

ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ІМ. Є.О. ПАТОНА НАН УКРАЇНИ
ТОВАРИСТВО ЗВАРНИКІВ УКРАЇНИ
МІЖНАРОДНА АСОЦІАЦІЯ «ЗВАРЮВАННЯ»



НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ

СУЧАСНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Конференція присвячена 105-й річниці
від дня народження академіка Бориса Патона

**ЗБІРКА ТЕЗ ДОПОВІДЕЙ
ПРОГРАМА КОНФЕРЕНЦІЇ**

27 листопада 2023 року
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
м. Київ

СПОНСОРИ КОНФЕРЕНЦІЇ

ТОВ «Зовнішньоекономічне представництво КУІЗ ім. Є.О. Патона»

ТОВ «Патон Інтернешнл»

ТОВ «Вітова»

ТОВ «Діагностичні прилади»

ТОВ «Червона Хвиля»

ДП «ДКТБ ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ»

ДП «Інженерний центр електронно-променевого зварювання»

ДП «Міжнародний центр електронно-променевих технологій» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
Товариство зварників України
Міжнародна Асоціація «Зварювання»

СУЧАСНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Збірка тез доповідей

Програма конференції

*Конференція присвячена 105-й річниці від дня народження
академіка Бориса Патона*

27 листопада 2023 р.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ

Сучасні напрями розвитку адитивних технологій: Тези доповідей науково-технічної конференції під ред. О.Т. Зельніченка. Київ: Міжнародна Асоціація «Зварювання», 2023. — 46 с.

В збірці представлено 50 тез пленарних та стендових доповідей науково-технічної конференції «Сучасні напрями розвитку адитивних технологій», в яких відображені останні досягнення та практичні результати в галузі сучасних напрямків розвитку адитивних технологій, які базуються на процесах зварювання.

Організатори конференції висловлюють подяку організаціям та компаніям за надану фінансову допомогу для проведення конференції:

- ТОВ «Зовнішньоекономічне представництво КУІЗ ім. Є.О. Патона»
- ТОВ «Патон Інтернешнл»
- ТОВ «Вітова»
- ТОВ «Діагностичні прилади»
- ТОВ «Червона Хвиля»
- ДП «ДКТБ ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ»
- ДП «Інженерний центр електронно-променевого зварювання»
- ДП «Міжнародний центр електронно-променевих технологій» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

Видавничий проект – *О.Т. Зельніченко*

Комп'ютерна верстка – *Т.Ю. Снегірьова*

Свідоцтво серія ДК, № 3497 від 4 червня 2009 р.

Тези публікуються в авторській редакції.

© Міжнародна Асоціація «Зварювання», 2023

© Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, 2023

ЗМІСТ

ПРОГРАМА КОНФЕРЕНЦІЇ	7
ПЛЕНАРНІ ДОПОВІДІ	12
<i>Аджемський С.В., Кононенко Г.А., Подольський Р.В., Бадюк С.І.</i> Вплив обдуву та завантаженості робочого простору на механічні властивості зразків, виготовлених за SLM-технологією	12
<i>Бабінець А.А.</i> Технологічні методи керування формуванням металу, наплавленого порошковими дротами	12
<i>Квасницький В.В., Лагодзінський І.М.</i> Вплив методів GMAW і PAW адитивного дугового наплавлення та складу захисного газу на геометричні характеристики поверхонь і структуру металу виробів	13
<i>Коржик В.М., Гринюк А.А., Хаскін В.Ю., Войтенко О.М., Бурлаченко О.М., Хуан О.О.</i> Плазмово-дугові технології адитивного наплавлення (3D друку) просторових металевих виробів: досвід застосування і нові можливості	13
<i>Коржик В.М., Строгонов Д.В., Бурлаченко О.М., Войтенко О.М., Куницький Д.В.</i> Розвиток плазмово-дугових технологій отримання сферичних гранул для адитивного виробництва і гранульної металургії	14
<i>Марковський П.Є., Ковальчук Д.В., Саввакін Д.Г., Ткачук В.П., Невмержицький В.І., Стасюк О.О.</i> Виробництво метало-матричних композитів на основі титану та його сполук шляхом 3D друку з використанням профільного електронного променю та порошкового дроту	14
<i>Масючок О.П., Юрженко М.В., Колісник Р.В., Шадрін А.О., Кондратенко В.Ю., Кораб М.Г.</i> Дослідження впливу параметрів FDM 3D друку на процеси формування, структуру та властивості виробів з полілактиду	15
<i>Матвійчук В.А., Нестеренков В.М., Берднікова О.М.</i> Вплив параметрів друку на властивості виробів з титанового сплаву Ti-6Al-4V отриманих за адитивною електронно-променевою технологією	15
<i>Махненко О.В., Саприкіна Г.Ю., Савицька О.М., Ананченко М.С.</i> Відновлювальний ремонт робочих лопаток парової турбіни за допомогою адитивної технології	16
<i>Оніщук В.В.</i> WAAM з адаптованими процесами Fronius MIG/MAG AC	16
<i>Павлій О.В., Глабець С.М., Кухта І.Я., Крюкова О.А.</i> Можливості досліджень якості виробів адитивних технологій за допомогою методів неруйнівного контролю	17
<i>Шаповалов В.О., Никитенко Ю.О., Якуша В.В., Гніздило О.М., Карускевич О.В.</i> 3D технологія вирощування монокристалів вольфраму	18
<i>Шваб С.Л., Селін Р.В., Ахонін С.В., Ворон М.М., Ковальчук Д.В.</i> Металево-порошковий дріт на основі титану як матеріал для адитивного виробництва	18
СТЕНДОВІ ДОПОВІДІ	19
<i>Адєєва Л.І., Тунік А.Ю., Коржик В.Н., Строгонов Д.В., Костін В.А., Григоренко С.Г.</i> Інтерметалідні порошки для 3D друку, отримані методом плазмово-дугової сфероїдизації порошкового дроту	19
<i>Ахонін С.В., Березос В.О., Северин А.Ю., Кузьменко М.М., Дорогой О.А.</i> Отримання порошку жароміцного титанового сплаву зі злиwkів електронно-променевою плавки	20
<i>Березос В.О., Ахонін Д.С., Єрохін О.Г.</i> Електронно-променева плавка новітнього біосумісного сплаву титану медичного призначення Ti-6Al-7Nb	20
<i>Білоус В.Ю., Ахонін С.В., Селін Р.В., Вржижевський Е.Л., Антонюк С.Л., Руханський С.Б.</i> Оцінка якості метала шва конструкційних титанових сплавів	21
<i>Вігiлянська Н.В., Гриценко О.П., Цимбаліста Т.В., Бурлаченко О.М.</i> Металокерамічні композиційні порошкові матеріали на основі алюмініду титану для адитивного виробництва	21
<i>Войнарович С.Г., Калюжний С.М., Кислиця О.М., Алонцева Д.Л., Азаматов Б.Н.</i> Індивідуальні ортопедичні імпланти виготовлені 3D друком та нанесеним мікроплазмовим методом біосумісного покриття	22
<i>Гайворонський О.А., Позняков В.Д., Завдовсєв А.В., Клапатюк А.В., Денисенко А.М., Корєнєв О.В.</i> Схильність зварних з'єднань броньових сталей високої твердості до утворення холодних тріщин та способи їх попередження	23
<i>Глуховський В.Ю., Литвиненко В.А.</i> Чисельно-інструментальний метод тепловізійного контролю важкодоступних промислових об'єктів	23
<i>Гончаров І.О.</i> Сінергетичні агломеровані флюси для зварювання високоміцних низьколегованих сталей	24
<i>Дмитрик В.В., Касьяненко І.В.</i> Рекристалізація в зварних з'єднаннях при повзучості	25
<i>Жданов С.Л., Позняков В.Д., Завдовсєв А.В., Герасименко А.М., Синєок О.Г., Максименко А.О., Рябоконт В.Д., Богодіст Р.В.</i> Структура і властивості зварних з'єднань сталі 06Г2БДП	25

<i>Zavdoveev A., Gaivoronskiy A., Pozniakov V., Klapatyuk A.</i> Bulk high entropy alloy through metal powder wire arc additive manufacturing	26
<i>Іваненко С.В.</i> Науково-технічна бібліотека Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона — унікальні фонди зі зварювання і суміжних процесів	26
<i>Каховський Ю.М., Каховський М.Ю., Литвиненко В.А., Глуховський В.Ю.</i> Діагностика та відновлення гальтельних переходів агрегату ПЛ15/3251-ГК-600 на Київській ГЕС	27
<i>Кузьменко Г.В., Гончаров І.О., Тагановський В.М.</i> Автоматичне електродугове зварювання рейкових сталей плавким мундштуком у надвузькому зазорі	28
<i>Кусков Ю.М., Захаров А.В., Рибалко І.М., Жданов В.А.</i> Електрошлакове наплавлення алмазовмісною шихтою, отриманою з відходів військового виробництва	29
<i>Лавриш С.М., Погрелюк І.М., Даниляк М.-О.М.</i> Покращення корозійної тривкості адитивно виготовленого титанового сплаву Тi6AL4V	29
<i>Матвійчук В.А., Нестеренков В.М., Ахонін С.В., Пашинський В.В.</i> Оптимізація технологічних параметрів друку виробів з порошків титанових сплавів TA15 за адитивною електронно-променевою технологією	30
<i>Матвійчук О.О.</i> Аналітична оцінка впливу вмісту наповнювача на в'язкість суспензії для термопластичного 3D друку металокерамічних матеріалів	31
<i>Несін В.В.</i> Аналіз умов обробки та синтез рекомендацій по застосуванню підтримок в адитивному малосерійному та штучному виробництві деталей з інконелю	32
<i>Овчинников О.В., Матвійчук В.А., Єфанов В.С., Хазнаферов М.В., Коваленко Т.О.</i> Електронно-променевий 3D друк сферичними порошками з низькомодульного біоінертного сплаву на основі системи металів цирконій–титан–ніобій	32
<i>Піскун Н.В., Терновий Є.Г., Крюков В.А., Глушак С.О., Статкевич І.І., Шулим В.Ф., Закорко В.О.</i> Розробка обладнання для електронно-променевої багат шарової наплавки 3D при виконанні ремонтно-відновлювальних робіт в умовах космічного вакууму	34
<i>Псярнецька Т.О., Цисар М.О.</i> Математичного моделювання для процесу інжекційного формування як адитивної технології сучасної порошкової металургії. Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАНУ	35
<i>Рощенко О.М.</i> Особливості виконання різбових з'єднань в деталях, виготовлених із застосуванням адитивних технологій	35
<i>Селін Р.В., Шваб С.Л., Ворон М.М., Янко Т.Б., Дорогой О.А.</i> Отримання осердя металопорошкових дротів на основі титанових сплавів для застосування їх в якості присадного матеріалу при адитивних технологіях	36
<i>Сенченков І.К., Рябцев І.А., Червінко О.П., Бабінець А.А.</i> Розрахунок НДС та усадки трубчастих елементів при напавленні зовнішньої поверхні	36
<i>Скирта Ю.Б., Велигоцький Д.В., Мамілов С.О., Товстолиткін О.І.</i> Автоматизація процесів дослідження під час гарячого та холодного ізостатичного пресування	37
<i>Соколовський М.В., Сіора О.В., Бондарєва В.І., Курило В.А., Сучек О.М., Юрченко Ю.В., Шамсутдінова Н.О., Бернацький А.В.</i> Аналіз технологічних особливостей лазерного наплавлення на тонкостінну основу	37
<i>Троїцький В.О., Михайлов С.Р., Пастовенський Р.О., Карманов М.М.</i> Рентгенотелевізійний контроль титанових суглобних імплантатів	38
<i>Шаповалов Є.В., Коляда В.О., Мангольд А.М., Новодранов А.С., Топчев Д.Д.</i> Отримання металевих виробів за допомогою роботизованого адитивного наплавлення	38
<i>Sharovalov V., Nikitenko Yu., Yakusha V., Khokhlova J., Khokhlov M., Berdnikova O.</i> Single-crystallinity of large-sized tungsten ingots obtained by 3D plasma-induction additive technology	39
<i>Яровицин О.В., Черв'яков М.О., Волосатов І.Р., Хруцов Г.Д., Пестов В.А., Наконечний О.О., Черв'якова Л.В.</i> Щодо оцінки ймовірності та запобігання реалізації механізму «ductility dip cracking» в умовах багат шарового дугового наплавлення нікелевих сплавів (<i>пленарна доповідь</i>)	40
<i>Жерносеков А.М., Романова І.Ю.</i> Спеціалізовані імпульсні джерела живлення дуги для адитивних технологій	41
<i>Ziakhor I., Nakonechny A., Wang Qichen, Fu Linyu, Lian Yangzi, Levchuk A., Koltsov V.</i> Development of technology for butt welding of copper-clad aluminium blanks	41
<i>Єфанов В.С., Куц Д.О., Басов Ю.Ф., Овчинников О.В.</i> Застосування адитивних технологій для виготовлення завихрювачів авіадвигунів	42
<i>Овчинников О.В., Завгородній О.В., Сторчак Є.А., Булиш С.О., Білий Р.Ю.</i> Отримання порошків з частинками сферичної форми низькомодульного біоінертного сплаву на основі системи металів Zr–Ti–Nb методом плазмового розпилення обертового електрода	43
<i>Перемітько В.В., Євдокимов А.В., Кривда І.В., Барлет М.Є.</i> Керування властивостями металу формою та способом внесення компонентів шихти наплавних матеріалів	44

Шановні учасники та гості конференції «СУЧАСНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ»!

Наша конференція присвячена науково-технічним проблемам адитивних технологій. Вважаю, що адитивні технології без перебільшення можна віднести до найбільш актуальних напрямів розвитку сучасного промислового виробництва.

В останні роки в розвитку 3D технологій відбувся якісний стрибок, пов'язаний із переходом від створення моделей-прототипів, за якими виготовляли металеві вироби, до безпосереднього друку таких виробів з різних металів і сплавів. Окрім готових, чи майже готових, металевих деталей різного роду за допомогою 3D друку виготовляють також і неметалеві вироби. Наприклад, створюють готові пластикові деталі або будинки з бетонної суміші. Габарити надрукованих різними методами деталей і конструкцій можуть становити від міліметрів до десятків метрів.

У сучасному адитивному виробництві створення складних виробів потрібної геометрії із поверхнею, близькою до чистової, відбувається безпосередньо з CAD-моделей без штампів чи складної механічної обробки. Це призводить до скорочення часу виготовлення, зменшення об'єму відходів і фінальної вартості виробів.

Для нашої країни сьогодні однією з найбільш важливих галузей застосування адитивного виробництва є військова справа. Оперативний 3D друк деталей складної військової техніки дозволяє швидко здійснювати її ремонт, у тому числі в польових умовах. Це тим більш важливо, чим більше зразків техніки різних фірм-виробників використовується в бойових умовах, а отже потребують ремонту.

Таким чином, через надзвичайну гнучкість і можливість адаптування до розв'язання широкої номенклатури промислових задач адитивне виробництво стає все більш актуальним в Україні.

У сучасному адитивному виробництві металевих виробів застосовують процеси електронно-променевого, лазерного і електродугового 3D друку. Серед променевих процесів найбільш розповсюдженими є селективне лазерне плавлення (SLM) і селективне плавлення електронним променем (EBSM). Серед дугових процесів – адитивне наплавлення дротами (WAAM), для якого може використовуватися дуга з плавким або неплавким електродом, плазмове наплавлення дротами (PAW) або його варіант – плазмове

порошкове адитивне наплавлення (3DPDM). Зазвичай променеві процеси адитивного виробництва використовують у разі необхідності одержання чистових або майже чистових виробів із високою точністю форми, а дугової – у разі потреби високої продуктивності. Для покращення результатів дугового 3D друку використовують комбіновані або гібридні процеси, в яких пошарове наплавлення сполучають із відповідною пошаровою обробкою – механічним фрезеруванням, ультразвуковою або електродинамічною проковкою тощо.

Сучасні матеріалознавчі дослідження дали поштовх розвитку глобальних інновацій у галузі адитивного виробництва виробів з однорідних та різнорідних матеріалів для одержання конструкцій складної геометрії з підвищеною функціональністю. Це так звані технології багатоматеріального адитивного виробництва (ММAM), які, зокрема, застосовують для отримання виробів з матеріалів типу метал-метал (у тому числі із спеціалізованими комірчастими макро- і мікроструктурами), метал-кераміка (у тому числі із послідовним нанесенням шарів), метал-полімер, а також мультиматеріалів з градієнтними властивостями.

Процеси адитивного виробництва активно поширюються у сучасному світі. Проте існує ще багато проблем, вирішення яких потребує системних всебічних досліджень. До них відносяться необхідність мінімізації залишкових напружень та деформацій, підвищення точності формування надрукованого виробу, покращення якості формування наплавлених шарів і структуроутворення, підвищення механічних властивостей тощо. Необхідно і надалі працювати в напрямках 3D друку пластмас та виробів медичного призначення, створення нових матеріалів для адитивних технологій, неруйнівного контролю надрукованих виробів, створення систем автоматизованого моніторингу процесу і необхідного для цього програмного забезпечення, математичного моделювання фізичних процесів в адитивних технологіях.

Сподіваюсь, що наша конференція тою чи іншою мірою торкнеться цих та багатьох інших питань і сприятиме подальшому розвитку процесів адитивного виробництва. Бажаю всім учасникам конференції плідної роботи, корисних контактів та дискусій, а також нових наукових здобутків на благо України.

Голова програмного комітету конференції,
директор ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України,
академік Ігор Кривцун

ПРОГРАМА
Конференції
СУЧАСНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
27 листопада 2023 р.
м. Київ, IV корпус ІЕЗ ім. Є.О. Патона, бібліотека

- 09:00–11:00** Реєстрація учасників конференції
IV корпус ІЕЗ, другий поверх, бібліотека
- 10:00–10:20** **Відкриття конференції**
Вітальне слово директора ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України
академіка НАН України І.В. Кривцуна
- 10:20–11:20 **Пленарні доповіді**
11:20–11:40 Кава-брейк
11:40–13:00 **Пленарні доповіді**
13:00–13:40 Кава-брейк
13:40–15:40 **Пленарні доповіді**
13:40–16:00 **Сесія стендових доповідей**
10:00–16:00 Виставка «Зварювання та споріднені технології»
17:00–20:00 Дружна вечеря (демонстраційна зала ІЕЗ)

Тривалість доповідей 20 хв (15 хв доповідь та 5 хв обговорення).

Робочі мови конференції: українська, англійська.

