

Национальная академия наук Украины
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
National Academy of Science of Ukraine
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine

Седьмая Международная конференция
Seventh International Conference

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ
И РОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ**

**MATHEMATICAL MODELLING
AND INFORMATION TECHNOLOGIES IN WELDING
AND RELATED PROCESSES**

Программа и тезисы докладов
15–19 сентября 2014 г., отель «Курортный», г. Одесса, Украина

Program and Abstracts of Papers
15–19 September 2014, Hotel «Kurortny», Odessa, Ukraine

Конференция посвящена памяти академика НАН Украины В.И. Махненко
The Conference is Dedicated to the Memory Prof. V.I. Makhnenko

Организатор:
Международная ассоциация «Сварка»
Organizer:
International Association «Welding»

Киев 2014 Kiev

Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: Тез. докл. Седьмой Межд. конф. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах», 15–19 сентября 2014 г., отель «Курортный», г. Одесса, Украина / Конференция посвящена памяти академика НАН Украины В.И. Махненко. — Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2014. — 48 стр.

Издательский проект *А.Т. Зельниченко*

Компьютерная верстка *Т.Ю. Снегиревой*

Свидетельство серия ДК, № 3497 от 4 июня 2009 г.

© Международная ассоциация «Сварка», 2014

© Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ	7
ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ	15
<i>Головка В.В., Тараборкін Л.А.</i> Математична модель зростання ендогенних неметалевих багатокомпонентних включень у зварному шві	15
<i>Демченко В.Ф., Кривцун И.В., Крикент И.В., Абдулах В.М.</i> Моделирование переходных процессов в импульсной дуге с тугоплавким катодом	15
<i>Демченко В.Ф., Федоров О.П., Шуба И.В.</i> Гравитационная и вибрационная чувствительности методов выращивания кристаллов из расплава	16
<i>Ермоленко Д.Ю., Игнатенко А.В., Головка В.В.</i> Прямое численное моделирование процесса кристаллизации в сварочной ванне при сварке ВПНЛ сталей	16
<i>Kossenko A., Lugovskoy A., Zinigrad M.</i> The Surface Modification of Creep - Resistant Magnesium Alloys by PEO	17
<i>Кривцун И.В., Крикент И.В., Демченко В.Ф., Забиров А., Райсген У., Мокров О.</i> Взаимодействие пучка излучения СО ₂ -лазера с плазмой аргоновой дуги при гибридной (лазер + ТИГ) сварке	17
<i>Кривцун И.В., Семенов И.Л., Игнатов А.В.</i> Численное моделирование взаимодействия дуговой плазмы с поверхностью анода	18
<i>Крикент И.В., Кривцун И.В., Демченко В.Ф., Зельниченко А.Т.</i> Влияние испарения материала анода на характеристики электрической дуги с тугоплавким катодом	19
<i>Максимов С.Ю., Прилипко Е.А., Рыбалкин Е.А.</i> Математическое моделирование распределения электродинамических усилий в сварочной ванне при сварке под водой	19
<i>Маркашова Л.И., Покляцкий А.Г., Кушнарёва О.С., Алексеенко Т.А.</i> Структура и эксплуатационные свойства сварных соединений сложнолегированных сплавов	19
<i>Маркашова Л.И., Тюрин Ю.Н., Колисниченко О.В., Валевиц М.Л., Богачёв Д.Г., Дуда И.М.</i> Структурно-фазовое состояние износостойких композиционных покрытий системы Сг ₃ С ₂ -NiCr, нанесенных с использованием многокамерной детонационной установки	20
<i>Махненко О.В.</i> Задачи математического моделирования физико-химических процессов при сварке и других родственных технологиях	21
<i>Махненко О.В., Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Мужиченко А.Ф.</i> Моделирование НДС при сварке кольцевых разнородных соединений труб из 12 % хромистой стали мартенситного класса	21
<i>Махненко О.В., Миленин А.С., Сапрыкина Г.Ю.</i> Расчетное определение работоспособности трубопровода из алюминия первого сплава АМгЗ первого контура исследовательского реактора с обнаруженными в зоне кольцевых сварных соединений несплошностями	22
<i>Махненко О.В., Мирзов И.В.</i> Расчетная оценка работоспособности ВКУ реактора ВВЕР-1000 (выгородки и сварной шахты) при продлении ресурса до 60 лет с учетом радиационного распухания	23

<i>Махненко О.В., Пустовой А.</i> Разработка сварных конструкций несущих элементов грузового вагона с повышенными характеристиками сопротивления усталости и живучести на основе математического моделирования	24
<i>Миленин А.С., Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И.</i> Особенности численного анализа предельного состояния сварных конструкций на основе критериев пластической неустойчивости	24
<i>Миленин А.С., Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И.</i> Прогнозирование эффективности ремонта элементов магистральных трубопроводов посредством композитных бандажей	25
<i>Миленин А.С., Козлитина С.С., Дзюбак Л.И.</i> Численный анализ технологического процесса электронно-лучевого оплавления поверхности цилиндрических слитков из никелевых сплавов	25
<i>Миленин А.С., Саенко В.Я., Полишко А.А., Козлитина С.С., Дзюбак Л.И.</i> Математическое моделирование технологического процесса ЭШН ЖМ разнородных по высоте крупных стальных слитков крупного сечения	26
<i>Миленин А.С., Шекера В.М., Царинный Б.В., Царинный А.Б.</i> Оценка степени разгрузки участка магистрального трубопровода с помощью сварного бандаж на различных этапах ремонта и эксплуатации	26
<i>Нестеренков В.М., Майстренко А.Л., Дутка В.А., Лукаш В.А.</i> Моделювання тепловиділення при зварюванні й модифікації структури легких сплавів тертям з перемішуванням	27
<i>Підгурський М.І., Підгурський І.М., Фик А.Ю., Грещук М.Г.</i> Моделювання розвитку поверхневих тріщин в зонах зварних з'єднань гнучо зварних ферм	27
<i>Семёнов А.П.</i> Моделирование процессов плавления и переноса электродного металла при сварке плавящимся электродом	28
<i>Семёнов А.П., Кривцун И.В., Губаев К.В.</i> Моделирование проплавления металла при ТИГ, лазерной и гибридной (лазер + ТИГ) точечной сварке	28
<i>Сидорец В.Н., Бушма А.И., Жерносеков А.М.</i> Газовая защита импульсного дугового и лазерно-дугового разрядов	29
<i>Сидорец В.Н., Кривцун И.В., Демченко В.Ф., Крикент И.В., Коваленко Д.В., Коваленко И.В., Павлов А.Г.</i> Расчетное и экспериментальное исследование статических и динамических характеристик аргоновой дуги с тугоплавким катодом	29
<i>Синюк В.С.</i> Использование водорода для предупреждения образования холодных трещин при дуговой сварке конструкционных сталей	30
<i>Слепцов О.И., Сивцев М.Н., Харбин Н.Н.</i> Расчетная модель оценки технологической прочности сварных соединений из высокопрочных низколегированных сталей	30
<i>Слепцов О.И., Тихонов А.Г., Адамов Р.Г.</i> Вопросы численного моделирования остаточных сварочных деформаций	31
<i>Харламов М.Ю., Кривцун И.В., Коржик В.Н., Демьянов А.И.</i> Моделирование процессов плазменно-дугового распыления проволочных материалов	31
СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ	33
<i>Ахонин С.В., Белоус В.Ю., Селин Р.В., Григоренко С.Г.</i> Математическое моделирование влияния термического цикла аргонодуговой сварки с поперечными колебаниями на структурные превращения в зоне термического влияния двухфазного титанового сплава	33
<i>Бердникова Е.Н.</i> Расчет напряжений разрушения с использованием методов количественного фактографического анализа изломов сварных соединений	33

<i>Бондаренко О.Ф., Бондаренко Ю.В., Сафронов П.С., Сидорець В.М.</i> Оптимізація структури багатокміркового джерела живлення для установок контактного мікрозварювання	34
<i>Дубко А.Г., Сидорець В.Н., Зельниченко А.Т., Худецкий И.Ю.</i> Повышение эффективности работы электродов высокочастотных электрохирургических инструментов	34
<i>Жерносеков А.М., Сидорець В.Н.</i> Оптимизация режимов и оборудования для импульсного воздействия на сварочную дугу переменного тока	35
<i>Зельниченко А.Т., Абдулах В.М., Романова И.Ю.</i> Обзор конференций по математическому моделированию в сварке и родственных процессах, проводимых в 1976–2012 гг. под руководством акад. В.И. Махненко	36
<i>Костин В.А.</i> Моделирование структурных превращений и механических свойств в сварных швах высокопрочных низколегированных сталей	36
<i>Кривцун И.В., Демченко В.Ф., Коваленко Д.В., Коваленко И.В.</i> Компьютерная программа «ТИГ-А-ТИГ» для моделирования процесса формирования однопроходных стыковых сварных швов при ТИГ и А-ТИГ сварке сталей	37
<i>Лебедев А.В., Дубко А.Г., Бойко И.А.</i> Математическое моделирование сварки живых тканей	38
<i>Маркашова Л.И., Шелягин В.Д., Кушнарєва О.С., Бердникова Е.Н., Бернацкий А.В.</i> Структурно-фазовое состояние и механические свойства поверхностных слоев стали 38ХНЗМФА, формирующихся в условиях лазерного и лазерно-плазменного легирования	38
<i>Махненко О.В., Прудкий И.И.</i> Выбор сварочных материалов на основе математического моделирования температурных циклов и микроструктурных превращений при сварке конструкционных сталей	39
<i>Минин В.Ф., Минин И.В., Минин О.В.</i> Моделирование волновых процессов при магнитно-импульсной сварке	40
<i>Minin V.F., Minin I.V., Minin O.V.</i> Electro-Arc Magneto-Pulse Installations are an Alternative to Conventional Magneto-Pulse Installations	40
<i>Пентегов І.В., Сидорець В.М., Сафронов П.С., Бондаренко О.Ф., Бондаренко Ю.В.</i> Математичне моделювання процесів передачі енергії від автономного гібридного джерела живлення до зварювального контакту	41
<i>Сурип А.П.</i> Экономическая модель плазменно-лазерной системы на примере процесса получения дроби из некомпактной металлической стружки	41
<i>Тараборкін Л.А., Головка В.В.</i> Багатовимірні моделі для оцінювання складу, структури та механічних властивостей металу шва залежно від легуючої властивості зварювальних матеріалів	42
<i>Тараборкін Л.А., Головка В.В.</i> Імовірнісна модель еволюції розподілу неметалевих включень за розмірами в металі зварних швів	43
<i>Харламов М.Ю., Кривцун И.В., Коржик В.Н., Ткачук В.И.</i> Расчет характеристик плазмы сжатой дуги при воздушно-плазменной резке на прямой и обратной полярности	43
ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ	45

ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ

15 сентября, понедельник

09:00 – 18:00	Приезд, регистрация и размещение участников конференции
19:00 – 21:00	Прием по поводу открытия конференции

16 сентября, вторник

09:00 – 10:40	Пленарные доклады
10:40 – 10:55	Кофе-брейк
10:55 – 13:00	Пленарные доклады
13:00 – 14:30	Обеденный перерыв
14:30 – 16:10	Пленарные доклады
16:10 – 16:25	Кофе-брейк
16:25 – 18:05	Пленарные доклады

17 сентября, среда

09:00 – 10:40	Пленарные доклады
10:40 – 10:55	Кофе-брейк
10:55 – 12:35	Пленарные доклады
13:00 – 14:30	Обеденный перерыв
14:30 – 16:00	Стендовые доклады
20:00 – 23:00	Товарищеский ужин

18 сентября, четверг

09:00 – 10:40	Пленарные доклады
10:40 – 10:55	Кофе-брейк
10:55 – 12:10	Пленарные доклады

19 сентября, пятница

09:00 – 11:00	Круглый стол «Современное состояние и перспективы развития математических методов в сварке и родственных процессах»
---------------	---

16 сентября, вторник

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

Сопредседатели –

академик НАН Украины И.В. Кривцун, д.т.н. В.Ф. Демченко

- 09:00 – 09:25 **Открытие конференции**
- 09:25 – 09:50 **Задачи математического моделирования физико-химических процессов при сварке и других родственных технологиях**
Махненко О.В.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина
- 09:50 – 10:15 **Моделирование процессов плавления и переноса электродного металла при сварке плавящимся электродом**
Семёнов А.П.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина
- 10:15 – 10:40 **Численное моделирование взаимодействия дуговой плазмы с поверхностью анода**
Кривцун И.В.^{1, 2}, Семенов И.Л.², Игнатов А.В.²
¹*Гуандунский генеральный научно-исследовательский институт промышленных технологий (Гуанчжоуский генеральный научно-исследовательский институт цветных металлов), Гуанчжоу, КНР*
²*Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина*
- 10:40 – 10:55 **Кофе-брейк**
- 10:55 – 11:20 **Особенности численного анализа предельного состояния сварных конструкций на основе критериев пластической неустойчивости**
Миленин А.С., Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина
- 11:20 – 11:45 **Гравитационная и вибрационная чувствительности методов выращивания кристаллов из расплава**
Демченко В.Ф.¹, Федоров О.П.², Шуба И.В.¹
¹*Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина*
²*Институт космических исследований НАНУ-НКАУ, Киев, Украина*
- 11:45 – 12:10 **Моделирование развития поверхностных трещин в зонах сварных соединений гнуто сварных ферм**
Підгурський М.І., Підгурський І.М., Фик А.Ю., Грещук М.Г.
Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, Тернопіль, Україна

- 12:10 – 12:35 **Структура и эксплуатационные свойства сварных соединений сложнолегированных сплавов**
Маркашова Л.И., Покляцкий А.Г., Кушнарера О.С., Алексеенко Т.А.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина
- 12:35 – 13:00 **The Surface Modification of Creep - Resistant Magnesium Alloys by PEO**
Kossenko A., Lugovskoy A., Zinigrad M.
Ariel University, Ariel, Israel
- 13:00 – 14:30 **Обеденный перерыв**

Председатель – д.т.н. В.Ф. Демченко

- 14:30 – 14:55 **Моделирование проплавления металла при ТИГ, лазерной и гибридной (лазер + ТИГ) точечной сварке**
Семёнов А.П., Кривцун И.В., Губаев К.В.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина
- 14:55 – 15:20 **Газовая защита импульсного дугового и лазерно-дугового разрядов**
Сидорец В.Н., Бушма А.И., Жерносеков А.М.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина
- 15:20 – 15:45 **Разработка сварных конструкций несущих элементов грузового вагона с повышенными характеристиками сопротивления усталости и живучести на основе математического моделирования**
Махненко О.В., Пустовой А.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина
- 15:45 – 16:10 **Прогнозирование эффективности ремонта элементов магистральных трубопроводов посредством композитных бандажей**
Миленин А.С., Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина
- 16:10 – 16:25 **Кофе-брейк**
- 16:25 – 16:50 **Математическое моделирование распределения электродинамических усилий в сварочной ванне при сварке под водой**
Максимов С.Ю.¹, Прилипко Е.А.¹, Рыбалкин Е.А.²
¹*Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина*
²*ИППФБ, Киев, Украина*
- 16:50 – 17:15 **Расчетная оценка работоспособности ВКУ реактора ВВЕР-1000 (выгородки и сварной шахты) при продлении ресурса до 60 лет с учетом радиационного распухания**
Махненко О.В., Мирзов И.В.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

