

X Міжнародна конференція

ПРОМЕНЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЗВАРЮВАННІ І ОБРОБЦІ МАТЕРІАЛІВ



**Збірка тез доповідей
Програма конференції**

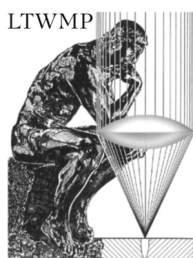
6 – 10 вересня 2021
Одеса, готель «Аркадія»

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ
Китайсько-український інститут зварювання ім. Є.О. Патона
Міжнародна Асоціація «Зварювання»

X Міжнародна конференція
ПРОМЕНЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЗВАРЮВАННІ
І ОБРОБЦІ МАТЕРІАЛІВ

Збірка тез пленарних та стендових доповідей
Програма конференції

6–10 вересня 2021 р.
м. Одеса, Україна, готель «Аркадія»



Променеві технології в зварюванні і обробці матеріалів: Тези допов. міжнар. конф. під ред. І.В. Кривцуна / Київ: Міжнародна Асоціація «Зварювання», 2021. — 32 с.

В збірці представлено 30 тез доповідей міжнародної конференції «Променеві технології в зварюванні і обробці матеріалів», в яких відображені останні досягнення та практичні результати в галузі зварювання та споріднених технологій, отримані фахівцями з України, Німеччини, Польщі, Словаччини та Китаю. ????????????

Організатори конференції висловлюють подяку наступним організаціям та компаніям:

- Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
 - Китайсько-український інститут зварювання ім. Є.О. Патона
 - ЧАО «НВО Червона Хвиля»
 - ДП «Міжнародний центр електронно-променевих технологій ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України»
- за надану допомогу в проведенні конференції.

Інформаційна підтримка конференції

ЗАВТОМАТИЧНЕ
ЗВАРЮВАННЯ
Автоматичне
зварювання

НСУЧАСНА
ПРОМІШЛЕНІСТЬ
Сучасна
електрометалургія

ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА
ІНСТРУМЕНТАЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ
Техн. діагностика
та неруйнівний
контроль

The Paton
WELDING JOURNAL
The Paton Welding
Journal

BIULETYN
Instytutu Spawalnictwa
w Gliwicach

Видавничий проект *О.Т. Зельніченко*

Комп'ютерна верстка *Т.Ю. Снегірєва*

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

Тези публікуються в авторській редакції.

© Міжнародна Асоціація «Зварювання», 2021

© Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, 2021

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ПРОГРАМА КОНФЕРЕНЦІЇ | 5 |
| ПЛЕНАРНІ ДОПОВІДІ | 11 |
| <i>Кривцун І.В., Демченко В.Ф., Крикент І.В., Семенов О.П., Абдулах В.М.</i> Гібридні лазерно-дугові процеси зварювання | 11 |
| <i>Аджамський С.В., Кононенко А.А., Подольський Р.В.</i> Застосування SLM-технології для виготовлення дентальних імплантів зі сплаву на основі титану | 11 |
| <i>Ахонин С.В., Белоус В.Ю., Селин Р.В., Вржизжевский Э.Л., Петриченко И.К., Максимов С.Ю.</i> Електронно-лучевая сварка и упрочняющая термообработка высокопрочных титановых сплавов на основе β -фазы | 12 |
| <i>Ахонин С.В., Березос С.В., Пикулин А.Н., Северин А.Ю., Ерохин А.Г.</i> Закономерности поведения тугоплавких кислородосодержащих включений в титане при ЭЛП | 12 |
| <i>Бернацький А.В., Позняков В.Д., Берднікова О.М., Кушнарєва О.С., Сіора О.В.</i> Вплив просторового положення на хімічну неоднорідність металу швів при лазерному зварюванні корозійно-стійкої жароміцної сталі AISI321 | 13 |
| <i>Бернацький А.В., Сіора О.В., Бондарєва В.І., Курило В.А., Сучек О.М., Коваль Ю.М., Фірстов Г.С., Кедровський С.М., Сліпченко В.М.</i> Дослідження точкових зварних з'єднань нікеліну титану, одержаних лазерним зварюванням | 13 |
| <i>Бернацький А.В., Сіора О.В., Набок Т.М., Соколовський М.В., Шамсутдінова Н.О.</i> Вплив газодинамічних процесів при лазерному зварюванні сталі 09Г2С у різних просторових положеннях на геометричні характеристики та форму зварних з'єднань | 14 |
| <i>Bondarev V.N., Dragan G.S.</i> Mechanisms of the ordered structures formation in thermal plasma with oxide particles | 14 |
| <i>Gumenyuk A., StraÙe A., Rethmeier M.</i> Improvement of the mechanical properties and corrosion resistance of laser welds on thick duplex plates by laser clad buttering | 15 |
| <i>Драган Г.С., Бекшаєв А.Я., Кутаров В.В.</i> Структуровані світлові поля: інструмент для формування і дослідження фазових переходів, структурний порядок і порушення в плазмі | 15 |
| <i>Драган Г.С., Рімашевський О.А., Шингарьов Г.Л., Трофименко М.Ю.</i> Автоматизована установка для експрес-аналізу плазмових характеристик в гетерогенній плазмі | 16 |
| <i>Drimal Daniel, Kolenic Frantisek, Kovac Lubos.</i> Properties of welded joints of boron alloyed austenitic stainless steel prepared by laser | 16 |
| <i>Касай П.А., Лысенко Н.А., Клочихин В.В., Педаш А.А.</i> Применение технологии селективного лазерного плавления при изготовлении деталей авиационной техники | 17 |
| <i>Ковальчук Д.В.</i> Нові технологічні можливості виготовлення якісних деталей великого розміру методом 3D друку з використанням профільних електронних променів та дроту | 17 |
| <i>Кораб М.Г., Таланюк В.В., Сенченков І.К., Юрженко М.В., Менжерес М.Г., Карпова С.В., Бернацький А.В., Лукашенко В.А., Лукашенко Д.А.</i> Зварювання полімерних матеріалів лазерами низької та середньої потужності | 18 |
| <i>Коржик В.М., Хаскін В.Ю., Гринюк А.А., Ілляшенко Є.В., Пелешенко С.І., Квасницький В.В., Щерецький В.О.</i> Дослідження процесу лазерного зварювання тонколистових високоміцних алюмінієвих сплавів | 18 |
| <i>Коржик В.М., Хаскін В.Ю., Гринюк А.А., Ілляшенко Є.В., Строгонов Д.В., Гос І.Д.</i> Особливості формування зварних швів при лазерно-плазмовому зварюванні | 19 |
| <i>Костін В.А., Таранова Т.Г., Григоренко С.Г., Білоус В.Ю.</i> Особливості руйнування зварних з'єднань економно легованого титанового сплаву | 20 |

| | |
|---|----|
| <i>Лысенко Н.А., Педаш А.А., Клочихин В.В., Касай П.А.</i> Влияние длительных выдержек на структуру и свойства образцов из сплава IN625, изготовленных методом селективного лазерного плавления | 20 |
| <i>Матвійчук В.А., Нестеренков В.М.</i> Адитивні електронно-променеві технології пошарового виготовлення металевих виробів з порошкових матеріалів | 21 |
| <i>Несін В.В.</i> Особливості технології лазерної обробки матеріалів спеціальної техніки | 22 |
| <i>Sahul Miroslav, Nesterenkov V., Rusynuk M., Sahul Martin, Fedorchuk V., Motrunich S., Klochkov I.</i> The influence of focusing current on the properties of electron beam welded joints produced on 2219 high strength aluminum alloy | 22 |
| <i>Скрябинский В.В., Нестеренков В.М., Микитчик А.В.</i> Особенности электронно-лучевой сварки алюминиевого сплава 1570 и механический свойства его сварных соединений при криогенных температурах | 23 |
| <i>Тунік А.Ю., Адєєва Л.І., Ковальчук Д.В., Григоренко С.Г., Полішко Г.О., Степанюк С.М.</i> Дослідження формування структури злиwkів, отриманих методом 3D технології при послідовному наплавленні дротом титанових сплавів | 24 |
| <i>Üstündağ Ö., Bakir N., Gumenyuk A., Rethmeier M.</i> Hybrid laser-arc welding of laser and plasma-cut 20 mm thick structural steels with AC magnetic support | 24 |
| <i>Шкрыль О.М., Куренкова В.В.</i> Электронно-лучевая технология, как неотъемлемая часть комплексного восстановления компонентов газотурбинных двигателей | 25 |
| <i>Яковчук К.Ю., Мьяльниця Г.П., Микитчик А.В., Рудой Ю.Е.</i> Вдосконалення термобар'єрного покриття типу CoCrAlY/ZrO ₂ -8%Y ₂ O ₃ шляхом легування поверхні металевого шару | 25 |
| СТЕНДОВІ ДОПОВІДІ | 27 |
| <i>Lesyk D.A., Martinez S., Pedash O.O., Dzhemelinskyi V.V., Lamikiz A.</i> Microstructure evaluation in 3D laser powder bed fused superalloy turbine blades subjected to thermomechanical treatment | 27 |
| <i>Худецький І.Ю., Антонова-Рафі Ю.В., Нестерова О.І., Масалов Д.В.</i> Застосування та перспективи променевих технологій в щелепно-лицьовій хірургії | 27 |
| <i>Царюк А.К., Шелягін В.Д., Суботін В.Г., Елагін В.П., Бернацький А.В., Сіора О.В.</i> Лазерне зварювання — перспективний процес при виготовленні відповідальних виробів енергетичного обладнання | 29 |
| Іменний покажчик | 31 |

ПРОГРАМА
X Міжнародної конференції
«ПРОМЕНЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЗВАРЮВАННІ І ОБРОБЦІ МАТЕРІАЛІВ»
6–10 вересня 2021 р.
м. Одеса, Україна, готель «Аркадія»

6 вересня, Понеділок

14:00–17:00

Реєстрація учасників конференції

19:00–21:00

Фуршет-зустріч

7 вересня, вівторок

09:00–12:00

Реєстрація учасників конференції

10:00–10:40

Відкриття конференції, вступна доповідь

Академік НАН України І.В. Кривцун

10:40–11:20

Пленарні доповіді

11:20–11:50

Кава-брейк

11:50–12:50

Пленарні доповіді

13:00–14:30

Обідня перерва

14:30–15:30

Пленарні доповіді

15:30–16:00

Кава-брейк

16:00–16:40

Пленарні доповіді

8 вересня, середа

10:00–11:20

Пленарні доповіді

11:20–11:50

Кава-брейк

11:50–12:50

Пленарні доповіді

13:00–14:30

Обідня перерва

14:30–15:30

Пленарні доповіді

15:30–16:00

Кава-брейк

16:00–16:40

Пленарні доповіді

19:00–21:00

Офіційна вечеря

9 вересня, четвер

10:00–11:20

Пленарні доповіді

13:00–14:30

Обідня перерва

14:30–16:00

Сесія стендових доповідей

10 вересня, п'ятниця

10:00–13:00

Круглий стіл з питань застосування променевих технологій

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

Робочі мови конференції: українська, англійська, російська.

7 вересня, вівторок

ПЛЕНАРНІ ДОПОВІДІ

Голова – акад. Кривцун І.В.

- 10:00–10:40 **Відкриття конференції**
Гібридні лазерно-дугові процеси зварювання
Кривцун І.В., Демченко В.Ф., Крикент І.В., Семенов О.П., Абдулах В.М.
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ
- 10:40–11:00 **Нові технологічні можливості виготовлення якісних деталей великого розміру методом 3D друку з використанням профільних електронних променів та дроту**
Ковальчук Д.В.
ЧАО «НВО Червона Хвиля», Київ
- 11:00–11:20 **Закономерности поведения тугоплавких кислородосодержащих включений в титане при ЭЛП**
Ахонин С.В., Березос С.В., Пикулин А.Н., Северин А.Ю., Ерохин А.Г.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев
- 11:20–11:50 **Кава-брейк**
- 11:50–12:10 **Электронно-лучевая технология, как неотъемлемая часть комплексного восстановления компонентов газотурбинных двигателей**
Шкрыль О.М., Куренкова В.В.
ООО «Патон Турбайн Текнолоджиз», Киев
- 12:10–12:30 **Особливості технології лазерної обробки матеріалів спеціальної техніки**
Несін В.В.
Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України, Київ
- 12:30–12:50 **Аддитивні електронно-променеві технології пошарового виготовлення металевих виробів з порошкових матеріалів**
Матвійчук В.А., Нестеренков В.М.
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ
- 13:00–14:30 **Обідня перерва**

Голова – д.т.н. Костін В.А.