ПЛЕНАРНІ ДОПОВІДІ

Бібліотека ІЕЗ

- 10:20–10:40** **Плазмово-дугові технології адитивного наплавлення (3D друку) просторових металевих виробів: досвід застосування і нові можливості**
¹ Коржик В.М., ¹ Гринюк А.А., ¹ Хаскін В.Ю., ¹ Войтенко О.М., ¹ Бурлаченко О.М.,
^{2,3} Хуан О.О.
¹Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ
²ІМЗ ім. Є.О. Патона, НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ
³Науково-дослідний інститут зварювальних технологій імені Патона в провінції Чжецзян, Ханчжоу, район Сяошань КНР
- 10:40–11:00** **Виробництво метало-матричних композитів на основі титану та його сполук шляхом 3D друку з використанням профільного електронного променя та порошкового дроту**
¹Марковський П.Є., ²Ковальчук Д.В., ¹Саввакін Д.Г., ²Ткачук В.П.,
²Невмержицький В.І., ¹Стасюк О.О.¹
¹Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, Київ
²ПрАТ «НВО «Червона Хвиля», Київ
- 11:00–11:20** **Вплив параметрів друку на властивості виробів з титанового сплаву Ti-6Al-4V отриманих за адитивною електронно-променевою технологією**
Матвійчук В.А., Нестеренков В.М., Берднікова О.М.
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ
- 11:20–11:40** **Кава-брейк**
- 11:40–12:00** **Вплив методів GMAW і PAW адитивного дугового наплавлення та складу захисного газу на геометричні характеристики поверхонь і структуру металу виробів**
Квасницький В.В., Лагодзінський І.М.
НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

- 12:00–12:20** WAAM з адаптованими процесами Fronius MIG/MAG AC (в on-line режимі)
Оніщук В.В.
ТОВ «Фроніус Україна», с. Княжичі, Київська обл.
- 12:20–12:40** Відновлювальний ремонт робочих лопаток парової турбіни за допомогою адитивної технології
Махненко О.В., Саприкіна Г.Ю., Савицька О.М., Ананченко М.С.
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ
- 12:40–13:00** Вплив обдуву та навантаженості робочого простору на механічні властивості зразків, виготовлених за SLM-технологією
^{1,2}Аджамський С.В., ^{1,3}Кононенко Г.А., ^{1,3}Подольський Р.В., ¹Бадюк С.І.
¹ТОВ «Адитивні лазерні технології України», Дніпро
²Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро
³Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро
- 13:00–13:40** Кава-брейк
- 13:40–14:00** Металево-порошковий дріт на основі титану як матеріал для адитивного виробництва
¹Шваб С.Л., ¹Селін Р.В., ¹Ахонін С.В., ²Ворон М.М., ³Ковальчук Д.В.
¹Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ
²ФТІМС НАН України, Київ
³ПрАТ «НВО «Червона Хвиля», Київ
- 14:00–14:20** Можливості досліджень якості виробів адитивних технологій за допомогою методів неруйнівного контролю
¹Павлій О.В., ²Глабець С.М., ¹Кухта І.Я., ³Крюкова О.А.
¹НВФ «Діагностичні прилади», Київ
²НВФ «Ультракон», Київ
³Київський національний університет технологій та дизайну, Київ
- 14:20–14:40** 3D технологія вирощування монокристалів вольфраму
Шаповалов В.О., Никитенко Ю.О., Якуша В.В., Гніздило О.М., Карускевич О.В.
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ
- 14:40–15:00** Розвиток плазмово-дугових технологій отримання сферичних гранул для адитивного виробництва і гранульної металургії
Коржик В.М., Строгонов Д.В., Бурлаченко О.М., Войтенко О.М., Куницький Д.В.
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ
- 15:00–15:20** Дослідження впливу параметрів FDM 3D друку на процеси формування, структуру та властивості виробів з полілактиду
Масючок О.П., Юрженко М.В., Колісник Р.В., Шадрін А.О., Кондратенко В.Ю., Кораб М.Г.
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ
- 15:20–15:40** Технологічні методи керування формуванням металу, наплавленого порошковими дротами
Бабінець А.А.
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ
- 15:40–16:00** Щодо оцінки ймовірності та запобігання реалізації механізму «ductility dip cracking» в умовах багат шарового дугового наплавлення нікелевих сплавів
Яровицин О.В., Черв'яков М.О., Волосатов І.Р., Хрущов Г.Д., Пестов В.А., Наконечний О.О., Черв'якова Л.В.
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

СТЕНДОВІ ДОПОВІДІ

Бібліотека ІЕЗ

Інтерметалідні порошки для 3D-друку, отримані методом плазмово-дугової сфероїдизації порошкового дроту

Адеєва Л.І., Тунік А.Ю., Коржик В.Н., Строгонов Д.В., Костін В.А., Григоренко С.Г.
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Отримання порошку жароміцного титанового сплаву зі зливків електронно-променевої плавки

¹Ахонін С.В., ¹Березос В.О., ¹Северин А.Ю., ²Кузьменко М.М., ²Дорогой О.А.
¹*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*
²*Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ*

Електронно-променева плавка новітнього біосумісного сплаву титану медичного призначення Ti-6Al-7Nb

Березос В.О., Ахонін Д.С., Єрохін О.Г.
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Оцінка якості метала шва конструкційних титанових сплавів

Білоус В.Ю., Ахонін С.В., Селін Р.В., Вржижевський Е.Л., Антонюк С.Л., Руханський С.Б.
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Металокерамічні композиційні порошкові матеріали на основі алюмініду титану для адитивного виробництва

Вігліянська Н.В., Грищенко О.П., Цимбаліста Т.В., Бурлаченко О.М.
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Індивідуальні ортопедичні імплантати виготовлені 3D друком та нанесеним мікроплазмовим методом біосумісного покриття

¹Войнарович С.Г., ¹Калюжний С.М., ¹Кислиця О.М., ²Алонцева Д.Л., ²Азаматов Б.Н.
¹*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*
²*Східно-Казахстанський технічний університет ім. Д. Серікбаєва, Усть-Каменогорськ, Казахстан*

Схильність зварних з'єднань броньових сталей високої твердості до утворення холодних тріщин та способи їх попередження

Гайворонський О.А., Позняков В.Д., Завдовєєв А.В., Клапатюк А.В., Денисенко А.М., Коренєв О.В.
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Чисельно-інструментальний метод тепловізійного контролю важкодоступних промислових об'єктів

Глуховський В.Ю., Литвиненко В.А.
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Сінергетичні агломеровані флюси для зварювання високоміцних низьколегованих сталей

Гончаров І.О.
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Рекристалізація в зварних з'єднаннях при повзучості

Дмитрик В.В., Касьяненко І.В.
Національний технічний університет «Харківський Політехнічний Інститут», Харків

Структура і властивості зварних з'єднань сталі 06Г2БДП

Жданов С.Л., Позняков В.Д., Завдовєєв А.В., Герасименко А.М., Синєок О.Г., Максименко А.О., Рябоконт В.Д., Богодіст Р.В.
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Bulk high entropy alloy through metal powder wire arc additive manufacturing

Zavdoveev A., Gaivoronskiy A., Pozniakov V., Klapatyuk A.
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NASU, Kyiv

Науково-технічна бібліотека Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона — унікальні фонди зі зварювання і суміжних процесів

Іваненко С.В.
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Діагностика та відновлення гальтельних переходів агрегату ПЛ15/3251-ГК-600 на Київській ГЕС

Каховський Ю.М., Каховський М.Ю., Литвиненко В.А., Глуховський В.Ю.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Автоматичне електродугове зварювання рейкових сталей плавким мундштуком у надвугзькому зазорі

Кузьменко Г.В., Гончаров І.О., Тагановський В.М.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Електрошлакове наплавлення алмазовмісною шихтою, отриманою з відходів військового виробництва

¹Кусков Ю.М., ²Захаров А.В., ²Рибалко І.М., ¹Жданов В.А.

¹Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

²Державний біотехнологічний університет, Харків

Покращення корозійної тривкості адитивно виготовленого титанового сплаву Ti6Al4V

Лаврись С.М., Погрелюк І.М., Даниляк М.-О.М.

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів

Оптимізація технологічних параметрів друку виробів з порошків титанових сплавів TA15 за адитивною електронно-променевою технологією

Матвійчук В.А., Нестеренков В.М., Ахонін С.В., Пашинський В.В.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Аналітична оцінка впливу вмісту наповнювача на в'язкість суспензії для термопластичного 3D друку металокерамічних матеріалів

Матвійчук О.О.

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ

Аналіз умов обробки та синтез рекомендацій по застосуванню підтримок в адитивному малосерійному та штучному виробництві деталей з інконелю

Несін В.В.

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України, Київ

Електронно-променевий 3D друк сферичними порошками з низькомодульного біоінертного сплаву на основі системи металів цирконій–титан–ніобій

¹Овчинников О.В., ²Матвійчук В.А., ³Єфанов В.С., ⁴Хазнаферов М.В., ⁵Коваленко Т.О.

¹АТ «Інститут титану», Запоріжжя

²Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

³Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпро

⁴ТОВ «НВО «ГЛОБАЛ ІНЖИНІРІНГ», Запоріжжя

⁵АТ «Мотор Січ», Запоріжжя

Розробка обладнання для електронно-променевої багат шарової наплавки 3D при виконанні ремонтно-відновлювальних робіт в умовах космічного вакууму

Піскун Н.В., Терновий Є.Г., Крюков В.А., Глушак С.О., Статкевич І.І., Шулим В.Ф., Закорко В.О.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Математичного моделювання для процесу інжекційного формування як адитивної технології сучасної порошкової металургії

Псярнецька Т.О., Цисар М.О.

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАНУ, Київ

Особливості виконання різьбових з'єднань в деталях, виготовлених із застосуванням адитивних технологій

Рощенко О.М.

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України, Київ

Отримання осердя металопорошкових дротів на основі титанових сплавів для застосування їх в якості присадного матеріалу при адитивних технологіях

¹Селін Р.В., ¹Шваб С.Л., ²Ворон М.М., ³Янко Т.Б., ⁴Дорогой О.А.

¹Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

²Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

³АТ «Інститут титану», Запоріжжя

⁴Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ

Розрахунок НДС та усадки трубчастих елементів при наплавленні зовнішньої поверхні¹Сенченков І.К., ²Рябцев І.А., ¹Червінко О.П., ²Бабінець А.А.¹Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України, Київ²Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ**Автоматизація процесів дослідження під час гарячого та холодного ізостатичного пресування**

Скирта Ю.Б., Велигоцький Д.В., Мамілов С.О. Товстолиткін О.І.

Інститут магнетизму НАН України та МОН України, Київ

Аналіз технологічних особливостей лазерного наплавлення на тонкостінну основу

Соколовський М.В., Сіора О.В., Бондарєва В.І., Курило В.А., Сучек О.М., Юрченко Ю.В.,

Шамсутдінова Н.О., Бернацький А.В.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Рентгенотелевізійний контроль титанових суглобних імплантатів

Троїцький В.О., Михайлов С.Р., Пастовенський Р.О., Карманов М.М.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Отримання металевих виробів за допомогою роботизованого адитивного наплавлення

Шаповалов Є.В., Коляда В.О., Мангольд А.М., Новодранов А.С., Топчев Д.Д.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Single-crystallinity of large-sized tungsten ingots obtained by 3D plasma-induction additive technology

Shapovalov V., Nikitenko Yu., Yakusha V., Khokhlova J., Khokhlov M., Berdnikova O.

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NASU, Kyiv

Спеціалізовані імпульсні джерела живлення дуги для адитивних технологій**Жерносков А.М., Романова І.Ю.**

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Development of technology for butt welding of copper-clad aluminium blanksZiakhor I.¹, Nakonechny A.¹, Wang Qichen², Fu Linyu³, Lian Yangzi³, Levchuk A.¹, Koltsov V.⁴¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NASU, Kyiv²CIMC Offshore Engineering Institute Company Ltd, Yantai, Shandong, P.R. China³Yantai Fisend Bimetal Co. Limited, Yantai, Shandong, P.R. China⁴Enterprise Technologies LTD, Kyiv**Застосування адитивних технологій для виготовлення завихрювачів авіадвигунів**¹Єфанов В.С., ²Куц Д.О., ³Басов Ю.Ф., ⁴Овчинников О.В.¹Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпро²Запорізький національний університет³АТ «МОТОР СІЧ», Запоріжжя⁴АТ «Інститут титану», Запоріжжя**Отримання порошків з частинками сферичної форми низькомодульного біоінертного сплаву на основі системи металів Zr–Ti–Nb методом плазмового розпилення обертового електрода**¹Овчинников О.В., ²Завгородній О.В., ³Сторчак Є.А., ²Булиш С.О., ⁴Білий Р.Ю.¹АТ «Інститут титану», Запоріжжя²НУ «Запорізька політехніка»³ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат»⁴Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпро**Керування властивостями металу формою та способом внесення компонентів шихти наплавних матеріалів****Перемітько В.В., Євдокимов А.В., Кривда І.В., Барлет М.Є.**

Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське

ПЛЕНАРНІ ДОПОВІДІ

ВПЛИВ ОБДУВУ ТА ЗАВАНТАЖЕНОСТІ РОБОЧОГО ПРОСТОРУ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗРАЗКІВ, ВИГОТОВЛЕНИХ ЗА SLM-ТЕХНОЛОГІЄЮ

С.В. Аджамський^{1,2}, Г.А. Кононенко^{1,3}, Р.В. Подольський^{1,3}, С.І. Бадюк¹

¹ТОВ «Адитивні лазерні технології України», Дніпро

²Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро

³Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро

Наразі для вибіркового лазерного плавлення (Selective Laser Melting (SLM)) актуальним завданням є дослідження впливу характеристик обдуву та завантаженості робочого простору на механічні властивості титанового сплаву Ti6Al4V. У роботі досліджували зразки на розтяг, для яких внаслідок різної завантаженості простору побудови була пауза різної тривалості між нанесенням порошку та поверненням променю лазера. У результаті аналізу значень механічних властивостей встановлено, що характеристики міцності дослідних зразків в області вхідного сопла обдуву інертним газом мають нижче значення на 3...5 % порівняно з центральною областю платформи з розкидом значень $\pm 2\%$, в області вихідного сопла значення на 3...5 % нижче порівняно з центральною областю, розкид значень $\pm 10\%$. Встановлено, що збільшення паузи від 50 до 65 с призводить до зменшення характеристик міцності та пластичності на 23 та 10 %, до 80 с — 33 та 0,7 % відповідно.

ТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ КЕРУВАННЯ ФОРМУВАННЯМ МЕТАЛУ, НАПЛАВЛЕНОГО ПОРОШКОВИМИ ДРОТАМИ

А.А. Бабінець

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Проведено комплексні порівняльні дослідження можливості керування формуванням та властивостями металу за рахунок зміни електричних параметрів при одношаровому дуговому наплавленні. У якості матеріалів використовувались електродні порошкові дроти діаметром 1,8...2,8 мм, які розроблено для трьох умов нанесення матеріалу — в середовищі захисних газів (GMAW), відкритою дугою (SSAW) та під флюсом (SAW). Металева частина дротів була розрахована таким чином, щоб отримати наплавлений метал типу теплостійкої інструментальної сталі 25X5ФМС. Дослідження виконувались у широкому діапазоні режимів: струм — 150...450 А, напруга — 20...32 В. Експериментально визначено оптимальні діапазони за величиною струму та напруги для кожного способу нанесення матеріалу та діаметру порошкового дроту, при яких забезпечується якісне формування наплавлених валиків, мінімальні глибина проплавлення та частка основного металу в наплавленому. Побудовано відповідні залежності впливу величини струму та напруги на геометричні розміри наплавлених валиків. Отримані експериментальні дані можуть бути використані у процесах адитивного виробництва при виборі оптимальних режимів дугового пошарового нанесення металічних матеріалів (WAAM) для виготовлення елементів деталей.

ВПЛИВ МЕТОДІВ GMAW І PAW АДИТИВНОГО ДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ ТА СКЛАДУ ЗАХИСНОГО ГАЗУ НА ГЕОМЕТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХОНЬ І СТРУКТУРУ МЕТАЛУ ВИРОБІВ

В.В. Квасницький, І.М. Лагодзінський

НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

З розвитком WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) технологій постає необхідність забезпечення стабільності характеристик якості просторових виробів та бажано отримати на виході поверхню з найменшою геометричною нерівномірністю. Дугове наплавлення, зокрема з короткими замиканнями (Cold Metal Transfer – CMT), та імпульсно-дугове наплавлення (Pulse процес) дозволяють підвищити контроль поведінки розплаву зварювальної ванни, зменшити витрати матеріалу на розбризкування та угар, що забезпечує збільшення продуктивності процесу. Разом із цим, актуальними є дослідження щодо закономірностей впливу методів дугового наплавлення, зокрема технологій CMT, Pulse та PAW, і складу захисного газового середовища на геометричні характеристики сформованих шарів, структуру наплавленого металу та схильність до утворення дефектів. Аналіз геометричних характеристик зразків свідчить, що склад захисної газової суміші має суттєвий вплив на висоту наплавлених шарів незалежно від методу наплавлення (CMT/Pulse). Так, для суміші M11 висота окремих валиків збільшується на 10,4...11,7 % у порівнянні з використанням суміші M21. Застосування імпульсного струму призводить до збільшення на 10...11 % ширини валиків у порівнянні з CMT процесом. Металографічні дослідження свідчать про типове для багатошарового наплавлення структуру металу виробів. Чіткої межі між окремими шарами наплавленого металу не виявлено.

ПЛАЗМОВО-ДУГОВІ ТЕХНОЛОГІЇ АДИТИВНОГО НАПЛАВЛЕННЯ (3D ДРУКУ) ПРОСТОРОВИХ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ: ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ І НОВІ МОЖЛИВОСТІ

**В.М. Коржик¹, А.А. Гринюк¹, В.Ю. Хаскін¹, О.М. Войтенко¹,
О.М. Бурлаченко¹, О.О. Хуан^{2,3}**

¹*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

²*ІМЗ ім. Є.О. Патона, НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ*

³*Науково-дослідний інститут зварювальних технологій імені Патона в провінції Чжецзян,
Ханчжоу, район Сяошань КНР*

Зростання актуальності 3D друку готових металевих виробів в останні роки обумовлене скороченням витрат на виготовлення, механічну обробку, зміну типорозмірів і номенклатури деталей, можливістю отримання суцільних деталей зі складною внутрішньою геометрією. Одним з найперспективніших процесів 3D друку, який забезпечує широкий діапазон продуктивності (0,02...25 кг/год. і більше) при можливості наплавлення стінки завтовшки 2...20 мм є адитивне плазмово-дугове наплавлення (АПДН) дротами та порошковими матеріалами. У роботі розглянуто сучасний стан досліджень адитивного виробництва металевих деталей зі сталей і сплавів, визначено стан і перспективи розвитку АПДН. Показано, що АПДН дозволяє виконувати 3D друк із використанням широкої номенклатури присаджувальних матеріалів, зокрема компактних і композиційних (порошкових) дротів, порошків легких сплавів і тугоплавких металів, композиційних порошків і механічних сумішей порошків сплавів, металокераміки, карбідів, боридів тощо. До нових можливостей застосування АПДН відносяться розробка технологій вирощування виробів із матеріалів з градієнтними функціональними властивостями, із різнорідних матеріалів, із супутнім модифікуванням наплавленого металу додатковою обробкою, покращенням властивостей наплавленого металу за рахунок застосування гібридних процесів. Висвітлено стан інноваційних розробок технологій та обладнання АПДН, виконаних в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, та їх промислового впровадження.

РОЗВИТОК ПЛАЗМОВО-ДУГОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОТРИМАННЯ СФЕРИЧНИХ ГРАНУЛ ДЛЯ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА І ГРАНУЛЬНОЇ МЕТАЛУРГІЇ

В.М. Коржик, Д.В. Строгонов, О.М. Бурлаченко, О.М. Войтенко, Д.В. Куницький
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Метало-матричні композити, зокрема на основі сплавів титану та його сполук, знаходять все більш широке застосування в промисловості завдяки підвищеним експлуатаційним властивостям в порівнянні з основним матеріалом. Вже доведено, що армування основи з титанового сплаву твердими частинками карбідів або боридів титану дозволяє досягти кращого поєднання властивостей, особливо міцності, твердості та зносостійкості, ніж традиційне легування. В той же час формування ізотропної структури таких композитів із збереженням фазового складу зміцнювальних компонентів є непростю технологічною задачею.

В цьому повідомленні будуть представлені результати досліджень зразків метало-матричних композитів на основі титанового сплаву Ti-6Al-4V, армованого частинками карбиду титану в кількості до 40%, отриманих шляхом пошарового наплавлення порошкового дроту відповідного хімічного складу з використанням технології 3D друку профільним електронним променем, відомої як xBeam 3D Metal Printing.

Дослідження продемонстрували можливість формування таким методом ізотропної структури композиту з відносно рівномірним розподілом виділень карбиду титану переважно рівновісної морфології всередині матриці сплаву Ti-6Al-4V. Твердість 3D друкованого композиту Ti-6Al-4V + 40 % TiC досягала 800 HV, що значно вище, ніж у матеріалі основи. Попередні результати балістичних випробувань двошарових зразків, отриманих наплавленням метало-матричного композиту Ti-6Al-4V + 40 % TiC на базову плиту з титанового сплаву Ti-6Al-4V, продемонстрували значно вищу балістичну стійкість такого двошарового матеріалу в порівнянні з усіма відомими однорідними титановими сплавами. Це дозволяє очікувати хороші перспективи промислового застосування метало-матричних композитів та шаруватих структур, отриманих за технологією xBeam 3D Metal Printing.

ВИРОБНИЦТВО МЕТАЛО-МАТРИЧНИХ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ ТИТАНУ ТА ЙОГО СПЛУК ШЛЯХОМ 3D ДРУКУ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОФІЛЬНОГО ЕЛЕКТРОННОГО ПРОМЕНЮ ТА ПОРОШКОВОГО ДРОТУ

**П.Є. Марковський¹, Д.В. Ковальчук², Д.Г. Саввакін¹,
В.П. Ткачук², В.І. Невмержицький², О.О. Стасюк¹**

¹Інститут металофізики ім. Г.В.Курдюмова НАН України, Київ

²ПрАТ «НВО «Червона Хвиля», Київ

Метало-матричні композити, зокрема на основі сплавів титану та його сполук, знаходять все більш широке застосування в промисловості завдяки підвищеним експлуатаційним властивостям в порівнянні з основним матеріалом. Вже доведено, що армування основи з титанового сплаву твердими частинками карбідів або боридів титану дозволяє досягти кращого поєднання властивостей, особливо міцності, твердості та зносостійкості, ніж традиційне легування. В той же час формування ізотропної структури таких композитів із збереженням фазового складу зміцнювальних компонентів є непростю технологічною задачею.

