

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
академик **Б. Е. Патон**

Ученые ИЭС им. Е. О. Патона
д.т.н. **Г. М. Григоренко** (зам. гл. ред.),
д.т.н. **С. В. Ахонин**, **Д. М. Дяченко** (отв. секр.),
д.т.н. **И. В. Кривциун**, д.т.н. **Л. Б. Медовар**,
д.т.н. **Б. А. Мовчан**, д.т.н. **А. С. Письменный**,
д.т.н. **А. И. Устинов**, д.т.н. **В. А. Шаповалов**

Ученые университетов Украины
д.т.н. **В. С. Волошин**, ПГТУ, Мариуполь
д.т.н. **М. И. Гасик**, НМетАУ, Днепр
д.т.н. **О. М. Ивасишин**, Ин-т металлофизики, Киев
д.т.н. **П. И. Лобода**,
НТУУ «КПИ им. И. Сикорского», Киев
д.т.н. **А. В. Овчинников**, ЗНТУ, Запорожье

Зарубежные ученые
д.т.н. **К. В. Григорович**
МИСиС, Москва, РФ
д.х.н. **М. Зиниград**
Ун-т Ариэля, Израиль
д.т.н. **А. А. Ильин**
МАТИ-РГТУ, Москва, РФ
д.ф.-м.н. **Г. Младенов**
Ин-т электроники, София, Болгария
д.т.н. **А. Митчелл**
Ун-т Британской Колумбии, Канада
д.т.н. **Г. Ф. Тавадзе**
Ин-т металлург. и материаловед.
им. Ф. Тавадзе, Тбилиси, Грузия
д.т.н. **Цоуха Джанг**
Северо-Восточный ун-т, Шеньян, Китай

Учредители
Национальная академия наук Украины
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ
Международная Ассоциация «Сварка» (издатель)

Адрес редакции журнала
«Современная электрометаллургия»
Институт электросварки
им. Е. О. Патона НАН Украины
Украина, 03680, г. Киев-150,
ул. Казимира Малевича, 11
Тел./факс: (38044) 200 82 77, 200 54 84
Тел.: (38044) 205 22 07
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

Редакторы
К. Г. Григоренко, **Т. В. Юштина**
Электронная верстка
Л. Н. Герасименко, **Т. Ю. Снегирева**

Свидетельство о государственной регистрации
КВ 6185 от 31.05.2002
ISSN 2415-8445

Рекомендовано к печати
Ученым советом ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины

Журнал входит в перечень утвержденных МОН
Украины изданий для публикации трудов
соискателей ученых степеней

При перепечатке материалов ссылка на журнал
обязательна. За содержание рекламных материалов
редакция журнала ответственности не несет

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Медовар Л. Б., Стовпченко А. П., Костецкий Ю. В. Концепция
микрозаводов для выпуска продукции премиум качества
электрошлаковым переплавом 3

Протокивилон И. В., Порохонько В. Б. Физическое моделирование
капельного переноса электродного металла при ЭШП с наложением
импульсных магнитных полей 9

**Биктагиров Ф. К., Мищенко Д. Д., Шаповалов В. А.,
Гнатушенко А. В., Игнатов А. П., Веретильник А. В.** Физические
свойства плавленного и агломерированного флюсов АНФ-6-1 15

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ

**Ахонин С. В., Северин А. Ю., Белоус В. Ю., Березос В. А.,
Пикулин А. Н., Ерохин А. Г.** Структура и свойства титанового сплава
ВТ19, полученного способом электронно-лучевой плавки, после
термомеханической обработки 19

Демченков С. А., Шишкин А. Е. Влияние старения реакционных
многослойных Al/Ni фольг на скорость распространения фронта
реакции СВС 25

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТАЛЛУРГИИ

Костин В. А., Григоренко Г. М. Особенности формирования структуры
3D изделия из стали S460M в аддитивной металлургической
технологии 33

Балицкий А. И., Иваскевич Л. М. Металлургические методы
повышения водородной хрупкости и трещиностойкости жаростойкого
никелевого сплава 43

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Григоренко С. Г., Григоренко Г. М., Задорожнюк О. М.
Интерметаллиды титана. Особенности, свойства, применение
(Обзор) 51