- 14:30–14:50 **Застосування SLM-технології для виготовлення дентальних імплантів зі сплаву на основі титану**
Аджамский С.В.¹, Кононенко А.А.^{1,2}, Подольський Р.В.^{1,2}
¹LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», Дніпро
²Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро
- 14:50–15:10 **Особливості формування зварних швів при лазерно-плазмовому зварюванні**
Коржик В.М.¹, Хаскін В.Ю.², Гринок А.А.¹, Ілляшенко Є.В.¹, Строгонов Д.В.¹, Гос І.Д.¹
¹Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ
²Китайсько-український Інститут зварювання Академії наук провінції Гуандун, КНР

15:10–15:30 **Дослідження точкових зварних з'єднань нікеліну титану, одержаних лазерним зварюванням**
Бернацький А.В.¹, Сіора О.В.¹, Бондарева В.І.¹, Курило В.А.¹, Сучек О.М.¹,
 Коваль Ю.М.², Фірстов Г.С.², Кедровський С.М.², Сліпченко В.М.²
¹Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ
²Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, Київ

15:30–16:00 **Кава-брейк**

16:00–16:20 **Зварювання полімерних матеріалів лазерами низької та середньої потужності**
 Кораб М.Г., Таланюк В.В., Сенченков І.К., Юрженко М.В., Менжерес М.Г.,
 Карпова С.В., Бернацький А.В., Лукашенко В.А., Лукашенко Д.А.
 Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

16:20–16:40 **Вплив просторового положення на хімічну неоднорідність металу швів при лазерному зварюванні корозійно-стійкої жароміцної сталі AISI321**
 Бернацький А.В., Позняков В.Д., Берднікова О.М., Кушнарєва О.С., Сіора О.В.
 Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

8 вересня, середа

Голова – акад. Ахонін С.В.

10:00–10:20 **Особенности электронно-лучевой сварки алюминиевого сплава 1570 и механический свойства его сварных соединений при криогенных температурах**
Скрябинский В.В.¹, Нестеренков В.М.¹, Микитчик А.В.²
¹Інститут електросварки ім. Є.О. Патона НАН України, Київ
²ГП «Международный центр электронно-лучевых технологий ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев

10:20–10:40 **Вплив газодинамічних процесів при лазерному зварюванні сталі 09Г2С у різних просторових положеннях на геометричні характеристики та форму зварних з'єднань**
Бернацький А.В., Сіора О.В., Набок Т.М., Соколовський М.В., Шамсутдінова Н.О.
 Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

10:40–11:00 **Применение технологии селективного лазерного плавления при изготовлении деталей авиационной техники**
 Касай П.А., Лысенко Н.А., Клочихин В.В., Педаш А.А.
 АО «Мотор Сич», Запорожье

11:00–11:20 **The influence of focusing current on the properties of electron beam welded joints produced on 2219 high strength aluminum alloy**
 Sahul Miroslav¹, Nesterenkov V.², Rusynuk M.², Sahul Martin¹, Fedorchuk V.²,
 Motrunich S.², Klochkov I.²
¹Slovak University of Technology in Bratislava, Slovakia
²E.O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kyiv

11:20–11:50 **Кава-брейк**

11:50–12:10 **Особливості руйнування зварних з'єднань економно легованого титанового сплаву Ti–2,8%Al–5,1%Mo–4,9%Fe, отриманого методом ЕПП**
Костін В.А., Таранова Т.Г., Григоренко С.Г., Білоус В.Ю.
 Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

- 12:10–12:30 **Hybrid laser-arc welding of laser and plasma-cut 20 mm thick structural steels with AC magnetic support**
Üstündağ Ö., Bakir N., Gumenyuk A., Rethmeier M.
Bundesanstalt für Materialforschung und prüfung (BAM), Berlin, Germany
- 12:30–12:50 **Improvement of the mechanical properties and corrosion resistance of laser welds on thick duplex plates by laser clad buttering**
Gumenyuk A., StraÙe A., Rethmeier M.
Bundesanstalt für Materialforschung und prüfung (BAM), Berlin, Germany
- 13:00–14:30 **Обідня перерва**

Голова – д.т.н. Хаскін В.Ю.

- 14:30–14:50 Вдосконалення термобар'єрного покриття типу $\text{CoCrAlY/ZrO}_2\text{-8\%Y}_2\text{O}_3$ шляхом легування поверхні металевго шару
Яковчук К.Ю.¹, Мьяльниця Г.П.², Микитчик А.В.¹, Рудой Ю.Е.¹
¹ДП «Міжнародний центр електронно-променевиx технологій ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України», Київ
²ДП «Науково-виробничий комплекс газотурбобудування «Зоря»–«Машипроект», Миколаїв
- 14:50–15:10 **Влияние длительных выдержек на структуру и свойства образцов из сплава IN625, изготовленных методом селективного лазерного плавления**
Лысенко Н.А., Педаш А.А., Клочихин В.В., Касай П.А.
АО «Мотор Сич», Запорожье
- 15:10–15:30 **Структуровані світлові поля: інструмент для формування і дослідження фазових переходів, структурний порядок і порушення в плазмі**
Драган Г.С., Бекшаєв А.Я., Кутаров В.В.
НДІ фізики Одеського національного університету ім. І.І. Мечникова, Одеса
- 15:30–16:00 **Кава-брейк**
- 16:00–16:20 **Автоматизована установка для експрес-аналізу плазмових характеристик в гетерогенній плазмі**
Драган Г.С., Рімашевський О.А., Шингарьов Г.Л., Трофименко М.Ю.
НДІ фізики Одеського національного університету ім. І.І. Мечникова, Одеса
- 16:20–16:40 **Mechanisms of the ordered structures formation in thermal plasma with oxide particles**
Bondarev V.N., Dragan G.S.
Physics Research Institute Odesa I.I. Mechnikov National University, Odesa

9 вересня, четвер

Голова – к.т.н. Бернацький А.В.

- 10:00–10:20 **Электронно-лучевая сварка и упрочняющая термообработка высокопрочных титановых сплавов на основе β -фазы**
Ахонин С.В., Белоус В.Ю., Селин Р.В., Вржижевский Э.Л., Петриченко И.К., Максимов С.Ю.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев

- 10:20–10:40 **Дослідження процесу лазерного зварювання тонколистових високоміцних алюмінієвих сплавів**
 Коржик В.М.¹, Хаскін В.Ю.², Гринюк А.А.¹, Ілляшенко Є.В.¹, Пелешенко С.І.³,
 Квасницький В.В.³, Щерецький В.О.¹
¹Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ
²Китайсько-український Інститут зварювання Академії наук провінції Гуандун, КНР
³НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ
- 10:40–11:00 **Properties of welded joints of boron alloyed austenitic stainless steel prepared by laser**
 Drimal Daniel, Kolenic Frantisek, Kovac Lubos
 PRVA ZVARACSKA a. s., Bratislava, Slovak Republic
- 11:00–11:20 **Дослідження формування структури зливків, отриманих методом 3D технології при послідовному наплавленні дротом титанових сплавів**
 Тунік А.Ю.¹, Адеєва Л.І.¹, Ковальчук Д.В.², Григоренко С.Г.¹, Полішко Г.О.¹,
 Степанюк С.М.¹
¹Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ
²ЧАО «НВО Червона Хвиля», Київ
- 13:00–14:30 **Обідня перерва**

СТЕНДОВІ ДОПОВІДІ

- 11:00–16:00 **Лазерне зварювання — перспективний процес при виготовленні відповідальних виробів енергетичного обладнання**
 Царюк А.К.¹, Шелягін В.Д.¹, Суботін В.Г.², Елагін В.П.¹, Бернацький А.В.¹, Сіора О.В.¹
¹Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ
²ВАТ «Турбоатом», Харків
- Microstructure evaluation in 3D laser powder bed fused superalloy turbine blades subjected to thermomechanical treatment**
 Lesyk D.A.¹, Martinez S.², Pedash O.O.³, Dzhemelinskyi V.V.¹, Lamikiz A.²
¹NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv
²University of the Basque Country, Bilbao, Spain
³MOTOR SICH JSC, Zaporizhzhia
- Застосування та перспективи променевих технологій в щелепно-лицьовій хірургії**
 Худецький І.Ю., Антонова-Рафі Ю.В., Нестерова О.І., Масалов Д.В.
 Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

10 вересня, п'ятниця

- 10:00–13:00 **Круглий стіл з питань застосування променевих технологій**
 Закриття конференції

ГІБРИДНІ ЛАЗЕРНО-ДУГОВІ ПРОЦЕСИ ЗВАРЮВАННЯ

І.В. Кривцун, В.Ф. Демченко, І.В. Крикент, О.П. Семенов, В.М. Абдулах

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

- Problem statement and assumptions (model of laser-arc discharge)
- Mathematical model and basic equations
- Model of arc plasma column
- Model of laser beam
- Model of anode region
- Boundary conditions
- Simulation results
- Arc plasma
- Laser beam
- Problem statement and assumptions (model of metal being welded)
- Mathematical model and basic equations
- Model of electromagnetic processes
- Model of heat transfer processes
- Model of hydrodynamic processes
- Simulation results

ЗАСТОСУВАННЯ SLM-ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕНТАЛЬНИХ ІМПЛАНТІВ ЗІ СПЛАВУ НА ОСНОВІ ТИТАНУ

С.В. Аджамський¹, Г.А. Кононенко^{1,2}, Р.В. Подольський^{1,2}

¹LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», Дніпро, Україна

²Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро

На сьогоднішній день SLM технологія знайшла застосування в різних галузях, в тому числі й в стоматологічній. Виготвлення дентальних імплантів за SLM технологією має значні переваги.

Мета роботи. Розробка та виготвлення обладнання, відпрацювання режимів побудови за технологією SLM та електрохімполірування дентальних імплантів з Ti-6Al-4V.

В роботі використовували титановий сплав Ti-6Al-4V хімічного складу, ваг. %: Al-6,21; V-4,03; Fe-0,04; C-0,1; O-0,7; N-0,02; Ti — база. Електрохімполірування виконували у розчині плавикової кислоти (HF), азотної кислоти з гліцерином (C₃H₈O₃).

Розроблено та виготовлено надкомпактний 3D-принтер Alfa-150D з розміром робочого поля 150×150×180 мм, який оснащений високоточним ітербієвим лазером з повітряним охолодженням з потужністю 200 Вт. Точність позиціонування лазерного променя — 0,15 мкм. Також як переваги 3D-принтера Alfa-150D можна відзначити: система регенерації фільтрів, яка дозволяє провести процедуру самоочищення фільтруючих елементів, значно знижує витрати та необхідність заміни газових фільтрів; підтримка інертного середовища і мінімальний вміст кисню в камері побудови, ізоляція порошку в подавальному бункері від зовнішнього середовища для запобігання окисленню є особливо важливими для виготвлення виробів медичного призначення; вбудована промислова відеокамера для здійснення безперервного моніторингу процесу побудови й архівації даних з високою роздільною здатністю знімків.

Виготовлені зразки імплантів з Ti-6Al-4V за дослідними режимами: постійна потужність лазера — 195 Вт, швидкість сканування променя лазера — 1000...1200 мм/с з кроком зміни 50 мм/с, відстань між проходками променя — 0,09...0,12 мм з кроком зміни 0,01 мм при постійній швидкості сканування. Встановлені режими, які забезпечують щільність металу зразків більше 99,95 %. На імплантах, виготовлених за раціональними режимами дослідили вплив сили струму (0,5...2,5 А), напруги (12...20 В) та тривалості (3...6 хв)

на втрату маси при електрохімічному поліруванні. З застосуванням візуального аналізу встановлено раціональні режими постобробки.

