діапазоні є цілком достатніми для забезпечення високої опірності до утворення гарячих тріщин типу «ductility dip cracking» – відповідно $\delta = 32,8$ % для режиму 1 та $\delta = 19,2$ % для режиму 2 при температурі 800 °C порівняно з багатошаровим наплавленим металом деяких інших жаростійких і жароміцних сплавів. Наприклад, для наплавленого металу сплавів ЧС 40, ЕП367, Hastelloy C22, ЕИ 698 та Rene 80 міні-

мальні значення δ при 600...900 °C складають від 0,7 до 7 % [19].

При температурі 1000 та 1100 °C для обох режимів наплавлення за технологією WAAM також встановлені достатньо високі й близькі значення пластичності наплавленого металу сплаву Inconel 625 (рис. 5) – відповідно $\delta = 25,3...26,8$ % та $\delta = 15,0...15,8$ %. Визначені у структурному стані «as built» значення пластичності такого наплавленого металу сплаву Inconel 625 при температурі 1000 та 1100 °C, виходячи з наведених у [19] відповідних додаткових експериментальних даних, насамперед пов'язуються із встановленим обмеженням вмістом у ньому кисню та азоту (табл. 5). З огляду на відомі дані щодо положення інтервалу кристалізації сплаву Inconel 625 [8, 15] можна припустити, що експериментальні дані пластичності наплавленого металу Inconel 625 при 1100 °C, як мінімум, потрапляють у безпосередній окіл лівої границі «brittle temperature range» (рис. 5, 6). Таким чином, аналіз лінії тренду визначеного при температурах 1100 та 1100 °C показника пластичності наплавленого металу за технологією WAAM сплаву Inconel 625 (рис. 5) дає змогу також оцінити схильність до утворення іншого виду гарячих тріщин типу «solid-state cracking» – «segregation cracking». Експериментальні дані пластичності наплавленого металу при 1100 °C, отриманого за двома режимами технології WAAM, аналогічно показують достатньо високу опірність до утворення такого виду гарячих тріщин. Порівняння експериментальних даних високотемпературної пластичності при 800 °C ($\delta = 32,8$ % для режиму 1 та $\delta = 19,2$ % для режиму 2) та 1100 °C ($\delta = 15,0$ % для режиму 1 та $\delta = 15,8$ % для режиму 2) свідчить про меншу опірність отриманого наплавленого металу сплаву Inconel 625 до утворення гарячих тріщин підвиду «segregation cracking» порівняно з їхнім підвидом «ductility dip cracking».

Вплив захисного газу. Експериментально підтверджено збільшення в наплавленому металі в

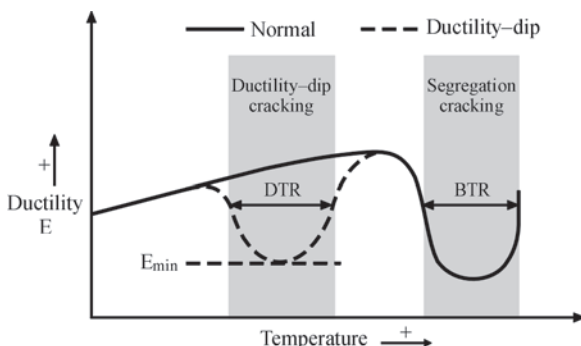


Рис. 6. Схема оцінки схильності нікелевого сплаву до утворення гарячих тріщин за механізмом «solid-state cracking» на основі аналізу його високотемпературної пластичності [15]: DTR – «ductility-dip temperature range» за ISO/TR 17641-3:2005; BTR – «brittle temperature range» за ISO/TR 17641-3:2005

Таблиця 5. Експериментальні дані з оцінки вмісту кисню та азоту в пробах наплавленого металу в структурному стані «as built» за методикою відновлювального плавлення в потоці газу-носія (вакуумної екстракції) згідно з ISO 4491-4:2019 та ASTM E1019-11:2018 відповідно