ИНФОРМАЦИЯ

IX Международная конференция молодых ученых «Сварка
и родственные технологии. WRTYS-2017» 59

РАЗРАБОТКИ ИЭС им. Е. О. ПАТОНА

Исследование закономерностей формирования способом электронно-
лучевого осаждения слоистых материалов функционального
назначения 61

Создание нового высокопрочного титанового сплава и разработка
оптимальных способов сварки 62

Исследование структурных превращений в сварных соединениях
высокопрочных сталей и разработка математической модели 63

Памяти А. К. Цыкуленко 64

ЗМІСТ

CONTENTS

ЕЛЕКТРОШЛАКОВА ТЕХНОЛОГІЯ

ELECTROSLAG TECHNOLOGY

Медовар Л. Б., Стовпченко А. П., Костецький Ю. В.
Концепція мікрозаводів для випуску продукції преміум
якості електрошлаковим переплавом 3

Протоковілов І. В., Порохонько В. Б. Фізичне моделювання
крапельного переносу електродного металу при ЕШП з
накладенням імпульсних магнітних полів 9

*Біктагіров Ф. К., Мищенко Д. Д., Шаповалов В. О.,
Гнатушенко О. В., Ігнатов А. П., Веретільник О. В.*
Фізичні властивості плавленого та агломерованого флюсів
АНФ-6-1 15

Medovar L.B., Stovpchenko A.P., Kostetsky Yu.V. Conception
of microplants for producing premium quality products by
using electroslag remelting 3

Protokovilov I.V., Porokhonko V.B. Physical modeling of
electrode metal drop transfer in ESM with superposition of
pulsed magnetic fields 9

*Biktagirov F.K., Mishchenko D.D., Shapovalov V.A.,
Gnatushenko A.V., Ignatov A.P., Veretilnik A.V.* Physical
properties of fused and agglomerated fluxes ANF-6-1 15

ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІ ПРОЦЕСИ

ELECTRON BEAM PROCESSES

*Ахонін С. В., Северин А. Ю., Белоус В. Ю., Березос В. О.,
Пікулін О. Н., Ерохін О. Г.* Структура та властивості
титанового сплаву VT19, отриманого способом
електронно-променевої плавки, після термомеханічної
обробки 19

Демченков С. О., Шишкін А. Є. Вплив старіння
реакційних багатощарових Al/Ni фольг на швидкість
поширення фронту реакції СВС 25

*Akhonin S.V., Severin A.Yu., Belous V.Yu., Berezos V.A.,
Pikulin A.N., Erokhin A.G.* Structure and properties of
titanium alloy VT19, produced by the electron beam
melting, after thermomechanical treatment 19

Demchenkov S.A., Shishkin A.F. Effect of ageing of reaction
multilayer Al/Ni foils on rate of SHS. reaction front
spreading 25

ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ МЕТАЛУРГІЇ

GENERAL PROBLEMS OF METALLURGY

Костін В. А., Григоренко Г. М. Особливості формування
структури 3D виробів зі сталі S460M в адитивній
металургійній технології 33

Балицький О. І., Іваскевич Л. М. Металургійні методи
підвищення водневої тривкості та тріщиностійкості
жароміцного нікелевого сплаву 43

Kostin V.A., Grigorenko G.M. Peculiarities of formation
of 3D structure of S460M steel product in additive
metallurgical technology 33

Balitsky A.I., Ivaskevich L.M. Metallurgical methods of
improving hydrogen brittleness and crack resistance of heat-
resistant nickel alloy 43

НОВІ МАТЕРІАЛИ

NEW MATERIALS

Григоренко С. Г., Григоренко Г. М., Задорожнюк О. М.
Інтерметаліди титану. Особливості, властивості,
застосування (Огляд) 51

Grigorenko S.G., Grigorenko G.M., Zadorozhnyuk O.M.
Intermetallics of titanium. Peculiar features, properties,
application (Review) 51

ІНФОРМАЦІЯ

INFORMATION

IX Міжнародна конференція молодих вчених
«Зварювання та споріднені технології. WRTYS-2017» ... 59

IX International Conference of young scientists «Welding
and related technologies. WRTYS-2017» 59