Висновки. Виготовлене обладнання для застосування SLM технології в стоматології. Встановлені режими виготовлення та електрохімполірування дентальних імплантів.

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА И УПРОЧНЯЮЩАЯ ТЕРМООБРАБОТКА ВЫСОКОПРОЧНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ β-ФАЗЫ

С.В. Ахонин, В.Ю. Белоус, Р.В. Селин, Э.Л. Вржижевский, И.К. Петриченко

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев

Важнейшим преимуществом псевдо-β-сплавов титана является их высокая прочность, а к недостаткам — высокая стоимость легирующих элементов. Для снижения стоимости сплавов на основе β-фазы разработаны экономно легированные сплавы, такие как LCB, Timetal 125. Этот класс титановых сплавов перспективен для применения в недорогих конструкциях. разработка технологии сварки и режимов термической обработки соединений таких сплавов является важной задачей. В работе изучались свойства соединений, выполненных электронно-лучевой сваркой, 3-х систем экономно легированных псевдо-β-титановых сплавов Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe, Ti–1,5Al–6,3Mo–4,4Fe и Ti–3,6Fe–0,25O. Определены свойства соединений этих сплавов, выполненные ЭЛС. Установлено, что структура их соединений состоит из зерен β-фазы, в которых присутствуют дисперсные выделения α-фазы, причем наименьшее количество β-фазы в ОМ и металле шва в состоянии после ЭПЗ фиксируется в сплаве Ti–3,6Fe–0,25O на уровне 62...67 %, а наибольшая — в сплаве Ti–1,5Al–6,3Mo–4,4Fe на уровне 74...85 %, в сплаве Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe — на уровне 71...74 %. ЭЛС с последующей ЛТО не обеспечивают снижение содержания β-фазы в металле шва и ОТО но позволяют получить почти равнопрочные сварные соединения, с уровнем прочности 98 % от прочности основного металла в состоянии проката. Закалка с последующим старением для соединений сплава Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe является наиболее эффективной обработкой, и позволяет поднять прочность соединений до 1204 МПа, при показателях ударной вязкости на уровне $KCV = 3,7...4,2$ Дж/см².

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ТУГОПЛАВКИХ КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ТИТАНЕ ПРИ ЭЛП

С.В. Ахонин, С.В. Березос, А.Н. Пикулин, А.Ю. Северин, А.Г. Ерохин

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев

Критически важным критерием качества титановых полуфабрикатов является отсутствие в них тугоплавких включений, которые являются концентраторами напряжения и источниками зарождения усталостных трещин. Значительная часть таких включений содержит кислород: это частицы оксидов титана различного стехиометрического состава и твердые частицы α-титана с повышенным содержанием кислорода. Согласно диаграмме состояния системы «титан–кислород», увеличение концентрации кислорода в титане существенно повышает температуру плавления титана. Показано, что в процессе электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью существуют два механизма удаления кислородсодержащих тугоплавких включений из титанового расплава: осаждение этих включений на дно ванны жидкого металла в промежуточной емкости и их растворение в расплаве титана. Методами математического моделирования определены времена осаждения и растворения тугоплавких кислородсодержащих включений в расплаве титана в зависимости от их размеров и химического состава, а также температуры. Разработана технология получения бездефектных слитков титана с регламентированным содержанием кислорода методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью. Выплавлена промышленная партия слитков с заданной концентрацией кислорода.

ВПЛИВ ПРОСТОРОВОГО ПОЛОЖЕННЯ НА ХІМІЧНУ НЕОДНОРІДНІСТЬ МЕТАЛУ ШВІВ ПРИ ЛАЗЕРНОМУ ЗВАРЮВАННІ КОРОЗІЙНО-СТІЙКОЇ ЖАРОМІЦНОЇ СТАЛІ AISI 321

А.В. Бернацький, В.Д. Позняков, О.М. Берднікова, О.С. Кушнарєва, О.В. Сіора

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

Загальні тенденції у створенні конструкцій новітньої техніки різного функціонального призначення у багатьох галузях промисловості (хімічній та харчовій, енергетиці та суднобудуванні, авіа- та ракетобудуванні, тощо), пов'язані із зменшенням маси виробів, застосуванням матеріалів з покращеними механічними та експлуатаційними характеристиками, а також впровадженням сучасних технологій обробки. Конструкції таких виробів часто включають у себе вузли та деталі як малого, так і великого розміру, які мають складну просторову форму. Відповідно, при створенні таких конструкцій із застосуванням технологій зварювання, виникає необхідність виконання різноманітних видів зварних з'єднань у різних просторових положеннях для виготовлення широкого асортименту продукції з різних матеріалів. Зміна просторового положення при зварюванні, може мати як позитивний, так й негативний вплив на якість та формування зварних з'єднань. Відсутність достатніх знань про залежність геометрії шва, структури, хімічного складу та механічних характеристик зварних з'єднань від зміни просторового положення при лазерному зварюванні, не дозволяє визначити його технологічні параметри, які є найбільш раціональними з точки зору досягнення високої якості та відповідності вимогам діючих стандартів.

У даній роботі було визначено вплив просторового положення на хімічну неоднорідність металу швів при лазерному зварюванні корозійно-стійкої жароміцної сталі AISI 321. Встановлено, що найбільші концентраційні зміни спостерігаються по Ni, відсоток якого найбільше зростає по межах кристалітів у верхній ділянці металу швів зразків, які були зварені у нижньому положенні та при куті 45°. Градієнт по концентрації Ni між об'ємом кристалітів і міжзереними границями може сприяти зниженню в'язкості металу у даних ділянках та призводити до нерівномірного рівня твердорозчинного зміцнення.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ НІКЕЛІДУ ТИТАНУ, ОДЕРЖАНИХ ЛАЗЕРНИМ ЗВАРЮВАННЯМ

**А.В. Бернацький¹, О.В. Сіора¹, В.І. Бондарєва¹, В.А. Курило¹, О.М. Сучек¹,
Ю.М. Коваль², Г.С. Фірстов², С.М. Кедровський², В.М. Сліпченко²**

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

²*Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, Київ*

Встановлено залежності зміни характеристик отримуваних з'єднань при варіюванні значень параметрів режимів лазерного зварювання зразків у вигляді дроту діаметром 0,8 мм зі сплаву Ti49,4Ni50,6 з ефектом пам'яті форми. За результатами роботи виконано оптимізацію параметрів технологічних режимів лазерного зварювання вказаного виду зварного з'єднання. Порівняння розрахункових (з отриманих рівнянь регресії) і експериментальних результатів для величини ЗТВ та розміру (діаметру) зварного з'єднання, дають змогу вважати їх збіжність прийнятною (відносне відхилення даних не перевищує 23 % та 20 % відповідно, що задовольняє точності технологічних розрахунків).

Розподіл хімічних елементів у центральній зоні точкового зварного з'єднання, одержаного лазерним зварюванням дротів з Ti+Ni матеріалу було досліджено методом енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії на скануючому електронному мікроскопі «Tescan Mira 3», оснащеному енергодисперсійним аналізатором рентгенівських спектрів «X-MaxN 80» (Oxford Instruments) з програмним забезпеченням для аналізу зображень «Automated AZtecEnergy». Дослідження показали, що в процесі застосування лазерного зварювання, розподіл основних хімічних компонентів залишається рівномірним.

ВПЛИВ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЛАЗЕРНОМУ ЗВАРЮВАННІ СТАЛІ 09Г2С У РІЗНИХ ПРОСТОРОВИХ ПОЛОЖЕННЯХ НА ГЕОМЕТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ФОРМУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

А.В. Бернацкий, О.В. Сіора, Т.М. Набок, М.В. Соколовський, Н.О. Шамсутдінова
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Дослідження впливу газодинамічних процесів при лазерному зварюванні сталі 09Г2С у різних просторових положеннях на геометричні характеристики та форму зварних з'єднань проводили при використанні захисної системи у вигляді коаксіального сопла зі змінними соплами діаметрами 1,0 2,0 та 3,0 мм. При виконанні зварювання, газову систему розташовували над зразком на відстані 3,0 мм від торця сопла. Зварювання виконували на наступному режимі: потужність лазерного випромінювання $P = 2$ кВт, швидкість зварювання $V_{зв} = 1$ м/хв, величина розфокусування $\Delta F = -2$ мм. У якості захисного газу використовували CO_2 , який подавали у зону дії лазерного випромінювання з витратами від 1 л/хв до 32 л/хв.

За результатами порівняльних досліджень побудовані графічні залежності, які характеризують вплив зміни параметрів газодинамічних процесів при лазерному зварюванні сталі 09Г2С, на геометричні характеристики зварних з'єднань при зміні просторового положення при зварюванні для різних діаметрів газового сопла.

Аналіз одержаних залежностей показує, що зміна просторового положення та напрямку зварювання (на підйом чи на спуск), мало впливає на зміну глибини провару. У той же час площа провару у більшому ступені залежить від зміни просторового положення. Встановлено, що для нижнього положення характер залежностей перестає бути лінійним та для діапазону витрат 12...20 л/хв набуває максимальних значень. У той час коли для зварювання у вертикальному положенні характерним є відносно монотонне зростання значень площі провару при збільшенні витрат захисного газу. Найбільша різниця у значеннях площі провару для нижнього та вертикального положення характерна для витрат 12 л/хв та складає близько 35 %.

MECHANISMS OF THE ORDERED STRUCTURES FORMATION IN THERMAL PLASMA WITH OXIDE PARTICLES

V.N. Bondarev, G.S. Dragan

Physics Research Institute Odesa I. I. Mechnikov National University, Odesa

Thermal plasma with particles of metal oxides, which is called smoke plasmas, is widely used in technological processes and natural phenomena. One of the most interesting effects in such an environment is the formation of spatially ordered structures of condensed particles and the formation of molecular clusters and their agglomerates. Attempts to describe such formations, unfortunately, did not lead to the agreement of experimental and calculated data in a wide range of values of the structural factor. Therefore, the authors propose a new thermodynamic model of smoke plasmas, which takes into account the Coulomb interaction along with the influence of their size in the Carnahan-Starling approximation and applies to both thermal smoke plasmas with solid or liquid condensed particles and thick colloidal solutions, which is based on the approximation of one-component plasma, when the studied charged particles are placed on a uniformly distributed background of the opposite compensating charge.

This approach makes it possible to take a decisive step in the theoretical description of the equilibrium characteristics of dense Coulomb systems of the complex (dusty) plasma type, when the well-known approximation of Debye and Hückel may become completely unusable. Then, along with the well-known ratio of d to the screening length, a second independent dimensionless parameter appears which makes it possible to more extend the calculation of thermodynamic functions. At «large» values of, many-particle contributions to the free energy become dominant, and taking them into account for the first time leads to a consistent quantitative interpretation of the experimentally established fact, according to which the screening length in a concentrated electrolyte is an increasing function of its concentration. It has been shown that in known real cases many-particle effects can become dominant, therefore the interpretation of the corresponding experiments at the quantitative (and even qualitative!) level turns out to be possible only within the framework of the theory proposed in the present paper. From the analysis of the calculated phase diagram of systems of the one-component smoke plasmas type, an estimate was obtained for the criterion of

their possible «crystallization». This criterion (applicable primarily for «Coulomb» colloidal suspensions) naturally includes the finite value of d .

It is assumed that the development of the ideas of this work will make it possible to formulate sufficient conditions under which the appearance of equilibrium long-range order becomes possible in real Coulomb media.

IMPROVEMENT OF THE MECHANICAL PROPERTIES AND CORROSION RESISTANCE OF LASER WELDS ON THICK DUPLEX PLATES BY LASER CLADDED BUTTERING

A. Gumenyuk, A. StraÙe, M. Rethmeier

Bundesanstalt für Materialforschung und prüfung (BAM), Berlin, Germany

Because of its excellent corrosion resistance, high tensile strength and high ductility, duplex stainless steel 2205 offers many areas of application. Though laser beam welding accompanied by high cooling rates, duplex steels tend to perform higher ferrite contents in weld metal as the base metal, which leads to a reduction of ductility and corrosion resistance of the weld joint. To overcome this problem, a solution, based on buttering the plate edges by laser metal deposition (LMD) with material containing higher Ni concentrations prior to laser welding was suggested. In this context different process parameters for LMD and different mixtures of duplex and nickel powder, were investigated. In a second step the possibility of welding those edges defect free while achieving balanced austenite-ferrite ratio was verified with metallographic analysis, Electron Backscatter Diffraction (EBSD) and impact testing according to Charpy. The improved corrosion resistance was observed with ASTM G48 standard test method.