- 17:15 – 17:40 **Математическое моделирование технологического процесса ЭШН ЖМ разнородных по высоте крупных стальных слитков крупного сечения**
Миленин А.С., Саенко В.Я., Полишко А.А., Козлитина С.С., Дзюбак Л.И.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина
- 17:40 – 18:05 **Моделювання тепловиділення при зварюванні й модифікації структури легких сплавів тертям з перемішуванням**
Нестеренков В.М.¹, Майстренко А.Л.², Дутка В.А.², Лукаш В.А.²
¹*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ, Київ, Україна*
²*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля, Київ, Україна*

17 сентября, среда

Председатель – д.т.н. О.В. Махненко

- 09:00 – 09:25 **Моделирование переходных процессов в импульсной дуге с тугоплавким катодом**
Демченко В.Ф.¹, Кривцун И.В.¹, Крикент И.В.², Абдулах В.М.¹
¹*Інститут електросварки ім. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина*
²*Днепродзержинский государственный технический университет, Днепродзержинск, Украина*
- 09:25 – 09:50 **Влияние испарения материала анода на характеристики электрической дуги с тугоплавким катодом**
Крикент И.В.¹, Кривцун И.В.², Демченко В.Ф.², Зельниченко А.Г.²
¹*Днепродзержинский государственный технический университет, Украина*
²*Інститут електросварки ім. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина*
- 09:50 – 10:15 **Математична модель зростання ендогенних неметалевих багатоконпонентних включень у зварному шві**
Головко В.В.¹, Тараборкін Л.А.²
¹*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, НАНУ, Київ, Україна*
²*НТУУ «КПІ», Київ, Україна*
- 10:15 – 10:40 **Расчетное и экспериментальное исследование статических и динамических характеристик аргоновой дуги с тугоплавким катодом**
Сидорец В.Н.¹, Кривцун И.В.¹, Демченко В.Ф.¹, Крикент И.В.², Коваленко Д.В.¹, Коваленко И.В.¹, Павлов А.Г.¹
¹*Інститут електросварки ім. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина*
²*Днепродзержинский государственный технический университет, Украина*
- 10:40 – 10:55 **Кофе-брейк**

- 10:55 – 11:20 **Численный анализ технологического процесса электронно-лучевого оплавления поверхности цилиндрических слитков из никелевых сплавов**
Миленин А.С., Козлитина С.С., Дзюбак Л.И.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина
- 11:20 – 11:45 **Оценка степени разгрузки участка магистрального трубопровода с помощью сварного бандажа на различных этапах ремонта и эксплуатации**
Миленин А.С., Шекера В.М., Царинный Б.В., Царинный А.Б.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина
- 11:45 – 12:10 **Использование водорода для предупреждения образования холодных трещин при дуговой сварке конструкционных сталей**
Синюк В.С.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина
- 12:10 – 12:35 **Расчетная модель оценки технологической прочности сварных соединений из высокопрочных низколегированных сталей**
Слепцов О.И., Сивцев М.Н., Харбин Н.Н.
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова, Якутск, Россия
- 13:00 – 14:30 **Обеденный перерыв**

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

- 14:30 – 16:00
- 1. Математическое моделирование влияния термического цикла аргонодуговой сварки с поперечными колебаниями на структурные превращения в зоне термического влияния двухфазного титанового сплава**
Ахонин С.В., Белоус В.Ю., Селин Р.В., Григоренко С.Г.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина
 - 2. Расчет напряжений разрушения с использованием методов количественного фактографического анализа изломов сварных соединений**
Бердникова Е.Н.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина
 - 3. Оптимізація структури багатокміркового джерела живлення для установок контактної мікрозварювання**
Бондаренко О.Ф.¹, Бондаренко Ю.В.¹, Сафронов П.С.¹, Сидорець В.М.²
¹*Донбаський державний технічний університет, Алчевськ, Україна*
²*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ, Київ, Україна*
 - 4. Повышение эффективности работы электродов высокочастотных электрохирургических инструментов**
Дубко А.Г., Сидорец В.Н., Зельниченко А.Т., Худецкий И.Ю.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

5. **Оптимизация режимов и оборудования для импульсного воздействия на сварочную дугу переменного тока**
Жерносеков А.М., Сидорец В.Н.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина
6. **Обзор конференций по математическому моделированию в сварке и родственных процессах, проводимых с 1975 по 2012 гг. под руководством акад. В.И. Махненко**
Зельниченко А.Т., Абдулах В.М., Романова И.Ю.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина
7. **Моделирование структурных превращений и механических свойств в сварных швах высокопрочных низколегированных сталей**
Костин В.А.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина
8. **Компьютерная программа «ТИГ-А-ТИГ» для моделирования процесса формирования однопроходных стыковых сварных швов при ТИГ и А-ТИГ сварке сталей**
Кривцун И.В., Демченко В.Ф., Коваленко Д.В., Коваленко И.В.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина
9. **Математическое моделирование сварки живых тканей**
Лебедев А.В., Дубко А.Г., Бойко И.А.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина
10. **Структурно-фазовое состояние и механические свойства поверхностных слоев стали 38ХНЗМФА, формирующихся в условиях лазерного и лазерно-плазменного легирования**
Маркашова Л.И., Шелягин В.Д., Кушнарева О.С., Бердникова Е.Н., Бернацкий А.В.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина
11. **Выбор сварочных материалов на основе математического моделирования температурных циклов и микроструктурных превращений при сварке конструкционных сталей**
Махненко О.В., Прудкий И.И.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина
12. **Моделирование волновых процессов при магнитно-импульсной сварке**
Минин В.Ф., Минин И.В., Минин О.В.
Сибирская государственная геодезическая академия, Новосибирск, Россия
13. **Electro-Arc Magneto-Pulse Installations are an Alternative to Conventional Magneto-Pulse Installations**
Minin V.F., Minin I.V., Minin O.V.
Siberian State Academy of Geodesy, Novosibirsk, Russia
14. **Математичне моделювання процесів передачі енергії від автономного гібридного джерела живлення до зварювального контакту**
Пентегов І.В.¹, Сидорець В.М.¹, Сафронов П.С.², Бондаренко О.Ф.², Бондаренко Ю.В.²
¹*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ, Київ, Україна*
²*Донбаський державний технічний університет, Алчевськ, Україна*

15. **Экономическая модель плазменно-лазерной системы на примере процесса получения дроби из некомпактной металлической стружки**
Сурин А.П.
ООО «Сооружение», Москва, РФ
16. **Багатовимірні моделі для оцінювання складу, структури та механічних властивостей металу шва залежно від легуючої властивості зварювальних матеріалів**
Тараборкін Л.А.¹, Головка В.В.²
¹*НТУУ «КПІ», Київ, Україна*
²*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ, Київ, Україна*
17. **Імовірнісна модель еволюції розподілу неметалевих включень за розмірами в металі зварних швів**
Тараборкін Л.А.¹, Головка В.В.²
¹*НТУУ «КПІ», Київ, Україна*
²*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ, Київ, Україна*
18. **Расчет характеристик плазмы сжатой дуги при воздушно-плазменной резке на прямой и обратной полярности**
Харламов М.Ю.², Кривцун И.В.^{1, 2}, Коржик В.Н.^{1, 2}, Ткачук В.И.²
¹*Гуандунский генеральный научно-исследовательский институт промышленных технологий (Гуанчжоуский генеральный научно-исследовательский институт цветных металлов), Гуанчжоу, КНР*
²*Інститут електросварки ім. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина*

18 сентября, четверг

Председатель – д.т.н. В.Н. Сидорец

- 09:00 – 09:25 **Структурно-фазовое состояние износостойких композиционных покрытий системы $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, нанесенных с использованием многокамерной детонационной установки**
Маркашова Л.И., Тюрин Ю.Н., Колисниченко О.В., Валевич М.Л., Богачёв Д.Г., Дуда И.М.
Інститут електросварки ім. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина
- 09:25 – 09:50 **Моделирование процессов плазменно-дугового распыления проводочных материалов**
Харламов М.Ю.², Кривцун И.В.^{1, 2}, Коржик В.Н.^{1, 2}, Демьянов А.И.²
¹*Гуандунский генеральный научно-исследовательский институт промышленных технологий (Гуанчжоуский генеральный научно-исследовательский институт цветных металлов), Гуанчжоу, КНР*
²*Інститут електросварки ім. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина*

- 09:50 – 10:15 **Взаимодействие пучка излучения CO₂-лазера с плазмой аргоновой дуги при гибридной (лазер + ТИГ) сварке**
Кривцун И.В.¹, Крикент И.В.¹, Демченко В.Ф.¹, Забиров А.², Райсген У.², Мокров О.²
¹*Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина*
²*Институт сварки и соединения, Аахенский университет, Германия*
- 10:15 – 10:40 **Прямое численное моделирование процесса кристаллизации в сварочной ванне при сварке ВПНЛ сталей**
Ермоленко Д.Ю., Игнатенко А.В., Головки В.В.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина
- 10:40 – 10:55 **Кофе-брейк**
- 10:55 – 11:20 **Расчетное определение работоспособности трубопровода из алюминиевого сплава АМгЗ первого контура исследовательского реактора с обнаруженными в зоне кольцевых сварных соединений несплошностями**
Махненко О.В., Миленин А.С., Сапрыкина Г.Ю.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина
- 11:20 – 11:45 **Моделирование НДС при сварке кольцевых разнородных соединений труб из 12 % хромистой стали мартенситного класса**
Махненко О.В., Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Мужиченко А.Ф.
Институт электросварки им. Е.О. Патона, НАНУ, Київ, Україна
- 11:45 – 12:10 **Вопросы численного моделирования остаточных сварочных деформаций**
Слепцов О.И., Тихонов А.Г., Адамов Р.Г.
Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия

19 сентября, пятница

- 09:00 – 11:00 Круглый стол «Современное состояние и перспективы развития математических методов в сварке и родственных процессах».
Заккрытие конференции

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗРОСТАННЯ ЕНДОГЕННИХ НЕМЕТАЛЕВИХ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ВКЛЮЧЕНЬ У ЗВАРНОМУ ШВИ

В.В. Головка², Л.А. Тараборкін¹

¹НТУУ «КПІ», Київ, Україна

²Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ, Київ, Україна

Ендогенні включення виникають у металі шва як результат хімічних реакцій і становлять основну масу включень, наявних у зварних швах. У зв'язку з численними даними про вплив неметалевих включень на структуру метала шва і складністю й трудомісткістю експериментальних досліджень актуальним є створення математичних моделей, які б дозволили на основі чисельного комп'ютерного експерименту прогнозувати кінетику формування включень.

Наявні в науковій літературі математичні моделі для практичного прогнозування складу, розміру та кількості неметалевих включень, унаслідок намагання спростити їх комп'ютерну реалізацію, не вповні відповідають істотним особливостям фізико-хімічних і теплофізичних процесів при зварюванні. Зокрема, йдеться про необхідність урахування суттєвої нестационарності, просторової неоднорідності й гетерогенності відповідних процесів, що відбуваються не тільки в рідкому металі, але й у двофазовій зоні в міждендритних об'ємах.

Покладений в основу запропонованої математичної моделі фізико-хімічний опис процесу формування неметалевих включень урахує зміну фізичних параметрів у діапазоні температур під час охолодження металу зварної ванни від 2300 до 1670 К відповідно до реального термічного циклу зварювання. Формування включень починається в рідкому металі зварної ванни і продовжується в двофазовій зоні. Зростання включення відбувається в дифузійній комірці визначеного розміру за механізмом реакційної дифузії, а продукти хімічних реакцій адсорбуються на поверхні включення. Враховано також різні ймовірності утворення включень залежно від їхніх температур плавлення, так що, на відміну від відомих моделей, в певних температурних піддіапазонах розглядаються різні набори хімічних реакцій. На поверхні зростаючого включення виконується балансова умова типу умови Стефана.

Комп'ютерна програма за розробленою моделлю, створена за допомогою системи програмування Visual C⁺⁺, була використана для чисельного прогнозування складу оксидних неметалевих включень.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИМПУЛЬСНОЙ ДУГЕ С ТУГОПЛАВКИМ КАТОДОМ

В.Ф. Демченко¹, И.В. Кривцун¹, И.В. Крикент², В.М. Абдулах¹

¹Інститут електросварки ім. Є.О. Патона НАНУ, Київ, Україна

²Днепродзержинский государственный технический университет, Украина

На основе самосогласованной математической модели процессов переноса энергии, импульса, массы и заряда в столбе и анодной области нестационарной электрической дуги с тугоплавким катодом проведен детальный численный анализ динамических характеристик аргоновой дуги с вольфрамовым катодом и медным водоохлаждаемым анодом при импульсном изменении электрического тока в диапазоне 50–200 А. Исследована динамика горения дуги при импульсном увеличении и уменьшении тока на переднем и заднем фронтах импульса, соответственно, при длительностях фронтов 20, 100 и 200 мкс. Показано, что газодинамические процессы в столбе дуги, являющиеся наиболее инерционными, вызывают существенное различие в динамике переходных процессов в дуге на переднем и заднем фронтах импульса и это различие тем больше, чем меньше их длительность. Установлено, что при длительности фронта импульса более 200 мкс переходные процессы в дуговой плазме протекают в режиме последовательной смены стационарных состояний, соответствующих текущей величине тока. В наибольшей степени эффекты нестационар-

ности при горении дуги в импульсном режиме проявляются в изменении характеристик ее анодной области. Изменение во времени плотности электрического тока и плотности теплового потока в анод в центре области анодной привязки дуги имеет немонотонный характер с образованием локального максимума (на переднем фронте импульса) и минимума (на заднем фронте), которые достигаются к моменту времени, соответствующему завершению подъема или спада тока. При малой длительности переднего фронта импульса тока (20 мкс) максимальная плотность тока в осевой зоне анодной области вдвое превышает соответствующую величину для стационарной дуги при токе 200 А. Экстремальное изменение электрических и тепловых характеристик анодной области дуги при импульсно-дуговой сварке неплавящимся электродом может приводить к важному технологическому результату — существенному увеличению проплавления способности процесса сварки.

ГРАВИТАЦИОННАЯ И ВИБРАЦИОННАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МЕТОДОВ ВЫРАЩИВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ ИЗ РАСПЛАВА

В.Ф. Демченко¹, О.П. Федоров², И.В. Шуба¹

¹*Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина*

²*Институт космических исследований НАНУ-НКАУ, Киев, Украина*

Сформулирована математическая модель тепловых и гидродинамических процессов при выращивании кристаллов из расплава по схеме Бриджмена и методом зонной плавки. Модель базируется на уравнении конвективно-кондуктивного переноса энергии и уравнениях движения вязкой несжимаемой жидкости в осесимметричной постановке с учетом воздействия на расплав подъемной силы Архимеда и термокапиллярной силы Марангони. Приведены результаты численных расчетов тепловых и гидродинамических процессов в расплавленной зоне при выращивании кристаллов указанными методами в земных условиях и в условиях малой гравитации. Изучено влияние на гидродинамику расплава аксиальных вибрационных возмущений различной частоты и амплитуды для двух характерных диапазонов вибрационных ускорений: 1) суммарное ускорение (фоновое ускорение гравитации + вибрационное ускорение) остается знакопостоянным, 2) суммарное ускорение меняет знак в течение одного периода вибрации. В первом случае осцилляции температурного поля и течения расплава, вызванные вибрационными возмущениями, затухают при увеличении частоты вибрации. При выращивании кристалла методом Бриджмена наложение вибрации способствует устранению слабоинтенсивных неустойчивых вихрей вблизи фронта кристаллизации. Во втором характерном диапазоне вибрационных ускорений их воздействие на гидродинамику расплава в методе зонной плавки ограничивается периодической сменой направления вращения вихревого течения при сохранении его устойчивости. Напротив, при выращивании кристалла по схеме Бриджмена под воздействием вибрационных ускорений из второго диапазона возникает релей-тейлоровская неустойчивость течения расплава, которая может негативно сказываться на формировании кристалла. Принципиальное различие гидродинамики расплава в двух рассматриваемых способах выращивания кристаллов обусловлено различием теплового состояния расплава: в схеме Бриджмена температура монотонно изменяется вдоль аксиальной координаты, тогда как в методе зонной плавки формируется температурное поле симметричное относительно некоторого аксиального сечения в средней части расплава. Из этого следует, что метод зонной плавки является менее чувствительным к потере устойчивости течения расплава при наложении интенсивного (по отношению к величине фоновой гравитации) вибрационного воздействия. Такие условия неизбежно возникают при выращивании кристалла в орбитальном полете.

ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В СВАРОЧНОЙ ВАННЕ ПРИ СВАРКЕ ВПНЛ СТАЛЕЙ

Д.Ю. Ермоленко, А.В. Игнатенко, В.В. Головки

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

Согласно литературным данным прямые методы моделирования подразумевают, что моделируется вся дендритная структура или существенная ее часть. Для того чтобы реализовать это, эволюция твердой и жидкой фаз должны рассчитываться в пространстве и во времени одновременно и согласовано. Исполни-

зованный в данной работе метод моделирует развитие кристаллизационной структуры путем явного отслеживания поверхности раздела фаз.

Особенностью моделирования процесса кристаллизации при сварке ВПНЛ сталей, является необходимость учета влияния различных факторов (легирующие элементы, неметаллические включения) на поверхностное натяжение на границе раздела фаз.

Разработанная модель основывается на локальной нестабильности плоского фронта кристаллизации в условиях высоких скоростей кристаллизации. Основным уравнением модели является уравнение, связывающее фактическую скорость движения границы раздела фаз в узле расчетной сетки с фактическим переохлаждением в этом узле. Эта связь осуществляется с помощью кинетического коэффициента роста, который является константой материала. Кроме общего начального переохлаждения системы, в модели учитываются концентрационное переохлаждение, обусловленное диффузией примеси, переохлаждение, обусловленное изменением наклона кинетического ликвидуса и переохлаждение обусловленное искривлением границы фаз (эффект Гиббса–Томсона). Это позволяет, с высокой точностью проводить моделирование процесса кристаллизации в сварочной ванне, исходя только из начальных условий процесса и констант материала.

Полученные результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными по определению кристаллизационной структуры металла шва реальных сварных соединений ВПНЛ сталей.

THE SURFACE MODIFICATION OF CREEP - RESISTANT MAGNESIUM ALLOYS BY PEO

A. Kossenko, A. Lugovskoy, M. Zinigrad

Ariel University, Ariel, Israel

Oxide ceramic coatings have been produced on Al–Ca–Sr magnesium alloys by plasma electrolytic oxidation (PEO) using various concentration of sodium silicate in weakly alkaline electrolyte. Potential-time responses were very varied for PEO in different electrolytes. A coating is formed from three sublayers (outer, inner and transition), which differ significantly in structure, porosity, and composition. The main compounds of coating's outer layer are periclase and forsterite in the dilute electrolytes and forsterite and various modifications of silicon oxide in the high concentrated electrolyte. The greatest hardness (874.7 HV10) of an oxide ceramic layer on the magnesium alloys was obtained in the outer sublayer of the coating; the inner oxide layer has a smaller hardness (236.1–458.6 HV10). Coatings derived using all electrolytes provided good corrosion resistance.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПУЧКА ИЗЛУЧЕНИЯ СО₂-ЛАЗЕРА С ПЛАЗМОЙ АРГОНОВОЙ ДУГИ ПРИ ГИБРИДНОЙ (ЛАЗЕР + ТИГ) СВАРКЕ

*И. Кривцун¹, И. Крикент¹, В. Демченко¹,
А. Забиров², У. Райсген², О. Мокров²*

¹*Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина*

²*Институт сварки и соединения, Аахенский университет, Аахен, Германия*

Предложена самосогласованная математическая модель процессов энерго-, массо- и электропереноса в плазме столба и анодной области стационарной аргоновой дуги с тугоплавким катодом при воздействии на нее сфокусированного пучка излучения СО₂-лазера непрерывного действия, распространяющегося вдоль столба дуги. Для математического описания процессов, протекающих в такой системе, используется однотемпературная модель дуговой плазмы, учитывающая дополнительный нагрев плазмы за счет поглощения лазерного излучения, а также ее многокомпонентность, связанную с испарением металла с поверхности анода.

Проанализировано влияние мощности лазерного пучка и теплового состояния поверхности анода на тепловые и электромагнитные характеристики столба и анодной области дуги. Показано, что в результате дополнительного локального нагрева дуговой плазмы лазерным излучением ее температура в приосевой зоне столба дуги может возрастать на 5000–10000 К по сравнению с обычной дугой при ТИГ-сварке. Это приводит к существенной перестройке пространственных распределений электрического потенциала и

плотности электрического тока в прианодной области дуги, а также плотности теплового потока, вводимого дугой в анод, изменяя тем самым распределенные и интегральные характеристики ее теплового и динамического воздействия на свариваемый металл. Установлено, что в результате воздействия сфокусированного лазерного пучка на дуговую плазму возникает эффект контрагирования электрического тока в центре области анодной привязки дуги и соответствующего увеличения плотности теплового потока, вводимого дугой в анод при гибридной сварке. Это способствует увеличению доли вкладываемой мощности, идущей на плавление свариваемого металла и, соответственно, на увеличение проплавляющей способности гибридного (лазерно-дугового) источника тепла.

Исследовано влияние поглощения и рефракции лазерного излучения в дуговой плазме на характеристики взаимодействующего с ней лазерного пучка и его тепловое воздействие на поверхность металла анода в условиях гибридной сварки. Показано, что поглощение лазерного пучка в дуговой плазме приводит к некоторому уменьшению мощности излучения, доходящей до поверхности анода, при этом размер пятна фокусировки пучка на поверхности анода практически не изменяется, т.е. рефракция пучка в дуговой плазме оказывается малосущественной.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДУГОВОЙ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ АНОДА

И.В. Кривцун^{1, 2}, И.Л. Семенов², А.В. Игнатов²

¹*Гуандунский генеральный научно-исследовательский институт промышленных технологий
(Гуанчжоуский генеральный научно-исследовательский институт цветных металлов),*

Гуанчжоу, КНР

²*Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина*

Численное исследование взаимодействия дуговой плазмы атмосферного давления с поверхностью электродов является одной из ключевых проблем математического моделирования процессов дуговой сварки. Особенности поведения плазмы в приэлектродных областях сварочной дуги оказывают существенное влияние, как на ее энергетический баланс, так и на характер ее теплового и электромагнитного взаимодействия со свариваемым металлом.

На сегодняшний день теория катодных процессов в электрических дугах развита достаточно хорошо. Современный обзор моделей, использующихся для описания катодной области дуги высокого давления. С другой стороны, особенности физических процессов, происходящих вблизи анода, на данный момент изучены недостаточно. В частности, существующие модели не позволяют самосогласованным образом учесть взаимодействие тепловых, электромагнитных и газодинамических процессов, протекающих в анодном слое. Описание анодных процессов в условиях дуговой сварки осложняется также наличием паров металла-анода, которые оказывают сильное влияние на характеристики плазмы вблизи поверхности электродного материала или свариваемого изделия. Таким образом, проблема построения наиболее полной модели анодной области сварочной дуги остается актуальной для дальнейшего развития теории дуговой сварки. В общем случае такая модель может быть построена на основе уравнений многожидкостной газовой динамики.

В настоящей работе предложена новая модель анодных процессов в электрической дуге атмосферного давления с неиспаряющимся анодом, в рамках которой прианодная плазма описывается при помощи системы многожидкостных уравнений в восьмимоментном приближении метода Грэда. Соответствующие этому приближению газодинамические уравнения для компонент плазмы и выражения для коэффициентов переноса. Предполагается, что дуговая плазма в пределах предлоя является квазинейтральной, а граница анодного слоя вблизи поверхности металла совпадает с границей слоя пространственного заряда. При этом для описания слоя пространственного заряда используется модель. Рассматриваемые уравнения многожидкостной газовой динамики решаются численно, с использованием схемы второго порядка точности. Приведены результаты расчетов для плазмы аргоновой дуги атмосферного давления, контактирующей с неиспаряющейся поверхностью анода. Представлены основные распределенные характеристики прианодной плазмы (распределения по толщине анодного слоя концентраций, скоростей и температур электронов и тяжелых компонент плазмы), а также интегральные характеристики анодной области дуги (анодное падение потенциала, полный тепловой поток, вводимый дугой в анод, и его составляющие) для различных значений плотности тока между плазмой и поверхностью анода (10^6 – $5 \cdot 10^7$ А/м²) и различных значений температуры его поверхности (1000–3000 К).

ВЛИЯНИЕ ИСПАРЕНИЯ МАТЕРИАЛА АНОДА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ С ТУГОПЛАВКИМ КАТОДОМ

И.В. Крикент¹, И.В. Кривцун², В.Ф. Демченко², А.Т. Зельниченко²

¹Днепродзержинский государственный технический университет, Украина

²Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

Предложена самосогласованная математическая модель процессов энерго-, массо- и электропереноса в плазме столба и анодной области электрической дуги с тугоплавким катодом и испаряющимся анодом, горящей в инертном газе. Для описания процесса испарения материала анода используется разработанная ранее модель анодной области дуги с испаряющимся в диффузионном режиме анодом. Конвективная диффузия ионизированного металлического пара в плазме столба дуги описывается уравнением, учитывающим различие коэффициентов диффузии атомов, одно- и двухзарядных ионов металла, наличие термодиффузионных потоков металлических частиц, а также дрейфа ионов пара в электрическом поле. На основе предложенной математической модели, проведен детальный численный анализ влияния диффузионного испарения материала анода (Fe) на тепловые, газодинамические и электромагнитные характеристики многокомпонентной плазмы столба и анодной области стационарной электрической дуги с тугоплавким катодом (W) при ее горении в инертном газе (Ar). Показано существенное влияние распределения температуры поверхности металла в области анодной привязки дуги на пространственные распределения температуры и плотности электрического тока в прианодной плазме, а также на распределенные и интегральные характеристики ее теплового воздействия на поверхность испаряющегося анода.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ УСИЛИЙ В СВАРОЧНОЙ ВАННЕ ПРИ СВАРКЕ ПОД ВОДОЙ

С.Ю. Максимов¹, Е.А. Прилипко¹, Е.А. Рыбалкин²

¹Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

²ИППФБ НАНУ, Киев, Украина

Управление качеством сварного соединения при подводной дуговой сварке с внешним электромагнитным воздействием позволяет обеспечить заданный уровень его свойств. Важную роль играет компьютерное моделирование распределения тока в жидкометаллической ванне, так как это является определяющим при расчете электродинамических усилий и перемещений расплава в ванне. Исходя из этого на языке Delphi 7 была разработана программа, которая позволяет, изменяя исходные условия, достаточно быстро подобрать режим воздействия.

Программа позволяет определить зависимость модуля индукции магнитного поля от глубины сварочной ванны, распределение плотности электродинамических усилий, плотности вихревых токов в сварочной ванне, оценить скорости движения расплава.

Результаты расчета можно использовать для определения параметров индуктора и режимов сварки в зависимости от геометрических размеров свариваемых пластин, их химического состава и глубины проведения работ.

СТРУКТУРА И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СЛОЖНОЛЕГИРОВАННЫХ СПЛАВОВ

Л.И. Маркашова, А.Г. Покляцкий, О.С. Кушнарева, Т.А. Алексеенко

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

На примере сложнолегированных сплавов и их сварных соединений, (конструкции аэрокосмической техники, судостроения, химической промышленности) рассмотрены изменения структурных параметров в различных технологических условиях сварки и их роль в обеспечении механических характеристик. Комплексными исследованиями с использованием оценок конкретного вклада структурных факторов

(химического состава, размера зерна, субзерна и дислокационной структуры, фазовых выделений и т.п.) показано: для соединений Al–Li сплавов в условиях аргонодуговой сварки (присадка Св1201) характерны резкие градиенты по механическим характеристикам — от металла шва к основному металлу ($\sigma_{0,2}$ от 175 до 448 МПа), а основной вклад в общий уровень упрочнения ($\Sigma\sigma_T$) вносит твердый раствор (28 %). Основная причина трещинообразования в металле шва (в условиях динамического нагружения) — мощные полосы сдвига (ПС). Трещиностойкость и механические свойства такого типа соединений возрастают в условиях легирования металла шва Sc (0,5 %), что обусловлено увеличением вклада в $\Sigma\sigma_T$ дисперсионного (32 %) и субзерненного (30 %) упрочнения, а возрастанию трещиностойкости способствует активная фрагментация структуры, предотвращающая развитие ПС. Выравнивание показателей прочности и пластичности при переходе от металла шва к основному металлу возможно и в условиях сварки трением с перемешиванием, что связано с диспергированием зеренной, субзерненной структуры и равномерным распределением фаз внутри зерен.

Особое влияние характера структурно-фазового состояния, а именно типа структур (α , β , α' -фаз) на основные показатели свойств обнаруживаются и для соединений жаропрочных титановых сплавов: резко градиентные свойства прочности, пластичности и трещиностойкости наблюдаются в случае формирования в металле сварных соединений полосовых структур (β и α -фазы, с ОЦК и ГПУ решеткой соответственно), отличающихся числом систем скольжения и, соответственно — плотностью дислокаций, что и приводит к формированию градиентов по σ_T (от 57 до 1010 МПа), σ_B и падению трещиностойкости. А использование параметров сварки, способствующих образованию α' -фаз мартенситного типа обеспечивает улучшение механических показателей и трещиностойкости сварных соединений.

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ Cr_3C_2 –NiCr, НАНЕСЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОКАМЕРНОЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ

*Л.И. Маркашова, Ю.Н. Тюрин, О.В. Колисниченко,
М.Л. Валевиц, Д.Г. Богачёв, И.М. Дуда*

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

Представлены результаты исследования влияния технологических параметров кумулятивно-детонационного напыления композиционного порошка Amperit 584.054 (75 % Cr_3C_2 + 25 % NiCr) фракционного состава (d_4) \approx 37,5 мкм на изменения структурно-фазового состояния получаемых износостойких покрытий для деталей машин и механизмов, работающих при повышенных температурах.

Изменяемыми технологическими параметрами (I–II–III режимы) служили: расход воздуха (V_B , м³/ч) и соотношение расхода горючего газа к окислителю (β). Так, для режима I — $\beta = 4,85$ –4,96; $V_B = 1,24$ –1,5; для режима II — $\beta = 4,95$ –4,97; $V_B = 1,95$ –2,32; для режима III — $\beta = 4,94$ –5,07; $V_B = 0,84$ –1,09. Соотношение длины к диаметру ствола пушки ($l/d = 300/18$ мм) и расход порошка (900 г/ч) не изменяли.