Режим	Захисний газ	Наплавлений метал сплаву Inconel 625, технологія WAAM	
		[O], ваг. %	[N], ваг. %
1	Ar	0,0085	0,0138
2	97,5 % Ar + 2,5 % CO ₂	0,0167	0,0109

два рази кисню (табл. 5) при заміні в умовах адитивної технології WAAM захисного газу Ar (режим 1) на 97,5 % Ar + 2,5 % CO₂ (режим 2) – відповідно з 0,0085 до 0,0167 ваг. %. Також встановлено суттєвий вплив зазначеного вище складу захисного газу на механічні властивості наплавленого металу сплаву Inconel 625 у структурному стані «as built» (рис. 5). Наплавлений із використанням захисного газу 97,5 % Ar + 2,5 % CO₂ (режим 2) метал сплаву Inconel 625 має дещо вищу границю міцності та пластичність при кімнатній температурі порівняно з іншим варіантом наплавленого металу (режим 1, захисний газ Ar). Але в діапазоні температур 600...900 °C такий наплавлений метал за показниками границь міцності, плинності та пластичності значним чином поступається першому варіанту наплавленого металу сплаву Inconel 625 (режим 1, захисний газ Ar).

Відомо, що додавання невеликої кількості активних газів у захисну атмосферу аргону при зварюванні плавким електродним дротом дозволяє позитивно впливати на перенос електродного металу в зварювальну ванну та зменшувати його втрати через розбризкування. Проте для високолегованих нікелевих сплавів, зокрема сплаву Inconel 625 (табл. 1), попри зазначений вище позитивний технологічний ефект, наявність у високотемпературній атмосфері зварювальної дуги таких складових дисоціації діоксиду вуглецю, як CO та O₂, може мати й певний негативний ефект. Встановлено (табл. 6), що зміна захисного газу від Ar до 97,5 % Ar + 2,5 % CO₂ при застосуванні плавкого електрода зі сплаву Inconel 625 викликає деякий перерозподіл окислювальних процесів у дуговому проміжку та зварювальній ванні. За даними EDX-аналізу перехід від Ar до 97,5 % + 2,5 % CO₂ у захисному газі викликає у відповідному наплавленому металі Inconel 625 незначне підвищення вмісту Mo (+ 0,37 %), Nb (+ 0,16 %), Ti (+ 0,05 %) та C (+ у ~1,08 рази) за рахунок зміщення окислю-

вальних процесів у бік вигорання Si (– 0,18 %), Cr (– 0,12 %), Fe (– 0,04 %). На нашу думку, підвищення пластичності при 20 °C та її зниження при 800 °C у наплавленому металі сплаву Inconel 625 при переході до захисного газу 97,5 % Ar + 2,5 % CO₂ пов’язано зі зменшенням вмісту Si та збільшенням вмісту C, що може призводити за [8, 15] до кількісного зменшення в міждендритних проміжках фаз Лавеса та кількісного збільшення карбідної фази типу NbC.

Не виключено, що виявлена для наплавленого металу сплаву Inconel 625 у структурному стані «as built» особливість зміни короткочасних механічних властивостей при 600...900 °C (рис. 4, 5) через високу стійкість карбідної фази типу NbC [8, 15] надалі може транслюватися як технологічна спадковість через типові режими термічної обробки [8] – «solution anneal» з ізотермічною витримкою при температурі ~1150 °C та «solution anneal» + «age-hardening» з ізотермічною витримкою при температурі 650...760 °C.

Порівняння за короткочасними механічними властивостями наплавленого металу та промислових напівфабрикатів сплаву Inconel 625, отриманих за традиційними технологіями виготовлення. На завершення викладеного матеріалу доцільно порівняти короткочасні механічні властивості в діапазоні температур 20...1100 °C для наплавленого металу сплаву Inconel 625 у структурному стані «as built», отриманого за адитивною технологією WAAM (рис. 4, 5), з аналогічними властивостями промислових полуфабрикатів (рис. 7, 8), отриманих за традиційними технологіями виготовлення.