В цьому повідомленні будуть представлені результати досліджень зразків метало-матричних композитів на основі титанового сплаву Ti-6Al-4V, армованого частинками карбиду титану в кількості до 40%, отриманих шляхом пошарового наплавлення порошкового дроту відповідного хімічного складу з використанням технології 3D друку профільним електронним променем, відомої як xBeam 3D Metal Printing.

Дослідження продемонстрували можливість формування таким методом ізотропної структури композиту з відносно рівномірним розподілом виділень карбиду титану переважно рівновісної морфології всередині матриці сплаву Ti-6Al-4V. Твердість 3D друкованого композиту Ti-6Al-4V + 40 % TiC досягала 800 HV, що значно вище, ніж у матеріалі основи. Попередні результати балістичних випробувань двошарових зразків, отриманих наплавленням метало-матричного композиту Ti-6Al-4V + 40 % TiC на базову плиту з титаново-

го сплаву Ti-6Al-4V, продемонстрували значно вищу балістичну стійкість такого двошарового матеріалу в порівнянні з усіма відомими однорідними титановими сплавами. Це дозволяє очікувати хороші перспективи промислового застосування метало-матричних композитів та шаруватих структур, отриманих за технологією xBeam 3D Metal Printing.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ FDM 3D ДРУКУ НА ПРОЦЕСИ ФОРМУВАННЯ, СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ВИРОБІВ З ПОЛІЛАКТИДУ

**О.П. Масючок, М.В. Юрженко, Р.В. Колісник, А.О. Шадрін,
В.Ю. Кондратенко, М.Г. Кораб**

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

На основі результатів математичного моделювання та теоретичних досліджень встановлено, що найвпливовішими факторами 3D друку, від яких залежить якість та час формування кінцевих виробів, є: температура філь'єри екструдера, висота шарів, швидкість руху друкуючої головки при формуванні виробів, а також одночасна побудова декількох виробів у межах одного циклу. У роботі було проведено відпрацювання режимів процесу FDM 3D друку та встановлено закономірності впливу згаданих параметрів на структуру та властивості отриманих 3D виробів із полілактиду. Експериментально визначено параметри формування виробів, які забезпечують отримання 3D об'єктів із прогнозованими властивостями — максимальною міцністю (98 % міцності філаменту), високою естетичною якістю (гладкістю поверхні та роздільною здатністю) та виробів з мінімальними часовими вкладеннями при їх виробництві.

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ДРУКУ НА ВЛАСТИВОСТІ ВИРОБІВ З ТИТАНОВОГО СПЛАВУ Ti-6Al-4V ОТРИМАНИХ ЗА АДИТИВНОЮ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ

В.А. Матвійчук, В.М. Нестеренков, О.М. Берднікова

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Фахівцями Інституту електрозварювання проведені дослідження у сфері розробки технології та обладнання для адитивного виробництва металевих виробів. Для досліджень створений макет адитивного устаткування. В основі технології лежить застосування пучка електронів високої потужності для сплавлення металевого порошку у вакуумній камері з утворенням послідовних шарів, які повторюють контури цифрової моделі виробу.

Визначення технологічних параметрів наплавлення є необхідною складовою отримання виробів з потрібними властивостями.

Об'єктом досліджень є процес наплавлення виробів з порошку титанового сплаву Ti-6Al-4V, який широко застосовують в промисловості.

Цьому сплаву притаманні високі питома міцність і жароміцність, опір втомним навантаженням, тріщиностійкість та достатня корозійна стійкість, що актуально для потреб авіа-, ракето- та двигунобудування.

Поєднання високої питомої міцності та практично ідеальної сумісності сплаву Ti-6Al-4V із тканинами людського організму робить його перспективним матеріалом для виготовлення протезів (заміна кісток) та імплантантів.

Метою досліджень є визначення оптимальних режимів наплавлення на основі виявлення впливу параметрів друку на структуру, мікротвердість та якісні показники виробів.

В результаті досліджень проаналізовано вплив технологічних параметрів на властивості виробів. Визначена оптимальна густина енергії електронного променя (44,5 Дж/мм³). За результатами досліджень надруковано 25 експериментальних зразків. Використано три режими швидкості променя: 270, 540 та 780 мм/с. Для кожного режиму змінювали струм динамічного фокусування від -1,2 до 1,27 А з кроком біля 0,3 А.

Проведено детальні дослідження зразків. Вивчено їх хімічний склад, мікроструктуру та мікротвердість на різних технологічних режимах друку.

Встановлено, що за хімічним складом вироби відповідають сплаву Ti-6Al-4V з деяким зниженням (на 0,6...1,96 %) вмісту алюмінію відносно хімічного складу порошку, що пов'язане з підвищеною леткістю алюмінієвого пару в умовах наплавлення у високому вакуумі.

Металографічними дослідженнями структури зразків встановлено, що за всією висотою формуються великі кристаліти з однорідною пластинчасто-голчастою структурою α' -фази з невеликою кількістю β -фази, переважно без дефектів при рівномірній мікротвердості як за висотою, так і вздовж поверхні зразків. Варіації мікротвердості пов'язані із структурно-фазовими складовими, зміною внутрішньої (тонкої) структури кристалітів, а саме з субструктурою, розмірами дисперсних голчаста-пластинчастих складових α' -фази, а також рівнем щільності дислокацій. Також варіації мікротвердості можуть бути пов'язані зі змінами вмісту α - і β -фаз.

Методом растрової електронної мікроскопії вивчено морфологію поверхонь зразків в декількох зонах, а саме у центральній зоні та по контуру, встановлено параметри шорсткості мікрорельєфу поверхонь, наявність дефектів (пор, несплавлень, мікронерівностей, включень). Встановлено, що вироби характеризуються переважно однорідним мікрорельєфом профілю. Структура поверхонь, що формується у різних зонах в залежності від технологічних режимів, відрізняється за своєю морфологією. Встановлено режими наплавлення, які мають практичне застосування: швидкість променю 780 мм/с; потужність 675 Вт; струм динамічного фокусування від -1,2 до 0 А. Це забезпечує мінімальні параметри мікрорельєфу поверхонь та відсутність дефектів: усадочних пор, несплавлень, а також мінімальну кількість включень.

ВІДНОВЛЮВАЛЬНИЙ РЕМОНТ РОБОЧИХ ЛОПАТОК ПАРОВОЇ ТУРБИНИ ЗА ДОПОМОГОЮ АДИТИВНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

О.В. Махненко, Г.Ю. Саприкіна, О.М. Савицька, М.С. Ананченко

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Ремонт відповідальних елементів конструкції, до яких можна віднести робочі лопатки потужних парових турбін із титанового сплаву, доцільно виконувати за допомогою адитивної технології, що зумовлено високими вимогами до якості виробу, а саме необхідністю забезпечити потрібну мікроструктуру та механічні властивості матеріалу лопатки, а також низький рівень залишкового напружено-деформованого стану і окислення поверхні матеріалу. Застосування методів математичного моделювання на базі комп'ютерних технологій дозволяє зменшити обсяг експериментальних досліджень і забезпечити необхідну якість ремонту, що гарантує певну надійність та роботоздатність лопаток після ремонту.

WAAM З АДАПТОВАНИМИ ПРОЦЕСАМИ FRONIUS MIG/MAG AC

В.В. Оніщук

ТОВ «Фроніус Україна», с. Княжичі, Київська обл.

WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) доволі новий метод виготовлення деталей чи виробів, і одне з перших та головних запитань щодо WAAM в даний час: це наскільки актуальними є реальне використання даного процесу в виробничих умовах та його перспективи. У вільному доступі є декілька прикладів такого використання, які можуть надати варіанти відповідей щодо актуальності такого використання.

Відкрита інформація з сайту компанії Relativity Space (<https://www.relativityspace.com/>), що спеціалізується в області космонавтики. На відео: фрагменти виготовлення особливо відповідальних конструкцій (елементи корпусів ступеней) методом WAAM. Візуально можна побачити зварювальне обладнання Fronius типу TPS та TPSi, та визначити процес зварювання: це СМТ процес. Таке заключення зроблено на основі видимого спеціального буфера для дроту та пальника СМТ.

CMT (Cold Metal Transfer) — ідеальний процес GMAW для WAAM, який розроблений та запатентований компанією Fronius International і базується на крапельному переносі з додатковим інтелектуальним механічним відведенням присадкового дроту при перенесенні кожної краплі металу в зварювальну ванну. Така технологія дає можливість регулювання та контролю за тепловкладенням, його мінімізації, та додатково створює високостабільний перенос металу, навіть в CO₂, практично без розбризкування.

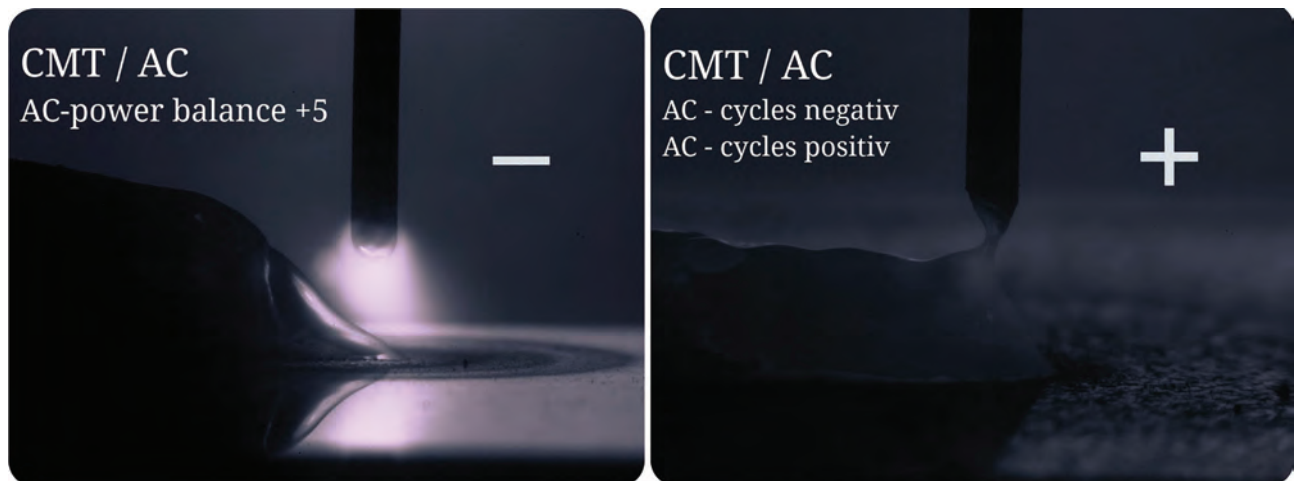
Процес CMT, створений (перші досліді) ще в 2001 р. та виведений на ринок (серійні зварювальні джерела живлення) в 2004 році, постійно розвивається та вдосконалюється як за рахунок технологічних вимог (CMT Advance), так і за рахунок інтелектуального мікропроцесорного управління.

Нова лінійка обладнання типу TPSi та iWave дала можливість підняти і так практично бездоганний процес CMT на новий рівень можливостей: CMT AC зробивши цей процес ще більш керованим, точним та простішим для інтеграції з роботизованими системами WAAM.

CMT AC базується на включенні в процес CMT ще однієї додаткової складової для регулювання процесу: **AC-Power Balance** — зміна полярності на дроті.

Завдяки цій зміні полярності, та широким межам такого регулювання, генерується низький тепловий вплив при збереженні високої швидкості плавлення та забезпечується ще більш точне контрольоване введення тепла.

Така технологія CMT AC в поєднанні з вдосконаленими допоміжними асистентами роботизованого використання і спеціальним інтерфейсом системи iWave має назву **CMT AC Additive** і надає нові можливості для адитивного виробництва WAAM.



МОЖЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕНЬ ЯКОСТІ ВИРОБІВ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

О.В. Павлій¹, С.М. Глабець², І.Я. Кухта¹, О.А. Крюкова³

¹НВФ «Діагностичні прилади», Київ

²НВФ «Ультракон», Київ

³Київський національний університет технологій та дизайну, Київ

Вибуховий розвиток сучасних технологій виробництва ставить нові завдання перед службами контролю якості підприємств. Новий тип виробництва металевих та неметалевих виробів виготовлених методом 3D друку, дугової, лазерної або електронно-променевої наплавки та ін. вимагає адаптації існуючих традиційних, впровадження нових методів досліджень та розробки критеріїв, за якими можливо оцінювати якість готової продукції.

У виробництві десятиліття використовуються надійні та ефективні методи неруйнівного контролю (НК) для виявлення несучільностей, оцінки фізичних властивостей та прогнозування строку життя виробу.

Більшість існуючих методів контролю можливо адаптувати і для контролю продуктів адитивного виробництва. Були проведені дослідження щодо можливості використання класичних методів НК (акустичний та радіографічний) для контролю несущільностей виробів з титану, сталі, бронзи, вольфраму та молібдену, які отримані електронно-променевою, дуговою та плазмово-дуговою наплавкою.

Отримані результати демонструють достатньо високу ефективність ультразвукового методу контролю для виробів з вольфраму (при забезпеченні надійного акустичного контрасту та наявності еталонних зразків з відповідного матеріалу). Для контролю виробів з титану, сталі та бронзи використовували метод класичної плівкової радіографії. Одержані рентгенівські знімки показують можливість виявлення несущільності, які еквівалентні індикаторам якості зображення на рівні не менше ніж 0,2 мм. При удосконаленні технології цей показник можна зменшити до 0,1 мм, що відповідає граничній чутливості методу плівкової радіографії.

За результатами проведених досліджень можна стверджувати, що ультразвуковий та радіаційний методи НК цілком можливо ефективно використовувати для контролю якості продукції адитивних технологій.

3D ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОЩУВАННЯ МОНОКРИСТАЛІВ ВОЛЬФРАМУ

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

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Проаналізовано еволюцію рідкофазних методів вирощування монокристалів вольфраму. Показано, що методи вирощування кристалів з одним джерелом нагріву не можуть вирішити проблему виробництва кристалів промислових розмірів. Надвеликі кристали вольфраму різної конфігурації можна отримати за допомогою 3D технологій та комбінованого плазмово-індукційного нагріву. Цей метод вже застосовувався для вирощування монокристалічних пластин, заготовок для широкоформатної монокристалічної прокатки, монокристалічних зливків і тиглів. Наступним кроком стане створення технології вирощування об'ємних супервеликих монокристалів вольфраму.

МЕТАЛЕВО-ПОРОШКОВИЙ ДРІТ НА ОСНОВІ ТИТАНУ ЯК МАТЕРІАЛ ДЛЯ АДДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

С.Л. Шваб¹, Р.В. Селін¹, С.В. Ахонін¹, М.М. Ворон², Д.В. Ковальчук³

¹Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

²Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

³ПрАТ «НВО «Червона Хвиля», Київ

У роботі показано можливість виготовлення металопорошкових дротів на основі високоміцних титанових сплавів різного складу (систем Ti-5Al-5Mo-5V-1Fe-1Cr та Ti-5Al-5Mo-5V-4Nb-1,5Cr-1Fe-2,5Zr), сплаву на основі титану медичного призначення (система Ti-13Zr-13Nb) та конструкційного титанового сплаву VT6 (система Ti-6Al-4V), армованого частинками TiC. Відображено технологічні моменти експериментального виробництва металопорошкових дротів методом волочіння та наступних перетяжок. Проведено дослідження із застосування цих матеріалів у якості присадного металу при WAAM технології як при аргонодуговому, так і при електронно-променевому способах наплавлення.

СТЕНДОВІ ДОПОВІДІ

ІНТЕРМЕТАЛІДНІ ПОРОШКИ ДЛЯ 3D ДРУКУ, ОТРИМАНІ МЕТОДОМ ПЛАЗМОВО-ДУГОВОЇ СФЕРОЇДИЗАЦІЇ ПОРОШКОВОГО ДРОТУ

Л.І. Адєєва, А.Ю. Тунік, В.Н. Коржик, Д.В. Строгонов, В.А. Костін, С.Г. Григоренко

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Серед перспективних інтерметалідних конструкційних матеріалів, які володіють унікальним комплексом фізико-механічних і експлуатаційних властивостей, особливе місце займають матеріали на основі алюмінідів заліза. Ці матеріали більш легкі і значно дешевші, ніж більшість жароміцних сталей та сплавів. Однак матеріали на основі FeAl не отримали широкого застосування в промисловості через відсутність простої і недорогої технології їх виробництва. Застосування методу плазмОВО-ДУГОВОГО розпилення (ПДР) дротяних матеріалів дозволяє отримувати високоякісні сферичні порошки з високими технологічними властивостями, що робить їх привабливими для 3D друку металевих виробів складної форми. Експерименти проводили в середовищі аргону на установці «PLAZER-30». В якості вихідного матеріалу застосовували дріт з оболонкою із низьковуглецевої сталі Ст08кп та порошковим наповнювачем (алюмінію марки ПА-4). Склад порошкового дроту 86Fe+14Al мас. %, відповідає формулі інтерметаліду Fe₃Al, коефіцієнт заповнення становить 16 %. Отримані порошкові матеріали були розділені на фракції –350+200; –200+100 та –100+75. Встановлено залежність морфології, структури, фазового складу, мікротвердості від сили струму плазмотрона та фракції порошку.

Мікроструктурі дослідження показали, що на всіх досліджених режимах плазмотрона (сила струму 180, 220, 270 А) розпилені частки переважно мають сферичну форму. Кількість часток несферичної форми збільшується зі збільшенням їх розміру з 3 до 12 %. У всіх фракціях порошків кількість металевих часток переважає кількість оксидної, однак частка оксидних часток поступово зростає при зменшенні фракції порошку і зниженні сили струму плазмотрона. Металеві частки мають складну структуру - ядро і оболонку товщиною 5...14 мкм. Після хімічного травлення в їхній структурі виявлено світлі дендрити алюмінідів заліза з прошарками α- заліза темного кольору між дендритами.

Порошки, отримані ПДР, мають стабільний фазовий склад. Основною складовою є алюмінід заліза Fe₃Al (або суміш Fe₃Al+AlFe). Рентгеноструктурні дослідження також показали наявність оксидних фаз: Fe₃O₄, Fe₂O₃ та первинної α-Fe, що не прореагувала з алюмінієм. На режимах при силі струму 220 і 270 А порошки фракції –200+100 мкм, містять найбільшу кількість алюмінідів 83,88 і 86,30 мас. % і найменшу оксидів 6,61...10,18 мас.%. В дрібних порошках (–100+75 мкм) вміст алюмінідів становить 70,38...75,68 мас. %, але кількість оксидів зростає до 29,62 мас. %. Мікротвердість оксидних часток, яка становить 5324...8153 МПа, вища ніж мікротвердість металевих часток, що дорівнює 3065...4590 МПа. Середня мікротвердість металевих часток значно нижча (2753...4935 МПа) ніж мікротвердість оксидних часток (4503...7464 МПа). В результаті проведених досліджень встановлено, що найкращий матеріал за фазовим складом, структурою, показниками твердості та фактором форми був отриманий при силі струму плазмотрона 220 А у фракції –200+100. Досліджені порошкові матеріали можуть використовуватись для отримання тривимірних виробів складної форми методами 3D друку для автотранспорту, енергетики, газотурбінних двигунів, авіаційної та хімічної промисловості.

ОТРИМАННЯ ПОРОШКУ ЖАРОМІЦНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВУ ЗІ ЗЛИВКІВ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ

С.В. Ахонін¹, В.О. Березос¹, А.Ю. Северин¹, М.М. Кузьменко², О.А. Дорогой²

¹Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

²Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ

Тривимірний друк деталей безпосередньо з металів є вкрай важливим і перспективним напрямом розвитку технологій машинобудування, тому що дозволяє значно здешевіти та прискорити отримання кінцевої деталі. Наразі, це є дуже важливим при виробництві деталей для малих літальних апаратів або ракет. Але, для використання такого друку необхідно використовувати порошки відповідного складу, зокрема з жароміцних сплавів.

Перспективним напрямом підвищення високотемпературних властивостей титанових сплавів є зміцнення титанової матриці за рахунок евтектичних виділень силіцидів по границях і в середині зерен, шляхом додавання кремнію в кількості, що перевищує термодинамічно стабільну величину у твердому розчині. Для забезпечення комплексу високих фізико-механічних характеристик експериментальних титанових сплавів при кімнатній та підвищених температурах було проведено комплексне легування з метою забезпечення зміцнення твердого розчину за рахунок α -фази та дисперсних частинок вторинної фази, зокрема силіцидами.

Електронно-променева плавка (ЕПП) дозволяє отримувати якісні зливки титанових сплавів, які характеризуються достатньою хімічною однорідністю та відсутністю дефектів литого походження. Було отримано зливки $\varnothing 150$ мм жароміцного сплаву системи Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn.