Комплексом методов, включающим световую микроскопию («Versamet-2»), аналитическую растровую электронную микроскопию (СЭМ-515, фирмы Philips, Голландия, оснащенный энергодисперсионным спектрометром системы «Link»), рентгеноструктурный фазовый анализ (установка Дрон-УМ1 в монокроматическом $CuK\alpha$ -излучении), просвечивающую трансмиссионную электронную микроскопию (JEM-200 CX, фирмы Jeol, Япония) при ускоряющем напряжении 200 кВ проводили исследования структурно-фазового состояния напыленных покрытий и их качество в зоне соединения с подложкой. Объемную долю пор и структурных составляющих определяли при помощи программы ATLAS в большом количестве полей зрения. Статистическую обработку данных по распределению и уровню локальных внутренних напряжений проводили при помощи программы Statistica.

Установлено, что использование оптимального режима I (средний уровень тепловложения) приводит к формированию покрытия толщиной (δ) до 400 мкм, обладающего максимальной интегральной микротвердостью ($HV_{0,3-7100-13240}$ МПа) и минимальной пористостью (0,7–1,3 %), средним содержанием lamелей ($h \sim 1,5$ –3,5 мкм; $l \sim 15$ –70 мкм, $V_d = 22$ %) и продуктов диссоциации высшего карбида хрома ($(d_4) \sim 1,0$ –10 мкм, $V_d Cr_7C_3 + Cr_2O_3 \approx 26$ %) при равномерно повышенной плотности дислокаций без значительных градиентов в их распределении. Последнее свидетельствует об отсутствии факторов, провоцирующих трещинообразование.

Таким образом, данные исследования позволили дать рекомендации технологам по корректировке режимов кумулятивно-детонационного напыления с целью существенного продления ресурса работы конкретных изделий.

ЗАДАЧИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ И ДРУГИХ РОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

О.В. Махненко

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

Потребность в расчетных оценках различных процессов и явлений при сварке, наплавке, термообработке и других родственных технологиях и необходимость развития соответствующих расчетных методов существовало на протяжении всего периода развития и внедрения сварки в промышленность. Проблемы свариваемости, сварочных напряжений и деформаций, прочности и точности сварных конструкций и т.п. всегда интересовали специалистов по сварке.

В процессе развития сварочных технологий, появления новых сварочных процессов и новых материалов, имеющих более сложную микроструктуру и ее изменение в процессе сварочного цикла нагрева и охлаждения, решение таких проблем путем экспериментальных проб и ошибок стало слишком трудоемким и дорогостоящим. Расчетные методы и математическое моделирование становятся все более востребованными и позволяют значительно уменьшить объем экспериментальных работ.

В настоящее время математическое моделирование находит широкое применение как при разработке новых технологий, новых конструкций, применении новых материалов, так и при решении различных проблем, возникающих в процессе применения традиционных технологий сварки и при эксплуатации действующих сварных конструкций.

Среди большого количества взаимосвязанных проблем, имеющих место при сварочном нагреве, математическое моделирование процессов сварки может быть ориентировано на следующие основные задачи:

- тепловые процессы при сварке;
- металлургия сварки;
- сварочные деформации и напряжения;
- диффузионные процессы при сварке;
- прочность и долговечность сварных соединений и конструкций;
- проблемы спецэлектрометаллургии.

В настоящее время, все указанные задачи фактически являются отдельными научными направлениями в области сварки и родственных технологий, которые имеют обширную исследовательскую базу и продолжают интенсивно развиваться.

Таким образом, современное развитие компьютерной техники и методов моделирования различных физико-химических процессов, происходящих при сварке, наплавке, термообработке и других родственных технологиях, позволяют инженеру получать целый комплекс необходимой информации для разработки новых технологий сварки и современных сварных конструкций.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НДС ПРИ СВАРКЕ КОЛЬЦЕВЫХ РАЗНОРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБ ИЗ 12 % ХРОМИСТОЙ СТАЛИ МАРТЕНСИТНОГО КЛАССА

О.В. Махненко, Е.А. Великоиваненко, Г.Ф. Розынка, А.Ф. Мужиченко

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

В настоящее время различными исследовательскими организациями ведутся разработки новых хромистых нержавеющей сталей с повышенными характеристиками длительной прочности применительно к элементам оборудования перспективных теплоэлектростанций, которые будут работать на сверхкритических

режимах теплоносителя до 650 °С. Элементы оборудования, изготовленные из новой стали, должны соединяться по технологии сварки, образуя надежные неразъемные соединения.

Одним из таких элементов оборудования являются пароперегреватели, которые при проведении эксплуатационных испытаний нового материала будут содержать разнородные соединения труб размером 42×7 мм с V-разделкой кромок из новой 12 % хромистой нержавеющей стали со сталью 12X18H10T аустенитного класса или со сталью 12X1МФ перлитного класса. Технология сварки таких соединений при вставке опытных образцов труб из нового материала в действующий пароперегреватель не предусматривает предварительный подогрев и послесварочную термообработку. Поэтому существует опасность холодного растрескивания в зоне сварных соединений в связи с образованием в ЗТВ труб из 12% хромистой нержавеющей стали мартенситной микроструктуры и высоких остаточных растягивающих напряжений. С целью анализа влияния технологии сварки на склонность к образованию холодных трещин проведено исследование напряженно-деформированного состояния в зоне разнородных сварных соединений труб паронагревателя с помощью методов математического моделирования.

Для прогнозирования температурных циклов, объемной доли мартенсита, временных и остаточных напряжений в многопроходном сварном соединении были использованы конечно-элементная модель объемного источника нагрева и методы неизотермического деформирования материала, ассоциированные с условием текучести Мизеса. Моделирование основано на отслеживании кинетики формирования и развития пластических деформаций и напряжений в сварном соединении при нагреве и охлаждении каждого прохода шва. Учитывались микроструктурные преобразования в зоне сварки, которые вызывают объемные эффекты и влияют на физико-механические свойства материала. Допущение о быстродвижущимся источнике сварочного нагрева позволило развить 2D модель для многопроходного сварки кольцевого соединения труб, использование которой не требует длительного времени на расчет варианта сварки. Сравнение результатов 2D и 3D моделей для случая стыковой кольцевой сварки за 4 сварочных проходы разнородного соединения труб размера 42×6 мм с V-разделкой кромок продемонстрировало достаточно хорошее согласования. Использование 2D модели для многопроходного сварки кольцевого соединения труб не требует длительного времени на расчет, позволяет за короткое время просчитать достаточное количество вариантов технологии сварки с целью определения чувствительности сварного металла к образованию холодных и горячих трещин при сварке.

РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТРУБОПРОВОДА ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМгЗ ПЕРВОГО КОНТУРА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА С ОБНАРУЖЕННЫМИ В ЗОНЕ КОЛЬЦЕВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НЕСПЛОШНОСТЯМИ

О.В. Махненко, А.С. Миленин, Г.Ю. Сапрыкина

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

При выполнении радиографического контроля сварных кольцевых соединений трубопровода из алюминиевого сплава АМгЗ (внутренний диаметр 370 мм, толщина стенки 10 мм) 1-го контура исследовательского реактора ВВР-М были выявлены несплошности металла в виде пор и крупных включений. Размеры отдельных несплошностей (поры до 4 мм, включения до 6.5×1.5 мм и 5.5×3.5 мм) превышают допустимые пределы по действующим правилам и нормам ПНАЭ Г-7-023–90 и ПНАЭ Г-7-010–89. С целью обоснования работоспособности трубопровода с обнаруженными в зоне сварных кольцевых соединений несплошностями без проведения ремонта было проведено расчетное исследование поведения указанных несплошностей при рабочем эксплуатационном давлении и при гидротестированиях.

Нагруженность трубопровода определялась с учетом следующих основных составляющих: напряжения от эксплуатационного или испытательного внутреннего давления и остаточные напряжения, связанные с технологией изготовления или последующего ремонта. Для определения остаточных сварочных напряжений использовалась численная методика МКЭ и компьютерная программа, входящая в систему «Weld-predictions», разработанную в ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ.

В докладе представлена методология и результаты расчетного определения несущей способности сварного алюминиевого трубопровода под внутренним давлением с учётом наличия в металле сварного шва газовых пор, образовавшихся при сварке. Были применены современные подходы моделирования процессов вязкого разрушения в области геометрических и физических концентраторов на основе численного решения

задачи прослеживания упруго-пластических деформаций при нагружении до предельного состояния в рамках конечно-элементной модели. В качестве критерия предельного состояния использовалось условие недопустимости появления в зоне существующих газовых пор новых микропор вязкого разрушения, обусловленных пластическим течением металла. Расчеты выполнены для нескольких вариантов сочетания размеров и расположения обнаруженных пор.

Также представлены результаты расчета по обоснованию допустимости обнаруженных крупных включений (шлаковых, вольфрамовых, оксидных пленок) в зоне кольцевых сварных соединений. С консервативных позиций шлаковые включения были классифицированы как трещинообразные дефекты, для прогнозирования поведения которых применялся критерий спонтанного хрупко-вязкого разрушения трубопровода с трещиной (двухпараметрический критерий).

На основе полученных результатов расчетного моделирования поведения обнаруженных несплошностей в сварных соединениях трубопровода при рабочем давлении и при гидроиспытаниях сделано заключение относительно работоспособности трубопровода.

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ВКУ (ВЫГОРОДКИ И СВАРНОЙ ШАХТЫ) РЕАКТОРА ВВЭР-1000 С УЧЕТОМ РАДИАЦИОННОГО РАСПУХАНИЯ ПРИ ПРОДЛЕНИИ РЕСУРСА ДО 60 ЛЕТ

О.В. Махненко, И.В. Мирзов

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

Внутрикорпусные устройства (ВКУ) ВВЭР-1000 изготавливают из аустенитной хромоникелевой стали 08X18H10T. Длительный нагрев и радиационное облучение аустенитной стали способствуют возникновению объемных деформаций распухания и проявлением склонности к хрупкому разрушению.

В работе исследовано напряженно-деформированное состояние ВКУ реактора ВВЭР-1000 на примере выгородки и стенки шахты с учетом фактора радиационного распухания. Реализованы математические модели радиационного распухания и механических свойств материала ВКУ, рекомендованные действующими нормативными документами. Модели учитывают напряженно-деформированное состояние материала, температуру, влияние пластических деформаций и радиационной ползучести.

На основе расчетных результатов по формоизменению и напряженному состоянию выгородки и шахты ВВЭР-1000 дана оценка их работоспособности в течение 30 лет эксплуатации и продленного срока службы до 60 лет с учетом контакта выгородки и шахты и остаточных сварочных напряжений в зоне сварных соединений.

Оценка работоспособности ВКУ дана с точки зрения статической и циклической прочности. Размах напряжений при оценке циклической прочности определялся как максимальная разница напряжений в горячем и холодном состояниях реактора. Количество холодных состояний соответствует количеству остановок реактора на ППР.

Согласно действующим нормативным документам при оценке остаточного ресурса сварных металлоконструкций необходимо постулировать наличие возможных дефектов и непроваров. В данной работе было оценено сопротивление хрупкому разрушению внутрикорпусной стенки шахты при условии наличия в ее сварном шве поверхностной трещины заданных размеров.

Сопротивление хрупкому разрушению шпилек, скрепляющих кольца выгородки, оценено исходя из соображения, что концентратором напряжений в шпильках является нарезная резьба. В работе показано, что самым слабым местом в конструкции выгородки являются шпильки, и именно они ограничивают эксплуатационный ресурс ВКУ ВВЭР-1000.

РАЗРАБОТКА СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕЛЕЖКИ ГРУЗОВОГО ВАГОНА С ПОВЫШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ И ЖИВУЧЕСТИ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

О.В. Махненко, А. Пустовой

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

Статистика аварийности на железных дорогах Украины и России свидетельствует об увеличении в последние годы случаев, связанных с разрушением литых несущих элементов двухосных трехэлементных тележек грузового вагона. Анализ эксплуатационной надежности литых конструкций боковой рамы и надрессорной балки тележки типа 18-100 показал, что основной причиной отказа является появление усталостных трещин.

Целесообразным является поиск альтернативы относительно возможности использования технологии сварки при изготовлении указанных деталей из листового проката, с целью повышения их надежности и живучести. В докладе показано, что существующие Нормы на проектирование сварных соединений и узлов вагонов железных дорог существенно завышают реальное сопротивление сварных соединений циклическим нагрузкам по сравнению с рекомендациями Международного Института Сварки. Этот недостаток характерен для многих действующих в России и Украине нормативных документов, регламентирующих расчетное определение сопротивления усталости сварных соединений и узлов, что приводит к негативным результатам проектирования по требуемой долговечности сварных элементов.

При разработке надежных и технологичных сварных элементов тележки грузовых вагонов необходимо использовать последние достижения в области усталостной прочности сварных соединений. Действующие Нормы расчета и проектирования железнодорожных вагонов в части сварных соединений этих конструкций требуют радикальной переработки с учетом накопленной информации Международным институтом сварки (Рекомендации МИС).

ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ КРИТЕРИЕВ ПЛАСТИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

А.С. Миленин, Е.А. Великоиваненко, Г.Ф. Розынка, Н.И. Пивторак

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

Оценка предельного состояния ответственных сварных конструкций является важным этапом оценки их работоспособности, технологической прочности и остаточного ресурса. Снижение консервативности такой оценки наряду с гарантированной степенью достоверности позволяет расширить границы применимости современных конструкционных материалов и оптимизировать технологические процессы производства элементов конструкций и их ремонта. С этой целью необходимым является численное и численно-экспериментальное решение комплексных задач развития термодетформированного состояния конкретных узлов при сварке и последующей эксплуатации, наряду с прогнозированием процессов разрушения материала и достижения им предельного состояния.

В частности, для сосудов давления и трубопроводных элементов из высокопрочных сталей, а также конструкций из алюминиевых сплавов, характерным процессом, определяющим предельное состояние, является вязкое разрушение и обусловленная им пластическая неустойчивость. В настоящей работе был реализован комплекс математических моделей и средств их компьютерной реализации, позволяющих прогнозировать кинетику напряженно-деформированного состояния конструкций без острых геометрических концентраторов с учётом зарождения и развития процессов вязкого разрушения под действием внешних температурных и силовых факторов. Это позволило рассмотреть ряд важных с практической и фундаментальной точек зрения задач: оптимизацию процесса многопроходной сварочной наплавки дефектов магистральных трубопроводов под давлением; вероятностный анализ состояния толстостенных трубопроводов и сосудов высокого давления со сложным эксплуатационным и технологическим повреждением, в том числе, в области сварных швов; прогнозирование склонности алюминиевых сплавов различных серий к горячему растрескиванию.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕМОНТА ЭЛЕМЕНТОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПОСРЕДСТВОМ КОМПОЗИТНЫХ БАНДАЖЕЙ

А.С. Миленин, Е.А. Великоиваненко, Г.Ф. Розынка, Н.И. Пивторак

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

Использование для временного ремонта участков магистральных и технологических трубопроводов различного диаметра усиливающих конструкций (бандажей) из композиционных материалов в настоящее время получает всё большее распространение. Основным преимуществом такого подхода является относительная дешевизна, простота и возможность усиливать участки трубопроводов со сложной геометрией: гибы, колена, отводы, участки с запорной аппаратурой, проч. Но при этом возникают естественные сложности анализа работоспособности участка трубопровода с установленным композитным бандажом в силу существенной неоднородности и анизотропии материала ремонтной конструкции. Кроме того, экспериментальные исследования несущей способности восстановленной таким способом конструкции затруднены сложным характером зарождения и развития разрушения композитного бандажа при существенных нагрузках.