СТРУКТУРОВАНІ СВІТЛОВІ ПОЛЯ: ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗОВИХ ПЕРЕХІДІВ, СТРУКТУРНИЙ ПОРЯДОК І ПОРУШЕННЯ В ПЛАЗМІ

Г.С. Драган, А.Я. Бекшаєв, В.В. Кутаров

НДІ фізики Одеського національного університету ім. І.І. Мечникова, Одеса

Останні десятиліття інтенсивно розвиваються методи та пристрої для активного впливу структурованого оптичного поля на мікро- та нанооб'єкти, що відкриває нові можливості для управління тонкими фізичними та хімічними процесами на мікро- та нанорозмірах. Існує кілька видів механічної дії структурованих світлових хвиль. У простих ситуаціях оптичний тиск штовхає дрібні частинки разом із щільністю імпульсу світла (вектор Пойнтінга), тоді як градієнтні сили рухають діелектричні (провідні) частинки до локальних максимумів інтенсивності (мінімумів), які, отже, утворюють ефективні оптичні пастки, здатні переводити захоплені частинки разом з елементами структури поля (оптичний пінцет). У більш складних полях з внутрішньою, чи геометричною хіральністю частинки здійснюють регульоване обертання, яке може бути залежним, або незалежним від їх просторового положення (пінцет із закруткою, зарядами та діелектричними властивостями; складні обертальні та спіральні рухи). Векторні оптичні поля зі складною конфігурацією можуть виконувати неколінеарну дію, продиктовану частиною «спіну» лінійного імпульсу, спрямованого ортогонально, чи протилежно до імпульсу Пойнтінга. Оптичні поля з обертальною природою можуть викликати вибіркові реакції, залежні від хіральності, постачати ексклюзивні інструменти для розрізнення енантіомерів та вимірювання складу матеріалів.

Така різноманітність фізичних проявів передбачає, що структуровані оптичні поля можуть запропонувати унікальні інструменти не тільки для діагностики, але й для навмисного контролю та регуляризації процесів у плазмі. Зокрема, структуроване світло може викликати залежні від заряду рухи в системах заряджених частинок з послідовною генерацією локальних статичних полів (обертання зарядів створює статичне магнітне поле через зворотний ефект Фарадея; їх просторове поділ у зовнішньому електричному полі сприяє ефект Дембера в неоднорідній плазмі). Фотоіндуковані статичні електричні та магнітні поля, а також неоднорідні електромагнітні поля з оптичною частотою «самі по собі» істотно впливатимуть на умови процесів конденсації та зародження, утворення кристалів плазми, їх динаміку плавлення та кристалізації тощо.

В роботі досліджуються способи впливу світлових полів на фізико-хімічні процеси в димовій плазмі, які можуть бути реалізовані за допомогою простих зовнішніх оптичних елементів, наприклад, програмованих просторових модуляторів світла.

АВТОМАТИЗОВАНА УСТАНОВКА ДЛЯ ЕКСПРЕС-АНАЛІЗУ ПЛАЗМОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ГЕТЕРОГЕННІЙ ПЛАЗМІ

Г.С. Драган, О.А. Рімашевський, Г.Л. Шингарьов, М.Ю. Трофименко

НДІ фізики Одеського національного університету ім. І.І. Мечникова, Одеса

Експериментальні дослідження гетерогенної димової плазми на прикладі плазми дугового розряду, або продуктів згорання металізованих композицій представляє великий практичний та науковий інтерес. Це пов'язано з одного боку, з розвитком наукоємних технологій, а з другого боку, з необхідністю вивчення процесів енуклеації, агломерації та формування просторових упорядкованих структур конденсованих частинок оксидів металів. Головною причиною недостатньої вивченості фізичних властивостей гетерогенних систем є нерівноважність фізико-хімічних процесів та структурна неоднорідність об'єму. Конденсовані частинки зароджуються в плазмовому середовищі і тому вони мають достатньо широкий спектр розмірів, що суттєво впливає на міжфазну взаємодію на поверхні. Таким чином, експериментальна установка має забезпечувати вимірювання таких тепло- та електрофізичних характеристик, як температура конденсованої та газової фаз; концентрація електронів та атомів легко іонізуючої домішки; концентрацію та функцію розподілу конденсованих частинок по розмірам та їх заряди; енергію випромінювання газової та конденсованої фаз. Спектральні дослідження проводяться за допомогою монохроматора з дифракційною решіткою 1200 штр. на мм, що дозволяє реєструвати спектр випромінювання з достатньою роздільною здатністю на матрицю з мікроприймачами та забезпечити його запис на комп'ютер. Реєстрація випромінювання на комп'ютері дозволяє одночасно проводити обробку вимірюваних характеристик та в онлайн-режимі побудувати залежності температури частинок та газової фази, концентрації електронів та нейтральних атомів з часом. Одночасно реєструється розсіяння трьох лазерних променів в інфрачервоному та видимому діапазонах спектру під кутами від нуля до 90° відносно падаючого лазерного променя. Випромінювання лазерів модулюється з частотою 100 кГц для виділення розсіяного випромінювання на фоні власного випромінювання плазми. Процес вимірювання керується командами з комп'ютера з використанням спеціальних програм. Вимірювання розсіяння випромінювання необхідно для визначення функції розподілу частинок по розмірам. Крім того, вимірювання розсіяного випромінювання дає можливість виявити наявність просторових упорядкованих структур заряджених частинок. Проведення експерименту повністю автоматизоване, включаючи розрахунки плазмових характеристик і представлення графічних залежностей. Джерелом плазми може бути електричний розряд, або факел продуктів згорання.

PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF BORON ALLOYED AUSTENITIC STAINLESS STEEL PREPARED BY LASER

Drimal Daniel, Kolenic Frantisek, Kovac Lubos

PRVA ZVARACKA a. s., Bratislava Slovak Republic

This contribution presents the results of investigation of welded joints properties of boron alloyed austenitic stainless steels. The austenitic stainless steels AISI 304 with boron content 1.24 wt.% and 1.74 wt.% were used as experimental material. The welding experiments were performed by fibre laser IPG YLR 4500. The influence of welding parameters, composition of shielding gas, thermal cycle slope and using filler materials was investigated with regard to weld joints properties, especially to intergranular corrosion resistance. The possibility of improvement of corrosion resistance by laser beam local surface microstructure modification was investigated. Surface microstructure modification was performed by defocused laser beam heating. Intergranular corrosion resistance was evaluated according to ISO 3651-2 methodology A. Depth of corrosion attack was evaluated by optical microscopy on metallographic sections. Selected weld joints undergo mechanical testing to determine tensile strength test and bend test.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

П.А. Касай, Н.А. Лысенко, В.В. Клочихин, А.А. Педаш

АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина

В настоящей работе проведено сравнительное исследование микроструктуры деталей и механических свойств образцов полученных из традиционно применяемых при изготовлении деталей горячего тракта газотурбинных двигателей жаропрочных сплавов ЭП648-ВИ, Inconel 718, Inconel 625. Изготовление деталей и образцов проводили методом селективного лазерного плавления (3D-принтинга) порошков на установке «EOS M400» с последующими горячим изостатическим прессованием (ГИП) и термической обработкой.

В ходе работы был проведен микрорентгеноспектральный анализ порошков используемых сплавов на соответствие химическому составу. Установлено, что химический состав применяемых порошков и изготовленных методом 3D-принтинга образцов и деталей соответствует требованиям нормативной документации на рассматриваемые материалы.

Микроструктура исследуемых материалов после проведения селективного лазерного сплавления состояла преимущественно из дендритов и характерной структурной неоднородностью, обусловленной формированием зёрен, вытянутых в направлении роста образцов при изготовлении. При этом в образцах четко просматривались зоны послойного сплавления. Анализ фазового состава материалов после ГИП и термической обработки показывал наличие основного Ni–Fe–Cr γ -твердого раствора с наличием карбидов и карбонитридов, а также некоторого количества упрочняющих интерметаллидных фаз типа γ' (Ni₃Ti,Al) и γ'' (Ni₃Nb). В микроструктуре сплавов Inconel 718 и Inconel 625 идентифицирована также избыточная пластинчатая α -фаза, а в сплаве ЭП648-ВИ игольчатая α -Cr.

Механическими испытаниями установлено, что технология селективного лазерного сплавления позволяет получать изделия из жаропрочных сплавов ЭП648-ВИ, Inconel 718, Inconel 625 с уровнем механических свойств, значительно превышающим нормы существующих отраслевых авиационных стандартов. Проведенное исследование позволяет сделать вывод о пригодности указанной технологии для изготовления деталей авиационного назначения и рекомендовать ее использование в серийном производстве.

НОВІ ТЕХНОЛОГІЧНІ МОЖЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ЯКІСНИХ ДЕТАЛЕЙ ВЕЛИКОГО РОЗМІРУ МЕТОДОМ 3D ДРУКУ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОФІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПРОМЕНІВ ТА ДРОТУ

Д.В. Ковальчук

ЧАО «НВО Червона Хвиля», Київ

Не дивлячись на суттєве зростання застосування 3D друку в промисловому виготовленні металевих виробів, реальна частка таких технологій в загальному балансі методів виробництва залишається незначною. Серед головних факторів, які стримують стрімке зростання впровадження адитивного виробництва в реальний сектор промисловості, називають високу собівартість, складність та високу ціну обладнання, обмежені розміри виробів, нижчі показники властивостей матеріалів в порівнянні з традиційними процесами, тощо.

Технологія металевого 3D друку xBeam 3D Metal Printing вже продемонструвала здатність відповідати на ці виклики за рахунок унікального поєднання високої продуктивності, високої точності та низької собівартості виготовлення виробів досить складної форми. Також вже проведені комплексні дослідження структури та властивостей виробів з титанових сплавів, виготовлених таким методом, які підтвердили відповідність вимогам вітчизняних та закордонних галузевих стандартів.

В доповіді будуть представлені останні напрацювання в розвитку технології xBeam, здатні розширити застосування технологій 3D друку в реальному промисловому виробництві, та в цілому підвищити ефективність виготовлення металевих виробів різного застосування.

ЗВАРЮВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ ЛАЗЕРАМИ МАЛОЇ ТА СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ

М.Г. Кораб, В.В. Таланюк, І.К. Сенченков, М.В. Юрженко, М.Г. Менжерес, С.В. Карпова, А.В. Бернацький, В.А. Лукашенко, Д.А. Лукашенко

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

Теоретична частина роботи присвячена математичному моделюванню теплових процесів при лазерному зварюванні з використанням класичної теорії теплопровідності. Термічний цикл при дії випромінювання на поверхню аналізували за допомогою моделей повного теплового балансу, розподіленого поверхневого, точкового, кругового та лінійного теплових джерел. Моделювання процесу зварювання полягало у розв'язанні задачі формування теплових полів у в'язкопружних полімерних матеріалах при рухомому внутрішньому джерелі теплової енергії. Було прийнято, що верхня деталь прозора для лазерного випромінювання, нижня має заданий коефіцієнт поглинання світлового променя, а їх теплофізичні характеристики залежать від температури. Було сформульовано рівняння теплопровідності та визначальні рівняння, доповнені граничними умовами конвективного теплообміну і початковим розподілом температури. Для чисельної реалізації визначених рівнянь використаний метод скінчених елементів, в основі якого лежить альтернативне формулювання задачі.