Проведена гаряча деформаційна обробка отриманих зливок дозволила отримати прутки $\varnothing 54$ мм та довжиною 770 мм. Після механічної обробки до $\varnothing 50$ мм та довжини 700 мм прутки було розпилено у металевий сферичний порошок з основною фракцією гранул 100-160 мкм на установці відцентрового розпилення ВГУ-2М (ПІМ ім. І.М. Францевича НАН України). Така схема отримання полуфабрикатів з жароміцних сплавів під розпилення, дозволила мінімізувати втрати складнолегованого і досить дорогого матеріалу.

ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВА ПЛАВКА НОВІТНЬОГО БІОСУМІСНОГО СПЛАВУ ТИТАНУ МЕДИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ Ti–6Al–7Nb

В.О. Березос, Д.С. Ахонін, О.Г. Єрохін

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Наразі в Україні є значний попит на продукцію зі сплавів медичного призначення, але немає власного виробництва і вони в значній кількості імпортуються із-за кордону. Сплави медичного призначення в переважній більшості виробляють методом вакуумно-дугового переплаву (ВДП). В Україні відсутні печі ВДП, але є наявний потужний парк установок електронно-променевої плавки (ЕПП), тому, задача розробки технології одержання медичних титанових сплавів, які відповідають жорстким експлуатаційним вимогам, є вельми актуальною.

В ЄС найбільш вживаним титановим сплавом медичного призначення, який пройшов всі етапи медичної сертифікації, є сплав Ti–6Al–7Nb.

Як відомо, при виплавці зливок титанових сплавів методом ЕПП легуючі елементи з пружністю пари, що перевищує пружність пари титану, випаровуються інтенсивніше, що призводить до зміни хімічного складу металу. Тому, з технологічної точки зору особливістю, що ускладнює виплавку сплаву Ti–6Al–7Nb методом ЕПП, є дуже велика різниця температур плавлення легуючих елементів (алюмінію 660 °С, ніобію — 2469 °С). Для визначення закономірностей таких змін була побудована математична модель процесів випаровування алюмінію та ніобію при ЕПП титанового сплаву Ti–6Al–7Nb, яка встановлює залежність вмісту цих елементів в зливку від технологічних параметрів плавки. На основі встановлених закономірностей процесів випаровування легуючих елементів та кристалізації при ЕПП було визначено режими плавки та відпрацьовано технологію одержання бездефектних та хімічно однорідних зливок перспективного біосумісного титанового сплаву медичного призначення Ti–6Al–7Nb з гомогенною дрібнозернистою структурою, в якій відсутні будь-які прояви слідів зональної ліквідації.

Проведені роботи показали, що розроблена технологія ЕПП є ефективним методом отримання злиwkів титанового сплаву медичного призначення Ti-6Al-7Nb з якісною поверхнею, однорідним хімічним складом і високим рівнем механічних властивостей.

ОЦІНКА ЯКОСТІ МЕТАЛА ШВА КОНСТРУКЦІЙНИХ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

**В.Ю. Білоус, С.В. Ахонін, Р.В. Селін, Е.Л. Вржижевський,
С.Л. Антонюк, С.Б. Руханський**

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Отримати зварні з'єднання титанових сплавів можливо на режимах з різним значенням погонної енергії. З метою оцінки ефективності обраного режиму зварювання, а також та після зварювальної термообробки зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів було запропоновано критерій «якості» режиму зварювання в умовних одиницях, який складається з вкладу режимів зварювання та термообробки у комплексне підвищення сумарних показників міцності, пластичності та ударної в'язкості званих з'єднань титанових сплавів відносно основного металу відповідного сплаву. Загалом, для титанових сплавів, зазвичай, підвищення одних механічних властивостей, наприклад міцності, визиває відповідне зниження пластичності та показників ударної в'язкості. Але у деяких випадках це відбувається не пропорційно. Аналіз отриманих результатів механічних характеристик зварних з'єднань дозволив зробити висновок, що в зварних з'єднаннях титанових сплавів в яких високі показники пластичності показники ударної в'язкості таких знаходяться на високому рівні. У зв'язку з цим був запропоновано коефіцієнт «якості режиму зварювання»:

$$K_{рзв} = k_1(\sigma_{зв} / \sigma_{ом}) + k_2(KCV_{зв} / KCV_{ом}),$$

де $\sigma_{зв}$ — межа міцності зварного з'єднання; $\sigma_{ом}$ — межа міцності основного металу; $KCV_{зв}$ — ударна в'язкість зварного з'єднання; $KCV_{ом}$ — ударна в'язкість основного металу; k_1, k_2 — коефіцієнти «ваги» міцності та ударної в'язкості для оцінки якості зварного з'єднання.

Встановлено що виконання ЕПЗ з застосуванням ЛТО та попереднього підігріву для псевдо- β -сплавів ВТ 19 та економно легованого LCB-5.1 забезпечує найбільші значення коефіцієнту якості. Значення показника якості та коефіцієнт міцності зварних з'єднань двох фазного ($\alpha+\beta$)-сплаву Т120 поступаються відповідним показникам псевдо- β -сплавів. В разі аргонодугового зварювання конструкційних титанових сплавів застосування малолегованого присадного матеріалу на відповідних режимах що дозволяє знизити на 10...20 % кількість легуючих елементів в металі шва порівняно з основним металом, забезпечує високу якість зварних з'єднань перспективних високоміцних псевдо- β -сплавів та найбільші значення коефіцієнту якості в стані після зварювання. Найбільший коефіцієнт якості для зварних з'єднань конструкційного псевдо- β -титанового сплаву ВТ19 та ($\alpha+\beta$)-сплаву Т120 забезпечує АДЗ та з подачею нелегованого присадного матеріалу ВТ1-00св на режимах зварювання які забезпечують вміст присадного металу в шві в кількості 10 %.

МЕТАЛОКЕРАМІЧНІ КОМПОЗИЦІЙНІ ПОРОШКОВІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІДУ ТИТАНУ ДЛЯ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

Н.В. Вігілянська, О.П. Грищенко, Т.В. Цимбаліста, О.М. Бурлаченко

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

За рахунок поєднання комплексу таких властивостей, як низька густина, висока питома міцність, корозійна стійкість, жаростійкість та жароміцність, сплави на основі алюмініду титану на даний час розглядаються як найбільш перспективні матеріали, що відповідають сучасним вимогам авіакосмічної, авіаційної та автомобільної промисловості. Алюмініди титану можуть бути застосовані в якості конструкційних матеріалів, захисних покриттів та для виготовлення виробів методами адитивного виробництва, де в якості сировини використовують TiAl-порошки. В той же час крихкість, низька пластичність і тріщиностійкість

у широкому інтервалі температур, обмежує їх широке використання в промисловості. З метою підвищення фізико-механічних та службових властивостей виробів, виготовлених методами адитивного виробництва, розроблено металокерамічні композиційні порошки на основі TiAl з додаванням в їх склад в якості зміцнюючих компонентів неметалевих тугоплавких сполук (B_4C , BN, SiC та Si_3N_4). Порошки одержано методом механохімічного синтезу (МХС) шляхом обробки механічних сумішей порошків 73TiAl–27 B_4C , 69TiAl–31BN, 88TiAl–12SiC та 83TiAl–17 Si_3N_4 (мас. %) у високоенергетичному планетарному млині з наступною сфероїдизацією продуктів МХС шляхом розпилення плазмовим струменем.

В результаті проходження через плазмовий струмінь при проходженні стадії плавлення частинки продукти МХС набувають сферичної форми і 95 % частинок продукту розпилення мають сферичну або близьку до сферичної форму. Середній розмір частинок порошків систем TiAl– B_4C , TiAl–BN, TiAl–SiC та TiAl– Si_3N_4 складає 38 ± 15 , 47 ± 20 , 67 ± 28 та 48 ± 26 мкм, відповідно. Основний об'єм (70–90%) частинок порошків систем TiAl– B_4C , TiAl–BN та TiAl– Si_3N_4 має розмір 20–60 мкм, порошок системи TiAl–SiC – 30–80 мкм. Рентгеновські та мікроструктурні дослідження показали, що одержані порошки мають щільну однорідну структуру, основною фазою в яких є інтерметалідна фаза TiAl. В результаті фазових перетворень, які протікають на стадії МХС, в частинках порошків формуються зміцнюючі фази боридів (TiB_2 , AlB_2), карбідів (TiC, Ti_3AlC), нітридів (TiN, AlN) та силіциду Ti_5Si_3 .

Таким чином, розроблені металокерамічні композиційні порошки на основі алюмініду титану можуть застосовуватися в адитивних технологіях, оскільки вони відповідають вимогам, що пред'являються до порошкових матеріалів при адитивному виробництві. Використання розроблених порошків дозволить розширити сфери застосування адитивних технологій та підвищити як механічні властивості, так і жаро- та корозійну стійкість виробів завдяки поєднанню властивостей алюмінідів титану та зміцнюючих добавок.

ІНДИВІДУАЛЬНІ ОРТОПЕДИЧНІ ІМПЛАНТАТИ ВИГОТОВЛЕНІ 3D ДРУКОМ ТА НАНЕСЕНИМ МІКРОПЛАЗМОВИМ МЕТОДОМ БІОСУМІСНОГО ПОКРИТТЯ

С.Г. Войнарович¹, С.М. Калюжний¹, О.М. Кислиця¹, Д.Л. Алонцева², Б.Н. Азаматов²

¹Інститут електророзварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

²Східно-Казахстанський технічний університет ім. Д. Серікбаєва, Усть-Каменогорськ, Казахстан

Вироби виготовлені технологією 3D друку широко застосовуються в травматології та ортопедії у вигляді індивідуальних імплантатів із аустенітних нержавіючих сталей марки 316L або титанового сплаву марки Вt6. Проте на даний час сучасний розвиток технології 3D друку не дозволяє друкувати імплантати з різних матеріалів, які сприяють підвищенню корозійної стійкості у внутрішньому середовищі організму людини та мають антибактеріальні властивості. Для надання поверхням імплантатів виготовлених 3D друком підвищених властивостей до біосумісності використовують технологію вакуумного осадження або традиційного плазмового напилення. Проте у випадку плазмового напилення є велика вірогідність перегріву пористого імплантату отриманого методом 3D друку, а покриття отримані вакуумним осадженням є досить вартісними. Найбільш доцільною серед методів нанесення покриттів є технологія мікроплазмового напилення (МПН). Незначна теплова потужність мікроплазмового струменя зменшує вірогідність перегрівання надрукованого імплантату із збереженням його фізико-механічних властивостей та наданням поверхні характеристик, які сприятимуть процесам остеоінтеграції шляхом нанесених покриттів із більш біосумісних матеріалів. Насьогодні успішно були отримані МПН покриття із Zr, Ta і NaP на поверхнях індивідуальних імплантатів виготовлених методом 3D друку. Подальші дослідження будуть спрямовані на встановлення впливу фазового складу, розміру пор та шорсткості рельєфу поверхні МПН покриттів на процеси остеоінтеграції імплантатів виготовлених методами 3D друку.

СХИЛЬНІСТЬ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ БРОНЬОВИХ СТАЛЕЙ ВИСОКОЇ ТВЕРДОСТІ ДО УТВОРЕННЯ ХОЛОДНИХ ТРІЩИН ТА СПОСОБИ ЇХ ПОПЕРЕДЖЕННЯ

**О.А. Гайворонський, В.Д. Позняков, А.В. Завдовєєв,
А.В. Клапатюк, А.М. Денисенко, О.В. Корєєв**

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

В роботі наведено результати досліджень щодо схильності зварних з'єднань сучасних броньових сталей високої твердості до утворення холодних тріщин та надано рекомендацій щодо їх попередження. При виконанні досліджень застосовувалися розрахунковий метод відповідно EN 1011-2:2001, метод Імплант для визначення опірності металу ЗТВ уповільненому руйнуванню та технологічна жорстка проба при зварюванні багатошарових з'єднань. Встановлено, що при дуговому зварюванні з'єднання броньових сталей високої твердості мають підвищену схильність до утворення холодних тріщин в металі ЗТВ. При зварюванні низьколегованим матеріалом типу Св-10ГСМТ застосування попереднього підігріву дозволяє їх уникнути. Температуру попереднього підігріву можливо розрахувати за показниками СЕТ та ТР відповідно до хімічного складу броньової сталі. При наявності концентраторів напружень в зварних з'єднаннях розрахункова температура попереднього підігріву повинна бути підвищена на 50–70 °С. Зварні з'єднання, виконані високолегованим матеріалом типу Св-08Х20Н9Г7Т мають підвищену опірність до уповільненого руйнування і утворення холодних тріщин. При виготовленні легкоброньованої техніки рекомендовано обирати броньову сталь, в якій вміст вуглецю не перевищує 0,26 %. При зварюванні такої броньової сталі низьколегованими матеріалами забезпечується достатньо висока опірність зварних з'єднань утворенню холодних тріщин навіть при наявності концентраторів напружень за рахунок попереднього підігріву до температури 150 °С, а також при зварюванні без попереднього підігріву при застосуванні високолегованих матеріалів.

ЧИСЕЛЬНО-ІНСТРУМЕНТАЛЬНИЙ МЕТОД ТЕПЛОВІЗІЙНОГО КОНТРОЛЮ ВАЖКОДОСТУПНИХ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ

В.Ю. Глуховський, В.А. Литвиненко

Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Діагностика технічного стану важкодоступних промислових конструкцій, будівель та споруд довготривалої експлуатації є обов'язковим етапом експертного аналізу їх стану та основою для планування ремонтно-відновлювальних заходів. Одним із основних аспектів дослідження є виявлення дефектів конструкцій, які можуть впливати на цілісність та функціональність відповідних конструкційних компонентів.

Для аналізу промислових об'єктів такого класу, при виявленні геометричних аномалій різного типу, свою ефективність показав метод тепловізійного контролю (ТК), які дозволяють виконувати дистанційну діагностику зменшуючи час аналізу та знижуючи виробничі ризики для персоналу. Сутність цього методу полягає у фіксації та наступному аналізі поверхневого температурного поля контрольованого об'єкту, з метою якісної та кількісної оцінки його аномальних ділянок, які зумовлені внутрішніми неоднорідностями в структурі об'єкту.

Одним із принципових недоліків даного методу є зниження точності кількісної оцінки розмірів виявлених дефектів зі збільшенням дистанції контролю. Це означає, що в разі виявлення певних аномалій, для обґрунтованого експертного висновку про їх припустимість необхідними є додаткові заходи з обстеження відповідного конструкційного елемента, що, певним чином, нівелює переваги ТК. Тому актуальною є розробка наукомістких підходів аналізу результатів вимірювання полів температур з точки зору їх кількісної інтерпретації. Метою даної роботи є розробка чисельно-інструментального методу ТК стану великогабаритних конструкцій та споруд на основі комплексного застосування тепловізійних приладів і розрахункових підходів аналізу теплових полів.

Сутність запропонованої методики полягає у тепловізійному вимірюванні температурних полів на поверхні плоских або циліндричних конструкцій. Області поверхневих чи підповерхневих дефектів характеризуються локальною зміною температури. При цьому, співвідношення температур в області дефекту та в бездефектній частині конструкції, залежить, перш за все, від залишкової товщини стінки та типу дефекту. Для визначення типу (поверхнева, підповерхнева) та фактичного розміру несущальності необхідно мати залежності локальної темпера-

тури на зовнішній поверхні конструкції в області дефекту від теплофізичних властивостей матеріалу та особливостей температурного впливу. Такі залежності було отримано на основі чисельного розрахунку температурного поля з урахуванням геометричних та фізичних особливостей стану конструкції. Валідація математичних моделей та засобів їх комп'ютерної реалізації була проведена на основі відповідних лабораторних досліджень модельних конструкційних елементів. За результатами розрахунків та термографічного вимірювання температури поверхні дефектного зразка показано похибку розробленого підходу не вище 15 %.

На прикладі конструкції залізобетонної чотиришарової промислової димової труби для котлоагрегатів ПТВ-100 висотою 120 метрів та діаметром гирла 4,8 метри на основі результатів чисельного розрахунку було отримано залежності максимальної температури в центрі дефекту локального стоншення стінки від його глибини, а також локальної температури від радіального розміру об'ємного дефекту розшарування, що розташований в центральному перерізі стінки димової труби.

Запропоновані розрахункові залежності дозволяють більш точно аналізувати відповідні термограми, оцінювати температуру всередині труби на певній висоті (відповідні залежності сходяться до конкретних температур поверхні бездефектної ділянки при розмірі дефекту, що дорівнює нулю), визначити тип і розміри дефектів в процесі ТК.

СІНЕРГЕТИЧНІ АГЛОМЕРОВАНІ ФЛЮСИ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ВИСОКОМІЦНИХ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

І.О. Гончаров

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Виробництво агломерованих флюсів є яскравим прикладом адитивної технології, а саме присутні порошкоподібні сипкі матеріали, які з'єднують в гранули за допомогою клею. Традиційне виробництво агломерованих флюсів, ґрунтоване на використанні мінеральних сировинних матеріалів при всіх їх перевагах над плавленими флюсами, визначає і властиві агломерованим флюсам недоліки, а саме: підвищену схильність до сорбування вологи з оточуючої атмосфери, меншу міцність гранул флюсу і залежність якості флюсу від якості застосовуваної при його виробництві сировини. При виготовленні агломерованих флюсів неможливо знизити вміст в складі шихтових матеріалів таких шкідливих домішок як сірка, фосфор. Зважаючи на підвищений рівень вимог до вмісту шкідливих домішок при зварюванні ВМНЛ сталей, вартість флюсів визначається вартістю сировини. Запропоновано технологію виготовлення синергетичних агломерованих флюсів, яка базується на використанні плавлених напівпродуктів.

Створено технологію рафінування шлакового розплаву в послідовно працюючих газополуменевій і електродуговій печі, яка забезпечує зниження вмісту сірки в 2–4 рази, а фосфору в 1,3–2,6 разів порівняно із традиційною технологією виплавлення у газополуменевій печі. Вивчені особливості будови гранул агломерованого флюсу при введенні до них плавлених напівпродуктів. Встановлено, що підвищення до 45 % в складі шихти агломерованих флюсів вмісту плавлених напівпродуктів приводить до зниження необхідної для формування гранул кількості зв'язуючої речовини з 30 до 15 мл/100 г шихти, зниження здатності агломерованого флюсу до поглинання атмосферної вологи на 46 %. Підвищення вмісту плавленого напівпродукту у складі шихти з 15 до 45 % приводить до зниження вмісту $[H]_{\text{диф.напл.метал}}$ з 3,5 до 2,5 см³/100 г. Запропоновано методіку кількісної оцінки стійкості гранул флюсу проти руйнування. Визначено, що при введенні плавлених напівпродуктів до складу шихти агломерованих флюсів в кількості 45 % дослідні агломеровані флюси переважають імпорتنі аналоги на 4 %. Розроблено флюс марки АНКС-28. Він забезпечує необхідний рівень вмісту кисню, вуглецю, кремнію та марганцю в зварних швах, формування в швах дрібнодисперсних неметалевих включень і мікроструктур металу шва на основі голчатого фериту при зварюванні ВМНЛ сталей і сталей підвищеної міцності. Завдяки цьому при багатодуговому зварюванні сталі 10Г2ФБ дротом Св-07Г1НМА досягнуто холодостійкості металу зварних швів $KCV_{-40^\circ\text{C}} = 98$ Дж/см². Флюс АНКС-28 рекомендовано до застосування при виготовленні пролітних будов мостів (розрахункова мінімальна температура до мінус 40 °С включно).

РЕКРИСТАЛІЗАЦІЯ В ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ ПРИ ПОВЗУЧОСТІ

В.В. Дмитрик, І.В. Касьяненко

Національний технічний університет «Харківський Політехнічний Інститут», Харків

В зварних з'єднаннях із теплостійких сталей, які довготривало (понад 270 тис. год.) працюють в умовах повзучості проходить процес рекристалізації, що сприяє зниженню їх експлуатаційних характеристик. І тому дослідження особливостей даного процесу, стосовно його уповільнення, є доцільним для підвищення надійності і ресурсу роботи зварних з'єднань.

Рекристалізація у зварних з'єднаннях паропроводів із теплостійких сталей має суттєві відмінності від рекристалізації, яка проходить при відпалі холоднодеформованого металу. Так процес рекристалізації при відпалі має інкубаційний період, характеризується утворенням та зростанням вільних від напружень зародків, а також розподіляється на первинну, збиральну і вторинну стадії. На відміну процес рекристалізації у зварних з'єднаннях (напрацювання 270–300 тис. год.) інкубаційного періоду не має, а також не має і стадійного розподілу. Такий процес характеризується наявністю поступової ліквідації окремих границь між зернами, що приводить до утворення зерен більших за величиною, а також до зниження механічних і фізичних властивостей металу зварних з'єднань.