С целью исследования характерных особенностей напряжённо-деформированного и предельного состояний дефектного участка магистрального трубопровода, несущая способность которого была восстановлена посредством композитного бандажа, а также для прогнозирования эффективности ремонта, был разработан соответствующий комплекс математических моделей, позволяющий проводить необходимый анализ состояния сложной конструкции такого рода с учётом зарождения и развития повреждения в микро- и макромасштабе. На примере элемента магистрального трубопровода с множественным коррозионным повреждением продемонстрированы характерные особенности процессов, определяющих эффективность ремонта посредством волокнистых композитов на основе стекловолокна и ресурс безопасной эксплуатации отремонтированной конструкции.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ОПЛАВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СЛИТКОВ ИЗ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

А.С. Миленин, С.С. Козлитина, Л.И. Дзюбак

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

Поверхность слитков, полученных методами специальной электрометаллургии, характерно подвержена формированию различных дефектов плавки (ликваты, поры и т.д.), требующих последующего устранения. Использование для этого механической обработки, заключающейся в удалении поверхностного дефектного слоя, влечёт существенные потери материала и соответствующее снижение выхода годного металла (до 15 %). С целью устранения дефектов с боковой поверхности цилиндрических слитков без потерь металла в стружку, в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины была разработана и внедрена технология электронно-лучевого оплавления, которая заключается в локальном нагреве, повторном переправлении поверхностного слоя слитка и формировании бездефектной зеркальной поверхности.

Технология оплавления нашла успешное промышленное применение при производстве крупногабаритных слитков из титана и сплавов на его основе. Следующим этапом развития этой технологии может рассматриваться её применение при получении слитков из широкого спектра жаропрочных и тугоплавких металлов, в частности, из никелевых сплавов. В отличие от титана, локальный нагрев, расплавление и последующая кристаллизация никеля может привести к появлению дефектов типа горячих трещин, поэтому технология оплавления применительно к слиткам из никелевых сплавов требует тщательной оптимизации. С целью анализа склонности металла поверхностного слоя цилиндрических слитков из сплавов на основе никеля в процессе электронно-лучевого оплавления был разработан комплекс программных средств компьютерного моделирования, учитывающий специфику технологии многолучевого температурного воздействия источников локального нагрева, развития напряжённо-деформированного состояния и пластического течения металла. На примере оплавления никелевых слитков небольшого диаметра продемонстрированы подходы по оптимизации рассматриваемого технологического процесса.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭШН ЖМ РАЗНОРОДНЫХ ПО ВЫСОТЕ КРУПНЫХ СТАЛЬНЫХ СЛИТКОВ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ

А.С. Миленин, В.Я. Саенко, А.А. Полишко, С.С. Козлитина, Л.И. Дзюбак

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

С целью анализа характерных особенностей технологии электрошлаковой наплавки жидким металлом (ЭШН ЖМ) в токопроводящем кристаллизаторе разнородных по высоте стальных слитков проведено комплексное численно-экспериментальное исследование кинетики процессов, определяющих качество получаемого продукта, соответствующие экспериментальные работы и металлографические исследования. В частности, на основе математического моделирования температурного состояния и химического состава металла проанализировано влияние технологических параметров ЭШН ЖМ на проплавление слитка круглого сечения, а также состояние переходной разнородной зоны. Экспериментальная верификация разработанных численных методик на примере ЭШН ЖМ разнородного по высоте биметаллического слитка диаметром 180 мм из высоколегированной стали 12Х13 (исходный готовый слиток) и среднелегированной стали 38ХНЗМФА (наплавленный металл) с гарантированным сплавлением показала как хорошую точность математических моделей (относительная погрешность по различным верификационным параметрам не превышает 4 %), так и высокое качество переходной зоны разнородных металлов. При этом глубина проплавления для слитка диаметром 180 мм составляет 10 мм, что подтверждено экспериментально и оценено при помощи металлографических исследований, и использовано в качестве одного из верификационных параметров в математической модели. На основе результатов численного прогнозирования продемонстрированы возможные пути оптимизации параметров для получения разнородных слитков большого диаметра (до 1200 мм) при гарантированном качестве переходной зоны разнородных металлов и глубины проплавления. В частности, показано, что путём изменения геометрии кристаллизатора возможно расплавление торца исходного слитка большого диаметра по всей площади его поперечного сечения и эффективное поддержание стационарного режима наплавки жидким металлом. Так, для слитка диаметром 1200 мм глубина проплавления не превышает 80 мм.

Применение способа ЭШН ЖМ открывает новые возможности для получения моноблочных разнородных по высоте (длине) круглых слитков путем регламентированной заливки в токоподводящий кристаллизатор жидкого металла разного заданного химического состава. В результате регламентированного непрерывного процесса ЭШН ЖМ, возможно получение разнородных по высоте гетерогенных стальных слитков большого сечения с минимальной протяженностью переходной зоны без применения сварки.

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ РАЗГРУЗКИ УЧАСТКА МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА С ПОМОЩЬЮ СВАРНОГО БАНДАЖА НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ РЕМОНТА И ЭКСПЛУАТАЦИИ

А.С. Миленин, В.М. Шекера, Б.В. Царинный, А.Б. Царинный

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

Усиление участков магистральных трубопроводов с обнаруженными при технической диагностике дефектами с помощью сварных конструкций (бандажей, муфт) является одним из наиболее распространённых методов ремонта трубопроводов без вывода из эксплуатации. Монтаж усиливающей конструкции (УК) состоит из нескольких последовательных этапов (снижение эксплуатационного давления в трубопроводе и установка бандажа; механический натяг УК; сварка продольных и окружных стыков; подъём давления до эксплуатационного значения), каждый из которых в той или иной степени влияет на суммарный разгружающий эффект. В рамках настоящей работы на основе численно-экспериментального подхода были исследованы закономерности влияния условий и параметров усиления участка магистрального трубопровода на несущую способность конструкции. В частности, с помощью лабораторных стендовых испытаний показаны характерные особенности переходных механических процессов при монтаже УК, а именно, условия формирования прилегания к поверхности трубопровода и необратимых деформаций обжимных узлов, которые нивелируют эффект механического натяга. Также предложены подходы инструментального контроля качества монтажа ремонтной конструкции, позволяющие га-

рантировать необходимый уровень разгрузки. На основе результатов математического моделирования процессов сварки угловых швов при окончательной сборке банджа показано существенное влияние сварочной усадки на суммарный эффект ремонта.

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИДІЛЕННЯ ПРИ ЗВАРЮВАННІ Й МОДИФІКАЦІЇ СТРУКТУРИ ЛЕГКИХ СПЛАВІВ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ

В.М. Нестеренков¹, А.Л. Майстренко², В.А. Дутка², В.А. Лукаш²

¹Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ, Київ, Україна

²Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, Україна

Останні два десятиліття серед різноманіття методів виготовлення нероз'ємних з'єднань дуже інтенсивно розробляється метод зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП). У процесі ЗТП діють сили тертя, що приводить до зростання температури; внаслідок цього у зоні, що прилягає до інструмента, відбувається інтенсивне деформування матеріалу деталей і його в'язко-пластичний плин. При моделюванні температурного поля в процесі ЗТП необхідно розглядати зв'язану задачу теплопровідності, в'язкого плинну й деформування металу деталей. З метою спрощення комп'ютерної моделі процесу ЗТП розглянуто тільки задачу теплопровідності, припускаючи при цьому, що теплові джерела обумовлені дією сил тертя й в'язко-пластичного деформування, а рух стрижня інструмента відбувається у вигляді обертання навколо своєї осі й поступального руху інструмента відносно деталі. Оскільки процеси тертя й деформування відбуваються одночасно, то при оцінці величини теплового потоку урахуються обидві його складові: перша, яка обумовлена тертям, та друга, котра зумовлена деформуванням матеріалу деталей, що зварюються. Отже, величина теплового потоку q моделюється у вигляді лінійної комбінації названих складових теплового потоку. З використанням методу скінченних елементів виконано чисельне моделювання температурного поля в інструменті з твердого сплаву та в мідних деталях в процесі ЗТП. На основі узгодження чисельних і експериментальних результатів встановлено адекватність розробленої моделі.

Описаний спосіб ЗТП було використано також у практичній роботі як засіб інтенсивного локального деформування з метою модифікування структури ливарного магнієвого сплаву МЛ10, що привело до десятикратного зменшення розміру зерен сплаву в зоні обробки.

МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ ПОВЕРХНЕВИХ ТРІЩИН В ЗОНАХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ГНУТОЗВАРНИХ ФЕРМ

М.І. Підгурський, І.М. Підгурський, А.Ю. Фик, М.Г. Грещук

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

Втомне руйнування великогабаритних зварних конструкцій, як правило, поєднує декілька випадкових процесів, що відбуваються одночасно: зародження окремих тріщин, їх поширення і поява нових тріщин. Процес зародження і розвитку тріщин у великогабаритних зварних конструкціях, що зазнають циклічного навантаження, тісно пов'язані з конструктивними концентраторами напружень, залишковими зварювальними напруженнями, дефектами зварних з'єднань. Стохастична природа явища ініціювання та розповсюдження тріщин створює передумови для багатоваріантності траєкторій розвитку руйнування. В таких умовах аналітичні моделі малоприменні для прогнозування надійності і довговічності зварних конструкцій, оскільки навіть аналітичний розв'язок для коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН), що описують поле напружень в околі фронту поверхневої тріщини ще не отримано. Задача визначення КІН значно ускладнюється за неоднорідності напруженого стану та структури матеріалу в зонах зварних швів, а також за взаємовпливу концентраторів напружень, біля яких розвивається тріщина, або кілька тріщин.

У зв'язку з цим методом скінченних елементів проведено дослідження об'ємного напруження деформівного стану вузлів зварних ферм із гнutoзварних профілів. Встановлено, що розподіл напружень в зоні зварного з'єднання вкрай нерівномірний з максимальними значеннями в області заокруглення профілів. Проведено оцінку коефіцієнтів концентрації напружень та здійснено їх порівняння з

експериментальними даними, отриманими методами малобазової електротензометрії. Відзначено задовільну кореляцію результатів.

Здійснено моделювання розвитку однієї та кількох поверхневих тріщин біля кромки зварного шва. Отримано поправкові функції, що оцінюють вплив зварного шва на КІН взаємодіючих поверхневих тріщин. Одержані результати дозволяють уточнити оцінку живучості зварних з'єднань конструкцій.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАВЛЕНИЯ И ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

А.П. Семёнов

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

Процессы нагрева и плавления сварочной проволоки, формирования и переноса капель электродного металла при сварке плавящимся электродом во многом определяют производительность и качество сварки. В свою очередь, характер плавления и переноса металла при данном способе сварки определяется большим количеством физических явлений, таких, например, как тепло- и массоперенос, газо(гидро)динамика и электромагнитные явления, протекающих в дуговой плазме, на поверхности и в объёме металла электрода, включая каплю. В настоящей работе предложена модель процессов плавления электродного металла, формирования и отрыва капель при сварке плавящимся электродом, учитывающая взаимодействие тепловых, электромагнитных, гидродинамических и капиллярных явлений, протекающих в системе «электродная проволока–капля». Анализ тепловых процессов в рассматриваемой системе выполняется путем решения задачи теплопереноса с учётом джоулева нагрева электродного металла, конвекции в расплаве, скрытой теплоты плавления и тепловых потерь, обусловленных испарением металла капли и лучистым потоком с ее поверхности. Модель гидродинамических процессов в капле базируется на уравнениях движения вязкой несжимаемой жидкости со свободной поверхностью при наличии поверхностных (капиллярная сила) и объёмных (сила тяжести и сила Лоренца) сил. При численной реализации моделей используется метод конечных элементов. Приведены результаты моделирования динамики формирования и отрыва капель, а также результаты расчётов полей температуры, скорости и плотности электрического тока в капле в процессе её формирования. Полученные расчётные данные находятся в хорошем соответствии с имеющимися экспериментальными данными.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ТИГ, ЛАЗЕРНОЙ И ГИБРИДНОЙ (ЛАЗЕР + ТИГ) ТОЧЕЧНОЙ СВАРКЕ

А.П. Семёнов, И.В. Кривцун, К.В. Губаев

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

Предложена комплексная математическая модель физических процессов в свариваемом металле при точечной сварке дугой с неплавящимся электродом, лазерным пучком и их комбинацией, позволяющая описывать процессы переноса энергии, массы и заряда как в сварочной ванне, так и в основном металле. В основе модели переноса заряда в свариваемом металле лежит уравнение непрерывности плотности электрического тока. При моделировании гидродинамических процессов в сварочной ванне используются уравнения Навье–Стокса для вязкой несжимаемой жидкости. Постановка задачи гидродинамики учитывает деформацию свободной поверхности ванны за счет реакции отдачи паров и изменения объема металла при плавлении, влияние электромагнитной и архимедовой сил на движение расплава, а также термокапиллярный эффект Марангони и силу трения плазмы на поверхности ванны. Для расчёта температурного поля в расплаве используются уравнения конвективно-кондуктивного переноса энергии. Анализ теплового состояния основного металла основывается на уравнении теплопроводности. Модель тепловых процессов учитывает потери тепла с поверхности ванны, обусловленные испарением металла, лучистым и конвективным теплообменом с окружающей средой, а также скрытую теплоту плавления материала. Для численного решения перечисленных задач используется метод конечных элементов. На основе описанной модели разработано программное обеспечение для компьютерного моделирования теплового состояния свариваемого металла и динамики сварочной ванны при различных способах точечной сварки. Проведен

детальный численный анализ особенностей проплавления металла при точечной сварке с использованием стационарной аргоновой дуги с неплавящимся электродом, сфокусированного пучка излучения СО₂-лазера непрерывного действия, а также их комбинации.

ГАЗОВАЯ ЗАЩИТА ИМПУЛЬСНОГО ДУГОВОГО И ЛАЗЕРНО-ДУГОВОГО РАЗРЯДОВ

В.Н. Сидорец, А.И. Бушма, А.М. Жерносеков

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

Процесс импульсно-дуговой сварки продолжает оставаться одним из самых перспективных сварочных процессов. Объясняется это большим количеством преимуществ по сравнению со сваркой на постоянном токе. Среди них: увеличение проплавления основного металла, увеличение скорости плавления электродной проволоки, качественное формирование сварного шва, возможность сварки в любых пространственных положениях, возможность осуществления различных типов переноса электродного металла. Подбор и оптимизация параметров сварочного процесса связанных с параметрами импульсов (амплитуде, частоте, скорости нарастания тока) дает дополнительные возможности управления сварочным процессом и получение качественных изделий.

Очень важным параметром процесса импульсно-дуговой сварки является скорость нарастания тока импульса. Именно при больших скоростях проявляются вышеуказанные преимущества. Однако опыт показывает, что при определенных скоростях наблюдается разрушение газовой защиты дугового разряда, что приводит к нестабильности сварочного процесса и появлению дефектов сварных швов.

Работа посвящена исследованию стабильности газовой защиты импульсно-дугового разряда, т.к. от этой стабильности зависит стабильность технологического процесса в целом. В частности, такие исследования важны при разработке новых сварочных технологий, например, технологии импульсной лазерно-дуговой сварки, предложенной авторами.

С помощью обобщенной математической модели динамической дуги исследована динамика радиуса импульсного дугового и лазерно-дугового разрядов. Определено, что скорость изменения радиуса разряда может превышать скорость звука. При переходе через звуковой барьер возникает ударная волна, которая разрушает газовую защиту разряда. Это необходимо учитывать при создании новых импульсных дуговых и лазерно-дуговых процессов и совершенствовании существующих импульсно-дуговых технологий.

РАСЧЕТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АРГОНОВОЙ ДУГИ С ТУГОПЛАВКИМ КАТОДОМ

***В.Н. Сидорец, И.В. Кривцун, В.Ф. Демченко, И.В. Крикент,
Д.В. Коваленко, И.В. Коваленко, А.Г. Павлов***

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

В современном сварочном производстве сварка неплавящимся электродом с импульсной модуляцией тока находит все более широкое применение благодаря дополнительным возможностям управления процессами проплавления металла и формирования сварного шва за счет надлежащего выбора формы импульсов сварочного тока, их длительности и частоты следования. Высокочастотная модуляция сварочного тока может служить средством активации процессов переноса энергии в свариваемом металле, обеспечивающим повышение проплавающей способности дуги и позволяющим расширить возможности процесса ТИГ сварки. Для теоретического обоснования выбора оптимальных режимов импульсно-дуговой сварки неплавящимся электродом необходимо изучить динамику горения импульсной дуги. Модель с распределенными параметрами из-за больших вычислительных затрат позволяет рассмотреть воздействие на дугу лишь одиночного импульса, тогда как практический интерес представляет исследование динамических характеристик дуги при подаче пачек импульсов сварочного тока. В связи с этим представляет интерес разработка упрощенной модели дуги с сосредоточенными параметрами, которая не имеет ограничений с точки зрения объема вычислений и позволит с достаточной точностью проследить динамику изменения электрических характеристик дуги с неплавящимся электродом при различных способах высокочастотной

модуляции сварочного тока. Для построения такой модели уравнения Кирхгофа, описывающие процессы в электрической цепи, дополнены уравнениями динамической модели дуги, которая используется в качестве входных данных статическую вольтамперную характеристику дуги и подлежащую определению постоянную времени переходных процессов. Для отработки динамической модели и идентификации ее параметров были проведены экспериментальные исследования статических вольтамперных характеристик аргоновой дуги с вольфрамовым катодом и медным водоохлаждаемым анодом. Эти же данные были получены расчетным методом на основе модели дуги с распределенными параметрами. Постоянная времени переходного процесса определялась исходя из сравнения результатов моделирования динамики изменения напряжения на дуге, полученных при помощи модели с распределенными параметрами, с результатами расчетов в рамках динамической модели дуги (модели с сосредоточенными параметрами). В совокупности проведенный комплекс расчетных и экспериментальных исследований позволил отработать динамическую модель дуги и идентифицировать входящие в нее параметры. Полученные в рамках динамической модели дуги результаты моделирования динамики изменения тока и напряжения на дуге при сварке неплавящимся электродом с наложением пачек высокочастотных импульсов сопоставляются с экспериментальными данными.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДОРОДА ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

В.С. Синюк

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

Мировое производство высокопрочных сталей неуклонно растет. Широкое применение этих сталей осложнено трудностями при их сварке, одной из которых являются холодные трещины. Известно, что риск образования этих трещин зависит от структуры металла, величины остаточных растягивающих напряжений, и содержания водорода. Практические методы борьбы с трещинами основаны на снижении уровня остаточных напряжений за счёт технологии сварки и сварочных материалов, уменьшении доли закалочных структур в металле шва и зоне термического влияния, а также снижения содержания водорода в наплавленном металле за счёт применения низководородных сварочных материалов. Литературные и авторские экспериментальные данные о влиянии водорода на механические свойства металла в широком диапазоне температур позволяют предложить новый подход к предупреждению образования холодных трещин. Суть этого подхода заключается в использовании пластифицирующего воздействия водорода на металл при повышенных температурах с целью управления остаточными сварочными напряжениями. Расчётами термомеханических процессов, протекающих при сварке, на одномерной модели показана возможность снижения остаточных напряжений за счёт влияния водорода на деформационное упрочнение металла в широком диапазоне температур. Таким образом, учёт не только охрупчивающего влияния водорода на свойства металла, но и пластифицирующего, открывает новые возможности для совершенствования и создания технологии сварки высокопрочных сталей.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

О.И. Слепцов, М.Н. Сивцев, Н.Н. Харбин

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова, Якутск, Россия

Одним из экспериментальных методов оценки технологической прочности сварных соединений являются испытания на замедленное разрушение образцов-вставок — Имплант. Данный метод сочетает определенные признаки прямых и косвенных методов определения склонности сварных соединений к образованию холодных трещин и позволяет учесть целый спектр факторов влияющих на данный процесс, таких как температура, остаточные напряжения, структура и водород. Однако, данные испытания достаточно трудоемки и требуют много времени для определения экспериментальных точек. В связи с этим актуальна

задача разработки расчетной модели, с помощью которой стало бы возможным оценить технологическую прочность сварных соединений с наименьшим количеством испытаний.

В данной работе, на основе теорий ползучести и наследственной механики, предложена расчетная модель оценки технологической прочности сварных соединений из высокопрочных низколегированных сталей. Предварительные расчеты по данной модели показали достаточную корреляцию с экспериментальными значениями, что позволяет использовать расчетную модель на практике.

Отметим, что определение функционального вида параметров модели (которые в данной работе для конкретной стали определялись эмпирически), дают основание полагать, что использование расчетной модели значительно расширит возможности исследования природы образования холодных трещин в сварных соединениях.

ВОПРОСЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

О.И. Слепцов, А.Г. Тихонов, Р.Г. Адамов

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия

Применительно к тонкой пластинке рассмотрены вопросы разработки численного расчета остаточных деформаций. Уравнения связи между напряжениями и деформациями отражают развитие упруго-пластических деформаций. Физическая нелинейность в условиях текучести при численном решении реализуется по методу последовательных уточнений. При этом на определенном этапе нагружения, когда известны распределение температуры и напряжений, а также функция напряженного состояния, решается итерационно система уравнений равновесия в перемещениях с переменными коэффициентами.

Для решения этой системы приведен конечноразностный аналог и итерационная система ее решения на основе матричной прогонки.

Выполнены тестовые прогоны для модельных задач. Следует отметить, что для описания температурной задачи можно привлечь модели, отражающие различные факторы и особенности сварочного нагрева. В частности, нами для тепловой задачи использована нелинейная задача Стефана, учитывается зависимость теплофизических характеристик от температуры.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОГО РАСПЫЛЕНИЯ ПРОВОЛОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

М.Ю. Харламов², И.В. Кривцун^{1, 2}, В.Н. Коржик^{1, 2}, А.И. Демьянов²

¹*Гуандунский генеральный научно-исследовательский институт промышленных технологий
(Гуанчжоуский генеральный научно-исследовательский институт цветных металлов),*

Гуанчжоу, КНР

²*Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина*

Разработана комплексная математическая модель физических процессов, протекающих при плазменно-дуговом распылении токоведущей проволоки. Данная модель включает в себя разработанные ранее математические модели: 1 — модель плазменной струи, создаваемой плазмотроном с внешней проволокой-анодом; 2 — модель нагрева и плавления проволоки, включая модель жидкой прослойки на ее рабочем конце; 3 — модель формирования и срыва капель расплавленного металла; 4 — модель нагрева и движения расплавленных частиц в плазменном потоке с учетом их дробления.

В рамках создания комплексной математической модели плазменно-дугового распыления проволочных материалов, были исследованы гидродинамические процессы при струйном течении и образовании капель жидкого металла — напыляемых частиц в спутном высокоскоростном плазменном потоке. Выполнен численный анализ процессов формирования и отрыва капель, исследовано влияние параметров режима напыления на указанные процессы. Показано, что при плазменно-дуговом распылении токоведущей проволоки могут существовать три типа течения и распада струи расплавленного металла: струйное течение металла, распад струи с формированием практически одинаковых по размеру капель и формирование капель, значительно отличающихся по размерам.

Проведены исследования процессов движения, нагрева и дробления в плазменной струе капель жидкого металла, срывающихся с конца распыляемой проволоки. Выполнен детальный численный анализ указанных процессов. Показано, что при движении капель расплава в струе плазмы происходит их многократное дробление, приводящее к формированию частиц с размерами, значительно меньшими размеров исходных капель, срываемых с конца распыляемой проволоки.

Совместное использование моделей отдельных физических процессов, сопровождающих плазменно-дуговое распыление проволочных материалов, позволяет проводить детальный количественный анализ каждого из протекающих процессов с учетом их взаимовлияния. Это дает возможность прогнозировать фракционный состав, тепловые и динамические характеристики частиц в зависимости от параметров режима распыления.

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО ЦИКЛА АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКИ С ПОПЕРЕЧНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ НА СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ЗОНЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ ДВУХФАЗНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА

С.В. Ахонин, В.Ю. Белоус, Р.В. Селин, С.Г. Григоренко

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

В работе изучалось влияние термического цикла аргонодуговой сварки титана с поперечными колебаниями сварочной дуги на форму и размеры сварного шва, протяженность зоны термического влияния (ЗТВ) и на структурные превращения в ЗТВ на примере титанового сплава ВТ23. Моделировался процесс TIG-сварки титана в узкий зазор с применением внешнего управляющего магнитного поля. Для расчетного определения размеров ЗТВ в программе ANSYS построена трёхмерная математическая модель тепловых процессов в титане при сварке основу которой составляет дифференциальное уравнение теплопроводности. Для расчетов была использована конечно-элементная трёхмерная модель плиты толщиной 40 мм с прямоугольной разделкой шириной 10 мм, края модели находятся в свободном положении. Источник нагрева совершал поперечные перемещения по нижней стенке разделки поперек направления сварки. По результатам расчетов определялись размеры участков зоны термического влияния, в которых протекают полиморфные превращения, определялись скорости охлаждения в характерных участках зоны термического влияния.

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ РАЗРУШЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ФРАКТОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ИЗЛОМОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Е.Н. Бердникова

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

В настоящее время все больше технологических разработок направлено на повышение способности конструкций, работающих в сложных эксплуатационных условиях, сопротивляться хрупкому разрушению. Для решения этих задач требуется анализ взаимосвязи структуры металла, формирующейся в результате температурно-временных условий сварки, а также воздействия внешних нагрузок (статических, динамических и др.), с характером и причинами трещинообразования.

В докладе рассмотрены основные стадии разрушения и механизмы зарождения трещин для различных структурных составляющих, формирующихся в сварных соединениях высокопрочных сталей с учетом объемной доли типов разрушения (транскристаллитное или интеркристаллитное; хрупкое; квазихрупкое; вязкое) и параметров элементов микрорельефа изломов (размеров фасеток скола, квазискола, ямок вязкой составляющей, вторичных трещин и др.). На основании экспериментальных данных, полученных методами количественной фрактографии, приводится пример расчетных оценок напряжения, необходимого для зарождения микротрещин в местах локальных концентраторов напряжений — у границ структурных составляющих, неметаллических включений, твердых фаз карбидного типа и др. Приведены размеры структурных концентраторов зарождения микротрещин, которые провоцируют магистральное разрушение. Показано, что в зонах внутризеренного хрупкого скола величина напряжений зарождения микротрещин порядка $\leq 0,2\sigma_{0.2}$. Смена характера разрушения в зонах с квазихрупкой и вязкой составляющей

ющими приводит к увеличению сопротивляемости хрупкому разрушению металла ЗТВ до уровня напряжений $\sim (0,6-0,8)\sigma_{0,2}$.

ОПТИМІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ БАГАТОКОМІРКОВОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ УСТАНОВОК КОНТАКТНОГО МІКОЗВАРЮВАННЯ

О.Ф. Бондаренко¹, Ю.В. Бондаренко¹, П.С. Сафронов¹, В.М. Сидорець²

¹Донбаський державний технічний університет, Алчевськ, Україна

²Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ, Київ, Україна

Висока якість зварних з'єднань при виконанні контактної мікрозварювання забезпечується шляхом точного регулювання електричних параметрів імпульсів зварювального струму, можливість реалізації якого напряму залежить від раціональності побудови джерела живлення зварювальної установки.

Ефективним варіантом побудови джерела живлення установки контактної мікрозварювання є транзисторний перетворювач з модульною (багатокомірковою) структурою. Використання транзисторного перетворювача дозволяє здійснювати найбільш точне формування закону зміни струму в процесі зварювання. Саме необхідний закон зміни струму на передньому фронті імпульсу забезпечує відсутність прожогів, виплесків та інших дефектів. Задній фронт безпосередньо впливає на швидкості кристалізації та охолодження зварної точки, що забезпечує необхідну мікроструктуру та високі показники механічних властивостей зварного з'єднання. Модульна структура, що передбачає наявність певної кількості ідентичних транзисторних комірок, кожна з яких регулює частину загального зварювального струму, дозволяє підвищити ступінь уніфікації конструкції джерела живлення та надійність його функціонування. Важливим завданням при цьому є визначення оптимальної кількості комірок джерела живлення, оскільки, з одного боку, збільшення кількості комірок призводить до поліпшення його електричних параметрів, а з іншого — до погіршення масогабаритних та вартісних показників.

З метою визначення оптимальної структури джерела живлення установки контактної мікрозварювання була проведена математична оптимізація за трьома критеріями: потужність втрат, об'єм та вартість джерела. Ці критерії з відповідними ваговими коефіцієнтами були зведені до адитивного критерію. Було встановлено, що мінімум цільової функції (за умов цін та технологій виготовлення елементів силової електроніки) існує. Були проведені дослідження залежності оптимального числа комірок від сумарного зварювального струму.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОХИРУРГИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ

А.Г. Дубко, В.Н. Сидорец, А.Т. Зельниченко, И.Ю. Худецкий

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

Ток высокой частоты в современной медицине применяют во многих областях общей хирургии, кардиологии, урологии, отоларингологии, гинекологии, онкологии. Также он применяется для сварки мягких биологических тканей. Частота переменного тока выбирается в диапазоне от 66 кГц до 4 МГц. Протекание через проводник переменного тока сопровождается скин-эффектом, который заключается в неоднородном распределении плотности переменного тока по его сечению. Наибольшее значение наблюдается у поверхности. С увеличением глубины плотность тока резко уменьшается. При очень больших частотах ток протекает практически только в тонком поверхностном слое. Внутри достаточно толстого проводника тока высокой частоты нет.

Неравномерное распределение плотности тока в электродах электрохирургических инструментов влияет на градиент температур биологических тканей, которые контактируют с поверхностями электродов. Это снижает эффективность электрохирургического воздействия. Выбор конструкции электродов и их попе-

речного сечения, является актуальной задачей при проектировании электродов электрохирургических инструментов.

Для анализа электротехнических процессов в биологической ткани и электродах электрохирургических инструментов, происходящих при хирургическом вмешательстве, разработаны математические модели. В основу моделирования положено уравнение для переменного электромагнитного поля, которое вытекает из уравнений Максвелла, где электрофизические характеристики биологических тканей и электродов определяются соответствующими удельными электропроводностями, диэлектрическими и магнитными проницаемостями материалов.

Для решения уравнения переменного электромагнитного поля использовали метод конечных разностей и метод конечных элементов. Реализация методов осуществлялась в среде математического пакета Matlab, который использовался также для графической визуализации результатов. Это давало возможность оперативно анализировать скин-эффект в проводящих средах.