Встановлено, що наплавлений метал сплаву Inconel 625 у структурному стані «as built» (рис. 4, 5) має близькі значення границь плинності YS та міцності UTS до відповідних показників прутків після гарячої прокатки (рис. 7), що пройшли термічну обробку за режимом «solution

Таблиця 6. Результати оцінки хімічного складу наплавленого металу сплаву Inconel 625 за даними EDX-аналізу (растровий електронний мікроскоп Tescan Mira 3 LMU, прискорююча напруга 20 кВ, площа аналізу 1 мм²)

Захисний газ	δ_s , % при 800 °C	мас. %												
		C*	Al	Ti	Cr	Ni	Co	Mo	Nb	Ta	Fe	Si	Mn	Total
Ar	32,8	9,35	0,16	0,08	20,74	56,33	0,00	9,51	3,57	0,00	0,10	0,16	0,00	100,00
		–	0,19	0,09	22,80	61,78	0,00	10,79	4,07	0,00	0,11	0,18	0,00	100,00
97,5 % Ar + 2,5 % CO ₂	19,2	10,09	0,16	0,13	20,46	55,69	0,00	9,73	3,67	0,00	0,07	0,00	0,00	100,00
		–	0,19	0,14	22,68	61,54	0,00	11,16	4,23	0,00	0,07	0,00	0,00	100,00

anneal». Основними відмінностями короткочасних механічних властивостей наплавленого металу сплаву Inconel 625 у структурному стані «as built» є швидше зниження значень границі міцності UTS у діапазоні температур 20...600 °C, а також значно менші значення пластичності δ – особливо при температурах більше за 600 °C.

Встановлено, що наплавлений метал сплаву Inconel 625 у структурному стані «as built» (рис. 4, 5) при температурах 600...700 °C значною мірою (у ~1,5 рази) поступається за показниками границь плинності YS та міцності UTS відповідним показникам прутків після кування, гарячої прокатки та, ймовірно, термічної обробки за режимом «solution anneal» + «age-hardening» (рис. 8). Незважаючи на близькі значення пластичності δ при кімнатній температурі для прутків після кування, гарячої прокатки та, ймовірно, термічної обробки при підвищених температурах цей показник значним чином, як правило, не менше ніж у 1,5 рази переважає наплавлений метал.

Аналіз рис. 4, 5, 7, 8 дозволив виділити додаткові закономірності, характерні для діапазону температур, починаючи з 800...900 °C. По-перше, як для наплавленого металу сплаву Inconel 625, так і для промислових напівфабрикатів із цього сплаву, виготовлених за традиційними технологіями, спостерігаються близькі значення границь плинності YS та міцності UTS. По-друге, промислові напівфабрикати зі сплаву Inconel 625 та отриманий наплавлений метал Inconel 625 демонструють у зазначеному діапазоні різний вигляд залежностей пластичності від температури. Для промислових напівфабрикатів зі сплаву Inconel 625 спостерігається зростаючий характер залежності пластичності від температури, що може сягати при температурах 1000...1100 °C її значень орієнтовно 80...120 %. Навпаки, для наплавленого металу зі сплаву Inconel 625 спостерігається спадаючий характер такої залежності, що при температурі 1100 °C досягає значень пластичності 15,0...15,8 %. Відомо, що схожа залежність пластичності δ від температури, зокрема з наявністю її зниження в діапазоні температур 982...1093 °C до ~15 %, спостерігається для наплавленого металу сплаву Inconel 625, отриманого ручним дуговим зварюванням покритими електродами Welding Electrode 112 [21].