В порівняно найбільшому ступені рекристалізація відбувається на ділянках сплавлення, перегріву і неповної перекристалізації зони термічного впливу (ЗТВ) зварних з'єднань. Рекристалізація є складовою частиною деградації структури, сприяє зниженню майже на 15–20 % властивостей міцності і на 10–20 % ударної в'язкості зварних з'єднань. Прояв процесу рекристалізації помітно спостерігається на ділянках сплавлення, перегріву і неповної перекристалізації ЗТВ, деформація яких складає близько 2–3 %. Зазначимо, що деформація металу шва і основного металу при напрацюванні зварних з'єднань 270–300 тис. год. становить приблизно 0,5–0,7 %, що на прояв рекристалізації в їх металі не впливає.

Встановили, що швидкість усунення окремих границь між зернами залежить від структурно-фазового стану зварних з'єднань і прискорюється при наявності перегрівів. Злиття зерен приведе до наступного утворення їх однакової структурної орієнтації. При дослідженні процесу рекристалізації, стосовно умов повзучості, слід усвідомлювати положення теорії дислокацій і теорії границь зерен, що доцільно для зниження рівня рекристалізації. Наведені дослідження є доцільними для усвідомлення структурно-фазових перетворень у нових, більш теплостійких сталях.

СТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛІ 06Г2БДП

С.Л. Жданов, В.Д. Позняков, А.В. Завдовєєв, А.М. Герасименко, О.Г. Синєок,
А.О. Максименко, В.Д. Рябоконт, Р.В. Богодіт*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

Забезпечення надійної експлуатації металокопункцій мостів вимагає вирішення широкого кола питань, зокрема, розроблення нових вітчизняних матеріалів з гарантованими характеристиками, які б забезпечували необхідну довговічність мостових споруд. Сучасним вимогам до матеріалів для будівельних металокопункцій і мостів відповідають високоміцні економнолеговані сталі 06ГБ, 06Г2Б, на базі яких створена сталь з підвищеною стійкістю до атмосферної корозії марки 06Г2БДП класу міцності 355–500 МПа. Використання корозійностійкої сталі при виготовленні металокопункцій мостів дозволить підвищити їх надійність та експлуатаційний ресурс. В роботі розглянуті питання впливу технологічних параметрів зварювання на структуру та властивості зварних з'єднань сталі 06Г2БДП. Встановлено, що за показниками статичної міцності зазначені способи зварювання та зварювальні матеріали: дріт суцільного перерізу NiMo1-IG у сполуці з газовою сумішшю 82 % Ar + 18 % CO₂, порошковий дріт Filarc PZ 6114S разом з CO₂ та дріт суцільного перерізу Св-10НМА у сполуці з флюсом ОК Flux 10.71 забезпечують необхідний рівень механічних властивостей. Металографічні дослідження мікроструктури всіх зон зварних з'єднань та фактографічні дослідження поверхні зламів зразків після випробувань на ударний згин показали, що із вищезазначених сполук зварювальних матеріалів з точки зору формування дисперсної феритно-карбідної структури та отримання високих показників ударної в'язкості найбільш сприятливим може бути використання дроту суцільного перерізу фірми Böhler NiMo1-IG при механізованому зварюванні сталі 06Г2БДП у суміші газів 82 % Ar + 18 % CO₂.

BULK HIGH ENTROPY ALLOY THROUGH METAL POWDER WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING

A. Zavdoveev, A. Gaivoronskiy, V. Pozniakov, A. Klapatyuk

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NASU, Kyiv

High-entropy alloys (HE alloys) are defined as those composed of five or more principal elements in equimolar ratios or HE alloys may contain principal elements with the concentration of each element being between 35 and 5 at. %. This has led to many alloy systems with simple crystal structures and extraordinary properties. It is established that HEAs form different microstructures such as single-phase FCC, BCC, HCP microstructures as well as complex multi-phase microstructures. These alloys have attracted great research interest owing to promising properties observed in specific HEAs. For instance, the quinary equi-molar Cantor HEA CrMnFeCoNi possesses an exceptional fracture toughness of more than 200 MPa m^{1/2} at cryogenic temperatures, making it an ideal material for low-temperature applications. As usual, HEAs are processed by powder metallurgy, conventional casting, etc.

The proposed method can be used in the additive manufacturing of high-entropy alloys using gas metal arc welding (GMAW) with metal powder-cored wires (MPCW) with high filling factors. The filling of the wire contains components in equal amounts relative to each other. The method of welding using this MPCW provides an additive high-entropy alloy with the desired characteristics. The proposed method is superior in a number of indicators to such alternative methods of obtaining bulk alloy as melting in vacuum or argon-plasma melting, firstly due to the predominance in the molten volume of the workpiece.

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА БІБЛІОТЕКА ІНСТИТУТУ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є.О. ПАТОНА — УНІКАЛЬНІ ФОНДИ ЗІ ЗВАРЮВАННЯ І СУМІЖНИХ ПРОЦЕСІВ

С.В. Іваненко

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Науково-технічна бібліотека Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України (далі — НТБ ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України) заснована у 1934 р. Основою формування книжкового фонду книгозбірні став науковий доробок засновника інституту Євгена Оскаровича Патона розміром у 400 праць.

За роки свого існування книгозбірня стала однією з найпотужніших у мережі бібліотек наукових установ НАН України з унікальним вузькоспеціалізованим фондом літератури зі зварювання і споріднених процесів. Ядро фонду наукової бібліотеки склали видання Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона та наукові праці його співробітників.

Станом на кінець 2023 р. фонд науково-технічної бібліотеки становить 276,7 тис. примірників (з них 96,3 тис. примірників літератури іноземними мовами). У фонді знаходиться понад 86 тис. книг, 134 тис. примірників періодичних видань, 405 мікрофільмів, 54,6 тис. примірників спеціальних видів літератури (дисертації, автореферати дисертацій, переклади публікацій із іноземних джерел, звіти про виконання науково-дослідних робіт установи, каталоги зарубіжних фірм, матеріали конференцій Міжнародного інституту зварювання) та 1,7 тис. документів з особистої колекції видань академіка Бориса Євгеновича Патона.

Комплектування періодикою у 2023 р. відбувається за рахунок дарів від читачів, спільнокоштом бібліотекарів, централізовано за міжнародним книгообміном через Національну бібліотеку України імені В. І. Вернадського (далі НБУВ) та надходжень від зарубіжних редакцій профільних журналів. Основними джерелами комплектування книжкового фонду є дари від авторів видань; співробітників інституту; керівного складу установи, отримані від співпраці з іншими вченими та організаціями; академічних видавництв «Академперіодика» і «Наукова думка» та Інституту енциклопедичних досліджень НАН України.

Важливою умовою існування сучасної наукової бібліотеки є затребуваність її інформаційно-аналітичної діяльності. До інформаційно-аналітичних продуктів НТБ ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України сьогодні відносяться: бібліографічні довідки; бібліографічні покажчики; науково-допоміжна бібліографія; інформаційні бюлетені; віртуальні виставки та буктрейлери.

Для інформування наукових відділів актуальними матеріалами зі зварювання і суміжних процесів НТБ ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України здійснюється випуск бібліографічного покажчика «Зварювання і споріднені технології», який змінив свою періодичність із 6-ти до 4-х у рік. Обсяг наповненості покажчика під час війни вдається утримувати за рахунок джерел відкритого доступу за тематикою видання. У 2023 р. зміст бібліографічного покажчика доповнено новим розділом «Публікації учених ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України у наукометричних базах даних», оскільки установа загалом і її науковці безпосередньо задають тренди розвитку галузі.

Важливе місце у бібліотечно-інформаційній діяльності НТБ ІЕЗ займає виставкова робота. Традиційні книжкові виставки експонуються в читальній залі. Через запроваджені карантинні обмеження у зв'язку із поширенням коронавірусної хвороби Covid-19 у 2020 р. бібліотека активізувала організацію електронних вітрин видань з метою розкриття і популяризації фонду за межами установи. У цьому ж році бібліотекарі почали створювати буктрейлери до цих виставок та публікувати їх на сторінці бібліотеки у соціальній мережі Facebook. Варто зауважити, що віртуальні виставки стали основним джерелом розкриття бібліотечних фондів з початку повномасштабної війни з лютого 2022 р.

Найважливішим продуктом науково-технічної бібліотеки є електронний каталог, робота над яким розпочалася у 1995 р. Станом на кінець 2023 р. каталог налічує понад 50 тис. записів на базі АБІС «ІРБІС-64». Слід зазначити, що нині робота з електронним каталогом спрямована не на поповнення новими записами, а на його систематизацію.

У діяльності сучасної академічної бібліотеки набуває актуальності проблема використання наукометричних показників для оцінювання результативності наукової роботи вченого. На сьогоднішній день бібліотека здійснює комплекс робіт з організації доступу до ресурсів Scopus та Web of Science, підтверджує адреси електронної пошти в домені інституту у Google Scholar, реєструє профілі на ресурсі «Бібліометрика української науки», адмініструє профілі вчених у розділі «книжкові видання» на корпоративному академічному порталі nas.gov.ua тощо.

НТБ ІЕЗ ім. Є.О. Патона виконує електронні замовлення користувачів на цифрові копії статей, замовлення по міжбібліотечному абонементу та індексує документи за міжнародною класифікацією УДК.

Працівники бібліотеки співпрацюють із редакційно-видавничим відділом установи та Інститутом бібліотекознавства НБУВ. Підготовлені публікації і виголошені доповіді й виступи пропагують роботу наукової установи загалом та науково-технічної бібліотеки зокрема.

З початком повномасштабної війни основним завданням бібліотеки як інформаційного центру стало документування воєнних подій та участі установи у допомозі військовим (інтерв'ю у ЗМІ, публічні виступи щодо напрямків науково-технічної допомоги інституту в умовах війни та повоєнному відновленні країни, організація заходів воєнної тематики). Із резервного фонду бібліотеки вилучаються видання для благодійної допомоги.

Тож, основним завданням НТБ ІЕЗ ім. Є.О. Патона наразі є забезпечення збереження фондів, документальне фіксування воєнної агресії Російської Федерації проти незалежної України, залучення до волонтерських ініціатив установи, пошуку власних шляхів допомоги державі та збереження всіх здобутків і напрацювань, які нам залишили попередні покоління бібліотекарів інституту.

ДІАГНОСТИКА ТА ВІДНОВЛЕННЯ ГАЛЬТЕЛЬНИХ ПЕРЕХОДІВ АГРЕГАТУ ПЛ15/3251-ГК-600 НА КИЇВСЬКІЙ ГЕС

Ю.М. Каховський, М.Ю. Каховський, В.А. Литвиненко, В.Ю. Глуховський

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

В Україні діють 5 з 6 гідроелектростанцій: каскад Київських ГЕС і ГАЕС, Канівська, Кременчуцька, Дніпродзержинська, Дніпровська, а також Дністровська ГЕС. Каховська ГЕС на весні 2023 року була підірвана державою терористом Російська Федерація.

Будівництво Київської ГЕС тривало з 1960 по 1968 рік. Особливістю станції є використання горизонтальних капсульних гідроагрегатів. У 1960–1968 роках було запущено агрегати № 1–20. Вперше в колишньому СРСР було використано низьконапірні горизонтальні капсульні гідроагрегати. На вересень 2021 року встановлена потужність Київської ГЕС складає 440 МВт. Київська ГЕС грає важливу роль у забезпеченні електроенергією столиці України та навколишніх областей, а також у регулюванні водного режиму на Дніпрі.

Перед початком ремонтних робіт були сформовані основні етапи інструментального обстеження пошкоджень колон статора турбіни гідроагрегату ст. № 6 типу ПЛ15/3251-ГК-600. Капілярний контроль гальтельних переходів виявив наявність тріщин, що дало можливість точно визначити місця ремонтних робіт та їх об'єм.

Технологія ремонту полягала у видаленні дефектних ділянок та формуванні кромок під зварювання, ремонтно-відновлювальному зварюванню з подальшим наплавленням та неруйнівному контролю відновлених ділянок.

Відновлення дефектних ділянок виконувалось методом ручного дугового зварювання покритими електродами марки FOX EV50 (тип E 4 2 5 42 H5). Зварювання виконувалось з попереднім підігрівом в зоні зварювання. Для зменшення залишкових напружень і деформацій забезпечувалось уповільнене охолодження наплавленого металу, а в окремих випадках, обробка простукуванням зварних швів безпосередньо після накладення кожного з шарів пневмоінструментом. Завершальним етапом зварювальних робіт було механічне видалення посилень швів і доведення їх до необхідних розмірів зазначених у кресленнях.

За регламентом робіт всі відремонтовані ділянки гальтельних переходів підлягали інструментальному обстеженню методами неруйнівного контролю, до яких входили візуально-вимірювальний, магнітний та ультразвуковий.

Візуально-вимірювальний контроль виконувався відповідними традиційними засобами контролю, згідно методики, яка наведена в стандарті ДСТУ EN 13927–2005. Також додатково випробували систему автоматизованого візуального контролю та її апаратуру, яка раніше була випробувана на зварних з'єднаннях повздовжніх головних балок мосту Патона через р. Дніпро в 2021 році.

За результатами візуально-вимірювального контролю всі відремонтовані ділянки не мали видимих дефектів, метал шву та навколо шовної зони.

За результатами УЗК інформативні сигнали, які б перевищували рівень приймання виявлені не були.

Завершальним етапом з оцінки якості ремонтних зварних швів був магніто-порошковий контроль із застосуванням розробленого відділом № 4 ІЕЗ магнітного дефектоскопу ТВА-5. За результатами магнітного контролю були виявлені неприпустимі лінійні індикації, наявність яких спонукало до повторного виконання процедур ремонтного зварювання відповідних ділянок та проведенню повторної оцінки.

За результатами кінцевого неруйнівного контролю відремонтованих ділянок гальтельних переходів колон статора турбіни гідроагрегату ст. № 6 типу ПЛ15/3251-ГК-600 дефекти, які не відповідали рівням приймання, виявлені не були.

Таким чином, оперативно проведений комплекс робіт з відновлення спрацьованих гальтельних переходів агрегату типу ПЛ15/3251-ГК-600 Київської ГЕС забезпечив вчасне введення в експлуатацію агрегату № 6, що дозволило відновити роботу гідроелектростанції в повному обсязі.

АВТОМАТИЧНЕ ЕЛЕКТРОДУГОВЕ ЗВАРЮВАННЯ РЕЙКОВИХ СТАЛЕЙ ПЛАВКИМ МУНДШТУКОМ У НАДВУЗЬКОМУ ЗАЗОРІ

Г.В. Кузьменко, І.О. Гончаров, В.М. Тагановський
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Запропоновано технологію зварювання сучасних високоміцних рейкових сталей. Для цього пропонується застосувати автоматичне ванне зварювання плавким струмопровідним плоским мундштуком спеціальної конструкції, через повздовжній канал в якому подається самозахисний порошковий дріт. Завдяки механізації процесу в 2–3 рази підвищується продуктивність робіт, підвищуються якісні показники зварних з'єднань. При цьому зберігається висока мобільність процесу і універсальність обладнання. Зварювання виконується плавким мундштуком, який може бути нерухомим або виконувати зворотно-поступальні переміщення різної амплітуди. Це дозволяє забезпечити повний провар зварюваних крайків по всьому перетину рейки. Зварювання підшви виконується на підкладці багатопрохідним зварюванням, після чого спеціальним рычажковим механізмом без перерви процесу здійснюється притискнення мідних башмаків, які забезпечують формування бокових поверхонь шва при зварюванні шийки і головки рейок.

Застосування такого процесу зварювання дозволяє зменшити зазор між краями зварюваних рейок до 10–15 мм. При цьому зменшується кількість розплавленого металу і, відповідно, теплокладення в зварне з'єднання. Автоматизація процесу зварювання дозволяє не тільки виключити дефекти, спричинені можливою низькою кваліфікацією зварника. За рахунок оптимального вибору режимів

зварювання термічний цикл зварювання регулюється таким чином, щоб попередити перегрів металу на околошовній ділянці зони термічного впливу і запобігти утворення холодних тріщин в зварному з'єднанні. Створено макет дослідного устаткування для механізованого електродугового зварювання залізничних рейок ванним способом плавким мундштуком. Завдяки оптимізації шлакової основи порошкових дротів значно покращені їх зварювально-технологічні властивості та знижено рівень дифузійного водню в металі шва нижче $5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$. При дослідженні макро та мікрошліфів, вирізаних зі стиків, зварених із зазорами 12 та 15 мм, тріщин та інших дефектів не виявлено. Твердість металу шва та ЗТВ не перевищує 41 HRC. Швидкість охолодження металу ЗТВ в інтервалі температур 600–500 °C лежить в межах 2,4–4,5 К/с, що забезпечує відсутність мартенситу та холодних тріщин. Зварні шви стиків рейок Р65 із сталі К76Ф за ДСТУ 4344, виконані дослідними дротами, завдяки ідентичному легуванню майже не відрізняються за хімічним складом та механічними властивостями від виконаних стандартним дротом ($\sigma_{\text{в}}$ — 861 та 853 МПа відповідно). При цьому помітне покращення ударної в'язкості (KCU^{+20} — 67 і 56 Дж/см² відповідно). За рахунок зниження вмісту газоутворюючих компонентів знижено розбризкування металу при зварюванні дослідними дротами.

ЕЛЕКТРОШЛАКОВЕ НАПЛАВЛЕННЯ АЛМАЗОВМІСНОЮ ШИХТОЮ, ОТРИМАНОЮ З ВІДХОДІВ ВІЙСЬКОВОГО ВИРОБНИЦТВА

Ю.М. Кусков¹, А.В. Захаров², І.М. Рибалко², В.А. Жданов¹

¹Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

²Державний біотехнологічний університет, Харків

Модифікування є прогресивним способом підвищення механічних експлуатаційних властивостей сталей і сплавів. Запропоновано технологію електрошлакового наплавлення порошковими дротами, до складу шихти яких введено немагнітну дрібнофракційну порошкову суміш.

Суміш отримують шляхом спеціальної багаторазової детонаційної обробки з вичерпаним терміном зберігання боєприпасів бронебійних і сигнальних набоїв з наявністю в ній дисперсної алмазної фракції та модифікуючих добавок Al, Mg, Ti, та ін. Для детонації використовуються бронебійні набої головним чином 12,7 мм — 99 % і 15 мм сигнальні — до 1 %, що дають змогу забезпечити формування алмазної фракції стабільної якості та її збереження в умовах наплавлення. Наплавлення виконували за допомогою апарата А-550 у струмопідвідному кристалізаторі Ø 65...85 мм.

Подачу в шлакову ванну, що перебуває завдяки струмопідвідній секції кристалізатора в розплавленому стані, неструмопровідних наплавочних присадних дротів Ø 2,8...3,6 мм здійснювали за допомогою механізму подачі зварювального напівавтомата ПШ — 107 В. Для направлення кінця дроту в найбільш нагріту зону шлакової ванни (біля стінки секції) на кінці мундштука була встановлена напрямна втулка. Максимальна швидкість подачі дротів обмежувалася моментом торкання їх торців наплавленого металу (за мінімальної глибини металеві ванни).

У результаті стабільного протікання процесу наплавлення, формувалися якісні наплавочні шари. Наразі проводяться металографічні дослідження наплавленого металу.

ПОКРАЩЕННЯ КОРОЗІЙНОЇ ТРИВКОСТІ АДИТИВНО ВИГОТОВЛЕНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВУ Ti6Al4V

С.М. Лаврись, І.М. Погрелюк, М.-О.М. Даниляк

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів

Аддитивні технології є прогресивним та економічно випроданим методом виготовлення титанових деталей складної форми. У роботі досліджено вплив термічного та хіміко-термічного оброблення на еволюцію мікроструктури та корозійну стійкість адитивно виготовленого сплаву Ti6Al4V у 20 % розчині хлоридної кислоти шляхом порівняння із традиційно виготовленим (деформованим). Зразки виготовляли методом селективного лазерного плавлення, яке проводили на підприємстві 3D Metal Tech (Україна). Стійкість до корозії досліджу-

вали за допомогою електрохімічного та гравіметричного методу відповідно до стандарту ASTM G 31-72. Результати корозійних випробувань показали, що антикорозійні властивості адитивно виготовленого сплаву були гіршими, ніж деформованого, що пояснювали формуванням типової для даного методу виготовлення нерівноважної мартенситної структури та залишкових напружень у сплаві. Результати мікроструктури показали, що наступне термічне оброблення дозволяє зменшити вміст нерівноважної мартенситної фази та залишкових напружень, що призводить до покращення корозійної тривкості сплаву. Щодо хіміко-термічного оброблення (азотування), то останнє істотно (на порядок) покращує корозійну тривкість титану за рахунок формування хімічно інертного нітридного шару на поверхні адитивно виготовленого сплаву. Підсумовуючи, можна зробити висновок, що застосовуючи додаткові оброблення можна забезпечити корозійну тривкість адитивно виготовленого сплаву до рівня з деформованим (у випадку з термічним обробленням), або істотно її підвищити (у випадку з хіміко-термічним обробленням).