С помощью математического моделирования удалось получить более равномерное распределение плотности тока в электродах, а значит и более равномерный нагрев биологических тканей в процессе их сварки. Этот факт оказывает важное влияние на получение качественного сварного соединения. При проектировании электродов для сварки мягких тканей различных органов перспективно использовать разработанные модели. В результате моделирования установлено, что один из вариантов повышения эффективности работы электродов высокочастотных электрохирургических инструментов это конструирование электродов составными.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СВАРОЧНУЮ ДУГУ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

А.М. Жерносеков, В.Н. Сидорец

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

Практический опыт показывает, что традиционные источники питания для дуговой сварки на базе трансформаторов, исследованием и разработкой которых занимается Институт электросварки им. Е.О. Патона, продолжают успешно конкурировать со сварочными источниками питания инверторного типа.

Простота и надежность работы традиционных источников питания это те свойства, которыми еще не обладают инверторные источники питания, содержащие большое количество элементов силовой электроники.

Для сохранения конкурентоспособности традиционных сварочных источников питания необходимо их совершенствование, особенно устранение их основного недостатка — большой массы сварочного трансформатора. Необходимость высоких значений напряжения холостого хода трансформатора для обеспечения стабильного горения сварочной дуги и устойчивости всего сварочного процесса является причиной большой массы трансформатора. Одним из путей совершенствования традиционных сварочных источников питания является применение устройств стабилизации горения дуги, которые воздействуют на дугу импульсами тока, что обеспечивает стабильное ее горение при более низких значениях напряжения холостого хода сварочного трансформатора. Поскольку способов подачи стабилизирующих импульсов может быть много, то это открывает широкие возможности и перспективы для исследований.

Таким образом, данная проблема является актуальной не только для исследования условий горения сварочной дуги и влияния на нее импульсного стабилизирующего воздействия, но и для оптимизации режимов стабилизации и оборудования, которое осуществляет стабилизацию. Настоящая работа посвящена оптимизации режимов и оборудования для стабилизации сварочной дуги переменного тока. Нам удалось провести оптимизацию режимов стабилизации по критерию минимума напряжения холостого хода сварочного трансформатора, а затем, зная значение напряжения холостого хода, оптимизировать параметры трансформатора по массогабаритному критерию.

**ОБЗОР КОНФЕРЕНЦИЙ
ПО МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ
В СВАРКЕ И РОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ,
ПРОВОДИМЫХ В 1976–2012 гг.
ПОД РУКОВОДСТВОМ акад. В.И. МАХНЕНКО**

А.Т. Зельниченко, В.М. Абдулах, И.Ю. Романова

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

В докладе рассматривается тематика докладов и география участников конференций, проводимых под руководством академика Владимира Ивановича Махненко в области математического моделирования в сварке и специальной электрометаллургии. Проведен анализ следующих конференций, семинаров и международных школ:

- семинар «Применение математических методов для исследования процессов сварки и спецэлектрометаллургии», 25–27 мая 1976, Киев;
- IV Международная школа «Математические методы в сварке», 20–26 апреля 1981, пос. Кацивели, Крым;
- конференция «Применение математических методов в сварке», 10–12 декабря 1985, Киев;
- V Международная школа «Математические методы в сварке», 18–20 сентября 1988, Феопания, Киев;
- конференция «Математические методы и САПР в сварочном производстве», 30 января–3 февраля 1990, Свердловск;
- семинар «Моделирование физико-химических процессов, создание банков данных, расчетно-информационных и экспертных систем в области сварки и родственных технологий», 20–25 апреля 1993, Алушта, Крым;
- семинар «Компьютерное материаловедение и информатизация создания новых веществ и материалов», 22–27 мая 1995, Алушта, Крым;
- Международная конференция «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (ММИТСРП), 16–20 сентября 2002, Кацивели, Крым;
- II Международная конференция ММИТСРП, 13–17 сентября 2002, Кацивели, Крым;
- объединенная XVI Международная конференция «Компьютерные технологии в сварке и производстве» & III Международная конференция ММИТСРП, 6–8 июня 2006, Киев;
- IV Международная конференция ММИТСРП, 27–30 мая 2008, Кацивели, Крым;
- V Международная конференция ММИТСРП, 25–28 мая 2010, Кацивели, Крым;
- VI Международная конференция ММИТСРП, 28 мая–1 июня 2012, Кацивели, Крым.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ
И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В СВАРНЫХ ШВАХ
ВЫСОКОПРОЧНЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ**

В.А. Костин

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

В настоящее время возрастает необходимость использования в промышленности новых высокопрочных низколегированных (ВНЛ) сталей категорий прочности Х80, Х90 и выше для снижения себестоимости продукции и повышения уровня рентабельности металлических конструкций. Повышение уровня прочности свариваемых сталей выше 600–700 МПа приводит к возрастанию риска образования холодных трещин не только в участках зоны термического влияния, но и в металле шва, в связи с изменением характера распада аустенита — образованием промежуточных и закалочных структур.

Широкое применение в практике изучения структурных превращений, происходящих в металле швов и ЗТВ под воздействием термического цикла сварки, получили математические методы моделирования фазовых превращений на основе прогнозирования температур фазовых превращений, определения количества структурных составляющих и построения расчетных диаграмм распада аустенита.

Цель данной работы заключалась в создании модели описывающей кинетику распада аустенита, основанной на анализе большого объема экспериментальных данных, полученных путем использования системы имитации термомеханического цикла сварки Gleeble 3800.

Моделирование проводилось на сварных соединениях сталей 10ХСНД, 12ХН2МДФ, 14ХГНДЦ, выполненных автоматической дуговой сваркой под керамическими флюсами с использованием порошковых сварочных проволок Св-09Г2С и Св-10ГНМДТА.

Для проведения компьютерного моделирования использовались экспериментальные результаты определения температур начала образования феррита, бейнита, мартенсита, количество структурных составляющих, механические свойства. В работе были разработаны компьютерные программы для расчета температур фазовых превращений, кинетики распада аустенита и их механических свойств.

Преимущество предложенной расчетной модели для оценки структуры и механических свойств сварных швов состояло в возможности их определения при повышенных температурах, вплоть до температур начала распада аустенита 700–800 °С.

В дальнейшем предполагается использовать разработанные компьютерные программы для прогнозирования структуры и механических свойств сталей более широкого класса.

КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА «ТИГ-А-ТИГ» ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ОДНОПРОХОДНЫХ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ ШВОВ ПРИ ТИГ И А-ТИГ СВАРКЕ СТАЛЕЙ

И.В. Кривцун, В.Ф. Демченко, Д.В. Коваленко, И.В. Коваленко

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

Компьютерная программа «ТИГ-А-ТИГ» предназначена для моделирования процесса формирования однопроходных стыковых сварных швов при ТИГ и А-ТИГ сварке сталей. Программа базируется на математической модели процессов переноса энергии, импульса и заряда, протекающих в сварочной ванне и в основном металле.

Программа «ТИГ-А-ТИГ», численно реализующая описание модели, построена по принципу: препроцессор, процессор и постпроцессор. Препроцессор позволяет вводить входные данные для расчета, включающие тип процесса сварки, геометрию соединения (без разделки и с U-образной разделкой), положение горелки в пространстве и параметры режима сварки. Процессор предназначен для имитации формирования стыковых швов при ТИГ и А-ТИГ сварке сталей. Постпроцессор представляет результаты работы программы в виде размеров и формы поперечного сечения зоны проплавления однопроходного стыкового сварного шва при ТИГ или А-ТИГ сварке на основе расчетных данных, полученных процессором при численной реализации математической модели ТИГ (А-ТИГ) процесса.

Температурное поле в свариваемом металле визуализируется в трех ортогональных сечениях с возможностью отображения термического цикла в заданной точке поперечного сечения шва. Постпроцессор также визуализирует трехмерное изображение сварного соединения и расчетный макрошлиф поперечного сечения шва. Итоговым результатом работы программы является протокол расчета.

Программа предоставляет некоторые дополнительные функции: расчет таких параметров процесса сварки как: напряжение на дуге, электрическая и тепловая мощности, эффективный к.п.д., коэффициент концентрации дуги, максимальные плотности теплового потока и плотности электрического тока на аноде. Программа обладает удобными входным и выходным интерфейсами. Время расчета составляет порядка 3-х минут. Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными показало, что погрешность

расчетного прогнозирования формы шва не превышает 10 %, следовательно разработанное программное обеспечение может успешно применяться при проектировании технологии ТИГ и А-ТИГ сварки.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВАРКИ ЖИВЫХ ТКАНЕЙ

А.В. Лебедев, А.Г. Дубко, И.А. Бойко

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

Способ сварки живых тканей достаточно широко применяется в хирургии для сокращения времени операции, уменьшения потерь крови и вероятности послеоперационных осложнений. Экспериментальные исследования сварки живых тканей достаточно тяжело проводить из-за небольших размеров сварочного шва и длительности сварки, высокой стоимости экспериментов на подопытных животных. Поэтому математическое моделирование может дать более полную информацию об основных параметрах сварки – распределении температуры, механических напряжений, деформациях, градиентов электрического потенциала и плотности тока. Моделирование используется в Институте электросварки для исследования процессов сварки и в Киевском политехническом университете при подготовке магистров и бакалавров факультета биоинженерии. Для моделирования нами использовались системы автоматизированного проектирования и моделирования: Solid Works, Abaqus, ANSYS, Maxwell. Solid Works – это наиболее удобная программа для применения студентами при написании дипломных работ. Она проста в освоении и позволяет создавать пространственные модели ткани со сварочными инструментами. Библиотека свойств материалов обширна и позволяет вносить материалы пользователя. С помощью Solid Works проводились исследования прочности сварных швов, распределения механических напряжений, исследовались разрушения сваренных кровеносных сосудов в результате усталости шва, вызванной колебаниями давления крови с частотой сокращений сердца. Достаточно удобно исследовать нагрев и распределение температуры в ткани и электродах с учетом теплового сопротивления в местах контакта с электродами. С помощью Solid Works создаются объемные, фотореалистичные изображения сварочных швов и инструментов. К недостаткам Solid Works можно отнести длительное время моделирования при больших деформациях ткани и отсутствие моделирования электромагнитных процессов. Программы Abaqus и ANSYS более сложные для обучения студентов. Они позволяют моделировать электрические, тепловые и механические процессы. Одной из сложностей моделирования является определение свойств живой ткани: плотности, теплоемкости, электрической и тепловой проводимости, модуля Юнга и коэффициент Пуассона. Последние четыре параметра имеют анизотропные свойства.

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ СТАЛИ 38ХНЗМФА, ФОРМИРУЮЩИХСЯ В УСЛОВИЯХ ЛАЗЕРНОГО И ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

***Л.И. Маркашова, В.Д. Шелягин, О.С. Кушнарера,
Е.Н. Бердникова, А.В. Бернацкий***

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

Представлены результаты исследований структурно-фазовых состояний, в поверхностных слоях конструкционной стали 38ХНЗМФА в различных условиях упрочняющей обработки лазерным и лазерно-плазменным легированием формирующихся структур в обеспечении оптимальных механических (эксплуатационных) свойств обработанных поверхностей. Комплексным исследованием (световой, аналитической растровой и просвечивающей электронной микроскопии) установлено, что при всех исследуемых обработках поверхностей легированный слой имеет четко выраженную кристаллическую мелкозернистую структуру, а в случае лазерно-плазменной обработки преобладает внутризеренная структура ячеистого характера. При этом наиболее характерными дефектами для всех исследуемых обработок (различное

легирование) являются микротрещины, формирующиеся как в легированном слое, так и вдоль линии сплавления.

Оценками конкретного вклада структур и их параметров (химический состав, размер зерна, субзерна, плотность дислокаций, фазовых выделений и т.п.) в изменение $\Sigma\sigma_T$ показано: лазерно-плазменное легирование способствует более значительному увеличению прочностных характеристик поверхностей (на 20 %) в сравнении с лазерным легированием. А наибольший вклад в упрочнение (лазерно-плазменное легирование — $V = 500$ мм/мин; $P = 3$ кВт) вносят фазовые выделения (27 %), и субструктура (25 %). Низкая плотность дислокаций ($\rho \sim 8 \cdot 10^9 - 1 \cdot 10^{10}$ см⁻²) в легированном слое при равномерном ее распределении способствует формированию однородно распределенных по объемам зерен концентраторов локальных внутренних напряжений ($\tau_{л/вн} \sim 148 - 370$ МПа), что характеризует структурное состояние поверхности для указанной обработки как оптимальное, обеспечивающее практическое отсутствие трещин в обработанных поверхностях.

ВЫБОР СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЦИКЛОВ И МИКРОСТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ СВАРКЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

О.В. Махненко, И.И. Прудкий

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина

Сокращение сроков разработки и повышение требований по качеству производства сварных конструкций, вызвало создание целого ряда компьютерных программ, которые облегчают и ускоряют работу инженера-сварщика или инженера-технолога по разработке новых сварных конструкций и технологий сварки. Эти программные продукты можно условно разделить на две основные группы: системы автоматического проектирования технологических процессов (САПР ТП), которые, как правило, интегрированы с системами 3D моделирования для решения конструкторских задач, и системы инженерного анализа для моделирования технологических процессов сварки.

В ИЭС им. Е.О. Патона было создано сварочное ПО ARCWELDSYS (системы выбора сварочных материалов для дуговой сварки конструкционных сталей), которое предназначено для сокращения объема экспериментов на образцах при выборе сварочных материалов для конкретного сварного соединения путем использования средств математического моделирования. С учётом развития современной компьютерной техники и расчётных методов математического моделирования, физико-химических и металлургических процессов при сварке целесообразным является дальнейшее совершенствование существующей версии компьютерной системы на основе доработки математических моделей и расчётных алгоритмов по определению температурных полей и соответствующих структурных превращений для различных типов сварных соединений, в том числе за счёт применения трёхмерных моделей.

В докладе представлены сравнения результатов расчета тепловых полей при дуговой сварке, полученных с помощью двухмерных и трехмерных моделей методом конечных элементов. Показано, что при сварке сталей двухмерная модель позволяет получить распределение температур в поперечном сечении сварного соединения с достаточной для инженерного применения точностью. При сварке алюминиевых сплавов, имеющих высокий коэффициент теплопроводности, целесообразно применение трехмерной модели.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ СВАРКЕ

В.Ф. Минин В.Ф., И.В. Минин, О.В. Минин

Сибирская государственная геодезическая академия, Новосибирск, Россия

Магнитно-импульсная сварка является прогрессивной технологией для изготовления целого ряда перспективных изделий. Для моделирования волновых процессов, происходящих в оправке при магнитно-импульсной сварке, применялся специализированный метод.

Результаты моделирования показывают, что вследствие роста амплитуды волн сжатия и разрежения при их схождении к оси оправки, в материале оправки вблизи оси появляются знакопеременные напряжения, близкие по величине к пределу прочности материала и действующие в течении по крайней мере нескольких микросекунд. Разумно предположить, что в такой геометрии после нескольких десятков подобных циклов разрушение оправки кажется весьма вероятным, что и наблюдается в экспериментах. Поэтому естественный способ уменьшения знакопеременных напряжений вблизи оси оправки заключается в удалении прилегающего к оси материала оправки. В такой геометрии оправки значения максимальных растягивающих напряжений уменьшается примерно втрое. Другим методом уменьшения напряжений в оправке является применение дифракционных структур, позволяющих существенно уменьшить интенсивность ударных волн в материале тела. Рассмотрены также вопросы дозирования энергии метания свариваемых деталей.