Таким чином, перспективним напрямком подальших досліджень для наплавленого металу сплаву Inconel 625, отриманого за дуговими технологіями адитивного 3D наплавлення (зокрема й на основі процесу WAAM) є пошук таких режимів термічної або термомеханічної обробки, що дозволять

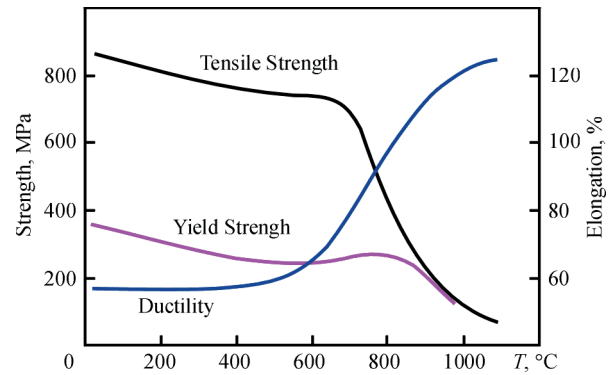


Рис. 7. Залежність показників короткочасної міцності від температури випробувань для прутків зі сплаву Inconel 625, отриманих гарячою прокаткою з наступною термічною обробкою за режимом «solution anneal» [8]

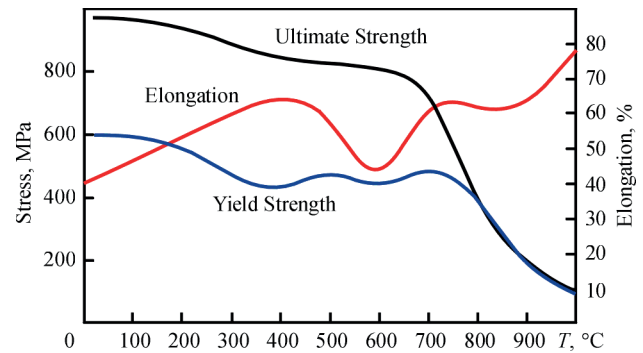


Рис. 8. Залежність показників короткочасної міцності від температури випробувань для прутків Ø12 мм зі сплаву Inconel 625, отриманих куванням і гарячою прокаткою [20]

наблизити механічні властивості наплавленого металу до рівня промислових напівфабрикатів, отриманих за традиційними технологіями виготовлення.

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).

Висновки

1. Досліджено мікроструктуру та короткочасні механічні властивості при 20...1100 °C зразків двох варіантів багатошарового наплавленого металу сплаву Inconel 625 у структурному стані «as built» (без додаткової термічної обробки), вирізаних із заготовки «вертикальна стінка», отриманої за адитивною технологією WAAM.

2. Мікроструктура зразків наплавленого металу сплаву Inconel 625 складається зі стовпчастих зерен і стовпчастих дендритів, що орієнтовані вздовж теплових градієнтів, з певними структурними особливостями, які змінюються вздовж висоти сканування в напрямку 3D друку через багаторазове термоцикування.

3. Встановлено, що характерною особливістю пластичності при 20...1100 °C для наплавленого металу сплаву Inconel 625 у структурному стані «as built» є наявність двох температурних інтервалів її зниження. Перший з них при температурі 600...900 °C має форму провалу і є «ductility-dip temperature range» – описаним у сучасних публікаціях з оцінки зварюваності нікелевих суперсплавів. Другий з них при температурі 1000...1100 °C має спадаючий характер і при температурі 1100 °C ймовірно наближається в окіл границі також відомого з аналогічних публікацій «brittle temperature range».

4. Показано, що добре відома висока опірність сплаву Inconel 625 до утворення гарячих тріщин за механізмом «solid-state cracking» (підвиди «ductility-dip cracking» та «segregation cracking») для дослідженого багатошарового наплавленого металу сплаву Inconel 625 у структурному стані «as built» співвідноситься з експериментально встановленими достатньо високими значеннями мінімальної високотемпературної пластичності в залежності від обраного режиму наплавлення: при 800 °C – 19,8 % та 32,8 %; при 1100 °C – 15,0 % та 15,8 %.