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДРУКУ ВИРОБІВ З ПОРОШКІВ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ TA15 ЗА АДИТИВНОЮ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ

В.А. Матвійчук, В.М. Нестеренков, С.В. Ахонін, В.В. Пашинський
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Інноваційні технології пошарового виготовлення виробів методом швидкого прототипування відкривають нові можливості для виробництва деталей заданої форми з прогнозованими властивостями.

Своєчасним є створення адитивних технологій вирощування виробів методом електронно-променевого наплавлення. Актуальним є розробка обладнання та технологій для реалізації адитивного виробництва, орієнтованих на впровадження на підприємствах авіакосмічної промисловості і турбінобудування, та для потреб біомедицини галузі.

Фахівцями Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона проведені дослідження з розробки технологій та обладнання для адитивного виробництва металевих деталей. Створений макет адитивного устаткування.

Значний інтерес для авіакосмічної галузі має титановий сплав TA15 системи Ti-6,5Al-2Zr-1Mo-1V, якому притаманні високі механічні характеристики, зносо- і корозійна стійкість. Актуальними слід вважати дослідження подальшого удосконалення властивостей виробів із сплаву TA15 шляхом пошуку оптимальних технологічних режимів їх друку. Визначення технологічних параметрів наплавлення є необхідною складовою отримання виробів з потрібними властивостями. При цьому важливим є отримання якісних виробів з точки зору забезпечення бездефектної структури при відсутності несплавлень, пор, включень, тощо, у тому числі формування поверхонь з однорідним рельєфом.

Метою досліджень є визначення оптимальних режимів наплавлення з порошків титанового сплаву TA15 на основі виявлення впливу параметрів друку на мікроструктуру виробів та формування поверхонь.

Для досягнення мети поставлені завдання:

- отримати дослідні зразки з різними технологічними параметрами друку;
- дослідити їх мікроструктуру та хімічний склад.
- визначити вплив параметрів друку на властивості виробів;
- винайти оптимальні параметри друку;
- виготовити експериментальні зразки для подальших випробувань.

Дослідження включало в себе вивчення п'яти різних рівнів густини енергії електронного променя та п'яти різних значеннях відстані між проходами променя при фіксованій швидкості його переміщення.

Зразки для дослідження мали прямокутну форму розміром 24×24 мм та висотою 10 мм, з якої 5 мм становить висота технологічних опор та 5 мм висота тіла виробу. Кількість надрукованих зразків — 25 од. Для кожного зразка розраховані технологічні параметри. Густина енергії змінювали від 20 до 70 Дж/мм³. Промінь переміщували за «змійчастою» траєкторією із швидкістю 500 мм/с. Відстань між проходами променя змінювали від 0,1 до 0,25 мм. Товщина шару порошку становила 0,1 мм.

Проведено дослідження впливу технологічних параметрів на формування поверхні та мікроструктури виробів, досліджено хімічний склад зразків. Знайдено оптимальні параметри друку.

Встановлено, що за хімічним складом вироби відповідають сплаву TA15.

Дослідженнями мікроструктури зразків № 9, 13, 16, 17, 22, 24 встановлено:

1. Метал усіх зразків має щільну литу структуру, яка сформувалась у наслідок повного переплавлення часток порошку, тобто процес 3D друку при усіх режимах іде як процес наплавлення, а не спікання. Будь які сліди первинних часток та пористість, пов'язана з ними, у основному металі відсутні. Пори, які спостерігаються у зразку № 9, мають вторинний характер та пов'язані з процесами усадки.

2. Найбільш дисперсна дендритна структура та найменший розмір голчастих кристалів α -фази спостерігається у зразку № 13. До умовної групи зразків з дисперсною структурою можна віднести також зразки № 15, 17. Зразки № 22, 24 мають значно більший розмір дендритів та більший розмір кристалів α -фази. Зразки № 9 та 16 мають суперечливі характеристики дендритної структури та розмір кристалів.

Визначено, що режим друку зразка № 13 (густина енергії 40 Дж/мм³, швидкість променя 500 мм/с, зміщення траєкторії 0,2 мм) є оптимальним.

За цим режимом для подальших механічних випробувань надруковані зразки розміром 12×12 мм, довжиною 62 мм в кількості 18 шт.

В цілому використання результатів досліджень дозволить розширити застосування адитивних технологій в авіакосмічній промисловості України, здійснити перехід адитивного виробництва на вищий технологічний рівень.

АНАЛІТИЧНА ОЦІНКА ВПЛИВУ ВМІСТУ НАПОВНЮВАЧА НА В'ЯЗКІСТЬ СУСПЕНЗІЇ ДЛЯ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО 3D ДРУКУ МЕТАЛОКЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

О.О. Матвійчук

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАНУ, Київ

3D друк забезпечує швидке прототипування виробів з термопластичних матеріалів по комп'ютерним 3D моделям. Причому такі прототипи можна друкувати не тільки з пластику, а й з металів, кераміки чи метало-кераміки, для цього необхідно лише здійснити наповнення термопласту відповідними частинками з певним розміром у певній кількості та здійснити пошарове нанесення розплаву наповненого термопласту у певній послідовності. Прототип або модель надрукована таким способом піддається процесу відгонки (видаленню) термопласта шляхом термодеструкції або розчинення в розчиннику, а залишковий каркас з частинок наповнювача термообробці, тобто спіканню при заданій температурі. Для металокерамічних наповнювачів, які використовуються для виготовлення зносостійких композитів найбільш придатним методом термопластичного 3D друку є FDM/FFF друк, який дозволяє формувати виріб складної форми з внутрішніми каналами. В даному методі робочим матеріалом є філамент, тобто гнучкий дріт. Філамент повинен мати невисоку в'язкість в розплавленому стані, щоб забезпечити видавлювання розплаву із сопла екструдера 3D принтера тиском нерозплавленої частини філаменту, як поршнем.

Металокерамічні порошки для наповнення термопластів мають розміри від субмікронних до десятка мікронів, а тому знання, як буде змінюватися в'язкість розплаву філаменту від ступеня наповнення та розмірів таких порошоків є важливим з технологічної та наукової точок зору.

В нашій роботі виконано аналітичне дослідження впливу вмісту, розмірів і форми частинок наповнювача на зміну в'язкості термопластичного матеріалу для 3D друку. В якості модельного стану композитного розплаву нами прийнята найбільш проста модель, в якій кубічні та сферичні частинки наповнювача розташовані в середині кубів, а рідке зв'язуюче заповнює всі прошарки між ними. Основними параметрами при аналітичній оцінці були: товщина прошарку, розмір частинки наповнювача та його доля, в'язкість термопласту.

В результаті встановлено, що значний вплив відіграє не тільки вихідна в'язкість термопласту, а форма та розміри наповнювача. При використанні частинок сферичної форми, діаметр яких не перевищує 10 мкм, можна досягнути об'ємної долі наповнення не більше 0,525, що забезпечує товщину прошарків термопластичного зв'язуючого 1 мкм. На практиці достатньо забезпечити об'ємну долю 0,5. Для досягнення об'ємної

долі більше 0,525 необхідно забезпечити більш компактну упаковку сферичних частинок ніж проста кубічна, але при цьому знижується рухливість та взаємне переміщення частинок, що призводить до стрімкого збільшення в'язкості. Для того, щоб в'язкість композитного розплаву не перевищила 15 %, а товщина прошарків зв'язуючого була достатньою для взаємного переміщення частинок в розплаві одна відносно одної необхідно використовувати порошок наповнювача з розмірами частинок 40–50 мкм. Тобто чим більша в'язкість вихідного розплаву тим більші розміри частинок наповнювача необхідно використовувати.

Для металокерамічних порошків у 3D друці методом FDM/FFF перспективним та актуальним є використання їх мікрогранул в діапазоні розмірів 30–60 мкм, тому що вони складаються з субмікронних частинок, які знаходяться в активованому. Використання таких мікрогранул забезпечить збільшення долі наповнення, активне спікання та отримання виробів з точною геометрією в компактному стані.

АНАЛІЗ УМОВ ОБРОБКИ ТА СИНТЕЗ РЕКОМЕНДАЦІЙ ПО ЗАСТОСУВАННЮ ПІДТРИМОК В АДИТИВНОМУ МАЛОСЕРІЙНОМУ ТА ШТУЧНОМУ ВИРОБНИЦТВІ ДЕТАЛЕЙ З ІНКОНЕЛЮ

В.В. Несін

*Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України, Київ*

Малосерійне виробництво характеризується застосуванням універсального обладнання та технологій. Лазерне обладнання для 3D технологій, як правило, є основою ділянки адитивного виробництва. Інше механо-обробне обладнання використовується на подальших етапах технологічного маршруту. Деталі, що продукуються на такій ділянці, здебільшого складні за геометрією та формою. Обов'язковим елементом сформованої конструкції виступають підтримки, які видаляються на подальших етапах технологічного маршруту обробки. Широко залучаються для цього можливості слюсарної обробки.

Матеріал інконель в адитивному виробництві застосовується у вигляді мікрофракційного рівномірного за розмірами сферичного порошку. Після лазерного спікання деталі обробляються, а підтримки видаляються.

Інконель, як сплав нікеля і хрому, є жароміцним матеріалом здатним до зварювання, але в'язким для механічної обробки.

Густина підтримок в моделі та їх розташування всановлюється програмними засобами. Менша кількість підтримок надає можливість скоротити термін виконання слюсарних операцій.

Отже, рекомендацією для малосерійного та, особливо, штучного адитивного виробництва при виготовленні деталей з інконелю можна вважати обмеження кількості підтримок в електронній моделі деталі. Таке рішення не лише спростить та прискорить слюсарну обробку. Воно зменшить знос ріжучих інструментів, які застосовуються в технологічному маршруті.

ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИЙ 3D ДРУК СФЕРИЧНИМИ ПОРОШКАМИ З НИЗЬКОМОДУЛЬНОГО БІОІНЕРТНОГО СПЛАВУ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ МЕТАЛІВ ЦИРКОНІЙ–ТИТАН–НІОБІЙ

О.В. Овчинников¹, В.А. Матвійчук², В.С. Єфанов³, М.В. Хазнаферов⁴, Т.О. Коваленко⁵

¹*АТ «Інститут титану», Запоріжжя*

²*Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, Київ*

³*Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпро*

⁴*ТОВ «НВО «ГЛОБАЛ ІНЖИНІРІНГ», Запоріжжя*

⁵*АТ «Мотор Січ», Запоріжжя*

Найбільші переваги адитивні технології мають при друці складними сплавами на основі хімічно активних металів титану, нікелю, цирконію, які потребують застосування захисної атмосфери. Так, для виробництва

складних індивідуалізованих імплантатів із титанових сплавів використовують лазерні 3D принтери із захисним середовищем інертних газів.

Недоліком цієї технології є низька продуктивність та неможливість застосування вакуумного середовища, яке надає більший захист при плавлі хімічно активних металів. Технологічні обмеження лазерного 3D друку такі як, низька швидкість 3D друку, невисока температура та наявність газів в зоні друку суттєво ускладнюють впровадження у виробництво нових медичних низькомодульних сплавів, які мають переваги над традиційними титановими сплавами.

Одним з таких сплавів є сплав на основі системи біоінертних металів цирконій–титан–ніобій, який має високофункціональні властивості, а саме, модуль пружності у декілька разів нижче ніж у титану та наближений до модуля пружності людської кістки. Рівень механічних властивостей цього сплаву може досягати титанового сплаву Grade 5 в залежності від стану мікроструктури.

Формування оптимального типу мікроструктури можливо при оптимізації режимів друку, які включають погонну енергію, температуру розплавленого металу в зоні плавлення і температуру нагріву виробів в зоні друку.

Для досягнення переваг 3D друку при використанні перспективних матеріалів з низьким модулем пружності, висунута наукова гіпотеза: використання високопродуктивних електронно-променевих 3D принтерів з можливістю друку в вакуумі та широким діапазоном температур підігріву області друку.

Головна мета дослідження — визначення оптимальних режимів друку з експериментального низькомодульного сплаву системи біоінертних металів цирконій–титан–ніобій для забезпечення максимального рівня механічних та функціональних властивостей виготовленого (сплавленого) виробу.

Дослідження проводилися за допомогою високопродуктивного електронно-променевого 3D принтера, який дозволив реалізувати високоточний та ефективний процес друку. Критерієм оптимізації була максимізація швидкості друку Speed 1000 mm/s, погонна енергія Energy 50 J/mm³, потужність Power 1000 W. Дослідження включало в себе вивчення п'яти різних швидкостей та п'яти рівнів погонної енергії.

Попередні дослідження встановили закономірності впливу морфології та розміру структурних складових сплаву на рівень механічних властивостей. Так для прутків з рівновісною структурою та розміром зерен від 30 мкм до 50 мкм, рівень механічних властивостей $\sigma_b = 700 \dots 820$ МПа, $\delta = 30 \dots 36$ %, $E = 37 \dots 40$ ГПа.

Отже, були визначені режими 3D друку, які забезпечують формування рівновісного типу мікроструктури з мінімальним розміром зерна.

Зразки для дослідження мали прямокутну форму розміром 24×24 мм та висотою 10 мм, з якої 5 мм становить висота технологічних опор та 5 мм висота тіла виробу. Кількість надрукованих зразків — 25 одиниць. Для кожного зразка розраховані технологічні параметри.

Проведено дослідження впливу технологічних параметрів на формування поверхні та мікроструктури виробів, досліджено хімічний склад зразків. Знайдено оптимальні технологічні параметри друку.

Аналіз отриманих результатів дослідження дозволив встановити оптимальні режими, які забезпечили максимальну погонну енергію, формування якісної поверхні та забезпечили бездефектну, рівновісну мікроструктуру зразків. Тип і розмір структур близький до мікроструктур деформованих прутків із необхідним рівнем механічних властивостей.

Застосування високопродуктивних електронно-променевих 3D принтерів із можливістю регулювання температур зони друку та контрольованого середовища друку — вакууму, відкриває нові перспективи для створення продуктів із низькомодульних сплавів на основі системи металів цирконій–титан–ніобій з вищими функціональними властивостями.

РОЗРОБКА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ БАГАТОШАРОВОЇ НАПЛАВКИ 3D ПРИ ВИКОНАННІ РЕМОНТНО-ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ РОБІТ В УМОВАХ КОСМІЧНОГО ВАКУУМУ

**Н.В. Піскун, Є.Г. Терновий, В.А. Крюков, С.О. Глушак,
І.І. Статкевич, В.Ф. Шулим, В.О. Загорко**
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

При будівництві та експлуатації постійно діючих споруд і обладнання на поверхні Місяця необхідно створювати житлові, робочі та допоміжні приміщення, оболонкові конструкції, трубопроводи, а також проводити ремонтно-відновлювальні роботи. Ця актуальність вимагає створення адаптованого до космічних умов обладнання для виконання робіт по 3D принтіngu. В умовах середовища на поверхні Місяця, як звісно, пріоритетними можуть бути електронно-променеві технологічні процеси.

На сьогоднішній день метод шарової наплавки матеріалів, що розплавляються і формуються електронним променем (Electron Beam Direct Manufacturing або EBDM, «Пряме виробництво електронно-променевим пучком») є найдосконалішим серед інших технологій 3D друку. Цей метод спочатку зародився в аерокосмічній галузі і вже завоював цивільні сфери.

EBDM– метод адитивного виробництва, схожий із селективним лазерним спіканням (розплавленням) (SLS), який замість лазерного використовує високоенергетичний електронний промінь.

Переваги методу EBDM перед лазерним спіканням (розплавленням):

- електронно-променева багатошарова наплавка для електромагнітних компонентів використовує дешеві матеріали;
- при необхідності електронний промінь може сканувати, що дозволяє нагрівати вихідний матеріал без додаткових елементів, які характерні для лазерного обладнання;
- відсутність складних механічних компонентів дозволяє досягти високої швидкості переміщення пучка, що разом із підвищенням його енергії дозволяє отримати більш високу якість і продуктивність;
- використанню електронно-променевих технологій в космічних умовах сприяє глибокий вакуум, який є природним середовищем.

Недоліком конструкцій електронно-променевих гармат попереднього покоління, які вже були випробувані у космосі, є те, що термін їх роботи не більше 7 хв з-за відсутності охолодження катодного блоку. Ці фактори мають негативний вплив на роботу гармати в довготривалому режимі, при виконанні процесу з 3D принтіngu.

Метою цієї роботи є створення гармати для виконання технологічного процесу 3D-принтіngu з довготривалим терміном роботи і скануванням електронного пучка. У відділі 35 ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблена малогабаритна електронно-променевої гармата з потужністю електронного променя до 2,5 кВт. Для можливості виконання експериментів з 3D принтіngu гармата оснащена фокусуною та відхиляючою системами.

Розроблений також ескізний проект механізму подачі присадного матеріалу в робочу зону, якій призначений для роботи спільно з електронно-променевою гарматою при проведенні технологічних процесів по 3D принтіngu в лабораторних умовах.

Гармата має комбіновану систему охолодження катодного блоку. При цьому ресурс роботи гармати — не менше 60 %, а термін роботи — не менше, ніж 1 рік, що дуже важливо для виконання процесів 3D принтіngu та при проведенні монтажних і ремонтно-відновлювальних робіт на поверхні Місяця.

Обладнання нового покоління дасть можливість створити принциповий технологічний процес електронно-променевого 3D наплавки, що дозволить поетапно формувати вироби з алюмінієвих, титанових та інтерметалідних сплавів шляхом додавання матеріалу за заданою програмою з метою відновлення геометрії пошкоджених корпусів конструкцій, споруд та інших об'єктів в космічних умовах.

МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ПРОЦЕСУ ІНЖЕКЦІЙНОГО ФОРМУВАННЯ ЯК АДИТИВНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ СУЧАСНОЇ ПОРОШКОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ

Т.О. Псярнецька, М.О. Цисар

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАНУ, Київ

Інжекційне формування – це один з методів сучасної адитивної технології в порошковій металургії. Особливістю цього методу є формування напівфабрикату, що на відміну від більш класичних методів: холодного та гарячого пресування зводиться до заповнення ливарної форми ньютонівською рідиною. Ця рідина представляє собою суміш розплавленого воску з частками металокераміки.

Процес заповнення форми, підбір температурних режимів, складу суміші та інших технологічних параметрів є нетривіальною задачею, що фактично не можливо дослідити експериментально. Саме тому для процесу інжекційного формування широко застосовуються методи комп'ютерного моделювання.

Так при проектуванні ливарної форми використовується спеціалізований пакет програм. Основною задачею такого проектування є зменшення кількості дефектів напівфабрикату, а саме: порожнин, неслитин, ліній спаю. На це суттєво буде впливати напрямок та кількість точок інжектування. Саме цю задачу і дозволяє розв'язати програмне забезпечення.

Другою не менш важливою задачею, що потребує розв'язку є температурна задача. Програмне забезпечення для вирішення цієї задачі, розроблене в ІНМ НАНУ, дозволяє визначити етапи, зміни та повний час остигання ливарної форми, за рахунок чого також виконують оптимізацію геометрії такої форми та ряду технологічних параметрів, які раніше підбирались виключно дослідним шляхом.

Однак процес моделювання є ідеалізованим і потребує повсякчасного вдосконалення, що враховують нові експериментальні результати досліджень. Тому в ІНМ НАНУ було розроблено методики для комбінованих досліджень, результати яких будуть в подальшому інтегровано в модельне представлення.

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОНАННЯ РІЗЬБОВИХ З'ЄДНАНЬ В ДЕТАЛЯХ, ВИГОТОВЛЕНИХ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

О.М. Рощенко

*Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України, Київ*

Виготовлення пластикових деталей за допомогою 3D принтерів є процесом, що реалізувався. На ринку достатньо представлени обладнання та матеріали. Представлений філамент для звичайного та високошвидкісного друку, що дозволяє вибирати матеріали, залежно від умов виробництва, зокрема: 1) малосерійне та поштучне; 2) серійне та 3) крупносерійне виробництво.

Подальша обробка заготовок деталей, виконаних за допомогою 3D принтерів, така, як різання, фрезерування, нарізання різьби, виконується аналогічно до обробки пластикових деталей виготовлених за допомогою процесів лиття. Але певні незначні відмінності в поведінці матеріалів, що обробляються, присуті.