ELECTRO-ARC MAGNETO-PULSE INSTALLATIONS ARE AN ALTERNATIVE TO CONVENTIONAL MAGNETO-PULSE INSTALLATIONS

V.F. Minin, I.V. Minin, O.V. Minin

Siberian State Academy of Geodesy, Novosibirsk, Russia

As compared with the conventional magneto-pulse installations the Electro Dynamic Magneto Impulse Devices (EDMID) features:

- greater manufacturing capabilities in carrying-out magneto-pulse welding of tubular parts;
- better quality of welding and other operations of magneto-pulse processing due to the guaranteed azimuth uniformity of power action upon parts;
- stable parameters of the working cycles, enhanced operational reliability and safety due to the principle improvement of the discharge circuit and its element basis.

It is possible to weld, form, assemble, cut, calibrate, swage and reduce tubular parts of any diameter with a wall thickness from 0.5 to 5 mm and to improve the technology of other operations of metal machining, e.g. pressing of powders, applying of coatings and so on. The details of metals and alloys with electric conductance are machined more successfully.

The EDMID realizes the unique technological properties of non-contact force action upon metals of pulses of a strong magnetic field induced by the inductor. A technical break-through was made due to the creation of the inductor-commutator device which includes the sector-type inductor. This is a new type of high-current devices which are capable of switching any current in the megaampere region simultaneously with the induction of a pulsed magnetic field for manufacturing purposes.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ ВІД АВТОНОМНОГО ГІБРИДНОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ДО ЗВАРЮВАЛЬНОГО КОНТАКТУ

**І.В. Пентегов¹, В.М. Сидорець¹,
П.С. Сафронів², О.Ф. Бондаренко², Ю.В. Бондаренко²**

¹Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ, Київ, Україна

²Донбаський державний технічний університет, Алчевськ, Україна

Технологія контактного мікрозварювання широко використовується в електронній промисловості та приладобудуванні. Висока якість зварювання може бути забезпечена шляхом контрольованого поступового введення теплової енергії в зону зварювання, яке, в свою чергу, здійснюється за рахунок точного регулювання електричних параметрів імпульсів зварювального струму. Тому без сумніву є актуальною задача постачання необхідної кількості енергії до зварювального контакту з можливістю її динамічного регулювання.

У зв'язку з цим викликає інтерес дослідження енергетичних можливостей та динамічних характеристик гібридних накопичувачів для автономних джерел живлення установок контактної мікрозварювання. Такі накопичувачі можуть включати акумуляторні батареї, суперконденсаторні модулі та електролітичні конденсатори. Спільне використання цих накопичувальних елементів, які мають різні динамічні характеристики і забезпечують різну швидкість віддачі енергії в навантаження, надасть можливість отримувати необхідну енергію протягом всього інтервалу часу формування зварювального імпульсу. А застосування транзисторного перетворювача з дорегулюванням струму в безперервному режимі дозволить забезпечити необхідні електричні параметри зварювальних імпульсів.

Задля дослідження процесів передачі енергії до зварювального контакту від автономного джерела живлення, що включає гібридний накопичувач і транзисторний перетворювач з дорегулюванням струму в безперервному режимі, було складено еквівалентну електричну схему системи та проведено її математичне моделювання. При складанні еквівалентної схеми були враховані електричні параметри накопичувальних елементів та силових транзисторів, які визначають інерційність передачі енергії та її внутрішні втрати, такі як паразитна індуктивність, паразитна ємність, внутрішній опір та ін. Результати математичного моделювання підтвердили ефективність гібридного джерела живлення та дозволили оптимізувати його структуру.

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЛАЗМЕННО-ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ НА ПРИМЕРЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ДРОБИ ИЗ НЕКОМПАКТНОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУЖКИ

А.П. Сурин

ООО «Сооружение», Москва, РФ

Рассмотрен технологический процесс получения дроби методом капельного плавления некомпактной металлической стружки плазменным разрядом.

Экспериментально установлено, что параметры эффективного проведения процесса существенно зависят от рода металла и состава переплавляемого сплава.

Расширение сортамента перерабатываемой стружки возможно за счет применения плазменно-лазерной системы, подбора состава газовой среды и давления в рабочей камере установки.

Рассмотрено влияние на производительность плавления предварительной очистки стружки, относительного положения лазера и плазменного ускорителя, использования средств для уменьшения работы выхода электронов из материала стружки.

Предложена система управления процессом капельного плавления пучков металлической стружки плазменным разрядом с использованием лазерного луча.

Разработана экономическая модель плазменно-лазерной системы для определения относительного срока окупаемости затрат на создание установки получения дроби из некомпактных пучков стружки металлов и сплавов с различными температурой плавления, коэффициентом теплопроводности, работой выхода электронов, химической активностью компонентов сплавов, упругостью пара и др.

Принципы построения модели могут быть использованы для различных процессов плавления, сварки металлических материалов, получения порошка.

БАГАТОВИМІРНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ СКЛАДУ, СТРУКТУРИ ТА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛУ ШВА ЗАЛЕЖНО ВІД ЛЕГУЮЧОЇ ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРЮВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Л.А. Тараборкін¹, В.В. Головка²

¹НТУУ «КПІ», Київ, Україна

²Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ, Київ, Україна

Масив вихідних даних був утворений за результатами металографічного аналізу металу зварних швів 15 дослідних флюсів, отриманих відповідно до спеціально розробленого плану експеримента, метою якого було вивчення впливу кисневого потенціалу та легуючої здатності зварювальних матеріалів на структуру та механічні властивості металу зварних швів. Вихідними даними були: вміст (ваг. %) у металі шва хімічних елементів С, Si, Mn, Ni, Mo, Ti, Cr, Al, S, P, O; вміст (ваг. %) Si, Mn, Ti, Al у структурних складових (у карбідах, полігональному та гольчатому фериті, неметалевих включеннях); показники механічних властивостей металу шва (границя текучості; тимчасовий опір руйнуванню; відносне подовження; відносне звуження; ударна в'язкість при температурі $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; ударна в'язкість при $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$; ударна в'язкість при $T = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Оскільки зазначені експериментальні дані утворюють досить складну для простого огляду сукупність, з метою проведення обґрунтованого аналізу доцільно поставити задачу про виявлення певних структур, притаманних цій сукупності. Поставлену задачу розв'язували методами факторного й кластерного аналізів, а також канонічних кореляцій.

Зокрема, у масиві даних виділили три кластери. Характер розподілу експериментальних даних по кластерах відображає характер впливу легуючої здатності — роздільний, спільний або перехресний — на вміст хімічних елементів у структурних складових та/або в неметалевих включеннях.

За результатами виконаного факторного аналізу виділено три фактори, які спільно пояснюють переважну частину варіабельності вихідних даних щодо хімічного складу шва, і п'ять факторів для опису хімічного складу структурних компонент. Відповідні факторні моделі мають істотні відмінності.

Аналіз канонічних кореляцій дозволив статистично надійно визначити зв'язки між хімічним складом металу шва і хімічним складом структурних складових, а також між хімічним складом металу шва і хімічним складом неметалевих включень, причому кожній з канонічних кореляцій надано змістовну інтерпретацію.

У рамках одержаної факторної моделі механічних властивостей металу шва вся сукупність вимірювань показників механічних властивостей може бути описана лише двома факторами, які пояснюють практично 95% спостереженої дисперсії.

ІМОВІРНІСНА МОДЕЛЬ ЕВОЛЮЦІЇ РОЗПОДІЛУ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ ЗА РОЗМІРАМИ В МЕТАЛІ ЗВАРНИХ ШВІВ

Л.А. Тараборкін¹, В.В. Головка²

¹НТУУ «КПІ», Київ, Україна

²Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ, Київ, Україна

Розподіл неметалевих включень за розмірами в об'ємі металу, отриманого тим або іншим металургійним способом, чисельно характеризують за допомогою функції щільності розподілу, яку в загальному випадку визначають, розв'язуючи рівняння Смолуховського. Однак при цьому доводиться вводити додаткові (не завжди фізично виправдані) припущення щодо умов і характеристик відповідного процесу. Альтернативний підхід полягає в тому, що на основі великого масиву накопичених експериментальних даних намагаються зіставити емпірично спостережені розподіли неметалевих включень за розмірами з певними відомими математичними законами розподілів.

Виконане в поданій роботі чисельно-експериментальне дослідження розподілу включень за розмірами в металі зварних швів, одержаних методами зварювання під флюсом і порошковим дротом показало, що експериментальні розподіли не є експоненціальними (на відміну від сталеплавильних процесів) з надійною ймовірністю щонайменше 95 % за критеріями Пірсона та Колмогорова–Смірнова. Натомість виявилось, що досліджені експериментальні дані походять із гамма-розподілу із зазначеною надійною ймовірністю. Оскільки початковий розподіл за розмірами зародків неметалевих включень з фізичних міркувань має підкорятись експоненціальному закону розподілу, то для опису еволюції розподілу неметалевих включень під час утворення зварного шва доцільно використати ймовірнісну модель у вигляді гамма-розподілу з параметрами, залежними в часу за лінійним законом. Зокрема, на початку процесу значення параметра форми дорівнює одиниці, так що початковий розподіл неметалевих включень у запропонованій моделі є, що фізично очікувано, експоненціальним. Отримані розрахункові формули дозволяють скористатись інструментом електронних таблиць для моделювання й візуалізації розподілу неметалевих включень у зварному шві за розмірами залежно від часу.

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЫ СЖАТОЙ ДУГИ ПРИ ВОЗДУШНО-ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКЕ НА ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ПОЛЯРНОСТИ

М.Ю. Харламов², И.В. Кривцун^{1, 2}, В.Н. Коржик^{1, 2}, В.И. Ткачук²

¹Гуандунский генеральный научно-исследовательский институт промышленных технологий (Гуанчжоуский генеральный научно-исследовательский институт цветных металлов),

Гуанчжоу, КНР

²Інститут електросварки ім. Є.О. Патона НАНУ, Київ, Україна

Предложена математическая модель тепловых, газодинамических и электромагнитных процессов в электродуговой плазме, генерируемой режущими плазмотронами при их работе на прямой и обратной полярности. Данная модель может быть использована для расчета распределенных и интегральных характеристик потока дуговой плазмы внутри плазмотрона, на открытом участке дуги и в полости реза. При этом модель позволяет проводить численный анализ тепловых, газодинамических и электромагнитных характеристик плазмы сжатой дуги в широких диапазонах изменения тока, расхода плазмообразующего газа, а также геометрических параметров плазмформирующего канала плазмотрона и полости реза.

Основные сложности при моделировании характеристик режущей дуги прямой и, особенно, обратной полярности связаны с определением области привязки дуги в полости реза. Для решения этой проблемы, распределения тока плазменной дуги по глубине реза задаются при помощи инетрполяционных зависимостей, построенных на основе известных экспериментальных данных.

Результаты численного исследования характеристик сжатой дуги, генерируемой режущим плазмотроном при работе на прямой и обратной полярности, показали, что существенное влияние на эти характеристики

оказывают геометрия плазмформирующего сопла, толщина разрезаемого изделия, а также параметры режима работы плазмотрона. В частности, увеличение толщины разрезаемого изделия приводит к существенному повышению напряжения и, соответственно, мощности плазменной дуги. Поэтому, при воздушно-плазменной резке деталей большой толщины необходимо использовать источники питания, поддерживающие работу в широком диапазоне рабочих мощностей (до 200 кВт) и напряжений (100–600 В).

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Абдулах В.М. 10, 12, 15, 36

Адамов Р.Г. 14, 31

Алексеенко Т.А. 9, 19

Ахонин С.В. 11, 33

Белоус В.Ю. 11, 33

Бердникова Е.Н. 11, 12, 33, 38

Бернацкий А.В. 12, 38

Богачёв Д.Г. 13, 20

Бойко И.А. 12, 38

Бондаренко О.Ф. 11, 12, 34, 41

Бондаренко Ю.В. 11, 12, 34, 41

Бушма А.И. 9, 29

Валевич М.Л. 13, 20

Великоиваненко Е.А. 8, 9, 14, 21, 24, 25

Головко В.В. 10, 13(2), 14, 15, 16, 42, 43

Грещук М.Г. 8, 27

Григоренко С.Г. 11, 33

Губаев К.В. 9, 28

Демченко В.Ф. 8, 10(3), 12, 14, 15, 16, 17, 19, 29, 37

Демьянов А.И. 13, 31

Дзюбак Л.И. 9, 10, 11, 25, 26

Дубко А.Г. 11, 12, 34, 38

Дуда И.М. 13, 20

Дутка В.А. 10, 27

Ермоленко Д.Ю. 14, 16

Жерносеков А.М. 9, 12, 29, 35

Забиров А. 14, 17

Зельниченко А.Т. 10, 11, 12, 19, 34, 36

Zinigrad М. 9, 17

Игнатенко А.В. 14, 16

Игнатов А.В. 8, 18

Коваленко Д.В. 10, 12, 29, 37

Коваленко И.В. 10, 12, 29, 37

Козлитина С.С. 10, 11, 25, 26

Колисниченко О.В. 13, 20

Коржик В.Н. 13(2), 31, 43

Костин В.А. 12, 36

Kossenko А. 9, 17

Кривцун И.В. 8, 9, 10(3), 12, 13(2), 14, 15, 17, 18, 19, 28, 29, 31, 37, 43

Крикент И.В. 10(3), 14, 15, 17, 19, 29

Кушнарева О.С. 9, 12, 19, 38

Лебедев А.В. 12, 38

Lugovskoy А. 9, 17

Лукаш В.А. 10, 27

Майстренко А.Л. 10, 27

Максимов С.Ю. 9, 19

Маркашова Л.И. 9, 12, 13, 19, 20, 38

Махненко О.В. 8, 9(2), 12, 14(2), 21(2), 22, 23, 24, 39

Миленин А.С. 8, 9, 10, 11(2), 14, 22, 24, 25(2), 26(2)

Минин В.Ф. 12(2), 40(2)

Минин И.В. 12(2), 40(2)

Минин О.В. 12(2), 40(2)

Мирзов И.В. 9, 23

Мокров О. 14, 17

Мужиченко А.Ф. 14, 21

Нестеренков В.М. 10, 27

Павлов А.Г. 10, 29

Підгурський І.М. 8, 27

Підгурський М.І. 8, 27

Пентегов І.В. 12, 41

Пивторак Н.И. 8, 9, 24, 25

Покляцкий А.Г. 9, 19

Полишко А.А. 10, 26

Прилипко Е.А. 9, 19

Прудкий И.И. 12, 39

Пустовой А. 9, 24

Райсен У. 14, 17

Розынка Г.Ф. 8, 9, 14, 21, 24, 25

Романова И.Ю. 12, 36

Рыбалкин Е.А. 9, 19

Саенко В.Я. 10, 26

Сапрыкина Г.Ю. 14, 22

Сафронов П.С. 11, 12, 34, 41

Селин Р.В. 11, 33

Семёнов А.П. 8, 9, 28(2)
Семенов И.Л. 8, 18
Сивцев М.Н. 11, 30
Сидорец В.Н. 9, 10, 11(2), 12(2), 29(2), 34(2), 35,
41
Синюк В.С. 11, 30
Слепцов О.И. 11, 14, 30, 31
Сурин А.П. 13, 41
Тараборкин Л.А. 10, 13(2), 15, 42, 43
Тихонов А.Г. 14, 31
Ткачук В.И. 13, 43
Тюрин Ю.Н. 13, 20

Федоров О.П. 8, 16
Фик А.Ю. 8, 27
Харбин Н.Н. 11, 30
Харламов М.Ю. 13(2), 31, 43
Худецкий И.Ю. 11, 34
Царинный А.Б. 11, 26
Царинный Б.В. 11, 26
Шекера В.М. 11, 26
Шелягин В.Д. 12, 38
Шуба И.В. 8, 16