Експериментально було проведено трансмісійне зварювання малопотужним короткофокусним лазером поліетиленових плівок різних типів. Зварювання внапуск проводили за допомогою діодного лазера потужністю 1 Вт з довжиною хвилі випромінювання 532 нм. Під час зварювання відбувалося формування шва шириною 0,8–1,0 мм та невеликою опуклістю назовні за рахунок розширення розплавленого полімерного матеріалу. Дослідження зварних швів показали їх міцність на рівні основного матеріалу.

Проведено зварювання трансмісійним методом листів полібутену та декількох шарів поліетиленової плівки. Для зварювання було використано установку Epilog Fiber Mark 20, оснащену волоконним інфрачервоним лазером з потужністю 20 Ватт та довжиною хвилі випромінювання 1,062 мкм. За результатами досліджень визначено максимальну глибину проплавлення листів полібутену при даній потужності випромінювання. Показано можливість зварювання до восьми шарів блакитної поліетиленової плівки марок ПВД-108 та ПВД-158.

З використанням волоконного лазера IPG з довжиною хвилі $\lambda = 1,06$ мкм і потужність 400 Вт вивчено вплив на поліетилені різних марок — ПЕ 100 і ПЕ 500, та проведено їх зварювання внапуск.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТОНКОЛИСТОВИХ ВИСОКОМІЦНИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

В.М. Коржик¹, В.Ю. Хаскін², А.А. Гринюк¹, Є.В. Ілляшенко¹, С.І.Пелешенко³, В.В. Квасніцький³, В.О. Щерецький¹

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

²Китайсько-український Інститут зварювання Академії наук провінції Гуандун, КНР

³НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ

В авіакосмічній промисловості наявна стійка тенденція використання міцних легких сплавів на основі алюмінію, магнію і берилію для загального полегшення транспортних засобів і збільшення ваги вантажів та пасажирів. Задача одержання нероз'ємних з'єднань таких сплавів, для створення відповідних конструкцій, переважно є достатньо складною. Складнощі пов'язані із поганою зварюваністю високоміцних сплавів, схильністю до утворення тріщин і пор в з'єднаннях. Окрім проблем зі зварюваністю сплавів існує низка вимог до самих з'єднань. Зазвичай це зменшення розмірів швів для мінімізації зон розміцнення і залишкових деформацій, вимоги високої функціональності, зокрема герметичності, максимального наближення міцності до міцності основного металу тощо. Одним з найбільш актуальних способів зварювання, який відповідає вказаним вимогам, є лазерний. Однак, завдяки жорсткому термічному циклу і обмеженому часу існування зварювальної ванни при використанні цього способу існує висока вірогідність утворення тріщин і внутрішніх пор.

Метою даної роботи є дослідження технологічних особливостей лазерного зварювання тонколистових алюмінієвих сплавів підвищеної міцності, у тому числі кільцевими швами з неповним проплавленням, за умов досягнення герметичного з'єднання при невисокому (до 80 °С) нагріві зварюваних зразків.

Для досягнення цієї мети вирішувалися наступні задачі: вивчення впливу підготовки зварюваних крайок на стабільність глибини провару, попередній вибір режимів зварювання деформованих і високоміцних сплавів, металографічні дослідження одержаних зразків, виявлення характерних дефектів і розробка шляхів їх усунення для одержання бездефектних з'єднань.

В якості матеріалу зразків використовували пластини і прутки з високоміцного сплаву 7075 (система Al–Zn–Mg–Cu–Cr) і, для порівняння, деформованого сплаву 1915 (система Al–Cu–Mn) товщиною $\delta \leq 1,5$ мм. З цих матеріалів виготовлювали пласкі та циліндричні (діаметром до 40 мм) зразки для зварювання лінійних і кільцевих з'єднань. При підготовці крайок таких зразків під зварювання було встановлено, що у разі використання механічного шабрення виникають певні структурні неоднорідності, пов'язані з наявністю залишків окисної плівки. Ці неоднорідності викликають нерівномірне поглинання лазерного випромінювання, що призводить до коливань глибини проплавлення при зварюванні ненаскрізним швом. Для досягнення рівномірного проплавлення окисну плівку необхідно усувати хімічним травленням. Подальші дослідження показали можливість усунення пор і гарячих тріщин при зварюванні зі швидкостями в межах 3...5 м/хв у захисті аргону. При цьому застосування потужності порядку 400 Вт дозволяє отримувати проплавлення 0,5–0,7 мм при ширині швів 0,5 мм. Для герметичного замкнення кільцевих швів застосовували плавне зниження потужності на ділянці переварювання 5...10 мм. Таким чином, показана можливість формування герметичного кільцевого шва на високоміцних алюмінієвих сплавах із шириною і глибиною порядку 0,5 мм при різній товщині зварюваних стінок (1,5 і 3,0 мм) за умов мінімального (до 80 °С) нагріву малогабаритних ($\varnothing 40 \times 50$ мм) деталей.

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЗВАРНИХ ШВІВ ПРИ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМОВОМУ ЗВАРЮВАННІ

В.М. Коржик¹, В.Ю. Хаскін², А.А. Гринюк¹, Є.В. Ілляшенко¹, Д.В. Строгонов¹, І.Д. Гос¹

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

²*Китайсько-український Інститут зварювання Академії наук провінції Гуандун, КНР*

Часткова (до 50 %) заміна лазерної потужності дуговою в гібридному лазерно-плазмовому процесі при збереженні порівняно невеликої ширини швів може зробити такий спосіб зварювання достатньо привабливим для низки промислових завдань. Через значне зниження вартості обладнання він може вдало конкурувати з лазерним зварюванням, яке на сьогодні отримує все більше розповсюдження. За рахунок підвищення термічної локальності та мінімізації залишкових деформацій порівняно з відомими дуговими способами зварювання, лазерно-плазмовою може використовуватися для виготовлення конструкцій з листових матеріалів товщиною до 4 мм. Така задача є актуальною, зокрема, для зварювання нержавіючих сталей при виготовленні конструкцій для хімічної і харчової промисловості.

Метою даної роботи є дослідження особливостей формоутворення швів при лазерно-плазмовому зварюванні нержавіючих сталей товщиною до 4 мм в режимі глибокого проплавлення за умов часткової заміни потужності випромінювання волоконного лазера потужністю стисненої плазмової.

Для досягнення цієї мети вирішувалися наступні задачі: вибір режимів лазерного і плазмового зварювання за критерієм якості формування швів; вибір режимів лазерно-плазмового зварювання за аналогічним критерієм; порівняння трьох способів зварювання для визначення особливостей формоутворення швів при зварюванні з утворенням кейхолу.

В якості матеріалу зразків використовували пластини зі сплаву AISI304 товщиною $\delta = 2$ і 4 мм. Для проведення досліджень було створено лабораторний стенд, постачений головками для лазерного, плазмового і гібридного зварювання. Дослідження з порівняння впливу на одержувану глибину провару бічного і коаксіального способів подачі захисного газу при зварюванні випромінюванням волоконного лазера показали практично ідентичні результати, що свідчить про допустимо низький рівень втрат випромінювання в плазмовому факелі, який утворюється над зварювальною ванною. Подальші дослідження зварювання в діапазоні швидкостей 0,5...2,5 м/хв при лазерній потужності до 2 кВт і струмі зварювання до 100 А продемонстрували прямо пропорційний вплив потужності лазерного випромінювання на глибину проплавлення і

плазмової потужності — на його ширину. Встановлено, що при зварюванні зразків товщиною 2 мм процес переважно є теплопровідним і не вимагає наявності присаджувальних матеріалів. При підвищенні товщини зразків до 4 мм формування швів є кінджальним, при цьому бажано використовувати присаджувальний дріт із швидкістю подачі близькою до швидкості зварювання.

ОСОБЛИВОСТІ РУЙНУВАННЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ЕКОНОМНОЛЕГОВАНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВУ Ti–2,8%Al–5,1%Mo–4,9%Fe ОТРИМАНОВОГО МЕТОДОМ ЕПП

В.А. Костін, Т.Г. Таранова, С.Г. Григоренко, В.Ю. Белоус
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

В останні часи в ІЕЗ ім. Е.О. Патона НАН України під керівництвом академіка С.В.Ахоніна було проведено роботи по виплавці зливків псевдо- β -сплаву Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe з використанням електронно-променевої плавки (ЕПП) з проміжною ємкістю, яка знайшла певне застосування в промисловості для отримання прецизійних титанових сплавів відповідного складу з низьким вмістом газів, домішок та шкідливих неметалевих включень. Застосування електронно-променевої плавки дозволяє підвищити якість зливків сплавів титану, у тому числі сучасних економнолегованих титанових сплавів типу LCB, знизити собівартість їх виробництва за рахунок використання брухту і відходів титанового виробництва.

Використання термічної обробки зварних з'єднань дозволяє певною мірою покращити їх механічні властивості, за рахунок керування хімічною та структурною неоднорідністю металу, заліковуванню дрібних дефектів (пор, мікротріщин), подрібненню зерна та гомогенізації хімічного складу.

В роботі досліджувалась мікроструктура, характер руйнування та механічні властивості економнолегованого псевдо- β титанового сплаву системи Ti–Al–Mo–Fe, отриманого методом ЕПП після різних режимів термообробки. Встановлено, що структура псевдо- β титанового сплаву Ti–2,8%Al–5,1%Mo–4,9%Fe після різних режимів термообробки складається переважно з суміші незначної частки фази альфа-титану та бета титану у різному співвідношенні. Руйнування псевдо- β титанового сплаву відбувається переважно за крихким механізмом. Частка в'язкої фази не перевищує 10...15 %. В результаті проведених досліджень встановлено, що оптимальним режимом термообробки є попередній локальний підігрів ЕП зварного з'єднання до температури 400 °С, який забезпечує рівномірний розподіл структурних складових, підвищує однорідність хімічного складу та забезпечує оптимальні механічні властивості зварних з'єднань (σ_T — 1081 МПа, σ_B — 1114 МПа, δ_5 — 5 %, KCV_{+20} — 4,4 Дж/см²).

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ ВЫДЕРЖЕК НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВА IN625, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Н.А. Лысенко, А.А. Педаш, В.В. Клочихин, П.А. Касай
АО «Мотор Сич», Запорожье

Исследовано влияния длительных выдержек при различных температурах на структуру и свойства сплава IN625 проводили на образцах, изготовленных методом селективного лазерного плавления (3D-принтинга) на установке «EOS M400» после горячего изостатического прессования (ГИП) и термообработки.

Химический состав, механические и жаропрочные свойства образцов, изготовленных из сплава (IN625) методом 3D-принтинга, соответствуют требованиям AMS 7000 для сплава IN625.

Установлено, что длительные выдержки (в течение 700 ч, 1000 ч, 2100 ч) при температуре 900 °С приводят к снижению пластичности и жаропрочности сплава IN625 вследствие выделения из γ -матрицы значительного количества пластинчатых частиц δ -фазы, а также огрубления структуры за счет роста и коагуляции карбидов типа $Cr_{23}C_6$, в особенности, на границах зёрен. Увеличение времени выдержки способствует увеличению количества и размеров пластин δ -фазы, а также огрублению границ зёрен.

Термообработка образцов со сниженными свойствами, наличием большого количества пластин δ -фазы и огрублением границ зёрен при температуре 1180 °C в течение 2 ч, способствует восстановлению механических и жаропрочных свойств до требуемых нормативной документацией норм, что обусловлено гомогенизацией сплава IN625, при которой наблюдается растворение пластинчатой δ -фазы и карбидов типа $Cr_{23}C_6$ в γ -твердом растворе, с последующим выделением карбидов типа $Cr_{23}C_6$ и небольшого количества интерметаллидной γ'' -фазы в виде мелких дискретных частиц, упрочняющих матрицу.

Длительные выдержки при температурах 700 °C (700 ч) и 980 °C (1400 ч) не приводят к образованию пластинчатой δ -фазы.

АДИТИВНІ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ ПОШАРОВОГО ВИГОТОВЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ З ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

В.А. Матвійчук, В.М. Нестеренков

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 і структури із заздалегідь прогнозованими властивостями.