Звартають на себе увагу процеси нарізання різьби в пластиках. У зразках, виконаних з аналогічних матеріалів, відмінність яких полягала лише в кольорі, була виявлена різна здатність до збереження різьби після першого закручування відповідних деталей. Вираженою ця проблема є в деталях з чорним кольоровим наповнювачем. Після циклу закручування та викручування парної деталі спостерігається руйнування різьби. Деталі сформовані 3D друком білого та сірого пластику виявилися більш стійкими до руйнування.

Вплив на крихкість пластику, надрукованого 3D друком, компонентів кольорових наповнювачів є актуальною проблемою, яка підлягає розв'язанню.

ОТРИМАННЯ ОСЕРДЯ МЕТАЛОПОРОШКОВИХ ДРОТІВ НА ОСНОВІ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ ЇХ В ЯКОСТІ ПРИСАДНОГО МАТЕРІАЛУ ПРИ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Р.В. Селін¹, С.Л. Шваб¹, М.М. Ворон², Т.Б. Янко³, О.А. Дорогой⁴

¹*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

²*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ*

³*АТ «Інститут титану», Запоріжжя*

⁴*Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ*

Аддитивне виробництво деталей із титанових сплавів — це процес створення деталей або компонентів з використанням титанових сплавів за допомогою технологій аддитивного виробництва, таких як 3D друкування. Серед усіх методів аддитивного виробництва деталей, метод WAAM є широко використовуваним в аддитивному виробництві для створення деталей з титанових сплавів. Застосування металопорошкових дротів при отриманні деталей методом WAAM дозволяє виробляти деталі з високоміцних титанових сплавів та значно збільшити номенклатуру титанових сплавів, які можна використовувати для отримання деталей цим методом. Одним із важливих і складних технологічних процесів при виробництві металопорошкових дротів є підготовка їх осердя — металевої складової, тобто самого порошку. В даній роботі будуть показані методи та особливості отримання осердя металопорошкового дроту на основі титанових сплавів для застосування їх в якості присадного матеріалу при WAAM, а саме метод гідрування-дегідрування (HDH –Hydrogenation-DeHydrogenation) та плазмового розпилення заготовки PREP (Plasma Rotating Electrode Process).

РОЗРАХУНОК НДС ТА УСАДКИ ТРУБЧАСТИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИ НАПЛАВЛЕННІ ЗОВНІШНЬОЇ ПОВЕРХНІ

І.К. Сенченков¹, І.А. Рябцев², О.П. Червінко¹, А.А. Бабінець²

¹*Інститут механіки ім. С.П.Тимошенка НАН України, Київ*

²*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

Викладено постановку задачі, математичні методи розв'язання та результати розрахунків напружено-деформованого і мікроструктурного стану, а також дисторсії циліндричних елементів при наплавленні зовнішньої поверхні.

Задача формується в квазістатичній постановці на основі підходу, який базується на теорії тіл, що ростуть.

Механіка поведінки основного і наплавленого металів описується уніфікованою моделлю течії Боднера–Партома при ізотропному зміцненні. Концентрація фаз розпаду аустеніту при охолодженні розраховується з використанням термокінетичних діаграм. Враховується залежність фізико-механічних характеристик від температури і фазового складу матеріалу.

Задача розв'язується методом покрокового інтегрування рівняння теплопровідності і рівняння течії за часом за допомогою неявної схеми. Нелінійна задача на кожному часовому кроці розв'язується методом ітерацій. Лінеаризована задача на кожній ітерації розв'язується методом скінченних елементів.

Як приклад розглянуто тонкостінний циліндричний елемент із сталі 35ХМ в осях Orz внутрішнім і зовнішнім діаметрами 50 мм і 60 мм, довжиною 250 мм. На зовнішню поверхню на ділянці 100 мм наплавляється шар сталі 35ХМ товщиною 2,7 мм.

Наводяться розподіли залишкових напружень, повних і пластичних деформацій, розподіли фаз розпаду аустеніту по об'єму основного і наплавленого металу. Показано розподіли радіальних переміщень на поверхнях циліндра, які характеризують радіальну осадку елементу. Надана оцінка крайового ефекту. Сформульовано рекомендації щодо вирівнювання осадки по довжині елементу.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ПІД ЧАС ГАРЯЧОГО ТА ХОЛОДНОГО ІЗОСТАТИЧНОГО ПРЕСУВАННЯ

Ю.Б. Скирта, Д.В. Велигоцький, С.О. Мамілов, О.І. Товстолиткін

Інститут магнетизму НАН України та МОН України, Київ

Аддитивне виробництво (АВ) — це загальний термін для різних виробничих процесів, у яких компоненти створюються шар за шаром. Деталі різної форми можна виготовити безпосередньо з даних 3D систем і не вимагають подальшого формування чи планування процесу. Щоб покращити статичні та динамічні механічні властивості деталей, вироблених за допомогою технологій АВ, все більше використовується для цього гаряче ізостатичне пресування (ГІП) [Atkinson H.V., 2000]. ГІП використовується для основного формування, дифузійного зварювання, ущільнення та традиційного спікання. Високий тиск і температура призводять до дифузії і пластичної деформації. Основними параметрами є температура, тиск і час.

В інституті магнетизму НАН України та МОН України діє наукове обладнання «Лабораторний комплекс (ЛК) дослідних установок для проведення експериментів в умовах високих газо- та гідростатичних тисків та температур для досліджень» (<https://sites.google.com/view/kyiv-hip/main>), яке в 2022 році отримало статус національного надбання. За допомогою даного обладнання виконуються дослідження впливу гарячого та холодного ізостатичного пресування на зразки матеріалів в діапазоні тисків від 0 до 200 КПа та температур від 20 до 850 °С. Габаритні розміри зразків, які можуть досліджуватись: діаметр — 6÷12 мм, а довжина — 150 мм. ЛК має шість каналів для одночасного проведення 6 експериментів.

В рамках програми модернізації ЛК було розроблено комп'ютерно-автоматизовану систему (КАС) контролю режимів температур. КАС складається з персонального комп'ютера (ПК), датчиків температури, АЦП та програмного забезпечення (ПЗ). Датчики температури розміщуються в зоні зразка під час експерименту. Сигнал з датчика температури надходить через АЦП до ПК, де за допомогою ПЗ здійснюється керування режимами вимірювання, обробка та збереження значень температури.

Розроблена комп'ютерно-автоматизована система дозволяє в режимі реального часу отримувати та зберігати дані про вимірювання температури під час виконання досліджень впливу гідростатичного пресування.

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЛАЗЕРНОГО НАПЛАВЛЕННЯ НА ТОНКОСТІННУ ОСНОВУ

М.В. Соколовський, О.В. Сіора, В.І. Бондарєва, В.А. Курило, О.М. Сучек, Ю.В. Юрченко, Н.О. Шамсутдінова, А.В. Бернацький

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Тонкостінні деталі — категорія деталей, де величина товщини не перевищує 5,0 мм та є набагато меншою за інші розміри. Такі деталі широко використовуються в різних сферах промисловості, часто потребуючи нанесення на них певних конструктивних елементів, які можна отримати з допомогою багатьох технологій, включаючи лазерне наплавлення та технології адитивного виробництва. За результатами різнопланових робіт в цьому напрямку можна зазначити ряд особливостей при розробці технологічних процесів лазерного наплавлення елементів на тонкостінну основу. Через специфіку роботи з тонкостінними деталями існує необхідність у правильній постановці завдання та вибору планування виробничого процесу. Вибір схеми технологічного процесу лазерного наплавлення на тонкостінну основу залежить від: розміру нанесеного конструктивного елементу; робочих режимів; траєкторії сканування, тощо. При цьому необхідно підкреслити важливість вибору оптимальних параметрів наплавлення перших шарів порошкового матеріалу, оскільки саме вони напряму впливають на тонкостінну основу. В цьому плані можна відзначити необхідність вирішення задачі правильного закріплення та забезпечення достатнього охолодження деталі, оскільки це важливо не лише для рівномірного розподілу матеріалу, що наплавляється, але і для запобігання термічних деформацій тонкостінної деталі. Додатково необхідно зазначити, що перехідний шар у системі «основа-наплавлений елемент» повинен формуватися з мінімальним градієнтом за структурою та хімічним складом — це мінімізує ризик зниження експлуатаційних характеристик виробу.

РЕНТГЕНТЕЛЕВІЗІЙНИЙ КОНТРОЛЬ ТИТАНОВИХ СУГЛОБНИХ ІМПЛАНТАТІВ

В.О. Троїцький, С.Р. Михайлов, Р.О. Пастовенський, М.М. Карманов

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Нині цифрова радіографія є одним з найбільш поширених і перспективних методів радіаційного неруйнівного контролю якості матеріалів і виробів. У порівнянні з системами на основі проміжних носіїв інформації (плівкова радіографія, електрорадіографія, комп'ютерна радіографія) цифрова радіографія, разом з можливістю отримання зображень в реальному часу, дозволяє істотно підвищити продуктивність і понизити вартість контролю, дає можливість комп'ютерної обробки і аналізу цифрових зображень, створення електронних архівів цифрових зображень і т.д.

В доповіді представлені результати радіаційного контролю титанових суглобних імплантатів (ендопротезів) за допомогою двох цифрових рентгентелевізійних систем. Виготовлення таких ендопротезів є однією з важливих задач медичної техніки, які застосовуються в травматології, ортопедії та онкоортопедії у клінічних установах. Такі вироби виготовляються методом 3D друку заготовок з подальшою термічною обробкою. Це так звані адитивні технології. Для 3D друку заготовок ендопротезів використовується порошок з титанового сплаву. Друк здійснюється за допомогою 3D принтера, а термічна обробка проводиться в захисному шарі аргону.

Одна із рентгентелевізійних систем розроблена в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України на основі високочутливого ПЗЗ-сенсора Sony ICX-285AL розміром 2/3" з кількістю ефективних пікселів 1392×1040. У якості рентгенівського екрана в системі застосовується ефективний гадолінієвий екран $Gd_2O_2S(Tb)$ з товщиною люмінофорного шару 200 мкм та роздільною здатністю 5,5 пар лін./мм. Розмір робочого поля системи складає 160×120 мм, що дозволяє виконувати контроль окремого ендопротезу за одну експозицію.

Друга рентгентелевізійна система виконана на основі сенсору S10811-11 фірми Hamamatsu Photonics (Японія) з робочим полем 34×24 мм. Сенсор має матрицю 1700×1200 пікселів, розмір пікселя 20 мкм та просторову роздільну здатність 20 пар лін./мм. Керування детектором S10811-11 здійснюється від комп'ютера через порт USB 2.0 за допомогою контролера C9266-04, який перетворює аналоговий сигнал детектора в цифровий (АЦП - 12 біт) та формує сигнали керування детектором.

Для контролю застосовувався рентгенівський апарат РАП-150/300. Фокусна відстань при контролі становила 700 мм, анодна напруга рентгенівської трубки — 60÷70 кВ, анодний стум — 10 мА, а час експозиції — 5÷10 с.

На першому етапі контролю ендопротези просвічувалися рентгентелевізійною системою з розміром робочого поля 160×120 мм. Якщо на цьому етапі на отриманих рентгенівських зображеннях виявлялися проблемні ділянки з підозрою на наявність дефектів, то на другому етапі контролю ці ділянки контролювалися за допомогою сенсору з високою роздільною здатністю S10811-11, який є фактично рентгентелевізійним мікроскопом та дозволяє виявити малорозмірні дефекти.

Результати проведеного радіаційного контролю титанових суглобних імплантатів (ендопротезів) за допомогою двох цифрових рентгентелевізійних систем показали, що запропонована методика контролю є ефективною та може повністю замінити малопродуктивну та дорогу плівкову радіографію.

ОТРИМАННЯ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ ЗА ДОПОМОГОЮ РОБОТИЗОВАНОГО АДИТИВНОГО НАПЛАВЛЕННЯ

Є.В. Шаповалов, В.О. Коляда, А.М. Мангольд, А.С. Новодранов, Д.Д. Топчев

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Вступ. На сьогодні 3D технології все більше поширюються у різних сферах суспільного життя. У промисловості за допомогою машин для 3D друку, виготовляються деталі із різних металів та сплавів. Складність геометричної форми та розміри виготовленої деталі мають доволі широкі межі. Адитивне наплавлення в деяких випадках перехоплює ініціативу над традиційною технологією механічної обробки. Для більшості металевих деталей визначальним критерієм є механічні властивості. На механічні властивості сплавів при однаковому хімічному складі впливає структура, яка може бути дрібнокристалічною, крупнокристалічною, змішаною або монокристалічною. Одним з основних завдань при розробці адитивної технології є врахуван-

ня впливу параметрів процесу наплавлення на формування структури. Мета дослідження полягає у визначенні впливу технологій формоутворення на структуру та механічні властивості наплавленої деталі.

Матеріали та методи. У експериментах у якості металу для наплавлення було використано зварювальний дріт марки 09Г2С діаметром 1,2 мм. Даний тип сталі є низьколегованим зі зниженим вмістом вуглецю. Характерною особливістю цієї сталі є її феритно-перлітна структура. Використання даної марки сталі у різних виробках відповідальних конструкцій, таких як парове, нафтове та інше обладнання досягається завдяки високій термостійкості (діапазон $-70-450^{\circ}\text{C}$) та високим показникам механічних властивостей. Попередні дослідження показали, що використання сталі 09Г2С при відповідних зварювальних режимах дозволяє отримати деталь простої форми із дрібнозернистою структурою. Наплавлена деталь має більш складну форму.

Виготовлення деталі. Для автоматизації процесу наплавлення було використано антропоморфний зварювальний робот із 6-ма ступенями свободи. Застосування зварювального робота дозволяє досягти високої точності повторення траєкторії руху, тим самим точно відтворити габаритні розміри моделі, а також гнучке перепрограмування на модель іншого виробу. Наплавлення шарів виконувалось за допомогою електродугового зварювального джерела у суміші захисних газів $\text{Ar}+\text{CO}_2$. Кожен шар формувався із бокового валика який задавав межі деталі, а також заповнюючого валика, який за допомогою коливальних рухів заповнював проміжок між боковими. В процесі наплавлення наступних шарів попередні будуть піддаватися термоциклуванню, що може відобразитися на початковій структурі та механічних властивостях. Після процесу наплавлення було проведено дослідження мікро та макроструктури отриманих деталей. Дослідні зразки було нарізано вздовж і в поперек наплавлених шарів. Визначено величину зерна за допомогою методу оптичної макрографії при 100 кратному збільшенні. Результати було порівняно з еталонними зображенням шкали відповідно до стандарту ISO 643:2019.

Висновки. По результатах адитивного наплавлення досліджено структуру і механічні властивості виробу зі сталі 09Г2С. Визначено, що виріб має щільну різнозернисту структуру без пор і несплавлень, а розмір зерна знаходиться в рамках 6–9 балу. Проведено порівняльне дослідження механічних властивостей вздовж і впоперек наплавлених шарів. Результати показали, що показники практично не відрізняються, а порівняння отриманих значень із нормативними показало перевищення на 10–50 %. За результатами мікрографічного дослідження структури шліфа визначено, що структура феритно-перлітна. Феритна складова наближається до 99 %. Глибина проплавлення попереднього шару складає 0,1–0,3 мм.

SINGLE-CRYSTALLINITY OF LARGE-SIZED TUNGSTEN INGOTS OBTAINED BY 3D PLASMA-INDUCTION ADDITIVE TECHNOLOGY

V. Shapovalov, Yu. Nikitenko, V. Yakusha, J. Khokhlova, M. Khokhlov, O. Berdnikova

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NASU, Kyiv

The development of a plasma-induction additive technology for growing a most refractory metal — tungsten, with alternating layers of its atomic lattice similar to a single crystal, is a quite difficult technical task till now. However, the relevance of the obtained material is determined by the needs of the high-tech market, where the functional priority of monocrystalline materials is required, because compared to polycrystalline materials, they have a high efficiency, but the materials are similar in terms of service life.

Tungsten has the highest melting point of all metals ($T_m = 3.422^{\circ}\text{C}$), is one of the heaviest metals, and has the second hardness among pure metals after chromium. All outstanding properties of tungsten are due to its high density — $18-19\text{ g/cm}^3$, for comparison: iron — 7.87 g/cm^3 , titanium — 4.56 g/cm^3 . Tungsten has a large size and atomic weight: 3 times that of iron and 4 times that of titanium. So, the ordering of such atomic structure with symmetric parameters of the cubic crystal lattice ensures the tungsten's high density and properties.

Using 3D plasma-induction additive technology the large single-crystal tungsten ingots with a cross-section of up to 15 cm were obtained at speeds of 17–70 mm/min. The technology includes the initial stage — the primary formation of a monocrystalline base, which ensures repeatability in each subsequent layer during the additive process of plasma deposition.

A combination of analytical criteria and instrumental methods for assessing allows supplement interpretation of the data characterizing tungsten's single crystallinity. Thus, it is known that for tungsten the critical limit is the

misorientation angle of subdrains of 6–9°, because of which there is an abrupt transition from the state of plasticity to brittleness, i.e., an increase in misorientation to this level is the threshold for the transition of the material to the polycrystalline state. Also, the study by the Oliver & Pharr method «An Improved technique for determining the hardness (H) and elastic modulus (E) using load displacement sensing indentation experiments» allows us to study the volumetric homogeneity of physical-mechanical properties of the material.

The result of this research is the confirmation of the volumetric single-crystallinity of tungsten ingot layers formed at different speeds of the plasma-induction process using two assessment criteria:

- the misorientation angle of the sub-granular structure is less than 2° in ingots across sections using transmission electron microscopy;
- the volumetric repeatability of microhardness, Young's modulus, and indentation diagrams, during the test along and across of ingot's section.

Indentation test performed due to ISO/FDIS 14577-1:2015; Metallic materials — Instrumented indentation test for hardness and materials parameters — Part 1: Test method. The most homogeneous tungsten structure was obtained at 17–46 mm/min.

The structural properties of the ingot change slightly due to technical pauses and during the growth process at a higher rate.

ЩОДО ОЦІНКИ ЙМОВІРНОСТІ ТА ЗАПОБІГАННЯ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕХАНІЗМУ «DUCTILITY DIP CRACKING» В УМОВАХ БАГАТОШАРОВОГО ДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ*

**О.В. Яровицин, М.О. Черв'яков, І.Р. Волосатов, Г.Д. Хрущов,
В.А. Пестов, О.О. Наконечний, Л.В. Черв'якова**

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Схильність багатошарового наплавленого металу нікелевих сплавів до утворення гарячих тріщин за механізмом «ductility dip cracking» (класифікація за ISO 17641-1:2004) запропоновано оцінювати за критерієм критичної руйнівної деформації ϵ , визначеної шляхом випробувань зразків наплавленого металу у структурному стані «as built» (термінологія за ISO/ASTM 52900:2015(E)) на повздожній статичний розтяг в температурному діапазоні 20–1100 °С. Встановлено, що при послідовній заміні сплаву Inconel 625, ЭП367, ЭП648, Inconel 718, ЧС40, ЭИ698, ЖС6К в бік збільшення жароміцності величина його критичної руйнівної деформації ϵ змінюється з 20–45 % до 0,3–0,7 %. Показано, що ознаки початку формування ductility dip range в такому наплавленому металі починають спостерігатися при 800°С: для ЧС40, що містить 2,4–2,7 ваг. % Al, ϵ знижується до 4,2 %; для сплаву ЭИ698 ϵ вже знижується до ~0,5 %. При подальшому збільшенні рівня жароміцності, для наплавленого металу ЖС6К малопластичний стан з $\epsilon \leq 0,8$ % розширюється на весь досліджений інтервал температур 20–1100 °С. Таким чином величину критичної руйнівної деформації $\epsilon \leq 0,8$ % при окремих температурах або в певному їх діапазоні можна співвіднести з експериментально підтвердженою підвищеною схильністю багатошарового наплавленого металу ряду нікелевих сплавів, що зміцнені γ' -фазою у кількості більше 20–25 об. %, до утворення гарячих тріщин. Відповідно, з огляду на наявність/відсутність ознак ductility dip range у структурному стані «as built» можна оцінювати ступінь придатності сплавів на нікелевій основі до застосування у адитивних технологіях 3D наплавлення. Одним із напрямків їх застосування може бути відновлення багатошаровим дуговим наплавленням певної частки об'єму деталі, пошкодженого при експлуатації. В свою чергу, схильність до гарячих тріщин за аналогічним механізмом для нікелевого сплаву може проявлятися також і з боку основного металу. Додатково розроблено нову ресурсозберігаючу методику оцінки деформаційної здатності високотемпературної ділянки ЗТВ в основному металі нікелевого сплаву. Її апробація для основного металу нікелевих сплавів ЭИ698, ЭП742, ЖС6К при 800 та 1000 °С підтвердила схожі з попередньо розглянутим наплавленим металом закономірності формування ductility dip range. Зі збільшенням кількості γ' -фази у нікелевому сплаві величина критичної руйнівної деформації високотемпературної ділянки ЗТВ основного металу зменшується до рівня $\epsilon = 0,5$ –1,0 %.