РОЗРОБКИ ІЕЗ ім. Є. О. ПАТОНА

DEVELOPMENTS OF THE
E.O. PATON ELECTRIC WELDING INSTITUTE

Дослідження закономірностей формування способом
електронно-променевого осадження шаруватих матеріалів
функціонального значення 61

Створювання нового високоміцного титанового сплаву і
розробка оптимальних способів зварювання 62

Дослідження структурних перетворень у зварних
з'єднаннях високоміцних сталей та розробка
математичної моделі 63

Пам'яті А. К. Цикуленко 64

Investigation of regularities of formation of functional-
purpose laminar materials by electron beam deposition
method 61

Development of new high-strength titanium alloys and
optimum methods of welding 62

Investigation of structural transformations in welded joints
of high-strength steels and design of mathematical model ... 63

In memory of A.K. Tsykulenko 64

Адреса редакції журналу
«Сучасна електрометалургія»

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України
Україна, 03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11
Тел./факс: (38044) 200 82 77, 200 54 84; тел.: 205 22 07
E-mail: journal@paton.kiev.ua; www.patonpublishinghouse.com
Свідоцтво про державну реєстрацію KB 6185 от 31.05.2002
ISSN 2415-8445

Editorial Address

of Journal «Electrometallurgy Today»
The E. O. Paton Electric Welding Institute, NASU
11, Kazimir Malevich Str., 03680, Kyiv, Ukraine
Tel./Fax: (38044) 200 82 77, 200 54 84; Tel.: 205 22 07
E-mail: journal@paton.kiev.ua; www.patonpublishinghouse.com
State Registration Certificate KV 6185 of 31.05.2002
ISSN 2415-8445

IX МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. WRTYS-2017»

23–26 мая 2017 г. состоялась IX Международная конференция молодых ученых «Сварка и родственные технологии. WRTYS-2017». Организатором конференции выступил Совет научной молодежи Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины при поддержке дирекции института и Национальной академии наук Украины. Впервые соорганизаторами конференции стал Международный институт сварки (МИС), Посольство Франции в Украине и Французский институт в Украине. По уже сложившейся традиции Представительство Польской академии наук в г. Киеве в лице директора проф. Г. Собчука также выступило соорганизатором конференции. Оргкомитет выражает огромную благодарность за партнерскую поддержку австрийской компании «INTECO», первому инновационному парку в Украине «Unit.city», частным компаниям «Elmet-roll», «Галант» и «Materials Lab».

Для участия в конференции подано 175 тезисов докладов. В работе конференции приняли участие около 160 молодых специалистов из 7-ми стран мира (Украины, Дании, Германии, Австрии, Франции, Польши, Сербии). Рабочий язык конференции — английский. С пленарными докладами выступили 40 участников. На сессии стендовых докладов представлено 38 работ. Опубликован сборник статей конференции (www.wrtys.com.ua/2017).

Открыл конференцию заместитель директора ИЭС академик НАНУ И. В. Кривцун. В своем вступительном слове он подчеркнул о необходимости проведения подобного рода мероприятий с целью обмена опытом и налаживания научных и дружественных отношений между молодыми учеными на международном уровне. И. В. Кривцун отметил, что уже на протяжении 18-ти лет конференция «Сварка и родственные технологии» пользуется популярностью среди молодых научных сотрудников и аспирантов в области сварки, металлургии и материаловедения и при этом количество участников постоянно растет. С приветственными словами выступили: атташе по вопросам научного и университетского сотрудничества Посольства Франции в Украине Сильвен Риголле, первый заместитель председателя Комитета науки и образования Верховной Рады Украины А. Спиваковский и технический и научный представитель Международного института сварки проф. Надеже Брун, которая представила интереснейшую презентацию о формате работы МИС. Все выступавшие пожелали участникам конференции плодотворной работы и научных достижений.