Процес виготовлення виробів таким методом з використанням електронного променя відносно новий, але вже успішно показав великі перспективи свого застосування для виробництва широкої номенклатури деталей та вузлів в авіакосмічній промисловості, турбінобудуванні та в біомедичній галузі. В його основу покладена операція пошарового сплавлення металевих порошків в вакуумі за допомогою електронного променя. Цей підхід відрізняє швидкий перехід до виробництва тривимірних виробів безпосередньо від системи автоматизованого проектування з можливістю використання широкого спектру металів і сплавів, в тому числі тугоплавких і хімічно активних.

Всі існуючі на цей час промислові зразки подібного обладнання належать іноземним компаніям. Вітчизняного устаткування, яке виробляється серійно, не існує.

Технології та обладнання, що створені колективом Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, з самого початку орієнтовані на потреби підприємств України. Для виробництва передбачається застосовувати необхідну виробнику недорогу вітчизняну сировину. Цей підхід надає можливість забезпечити виробництво деталей і вузлів виходячи із потреб споживача та в тісному контакті з ним. Технології, що розробляються, дозволять знизити терміни впровадження у виробництво нових видів продукції, розширити її асортимент, а також створювати принципово нові види продукції із заздалегідь прогнозованими властивостями, виробництво яких неможливо без застосування методів 3D друку.

Мета роботи: створення нових адитивних технологій і обладнання для виробництва виробів заданої форми і структури методами пошарового електронно-променевого сплавлення металевих порошків в вакуумі.

Основні завдання:

- розробка науково-технічних основ, конструкційних і технологічних рішень для створення спеціалізованого обладнання;
- проектування необхідного математичного, алгоритмічного та програмного забезпечення.

Актуальність: розроблені технології і обладнання дозволять виготовляти металеві вироби методом швидкого прототипування.

В результаті проведених науково-дослідних робіт створено макет технологічного обладнання для електронно-променевого 3D наплавлення із застосуванням металевих порошкових матеріалів, розроблені технологічні прийоми виготовлення деталей, отримані експериментальні зразки виробів заданої форми, вивчені їх структура і властивості, а також створені макети виробів промислового та медичного призначення. Доведено, що методи адитивних електронно-променевих технологій дозволяють отримувати литу і однорідну структуру наплавленого металу із заданими властивостями.

ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

В.В. Несін

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

Серед процесів променевої обробки матеріалів спеціальної техніки поширеними є лазерне різання, поверхневе маркування та гравіювання. Матеріалами, що піддаються лазерному різанню, виступають: тонкостінний прокат з низьколеговою, з корозійностійкою та пружинної сталі товщиною від 0,1 до 3 мм, листова сталь 65Г, 95Г, або аналогічні товщиною до 3^{+2} мм, бронза товщиною до $0,5^{+0,5}$ мм, алюмінієві сплави товщиною до 2 мм, будівельний матеріал ізолон з липкою основою загальною товщиною до 15 мм. Гравіювання та маркування застосовується на поверхнях зі сталей, латунні, бронзи, алюмінієвих сплавів, різноманітних пластмас, і на деталях з покриттями, виконаними емалями та поліефірними порошками.

Лазерне різання, маркування та гравіювання зазначених матеріалів мають певні особливі проблеми реалізації цих процесів у практиці застосування. Огляду особливостей процесів, аналізу проблем і синтезу технологічних рекомендацій з якісного використання променевих технологій при виготовленні спеціальної техніки присвячена ця доповідь.

Зокрема: 1) Режими обробки металів та полімерних матеріалів значно різняться. 2) глибини гравіювання деталей з пофарбованою поверхнею відбираються в межах від 0,1 до 0,3 мм. Зосереджене гравіювання має бути в межах товщини шару фарби. Лазерна обробка одночасно і покриття, і металу-основи може призвести до утворення ґрату, видалення якого, за даних умов, неможливе. 3) Різання конструкційних матеріалів з чорних та кольорових матеріалів супроводжується утворенням ґрату, що пов'язане з відбиттям випромінювання, перегрівом та наявністю окислу металу на поверхні. Поява ґрату враховується технологічними припущеннями на обробку (вводяться еквідистанти). Відносне збільшення спостерігається в ряду матеріалів: сталі, бронзи, латуні, алюмінієві сплави. 4) Кисень в зоні різання зменшує ґрат. Але в лазерному гравіюванні кисень збільшує глибину обробки. Тому ґрат в гравіюваних алюмінієвих сплавах видалається додатковою механічною обробкою до втирання фарби. 5) Викривлена від круглої до еліпсоподібної форма перерізу променя впливає на розміри малогабаритних деталей складної форми, що виготовляються з металевих матеріалів. І не впливає на різання ізолону для пакування. 6) Потужний імпульс лазерного променя на початку різання приводить до утворення збільшеного на $\approx 20\%$, отвору ніж на етапі сталого процесу. Таке збільшення виступає концентратором напруження у виробках з тонкостінних матеріалів під навантаженням. По аналогії зі зварним кратером пропонується початок різання вивести за межі матеріалу деталі.

THE INFLUENCE OF FOCUSING CURRENT ON THE PROPERTIES OF ELECTRON BEAM WELDED JOINTS PRODUCED ON 2219 HIGH STRENGTH ALUMINIUM ALLOY

**Miroslav Sahul¹, V. Nesterenkov², M. Rusnyk², Martin Sahul¹,
V. Fedorchuk², S. Motrunich², I. Klochkov²**

¹Slovak University of Technology in Bratislava, Slovakia

²E.O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kyiv

The paper concerns with the analysis of the influence of the focusing current on the geometry and microstructure of aluminium alloy welded joints produced by electron beam welding. 2219 high strength aluminium copper alloy was used as the base material. 2219 aluminium alloy is extensively used in the aerospace industry due to excellent mechanical properties, high strength to weight ratio and good corrosion resistance. Fuselage skins, wing panels, aircraft lip mouth grilles and rocket fuel tanks are some of the applications of the mentioned alloy. The thickness of the 2219 aluminium alloy was 10 mm. Bead on plate welded joints were produced within the study. UL-209M electron beam welding machine was used for production of welded joints. Focusing currents 629, 634, 639, 644 and 649 mA were utilized. Accelerating voltage of 60 kV was set up. Ellipse beam oscillation path was applied during welding. From the weld bead appearance point of view, the higher focusing current resulted in the production of smoother weld bead. Focusing current of 629 mA caused incompletely filled groove in some locations. The situation improved

when 634 mA focusing current was used. The higher focusing currents 639 to 649 mA led to the very smooth weld bead appearance. The smallest weld width was recorded when 629 mA focusing current was used. The weld width reached the value of 3.1 mm. The increase in focusing current to 634 mA resulted in the increase of the weld width to 3.8 mm. Further increase of focusing current to 639 mA caused the rise in the weld width to about 4.7 mm. Similar trend was observed when focusing current of 644 mA was used. The weld width increased to 5.3 mm. Finally, the highest value of the focusing current 649 mA generated the welded joint with the width of 7.2 mm. When assessing the weld root width slight fluctuations were observed when beam currents of 629 and 634 mA were applied. In the case of focusing currents 639, 644 and 649 mA, it can be stated that the higher the focusing current the narrower the weld root. Influence of the focusing current on the cross-sectional area of welded joints was assessed. Except slight deviation in the case of the 629 mA focusing current application, the higher the focusing current the larger the cross-sectional area of weld metal. The microstructure of weld metal consisted of α -aluminium solid solution. The inter-dendrite locations were enriched in alloying elements due to segregation. The influence of focusing current on the dendrite size is evident. The higher the focusing current the larger the dendrite size. Slight fluctuation was observed in the case of the focusing current of 634 mA. The finest dendrites were observed in the case of 629 mA focusing current. The mean dendrite size was 9.2 μm . The coarsest dendrites were documented when the highest focusing current, i.e., 649 mA was used. The mean dendrite size was 12 μm .

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1570, И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЕГО СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В.В. Скрябинский¹, В.М. Нестеренков¹, А.В. Микитчик²

¹*Институт электросваривания ім. Є.О. Патона НАН України, Київ*

²*ГП «Международный центр электронно-лучевых технологий
ИЭС ім. Е.О. Патона НАН України, Киев*

Высокопрочный сплав 1570 системы Al–Mg–Mn–Sc предназначен для замены сплава АМгб в сварных конструкциях летательных аппаратов общего и криогенного назначения. Одним из основных способов соединения элементов таких конструкций является электронно-лучевая сварка (ЭЛС). Целью настоящей работы является изучение особенностей ЭЛС сплава 1570 и исследование механических свойств его сварных соединений в интервале температур 20...293 К.

Установлено, что при ЭЛС сплава 1570 ширина зоны термического влияния (ЗТВ) составляет 2...4 мм, что значительно меньше, чем при ЭЛС сплава АМгб. Металл шва имеет однородную высокодисперсную ячеисто-дендритную структуру. В сварном шве, зоне сплавления и в ЗТВ трещины, скопления эвтектических прослоек и другие дефекты не обнаружены. В основном металле и в металле шва обнаружены достаточно крупные, по видимому, первичные интерметаллиды, содержащие скандий и цирконий.

Временное сопротивление соединений сплава 1570 при понижении температуры испытаний с 293 до 20 К увеличивается с 325 до 525 МПа. Условный предел текучести также повышается с 210 МПа до 270 МПа, а пластичность изменяется незначительно. В то же время ударная вязкость понижается с 38 до 9 Дж/см². Коэффициент прочности сварных соединений при понижении температуры испытаний с 293 до 20 К увеличивается с 0,85 до 0,95. Оценкой чувствительности к концентраторам напряжений служит отношение временного сопротивления образца с надрезом к временному сопротивлению гладкого образца ($\sigma_{\text{вн}}/\sigma_{\text{в}}$). Чувствительность металла сварного шва к надрезу с понижением температуры увеличивается но даже при температурах 77 и 20 К составляет не меньше 0,98...0,84.

В целом сплав 1570 хорошо сваривается электронным лучом и способ ЭЛС можно рекомендовать при изготовлении из него конструкций криогенного назначения.

ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ЗЛИВКІВ, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ 3D ТЕХНОЛОГІЇ ПРИ ПОСЛІДОВНОМУ НАПЛАВЛЕННІ ДРОТОМ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

А.Ю. Тунік¹, Л.І. Адєєва¹, Д.В. Ковальчук², С.Г. Григоренко¹,
Г.О. Полішко¹, С.М. Степанюк¹

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

²ЧАО «НВО Червона Хвиля», Київ

Створення об'єктів за рахунок нанесення послідовних шарів отримало назву «адитивне виробництво». Моделі, виготовлені адитивним методом, можуть застосовуватися на будь-якому виробничому етапі - як для виготовлення дослідних зразків, так і в якості готових виробів. Електронно-променево плавлення є одним з методів адитивного виробництва металевих деталей (в тому числі і титанових) з використанням електронних пучків. Моделі, виготовлені електронно-променевою плавкою, відрізняються монолітністю з відповідною високою міцністю. Електронно-променеві методи представляються найбільш перспективними для розробки технології 3D - наплавлення деталей зі сплавів на основі титану.

Метою роботи було вивчення особливостей формування структури виробів, одержаних методом адитивної технології на xBeam 3D-принтері з використанням титанового дроту. В ролі концентрованого джерела енергії був використаний електронний промінь. В якості вихідного матеріалу для наплавлення використовували титановий дріт складу 6Al, 4V мас. %, товщиною 2 мм.

Досліджено металографічні особливості структури та розподіл мікротвердості по перерізу виробу з псевдо- α -Ті сплаву. Встановлено, що отриманий виріб складається з ~30-ти окремих наплавлених шарів. Кожен наступний шар має термічний вплив (відпуск) на попередній, проте зі збільшенням їхньої кількості цей вплив зменшується, що відображується на особливостях мікроструктури, таких як розмір та форма зерен, мікротвердість окремих зон.

Механічні випробування зразків показали хороший рівень основних механічних властивостей як уздовж, так і поперек обложених шарів: межа міцності 945 і 920 МПа, межа плинності 861 і 836 МПа, відносні подовження 14 %, звуження 39 і 45 % відповідно. Поверхня руйнування отриманих зразків носить переважно в'язкий дрібно-ямковий характер. Однак, спостерігаються окремі ділянки розшарування або по межах великих первинних зерен, або по межах валиків.