5. Встановлено, що перехід від захисного газу Ar до суміші 97,5 % Ar + 2,5 % CO₂ при застосуванні адитивної технології WAAM, незважаючи на певне підвищення для багатошарового наплавленого металу сплаву Inconel 625 у структурному стані «as built» показників границі міцності та пластичності при 20 °C, у діапазоні 600...900 °C суттєво знижує показники границь міцності, плинності та пластичності – при 800 °C орієнтовно у 1,5 рази. Встановлене зниження короточасних механічних властивостей потенційно може зберігатися як технологічна спадковість при наступних термічних обробках такого наплавленого металу.

6. Показано, що короточасні механічні властивості наплавленого за адитивною технологією WAAM металу сплаву Inconel 625 без наступної термічної обробки за показниками границі міцності, плинності та пластичності суттєво поступаються відомому рівню промислових напівфабрикатів, отриманих за традиційними технологіями виготовлення. При цьому в діапазоні 1000...1100 °C спостерігається різний характер зміни пластичності: для наплавленого металу за адитивною технологією WAAM – спадаючий до рівня 15,0...15,8 % при 1100 °C; для промислових напівфабрикатів, отриманих за традиційними технологіями виготовлення – зростаючий до рівня 90...125 % при 1100 °C.

Список літератури/References

1. Amiri, V., Naffakh-Moosavy, H. (2024) Wire arc additive manufacturing of functionally graded carbon steel – stainless steel 316L – Inconel 625: Microstructural characterization

- and mechanical behavior. *J. of Advanced Joining Processes*, **9**, 100194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2024.100194>
2. Mohanraj, R., Abdul Basith, S.N., Chandru, S. et al. (2024) A review on microstructure and mechanical properties of Inconel 625 alloy fabricated using wire arc additive manufacturing process. *Rapid Prototyping J.*, **30**(7), 1337–1347. DOI: <https://doi.org/10.1108/rpj-11-2023-0387>
3. Gurmesa, F.D., Lemu, H.G., Tucho, W.M., Muleta, B.B. (2025) Impacts of wire diameter on microstructure and hardness of Inconel 625 fabricated by wire arc additive manufacturing. *J. of Materials Research and Technology*, **37**, 5423–5435. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.07.175>
4. Markanday, J.F.S. (2022) Applications of alloy design to cracking resistance of additively manufactured Ni-based alloys. *Mater. Sci. and Technol.*, **38**(16), 1300–1314. DOI: <https://doi.org/10.1080/02670836.2022.2068759>
5. Ghousoub, J.N., Tang, Y.T., Dick-Cleland, W.J.B. et al. (2022) On the influence of alloy composition on the additive manufacturability of Ni-based superalloys. *Metallurgical and Materials Transact. A*, **53A**, 962–983. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-021-06568-z>
6. Wei, Q., Xie, Y., Teng, Q. et al. (2022) Crack types, mechanisms, and suppression methods during high-energy beam additive manufacturing of nickel-based superalloys: A review. *Chinese J. of Mech. Eng.: Additive Manufacturing Frontiers*, **1**(4), 100055. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cjmeam.2022.100055>
7. Rodrigues, T.A., Cipriano Farias, F.W., Avila, J.A. et al. (2023) Effect of heat treatments on Inconel 625 fabricated by wire and arc additive manufacturing: An in situ synchrotron X-ray diffraction analysis. *Sci. and Technol. of Welding and Joining*, **28**(7), 534–539. DOI: <https://doi.org/10.1080/13621718.2023.2187927>
8. Singh, J.B. (2022) Alloy 625. *Microstructure, Properties and Performance*. Singapore, Springer Nature Singapore Pte Ltd.
9. Saravanakumar, K., Balaji, V.G., Srijha, T. et al. (2024) Analysis of microstructure and mechanical properties of Inconel 625 alloy by wire arc additive manufacturing (WAAM). *Archives of Metallurgy and Materials*, **69**(3), 1079–1086. DOI: <https://doi.org/10.24425/amm.2024.150928>
10. Pratheesh Kumar, S., Elangovan, S., Mohanraj, R., Ramakrishna, J.R. (2021) A review on properties of Inconel 625 and Inconel 718 fabricated using direct energy deposition. *Materials Today: Proceedings*, **46**(17), 7892–7906. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.566>
11. Madesh, R., Gokul Kumar, K. (2023) Multi-layer additive manufacturing on nickel-based superalloy by optimization of pulsed mode process parameters of single-layer bead geometry. *Materials Today Communications*, **37**, 107463. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107463>
12. Ravi, G., Murugan, N., Arulmani, R. (2020) Microstructure and mechanical properties of Inconel-625 slab component fabricated by wire arc additive manufacturing. *Mater. Sci. and Technol.*, **36**(16), 1785–1795. DOI: <https://doi.org/10.1080/02670836.2020.1836737>
13. Rashid, M., Sabu, S., Kunjachan, A. et al. (2024) Advances in wire-arc additive manufacturing of nickel-based superalloys: Heat sources, DfAM principles, material evaluation, process parameters, defect management, corrosion evaluation and post-processing techniques. *Intern. J. of Lightweight Mater. and Manuf.*, **7**(6), 882–913. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2024.05.009>
14. Ajithkumar, S., Arulmurugan, B., Manikandan, M. et al. (2025) Role of shielding gas in tailoring microstructure and anisotropy in wire arc additive manufactured Inconel 686. *Scientific Reports*, **15**, 21192. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08197-7>
15. DuPont, J.N., Lippold, J.C., Kiser S.D. (2009) *Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys*. Hoboken, John Wiley & Sons.
16. Ji, J., Zavdoveev, A., Vedel, D. et al. (2023) CMT-based wire arc additive manufacturing of Inconel 625 alloy. *Emerging Materials Research*, **12**(3), 315–322. DOI: <https://doi.org/10.1680/jemmr.23.00053>
17. Yushchenko, K.A., Yarovitsyn, A.V., Chervyakov, N.O. et al. (2019) Evaluation of short-term mechanical properties of a joint of difficult-to-weld nickel high-temperature alloys of ZhS6 type. *The Paton Welding J.*, **7**, 29–35. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj.2019.07.07>