*Пленарна доповідь.

Наведені результати досліджень, крім запропонованих нових підходів щодо оцінки ймовірності утворення гарячих тріщин за механізмом ductility dip cracking у адитивних технологіях 3D наплавлення, засвідчують необхідність розробки спеціальних технік багатопарового наплавлення для нікелевих жароміцних сплавів. На базі одного із нових наших підходів отримано патент України на спосіб мікроплазмового порошкового 3D наплавлення деталей з нікелевих жароміцних сплавів. Його практична апробація показала можливість відновлення без утворення тріщин ущільнюючих елементів об'ємом 10–20 см³ на блоках соплових лопаток з важкозварюваного нікелевого жароміцного сплаву ЖС6К із забезпеченням в залежності від обраних матеріалів границі міцності наплавленого металу в діапазоні 190–360 МПа при 1000 °С.

СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ІМПУЛЬСНІ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ДУГИ ДЛЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

А.М. Жерносков, І.Ю. Романова

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

У сучасних адитивних технологіях широке застосування в якості витратного матеріалу набули різні композиції порошків. Використання дротів і способів дугового зварювання є менш дослідженим. Це пояснюється, перш за все, достатньо великим розміром шару, що нарощується, значною зоною термічного впливу, розбризкуванням та іншими недоліками дугових процесів. Але використання дугових процесів у захисних газах плавким електродом при виготовленні великогабаритних виробів є цілком ефективним і перспективним напрямом розвитку адитивних технологій.

Імпульсно-дугове зварювання різних матеріалів плавким електродом у захисних газах широко використовується у машинобудуванні, хімічній, аерокосмічній, автомобільній, суднобудівній промисловості, трубопровідному транспорті (алюмінієві сплави, вуглецеві на нержавіючі сталі, сплави на основі міді, титану). Цей вид зварювання дозволяє суттєво зменшити розбризкування металу та підвищити механічні властивості зварних з'єднань. Тому використання та розвиток імпульсних процесів в адитивних технологіях є достатньо актуальним.

Основним об'єктом в імпульсно-дугових процесах є джерело живлення. На ринку зварювального устаткування, як правило, представлені джерела живлення імпульсної дуги, в яких синергетично реалізуються програми зварювання основних матеріалів. Використання дротів різних систем легування, у тому числі порошкових і самозахисних, вимагає суттєвого доопрацювання таких джерел живлення.

В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України були розроблені спеціалізовані джерела живлення для імпульсно-дугового зварювання з управлінням формою імпульсу, в яких реалізовано концепцію багаторівневого імпульсу струму, де розділені процеси плавлення та перенесення металу. Також розроблені різні види систем автоматичної стабілізації процесу імпульсно-дугового зварювання при дії виробничих збурень, у тому числі по вильоту електродного дроту. Такий підхід дозволяє зменшити випаровування металу краплі, збільшує швидкість плавлення електрода. Розроблені джерела живлення були перевірені при зварюванні (наплавленні) різних матеріалів. Також вони ефективно застосовувались у процесах гібридного лазерно-дугового зварювання.

Розроблене устаткування може бути використане в технологіях пошарового автоматичного (роботизованого) імпульсно-дугового наплавлення об'ємних металевих виробів.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR BUTT WELDING OF COPPER-CLAD ALUMINIUM BLANKS

I. Ziakhor¹, A. Nakonechny¹, Wang Qichen², Fu Linyu³, Lian Yangzi³, A. Levchuk¹, V. Koltsov⁴

¹*E.O. Paton Electric Welding Institute of the NASU, Kyiv*

²*CIMC Offshore Engineering Institute Company Ltd, Yantai, Shandong, P.R. China*

³*Yantai Fisend Bimetal Co. Limited, Yantai, Shandong, P.R. China*

⁴*Enterprise Technologies LTD, Kyiv*

With the development and distribution of copper clad aluminium (CCA) wire, the problem of reliable welding of Cu–Al blanks before the operation of drawing them to a given diameter arose. Particularly urgent problem is the need to weld CCA blanks on cold drawing lines, where the welded joints are subjected to high mechanical stress and

plastic deformation. The complexity of reliable welding of CCA blanks is associated with the possibility of delamination of the aluminium core and the copper layer (sheath), as well as the fact that when heated, Cu and Al enter into a chemical reaction with the formation of brittle eutectic and intermetallic layers. The most promising methods for joining CCA blanks are pressure welding methods. The paper presents the results of investigations on pressure welding of CCA blanks 8 mm dia. with 0.6 mm thickness of the copper sheath. Studies of welded joint formation were performed for three variants of butt welding, differing by the process of parts heating, namely resistance butt welding (RBW), flash-butt welding (FBW), and hybrid butt welding (HBW). HBW process includes stages of resistance heating and flashing with subsequent upsetting.

It has been experimentally established that in resistance heating of butt-compressed samples of Cu–Al blanks an eutectic layer $\alpha(\text{Al})/\theta(\text{CuAl}_2)$ with layers of intermetallic compounds (IMC) are formed in the interface of the Al-core and Cu-sheath of the welding contact zone in a time of about one tenths of a second. The existence of the so-called «incubation period» of the formation of IMC layer in resistance heating of a CCA blanks with a current density of $J = 30\text{--}60 \text{ A/mm}^2$, was not found in our studies. This eutectic layer, containing IMC layers of various compositions, can remain in the welded joint or be completely displaced from the joint plane, depending on the parameters of the RBW, FBW, and HBW processes. Therefore, precise control of the heating and upsetting process is a key factor in the formation of a high-quality CCA blanks welded joints.

The initial data and key engineering solutions for the development of effective technology and equipment for butt welding of CCA blanks are determined. The development of an efficient butt welding technology of CCA blanks should be based on the following principles: (1) high-speed local heating of the edges to be welded, providing plasticization of the aluminium core and copper sheath in the joint zone at a high temperature field gradient; (2) local shear deformation in the welding zone and constraining formation of a welded joint during upsetting, which ensures the absence of delamination of copper sheath. Based on the results of the research, requirements for the design and power parameters of a welding machine for HBW were determined.

ЗАСТОСУВАННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАВИХРЮВАЧІВ АВІАДВИГУНІВ

В.С. Єфанов¹, Д.О. Куц², Ю.Ф. Басов³, О.В. Овчинников⁴

¹Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпро

²Запорізький національний університет

³АТ «МОТОР СІЧ», Запоріжжя

⁴АТ «Інститут титану», Запоріжжя

Проблеми надійності, довговічності та ресурсу газових турбін турбореактивного двоконтурного двигуна (ТРДД) є серйозним викликом при їхньому проектуванні та експлуатації. Основним вузлом ТРДД є газогенератор, який включає компресор, камеру згоряння та турбіну. В свою чергу камера згоряння включає в себе такий ключовий елемент як завихрювач, який відповідає за розподіл палива. Важливо забезпечити швидке, рівномірне та повне згоряння палива через його оптимальний розподіл та формування рівномірного температурного поля.

Для підвищення конкурентоспроможності авіадвигунів важливе впровадження передових технічних рішень у конструкції, матеріалах і технологіях. Адитивні технології мають переваги у виготовленні деталей з металевих порошкових композицій. Опираючись на це спеціалістами АТ «МОТОР СІЧ», АТ «Інститут титану», ТОВ «НВО «ГЛОБАЛ ІНЖИНІРІНГ» були розроблені та впроваджені у серійне виробництво технології адитивного виробництва (3D друк) завихрювача камери згоряння методом вибіркового лазерного спікання (SLS-Selective laser sintering) порошку, отриманого зі жаростійкого і жароміцного сплаву на основі нікелю Inconel 625 та порошку, отриманого зі жароміцного сплаву на залізнікелевій основі Inconel 718. Ця технологія забезпечує виготовлення статорних деталей авіадвигунів з необхідною точністю та фізико-механічними властивостями, а також дозволяє уникнути дефектів властивих традиційному методу лиття.

Литий завихрювач конструктивно складається з трьох деталей: втулки, завихрювача повітряного та завихрювача паливного з'єднаних між собою методом електродугового зварювання в середовищі захисних газів та паяння.

Як показує досвід виробництва завихрювачів, виготовлених методом лиття за виплавлюваними моделями, процес має ряд недоліків, а саме:

- великий відсоток дефектних деталей на стадії виливки (до 30 %);
- за результатами продування по контурах відбракується до 5 % остаточно оброблених деталей;
- високу трудомісткість.

Всіх перерахованих вище недоліків можна уникнути конструктивно об'єднавши складові в одну монолітну деталь, що і було зроблено у вже впроваджених процесах.

Однак крім вище перерахованого позитивного впливу застосування 3D друку залишається ще економічна — вартість порошку для друку. У зв'язку з роботою завихрювача при жорстких умовах експлуатації, а саме різній температурі, доводиться використовувати дорогий закордонний сплав Inconel 625 або Inconel 718. Щоб зменшити собівартість виробу та адаптувати його до складних умов експлуатації, спеціалістами ТОВ «НВО «ГЛОБАЛ ІНЖИНІРІНГ» та Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона запропонована концептуально нова технологія друку, виготовлення монолітної деталі на експериментальному електронно-променевому принтері Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона з використанням порошків двох сплавів: холодної частини з жароміцного сплаву на основі нікелю марки ЭП648-ВИ, а гарячої частини з жаростійкого сплаву на основі нікелю марки ВЖ98.

Порошки зі сплавів ЭП648-ВИ та ВЖ98 виготовленні вітчизняним виробником (ТОВ «Мультифлекс») методом плазмового розпилення обертового електрода, що суттєво зменшує їх собівартість і при цьому збільшує їх якість.

Для вирішення питання виготовлення виробу з двох сплавів різної жаростійкості, проведено комплекс конструкторських робіт, поставлені та вирішені завдання розрахунку зон розподілу температур в завихрювачі при робочих режимах. Розроблена геометрія завихрювача з оптимальним розрахунком жаростійких та жароміцних матеріалів та врахуванням технології 3D друку.

На сьогоднішній день роботи знаходяться на стадії виготовлення дослідних виробів методом 3D друку по розробленим в спеціалізованій програмі тривимірним моделям завихрювача.

ОТРИМАННЯ ПОРОШКІВ З ЧАСТИНКАМИ СФЕРИЧНОЇ ФОРМИ НИЗЬКОМОДУЛЬНОГО БІОІНЕРТНОГО СПЛАВУ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ МЕТАЛІВ Zr–Ti–Nb МЕТОДОМ ПЛАЗМОВОГО РОЗПИЛЕННЯ ОБЕРТОВОГО ЕЛЕКТРОДА

О.В. Овчинников¹, О.В. Завгородній², Є.А. Сторчак³, С.О. Булиш², Р.Ю. Білий⁴

¹*АТ «Інститут титану», Запоріжжя*

²*НУ «Запорізька політехніка»*

³*ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат»*

⁴*Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпро*

Технологія 3D друку є ефективною, але водночас дорогою. Вона знаходить застосування в високотехнологічних галузях, таких як авіація та медицина. Однак основним обмежуючим фактором є проблеми, пов'язані з отриманням порошків необхідного складу та якості. Зокрема, в Україні виникають труднощі з отриманням порошків подвійного призначення, таких як нікелеві, титанові, цирконієві та інші сплави. Крім того, майже відсутнє вітчизняне виробництво експериментальних сплавів.

Все ці проблеми було успішно вирішено компанією ТОВ «Мультифлекс», у співпраці з науковцями АТ «Інститут Титану» та ТОВ «НВО «ГЛОБАЛ ІНЖИНІРІНГ». Завдяки плідній співпраці, проведена реконструкція та модернізація установки центробіжного розпилення типу УЦР-4. Впроваджено повний технологічний ланцюжок від плавлення сплавів необхідного складу до підготовки порошкових матеріалів згідно з українськими та міжнародними стандартами сплавів, а також реалізована можливість виготовлення сплавів за вимогами замовника.

Незважаючи на досягнені успіхи, отримання порошків нових матеріалів, таких як низькомодульний біоінертний сплав на основі системи металів Zr–Ti–Nb, вимагає проведення дослідницьких робіт з оптимізації технологічних режимів. Це необхідно для забезпечення оптимальних фракційних складів та відповідної якості в залежності від кінцевої технології формоутворення виробів методом 3D друку. Серед перспективних технологій 3D друку для цього класу сплавів виділяється електронно-променева технологія, в якій оптимальним фракційним складом є порошки фракції 40...120 мкм.

Мета роботи — визначити закономірності впливу технологічних режимів на вихід фракційних складів порошків експериментального сплаву з подальшою оптимізацією процесу отримання порошків для електронно-променевої технології.

Початковим етапом комплексу досліджень є аналіз вихідних матеріалів — визначення параметрів плавлення та складу сплаву. Підбір оптимальних технологічних параметрів для установки центробіжного розпилення, зокрема температури плавлення, швидкості розпилення, типу та тиску газу, тощо.

Після етапу розпилення визначили фракційний склад отриманих порошків. Для цього впроваджені спеціальні системи сепарації та аналізу вихідних параметрів порошків за вітчизняними та світовими стандартами.

Після завершення експериментальної частини роботи визначили закономірності впливу технологічних режимів на якість та склад порошків. Це дало змогу для подальшої оптимізації технологічного процесу та вдосконалення виробництва порошків для електронно-променевої технології 3D друку.

У результаті комплексних досліджень ТОВ «Мультифлекс» вирішили проблеми, пов'язані з отриманням порошків нових матеріалів, удосконалили технології виробництва, а також збільшили співпрацю з науковими та виробничими компаніями.

КЕРУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЯМИ МЕТАЛУ ФОРМОЮ ТА СПОСОБОМ ВНЕСЕННЯ КОМПОНЕНТІВ ШИХТИ НАПЛАВНИХ МАТЕРІАЛІВ

В.В. Перемітько, А.В. Євдокимов, І.В. Кривда, М.Є. Барлет

Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське

Широка номенклатура деталей машин гірничорудної, металургійної та будівельної піддається інтенсивному зносу через тривалий контакт з сипкими матеріалами, які чинять абразивну дію. При виготовленні деталей таких машин та механізмів вже тривалий час застосовують білі зносостійкі чавуни, в структурі яких містяться високотверді карбіди. Для зниження абразивного зносу отримали також поширення локальні захисні покриття на робочу поверхню деталі.

Сучасні зносостійкі покриття містять зазвичай декілька, досить дорогих, металів — хром, титан, молібден, ванадій. Ці легуючі елементи в значній мірі визначають тип карбідів, металеву основу та властивості сплаву.

Серед способів нанесення таких шарів поширеним варіантом є застосування дугового наплавлення, яке досить часто ведуть порошковими стрічками або дротами. Саме через шихту останніх можна реалізувати найпростіший — хімічний — спосіб модифікування наплавленого металу, що дозволяє суттєво підвищити його механічні та експлуатаційні властивості.

Досліджувалася дієвість покриття частинок ферохрому та ванадію зі складу шихти захисним шаром пластика на зміну властивостей наплавленого шару.

Використовували зразки з низьколегової сталі, на які порошковими дротами марки ВЕЛТЕК-Н630 та ВЕЛТЕК-Н620 наплавляли зносостійкий шар товщиною 4...5 мм. Частки ферохрому попередньо покривали шаром пластику товщиною 0,20...0,25 мм. Застосовували аерозольну форму поліуретану та дисперсню-фторопласту. Для порівняння також проводили наплавлення стандартним дротом, без покриття компонентів шихти пластиком.

Вивчення зразків проводили, задіявши спектральний аналіз хімічного складу наплавленого шару та металографічні дослідження структур. У випадку покриття часток ферохрому рідким пластиком виявлено збільшення присутності вуглецю від додавання пластику на 0,3...0,4 мас. %, більше зберігається хрому (на 2,5...3,5 мас. %), зростає твердість металу поверхневого шару (на 2...3 HRC).

При застосуванні фторопласту для покриття часток ванадію твердість — навпаки — знижувалася. Проте наступе випробування наплавлених зразків на тертя виявило у цьому випадку збільшення опірності зношуванню: втрата маси зменшилася на 15...20 %. Металографічне дослідження зафіксувало подрібнення структурних складових, особливо у першому шарі при дуговому наплавленні у два проходи.

ПЕРЕДПЛАТА 2024

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.			
	місяць	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 6 випусків на рік. ISSN 0005-111X. Передплатний індекс 70031	–	–	900	1800
«Сучасна електрометалургія», видається з 1985 р., 4 випуски на рік. ISSN 2415-8445. Передплатний індекс 70693	–	300	600	1200
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 0235-3474. Передплатний індекс 74475	–	300	600	1200
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X. Передплатний індекс 21971.	600	1800	3600	7200

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.

** Журнал «The Paton Welding Journal» містить статті, отримані від авторів з усього світу і вибірково переклади на англійську мову статей з журналів «Автоматичне зварювання», «Сучасна електрометалургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».

Передплату на журнали можна оформити по каталогах передплатних агенцій «УКРПОШТА», «Прес Центр» та у видавництві. Передплата через видавництво з любого місяця на любой термін, в т.ч. на попередні періоди та окремі статті, починаючи з першого року видання.

Передплата на електронну версію журналів.

Вартість передплати на електронну версію журналів дорівнює вартості передплати на друковану версію. Випуски журналу надсилаються електронною поштою у форматі pdf або для IP-адреси комп'ютера передплатника надається доступ до відповідних архівів журналу.

Передплата через сайт видавництва:

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

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem/subscription>

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk/subscription>

<https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj/subscription>

На сайті видавництва у 2024 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2022 рр.



Журнал «**Автоматичне зварювання**» — міжнародний науково-технічний та виробничий журнал у галузі технічних наук. В журналі публікуються результати досліджень за напрямками: матеріалознавство та металургія зварювання, наплавлення та інших споріднених технологій; технології та матеріали для зварювання конструкційних матеріалів; виробництво зварних металопродукцій для різних галузей промисловості; відновлювальний ремонт для подовження ресурсу зварних конструкцій і вузлів; проблеми міцності, конструювання та оптимізації зварних конструкцій; технології 3D друку, які базуються на зварювальних процесах; гібридні технології зварювання. В журналі публікується також інформація про нові зварювальні матеріали, джерела живлення та технології; звіти про виставки, конференції та семінари, анонси нових книг та винаходів, новини від відомих компаній та інше.



Журнал «**Сучасна електрометалургія**» — міжнародний науково-теоретичний та виробничий журнал у галузі технічних наук. В журналі публікуються результати досліджень у сферах: металургія чорних і кольорових металів та сплавів; спеціальна електрометалургія (електрошлакова, електронно-променева, плазмова- та вакуумно-дугова технології); нові матеріали; енерго- і ресурсозбереження; матеріалознавство, 3D технології у спеціальній електрометалургії. Публікується також допоміжна інформація з тематики журналу.



Журнал «**Технічна діагностика та неруйнівний контроль**» — міжнародний науково-технічний та виробничий журнал у галузі технічних наук. В журналі публікуються результати досліджень з діагностики матеріалів і конструкцій та методи неруйнівного контролю для оцінки стану матеріалів і конструкцій; теорія, методи і засоби технічної діагностики. Розміщуються матеріали з моніторингу конструкцій та подовження ресурсу та працездатності засобами НК. Публікується супутня інформація з тематики журналу, а також інформація про події та новини в Українському товаристві НК та Тд.

РЕКЛАМА В ЖУРНАЛАХ

Реклама публікується на обкладинках і внутрішніх вклейках журналів.

Перша сторінка обкладинки – 200×200 мм.

Друга, третя і четверта сторінки обкладинки – 200×290 мм.

Перша, друга, третя, четверта сторінки внутрішньої обкладинки – 200×290 мм.

Вклейка А4 – 200×290 мм. Розворот А3 – 400×290 мм.

А5 – 185×130 мм.

Розміри журналів після обрізу 200×290 мм.

Всі файли в форматі IBM PC, кольорова модель СМΥК, роздільна здатність 300 dpi.

ВАРТІСТЬ РЕКЛАМИ

Ціна договірна. Передбачена система знижок. Вартість публікації статті на правах реклами становить половину вартості рекламної площі. Публікується тільки профільна реклама з тематики журналів. Відносно вартості, знижок та термінів публікації прохання звертатися у видавництво.

ВИДАВНИЦТВО

Міжнародна Асоціація «Зварювання»
03150, Київ, вул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: 38044 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua, patonpublishinghouse@gmail.com

<https://patonpublishinghouse.com>

ДЛЯ НОТАТОК