Представлені результати демонструють перспективність даного методу і необхідність подальших досліджень.

HYBRID LASER-ARC WELDING OF LASER AND PLASMA-CUT 20 mm THICK STRUCTURAL STEELS WITH AC MAGNETIC SUPPORT

Ömer Üstündağ, Nasim Bakir, Andrey Gumenyuk, Michael Rethmeier

Bundesanstalt für Materialforschung und prüfung (BAM), Berlin, Germany

One of the challenges of the high-power hybrid laser welding of thick steels is the sensitivity of the process of the process to manufacturing tolerances. This usually leads to a time-consuming preparation of the welding edges, such as milling. The study deals with the influence of the edge quality of milled and plasma-cut steel made of S355J2 with a wall thickness of 20 mm on the laser hybrid welded seam quality. Furthermore, the gap bridgeability and the tolerances towards edge misalignment was investigated. An AC magnet was used as backing support to prevent sagging and positioned under the workpiece, to generate an upwards directed electromagnetic pressure. The profiles of the edges and the gap on the top and root side were measured using a digital camera. Single-pass laser hybrid welds of plasma-cut edges could be welded using a laser beam power of just 13.7 kW. A gap bridgeability up to 2 mm and misalignment of edges up to 2 mm could be achieved successful. Additionally, the independence of the cutting side and the welding side was shown, so that samples were welded to the opposite side to their cutting. For evaluation of internal defects or irregularities, X-ray images were carried out. Charpy impact strength tests were performed to determine the toughness of the welds.

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ, КАК НЕОТЪЕМЛЕМАЯ ЧАСТЬ КОМПЛЕКСНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

О.М. Шкрыль, В.В. Куренкова
ООО «Патон Турбайн Текнолоджиз», Киев

Рабочие и сопловые лопатки, в основном изготовленные из жаропрочных никелевых сплавов, являются наиболее важными элементами горячего тракта газовых турбин. Их безотказная работа под воздействием высоких температур, коррозионно-эрозионном воздействии газовой среды и различного рода напряжений в большей мере определяют надежность и ресурс двигателя. За время эксплуатации как в базовом сплаве основы данных изделий, так и в материале различного рода защитных покрытий развиваются процессы старения, коррозии, окисления, деградации, перегрева, усталости, ползучести и др., приводящие к возникновению дефектов и, как следствие, частичной или полной потере их функциональности и исчерпанию ресурсной долговечности.

В настоящее время ремонтные технологии достигли нового уровня и позволяют восстанавливать дорогостоящие детали газотурбинных двигателей, продлевая им жизнь, и таким образом, увеличивая их ресурс.

«One-Stop-Shop» подход, проводимый на одном предприятии, является наиболее перспективным направлением в мировой практике по восстановлению рабочих и сопловых аппаратов. Его полный цикл включает, дефектацию, очистку и удаление всех отработанных покрытий, различные виды ремонта, комплекс необходимых термомеханических операций, нанесение различного рода покрытий, проведение испытаний. Обладая знаниями, навыками, опытом и производственными возможностями в настоящее время «Патон Турбайн Текнолоджиз» осуществляет комплексное восстановление компонентов ГТД, бывших в эксплуатации, с проведением полного цикла ремонта и нанесения различного типа покрытий, необходимых для данного типа изделий.

Электронно-лучевая технология нанесения покрытий, являющаяся базовой, позволяет на финальном этапе процесса комплексного восстановления формировать на изделиях теплозащитные покрытия для повышения их надежности и долговечности. Столбчатая достаточно плотная структура формируемых кристаллитов внешнего керамического слоя обеспечивает запас долговечности теплозащитных систем покрытий при сменных термоциклических нагрузках в процессе эксплуатации. Методом электронно-лучевого осаждения в вакууме получают теплозащитные керамические покрытия на различных типах базовых сплавов и на различных видах связующих металлических подслоев.

На примере двух комплектов рабочих лопаток турбины показано системные подходы и реальный цикл восстановления изделий после эксплуатации, включая этапы дефектации, ремонта, нанесения электронно-лучевого и других типов покрытий. После восстановления лопатки не только успешно прошли испытания, отстояли гарантийный ресурс в турбине и все еще продолжают работать.

ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕРМОБАР'ЄРНОГО ПОКРИТТЯ ТИПУ $\text{CoCrAlY/ZrO}_2\text{-8\%Y}_2\text{O}_3$ ШЛЯХОМ ЛЕГУВАННЯ ПОВЕРХНІ МЕТАЛЕВОГО ШАРУ

К.Ю. Яковчук¹, Г.П. Мьяльница², А.В. Микитчик¹, Ю.Е. Рудой¹

¹ДП «Міжнародний центр електронно-променевої технології
ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України», Київ

²ДП «Науково-виробничий комплекс газотурбобудування «Зоря»–«Машпроект», Миколаїв

Наведено приклади використання термобар'єрних покриттів типу $\text{CoCrAlY/ZrO}_2\text{-8\%Y}_2\text{O}_3$, що наносяться шляхом електронно-променевого випаровування та конденсації у вакуумі (EB-PVD CoCrAlY/YSZ), для захисту лопаток газотурбінних двигунів та установок. Розглянуто перспективи підвищення довговічності таких покриттів шляхом легування поверхні металевого шару.

Представлені результати досліджень варіантів EB-PVD покриттів типу CoCrAlY/YSZ товщиною 40...90/50...110 мкм. В першому варіанті металевий шар CoCrAlY насичувався алюмінієм (або алюмінієм

та кремнієм) на глибину до 25...40 мкм шляхом нанесення на поверхню шлікерної суміші та наступної вакуумної термічної обробки. В іншому варіанті шар CoCrAlY насичувався алюмінієм та хромом на глибину 25...35 мкм шляхом їх випаровування та конденсації у вакуумі, при цьому алюміній конденсується на поверхні CoCrAlY у вигляді рідкої фази з наступною дифузією. Завершувальною технологічною операцією для обох варіантів було нанесення EB-PVD зовнішнього керамічного шару YSZ.

Представлено результати металографічних досліджень EB-PVD CoCrAlY/YSZ покриттів та розподіл хімічних елементів по перерізу покриття. Досліджено вплив вмісту легуючих елементів в поверхневому шарі CoCrAlY на мікроструктуру та властивості (мікротвердість та термоциклічну довговічність) покриттів.

Встановлено допустимий рівень концентрації алюмінію в поверхневому шарі CoCrAlY після насичення з шлікерної суміші (не вище 18 мас. %), перевищення якого приводить до утворення інтерметаллідних фаз типу CoAlCr з високою мікротвердістю (до 8 ГПа), що викликає появу мікротріщин.

На основі результатів проведених досліджень удосконалено технологію шлікерного термодифузійного легування поверхні металевого шару при нанесенні EB-PVD CoCrAlY/YSZ покриттів на лопатки та проведено їх успішні натурні випробування.

MICROSTRUCTURE EVALUATION IN 3D LASER POWDER BED FUSED SUPERALLOY TURBINE BLADES SUBJECTED TO THERMOMECHANICAL TREATMENT

D.A. Lesyk¹, S. Martinez², O.O. Pedash³, V.V. Dzhemelinskiy¹, A. Lamikiz²

¹*NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv*

²*University of the Basque Country, Bilbao, Spain*

³*MOTOR SICH JSC, Zaporizhzhia*

The nickel-based superalloys resistant to oxidation and corrosion, having a good combination of high strength and heat resistance are usually applied for manufacturing of the metal components that works well in high-temperature environments where aluminum and steel would succumb to creep. In particular, Inconel 625A, Inconel 625B, and Inconel 718 alloy products can be successfully fabricated by the metal 3D printing techniques.

Laser 3D printing is an attractive technology for manufacturing metal aeronautical engines or structural components. The laser powder bed fusion (LPBF) process, also known as selective laser melting (SLM) is one of an advanced laser-based additive manufacturing method for the aerospace industry. To increase ductility and strength, the heat post-treatments are used to change the structural-phase state in the LPBF-printed parts with an unconventional (dendritic) microstructure. In most cases, such a microstructure is not unacceptable for critical applications. To incorporate the LPBF technique for safety-critical aeronautical applications, the development of novel post-processing techniques is required. The combined thermomechanical technique for the post-processing of heat-resistant alloy parts fabricated by the LPBF process is proposed.

In this study, the turbine blade test parts were printed using a nickel-based pre-alloyed Inconel 718 powder. The hot isostatic pressing (HIP) followed by homogenization (H) and aging (A) was carried out to form a uniform structure of the LPBF-built turbine blade parts, reducing the material porosity. The shot peening (SP) technique was applied to eliminate surface defects and provide a new surface texture, refining the grains in the subsurface layer. The effects of the post-heat treatments combined with mechanical surface SP treatment on a microstructure, phase/chemical composition, grain refinement, subsurface porosity, and microhardness distribution in the near-surface layers were studied in this work.

Results indicated that the HIP followed by the heat treatments provided required the uniform structure LPBF-built turbine blade parts. On the other hand, the application of the SP treatment after heat treatments led to a further increase in the surface hardness and residual stress values. At the same time, the spherical/ellipsoidal balls and partially melted powder particles were successfully removed from the treated surface by the post-mechanical surface treatment.

ЗАСТОСУВАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПРОМЕНЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ЩЕЛЕПНО-ЛИЦЬОВІЙ ХІРУРГІЇ

І.Ю. Худецький, Ю.В. Антонова-Рафі, О.І. Нестерова, Д.В. Масалов

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

Захворювання і травми щелепно-лицьової області голови часто супроводжуються інфікуванням і є причиною ускладнень (гайморити, синуси ти, менінгіти та інші), які можуть привести до смерті чи інвалідизації пацієнта. Стан цієї області безпосередньо впливає на функціонування шлунково-кишкового тракту і в значній мірі визначає довголіття людини. Стоматологічні проблеми є однією з найпоширеніших патологій. Люди протягом життя неодноразово звертаються до стоматологів, рідше до щелепно-лицьових хірургів.

Останніми роками спостерігається тенденція як до збільшення кількості пацієнтів з переломами кісток лицьового скелету, так і до ускладнення характеру травм за рахунок поєднання ушкоджень обличчя та інших ділянок тіла, що є наслідком транспортних, вуличних, професійних, спортивних і побутових травм.

Переломи щелепи — на сьогодні дуже розповсюджений вид травм, які складають більш ніж 15 % загальної кількості переломів кісток тіла. Травма щелепи призводять до порушення фізіологічної рівноваги м'язів, порушує дихальні, ковтальні, жувальні та мовленнєві функції. Останніми роками спостерігається тенденція як до збільшення кількості пацієнтів з переломами кісток лицьового скелету, так і до ускладнення

характеру травм за рахунок поєднання ушкоджень обличчя та інших ділянок тіла, що є наслідком транспортних, вуличних, професійних, спортивних і побутових травм.

Особливістю надання хірургічної допомоги при проблемах в щелепно-лицьовій хірургії є постійна присутність патогенної та умовно-патогенної інфекції в ротовій порожнині. Ця інфекція присутня, в тому числі під час проведення необхідних оперативних втручань, при стоматологічних маніпуляціях та інших лікувальних заходах. Інфекція є причиною більшості ускладнень та суттєво впливає на ефективність лікування в цілому.

Одним з шляхів підвищення ефективності лікувальних заходів в щелепно-лицьовій хірургії та стоматології є створення локального стерильного середовища в місці проведення маніпуляцій.

Проведені дослідження дозволяють стверджувати, що найбільш ефективним способом створення стерильного середовища в зоні оперативних втручань є застосування конвекційно-інфрачервоних потоків. За рахунок поверхневої та регульованої по глибині дезінфікуючої дії на тканини в зоні операційної рани створюються сприятливі умови для подальшого заживлення рани. Значною перевагою даної технології у порівнянні з іншими методами дезінфекції є можливість зупинки кровотечі за рахунок формування білкової стерильної пломби на поверхні рани м'яких тканин та гемостаз кровотечі з губчастої частини кістки верхньої щелепи. За необхідності окремі маніпуляції з розтину м'яких тканин можна проводити безкровно за процедурою превентивної коагуляції судин в зоні розтину.