18. Costa, J.F.M., Jorge, J.C.F., de Souza, L.F.G. et al. (2024) Microstructural evaluation of Inconel 625 weld cladding deposited by the GMAW and GMAW with rotating electrode processes. *Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração*, 21, e2848. DOI: <http://doi.org/10.4322/2176-1523.20242848>
19. Yarovytsyn, O., Cherviyakov, M., Zviahintseva, H. et al. (2024) On the issue of assessing the probability and preventing the occurrence of «ductility dip cracking» mechanism under conditions of multi-layer welding arc 3D-overlaying process on nickel and cobalt alloys. In: Proc. of the 77th IIW Annual Assembly, Commission IX-H «Behavior of Metals Subjected to Welding», IIW Doc. IX-H-973-2024, 7–12 July 2024, Rhodes, Greece.
20. de Oliveira, M.M., Couto, A.A., Almeida, G.F.C. et al. (2019) Mechanical behavior of Inconel 625 at elevated temperatures. *Metals*, 9(3), 301–312. DOI: <https://doi.org/10.3390/met9030301>
21. Special Metals Corporation (2013) Inconel® alloy 625. *Technical Bulletin*. www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-625.pdf

Перелік використаних міжнародних стандартів

ДСТУ ISO 6892-1:2019 Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури (ISO 6892-1:2016, IDT).

ISO 15156-3:2020. Petroleum and natural gas industries – Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production. Pt 3: Cracking-resistant CRAs (corrosion-resistant alloys) and other alloys.

ISO/ASTM 52900:2015. Additive manufacturing – General principles – Terminology. ISO copyright office.

ISO/TR 25901-1:2016. Welding and allied processes – Vocabulary. Pt 1: General terms. ISO copyright office.