Розробка технології зупинки кровотеч та дезінфекції рани при встановленні дентальних імплантатів передбачає визначення медико-технічних вимог до апаратури та діапазони основних параметрів конвекційно-інфрачервоного потоку, що забезпечують зупинку кровотечі та дезінфекцію рани при встановленні дентальних імплантатів.

Розробка цих вимог у свою чергу тісно пов'язана з біофізичними та патоморфологічними характеристиками тканин в зоні встановлення імплантатів, особливістю перебігу патологічних процесів, що привели до необхідності проведення імплантації, особливостями оперативних технологій встановлення імплантатів в стоматології. Важливе значення мають також кінцеві цілі застосування конвекційно-інфрачервоного потоку, граничні умови, що їх обмежують, переваги та недоліки усіх відомих технологій заснованих на фізичних принципах для вирішення поставлених завдань.

Окремим напрямком застосування променевих технологій для стоматології та щелепно-лицьової хірургії є проблеми з виготовлення імплантатів та елементів остеосинтезу.

Зважаючи на те, що в більшості випадків лікувальні заходи протягом життя завершуються протезуванням на пізніх етапах — важливим є також питання створення біобезпечних імплантатів та елементів остеосинтезу. Вони повинні відповідати вимогам біобезпеки та задовольняти механічні вимоги до стоматологічних та щелепних імплантатів.

Ці питання можуть бути вирішені шляхом застосування сплавів з оптимальними механічними властивостями але недостатньою біосумісністю з біоінертним покриттям, нанесеним із застосуванням променевих технологій.

Підсумок. Проведені дослідження по розробці технології зупинки кровотечі і дезінфекції тканин рани при встановленні дентальних імплантатів. Визначені діапазони основних параметрів конвекційно-інфрачервоного потоку, що забезпечують зупинку кровотечі та дезінфекцію рани при встановленні дентальних імплантатів.

Створено спеціалізоване лабораторне обладнання для формування конвекційно-інфрачервоного потоку, яке може бути застосовано при розробці технології зупинки кровотечі та дезінфекції рани при встановленні дентальних імплантатів.

ЛАЗЕРНЕ ЗВАРЮВАННЯ — ПЕРСПЕКТИВНИЙ ПРОЦЕС ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ВІДПОВІДАЛЬНИХ ВИРОБІВ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

**А.К. Царюк¹, В.Д. Шелягін¹, В.Г. Суботін², В.П. Елагін¹,
А.В. Бернацький¹, О.В. Сіора¹**

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

²*ВАТ «Турбоатом», Харків*

Більшість зварних з'єднань корпусних деталей та роторів турбін в енергетичному обладнанні експлуатуються при високих навантаженнях, температурах і тиску та є найбільш відповідальними за його роботоздатність та надійність при тривалій експлуатації. Теплостійкі сталі, з яких їх виготовлено, велика товщина стінки та умови експлуатації вимагають спеціальної технології зварювання, яку регламентовано для дугового зварювання.

Більшість з таких деталей є тілами оберту, сприятливими для механічної розробки крайок, а також збирання під зварювання з високою точністю. Можливість дотримання необхідної форми крайок та зазору між ними є привабливим для застосування лазерного зварювання, провар якого має «кинжальну» форму. Такий спосіб, завдяки високій концентрації нагрівання металу, сприяє зменшенню ширини ЗТВ та рівня залишкових напружень і тому знаходить все більше застосування замість дугового зварювання при виготовленні виробів зварні з'єднання яких повинні мати високі властивості та надійність.

Сучасна технологія лазерного зварювання має багато недоліків. Так, у зварних швах, що виконані лазерним зварюванням у глибоку розробку, може утворюватися знеміцнення у середньої частини шва через зустрічне проростання кристалитів. Також можливе утворення в шві дефектів під негативним впливом плазменого факелу, диму та розбризкування металу. Розроблено різні способи боротьби з плазменним факелом та покращення якості шва. Найбільш поширеними є застосування імпульсних енергетичних впливів, коливання променя за різною формою, використання кількох променів, гібридних способів в комбінації з дуговим чи плазменним процесом, з подачею присадкового матеріалу та інш. Пропанується проводити рафінування від шкідливих домішок та подрібнення структури металу шва за рахунок дії окисно-відновних хімічних реакцій взаємодії з газами (аргоном, CO₂, гелієм та інш.), або з гранюльованими чи аерозольними флюсами та інш. Застосовують лазерне зварювання багатопрхідним способом валиками невеликого перерізу для термічної обробці нижніх шарів металу і підвищення властивостей зварного з'єднання. Припускається, що це дозволить виключити обов'язкову його термообробку.

Численні публікації з лазерного зварювання свідчать про інтенсивний пошук шляхів і способів вдосконалення технології і самого процесу. Проведення досліджень по підвищенню якості швів та розробка технології лазерного зварювання товстостінних деталей є особливо актуальними для отримання надійних зварних з'єднань вузлів енергетичного обладнання нового покоління, розрахованого на ультра — сверхкритичні параметри режиму експлуатації.

ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК

Абдулах В.М. 6, 11

Адеєва Л.І. 9, 24

Аджамский С.В. 6, 11

Антонова-Рафі Ю.В. 9, 27

Ахонин С.В. 6, 8, 12(2)

Вakir N. 8, 24

Бекшаєв А.Я. 8, 15

Белоус В.Ю. (Білоус В.Ю.) 7, 8, 12, 20

Берднікова О.М. 7, 13

Березос С.В. 6, 12

Бернацький А.В. 7(4), 9, 13(2), 14, 18, 29

Bondarev V.N. 8, 15

Бондарєва В.І. 7, 13

Вржижевский Э.Л. 8, 12

Гос І.Д. 6, 19

Григоренко С.Г. 7, 9, 20, 24

Гринюк А.А. 6, 9, 18, 19

Gumenyuk A. 8(2), 15(2)

Демченко В.Ф. 6, 11

Dzhemelinskiy V.V. 9, 27

Драган Г.С. (Dragan G.S.) 8(3), 14, 15, 16

Dgimal Daniel 9, 16

Елагін В.П. 9, 29

Ерохин А.Г. 6, 12

Ілляшенко С.В. 6, 9, 18, 19

Карпова С.В. 7, 18

Касай П.А. 7, 8, 17, 20

Квасницький В.В. 9, 18

Кедровський С.М. 7, 13

Клочихин В.В. 7, 8, 17, 20

Klochkov I. 7, 22

Ковач Lubos 9, 16

Коваль Ю.М. 7, 13

Ковальчук Д.В. 6, 9, 17, 24

Kolenic Frantisek 9, 16

Кононенко А.А. 6, 11

Кораб М.Г. 7, 18

Коржик В.М. 6, 9, 18, 19

Костін В.А. 7, 20

Крикент І.В. 6, 11

Кривцун І.В. 6, 11

Куренкова В.В. 6, 25

Курило В.А. 7, 13

Кутаров В.В. 8, 15

Кушнарьова О.С. 7, 13

Lamikiz A. 9, 27

Lesyk D.A. 9, 27

Лукашенко В.А. 7, 18

Лукашенко Д.А. 7, 18

Лысенко Н.А. 7, 8, 17, 20

Максимов С.Ю. 8, 12

Martinez S. 9, 27

Масалов Д.В. 9, 27

Матвійчук В.А. 6, 21

Менжерес М.Г. 7, 18

Микитчик А.В. 7, 8, 23, 25

Motrunich S. 7, 22

Мяльниця Г.П. 8, 25

Набок Т.М. 7, 14

Несін В.В. 6, 22

Нестеренков В.М. (Nesterenkov V.) 6, 7(2), 21, 22, 23

Нестерова О.І. 9, 27

Педаш А.А. (Pedash O.O.) 7, 8, 9, 17, 20, 27

Пелешенко С.І. 9, 18

Петриченко И.К. 8, 12

Пикулин А.Н. 6, 12

Подольський Р.В. 6, 11

Позняков В.Д. 7, 13

Полішко Г.О. 9, 24

Rethmeier M. 8(2), 15(2)

Рімашевський О.А. 8, 16

Rusynuk M. 7, 22

Рудой Ю.Е. 8, 25

Sahul Martin 7, 22

Sahul Miroslav 7, 22

Северин А.Ю. 6, 12

Селин Р.В. 8, 12

Семенов О.П. 6, 11

Сенченков І.К. 7, 18

Сіора О.В. 7(3), 9, 13(2), 14, 29

Скрябинский В.В. 7, 23

Сліпченко В.М. 7, 13

Соколовський М.В. 7, 14

Степанюк С.М. 9, 24

Straße A. 8, 15

Строгонов Д.В. 6, 19

Суботін В.Г. 9, 29

Сучек О.М. 7, 13

Таланюк В.В. 7, 18

Таранова Т.Г. 7, 20

Трофименко М.Ю. 8, 16

Тунік А.Ю. 9, 24

Üstündağ Ö. 8, 24

Fedorchuk V. 7, 22

Фірстов Г.С. 7, 13

Хаскін В.Ю. 6, 9, 18, 19

Худецький І.Ю. 9, 27

Царюк А.К. 9, 29

Шамсутдінова Н.О. 7, 14

Шелягін В.Д. 9, 29

Шингарьов Г.Л. 8, 16

Шкрыль О.М. 6, 25

Щерецький В.О. 9, 18

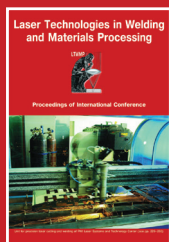
Юрженко М.В. 7, 18

Яковчук К.Ю. 8, 25

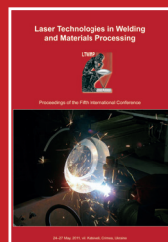
Paton Publishing House

PROCEEDINGS OF CONFERENCES

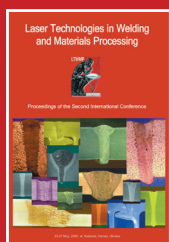
<https://patonpublishinghouse.com/ukr/proceedings/ltwmp>



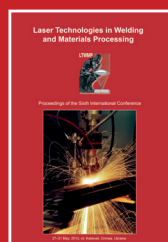
Proceedings of International Conference
«Laser Technologies in Welding and Materials Processing»
19 – 23 May 2003,
Katsiveli, Crimea, Ukraine.



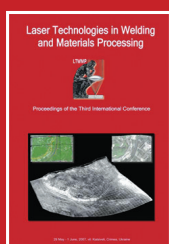
Proceedings of the Fifth International Conference
«Laser Technologies in Welding and Materials Processing»
24 – 27 May 2011,
Katsiveli, Crimea, Ukraine.



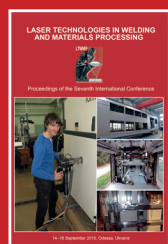
Proceedings of the Second International Conference
«Laser Technologies in Welding and Materials Processing»
23 – 27 May 2005,
Katsiveli, Crimea, Ukraine.



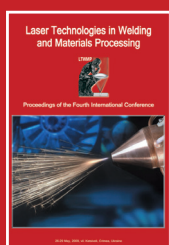
Proceedings of the Sixth International Conference
«Laser Technologies in Welding and Materials Processing»
27 – 31 May 2013,
Katsiveli, Crimea, Ukraine.



Proceedings of the Third International Conference
«Laser Technologies in Welding and Materials Processing»
29 May – 1 June 2007,
Katsiveli, Crimea, Ukraine.



Proceedings of the Seventh International Conference
«Laser Technologies in Welding and Materials Processing»
14 – 18 September 2015,
Odessa, Ukraine.



Proceedings of the Fourth International Conference
«Laser Technologies in Welding and Materials Processing»
26 – 29 May 2009,
Katsiveli, Crimea, Ukraine.



Proceedings of the Eighth International Conference
«Beam Technologies in Welding and Material processing»
11 – 15 September 2017,
Odessa, Ukraine.



Proceedings of the Ninth International Conference
«Beam Technologies in Welding and Material processing»
9 – 13 September 2019,
Odessa, Ukraine.