ISO 17641-1:2004. Destructive tests on welds in metallic materials – Hot cracking tests for weldments – Arc welding processes – Pt 1: General. ISO copyright office.

ISO/TR 17641-3:2005. Destructive tests on welds in metallic materials – Hot cracking tests for weldments – Arc welding processes – Pt 3: Externally loaded tests. ISO copyright office.

ISO 4491-4:2019. Metallic powders – Determination of oxygen content by reduction methods – Pt 4: Total oxygen by reduction-extraction. ISO copyright office.

ASTM E1019-11:2018. Standard Test Methods for Determination of Carbon, Sulfur, Nitrogen, and Oxygen in Steel, Iron, Nickel, and Cobalt Alloys by Various Combustion and Fusion Techniques. ASTM International.

INFLUENCE OF ARC 3D PRINTING PARAMETERS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF INCONEL 625 CLADDING METAL

S.I. Motrunich¹, O.V. Yarovytsyn¹, I.R. Volosatov¹, D.S. Tomko², Ji Junwen^{2,3}

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: moltasov@gmail.com

²National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine.

³Technical University of Munich. 21, Arcisstraße 21, Munich, Bavaria, 80333, Germany.

The influence of wire arc additive manufacturing (WAAM) process parameters using consumable wire electrode in shielding gas environment on the mechanical properties of multi-layer deposited metal of nickel-based superalloy Inconel 625 in the «as-built» structural condition in the temperature range of 20...1100 °C was investigated. Full-size cylindrical specimens Ø5×M10 at 20 °C and miniature flat proportional specimens with a working part cross-section of 2.5×2.5 mm at 20...1100 °C were manufactured and tested from a fabricated wall-type vertical structure. Results of metallographic investigations performed by scanning electron microscopy are presented, showing the features of columnar dendritic structure and morphology of secondary phases in different zones of the fabricated component. The deformation capacity of the obtained deposited metal of Inconel 625 alloy is analyzed from the viewpoint of the known increased resistance of this alloy to two subtypes of hot cracks by the «solid-state cracking» mechanism. It is shown that the transition from Ar shielding gas to a mixture of 97.5 % Ar + 2.5 % CO₂ when using WAAM additive technology in the temperature range of 600...900 °C significantly reduces the ultimate tensile strength, yield strength, and ductility values for the obtained deposited metal of Inconel 625 alloy, particularly at a temperature of 800 °C – approximately by a factor of 1.5. For Inconel 625 alloy, a comparative analysis of experimental data on short-term strength for metal deposited by WAAM additive technology and corresponding published data for industrial semi-finished products manufactured by traditional technologies was performed. 21 Ref., 6 Tabl., 8 Fig.

Keywords: wire arc additive manufacturing, WAAM, Inconel 625, nickel-based superalloy, mechanical properties, elevated temperatures, solid-state cracking, shielding gas, microstructure

ORCID

S.I. Мотруніч – <https://orcid.org/0000-0002-8841-8609>, О.В. Яровицин – <https://orcid.org/0000-0001-9922-3877>,

І.Р. Волосатов – <https://orcid.org/0000-0003-2593-9869>, Д.С. Томко – <https://orcid.org/0009-0001-2709-7012>,

Джі Джувень – <https://orcid.org/0000-0001-7959-753X>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

S.I. Мотруніч

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: motrunich@nas.gov.ua

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

С.І. Мотруніч, О.В. Яровицин, І.Р. Волосатов, Д.С. Томко, Цзі Цзунвень (2026) Вплив параметрів дугового 3D друку на механічні властивості наплавленого металу сплаву Inconel 625. *Автоматичне зварювання*, 04, 45–55.

DOI: <https://doi.org/10.37434/as2026.04.05>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as>

Отримано 13.10.2025

Отримано у переглянутому вигляді 12.05.2026

Підписано до друку 20.07.2026

Оприлюднено 24.07.2026