В рамках работы конференции были представлены доклады приглашенных лекторов-экспертов в

области сварки, металлургии и материаловедения. Так, вице-президент компании «INTECO» Матиас Кнабль сделал подробный доклад о технологиях плавки и литья для производства инструментальных сталей. Доцент сварочного факультета НГУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», к.т.н. Е. Чвертко представила интересный доклад о развитии современных технологий сварки на факультете и форме их подачи студентам. Разработки Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины в области технической диагностики структурных элементов, используя лазерные интерферометрические методы, представил старший научный сотрудник института, докторант, к.т.н. В. Савицкий. Особый интерес вызвал доклад заведующего отделом ИЭС к.т.н. М. Юрженко по сварке пластмасс и анализу механизмов, которые влияют на образование сварных соединений пластика. На острие новых тенденций и с актуальной информацией в области сварки живых тканей выступили заведующий отделом ИЭС д.т.н. Г. Маринский и заслуженный врач Украины, практикующий хирург д.м.н. С. Подпратов. В рамках первого рабочего дня конференции были представлены доклады по существующей практике получения грантов и проектов для молодых ученых в программах французского правительства для научной мобильности, DAAD (Германия), Erasmus+ и HORIZON 2020 представителями данных программ в Украине.

Впервые в рамках работы конференции организована блиц-выставка сварочного оборудования. Заведующим отделом ИЭС к.т.н. Е. Шаповаловым продемонстрирована система технического зрения для роботизированного комплекса при сварке деталей с низкой повторяемостью сборочных операций. Заведующим отделом ИЭС к.т.н. М. Юрженко представлен инновационный сварочный комплекс для сварки трубопроводов из пластмасс, а также разработки в области аддитивных технологий. Кроме этого, представлены новейшие разработки «Опытного завода сварочного оборудования ИЭС им. Е. О. Патона».

Как уже отмечалось ранее, за четыре рабочих дня было заслушано 40 устных и представлено 38 стендовых докладов. В результате независимой оценки международной комиссии из председателей секций были определены лучшие устные доклады и один постерный. Среди них:

«Тонкослойные покрытия поверхности имплантов с использованием ультракоротких лазерных импульсов» (Стефани Рейчел, Исследовательский институт, Росток, Германия);



Посещение участниками конференции аэродрома в Гостомеле

«Исследование кристаллизации и течений жидкости в процессе GTA сварки с in-situ наблюдением» (А. Чиоу, Институт сварки, Ютц, Франция);

«Аддитивная 3D печать MAG CMT дуговой наплавкой» (М. Острич, Варшавский университет технологий, Польша);

«Соединение термопластов с использованием Ni/Al реакционной многослойной фольги» (Т. Закусило, НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», Киев, Украина);

«Влияние послесварочной термообработки на микротвердость сварных соединений тяжелых плит в офшорных зонах и при строительстве кораблей» (Е. Голи-Оглу, NMLKDanSteel, Фредериксверк, Дания);

«Влияние расхода шлака в процессе ЭШП на состав металла и параметры процесса» (Л. Лисова, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев);

«Новые требования и возможности в разработке программного обеспечения для фундаменталь-

ного и автономного моделирования металлургических процессов» (М. Маер, «INTECO», Брукандер Мур, Австрия);

«Структура и свойства покрытий Al_2O_3 , напыленных на подложки из алюминия и титана» (Е. Титков, НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», Киев, Украина).

Среди постерных отмечен доклад С. Красноруцкого «Использование электронно-лучевой сварки для производства компонентов международного экспериментального термоядерного реактора (ITER)» (Брауншвейгский технический университет, Германия).

При подведении итогов конференции к.т.н. С. Степанюк выделил главные направления конференции, а именно, прогрессивные технологии сварки и соединения материалов, наплавки, нанесения покрытий, обработки поверхностей, процессы и технологии в металлургии, аддитивные технологии производства.



Демонстрация сварочного робототехнического комплекса с системой технического зрения



Посещение первого инновационного парка в Украине «Unit city»

Следует отметить, что в рамках работы конференции для всех участников впервые организована техническая экскурсия на аэродром «Антонов» с демонстрацией лучших достижений украинского авиастроения, в том числе самолета «Мрія» и экскурсия в первый инновационный парк в Украине «Unit.city».

Необходимо отметить высокий уровень проведения конференции и выразить благодарность ее организаторам. Созданная рабочая обстановка способствовала развитию тематических дискуссий и установлению творческих контактов между научными сотрудниками в области сварки, металлургии и материаловедения.

А. А. Полишко

РАЗРАБОТКИ ИЭС им. Е. О. ПАТОНА

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СПОСОБОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Материалы со слоистой структурой, состоящие из последовательно чередующихся слоев с разным химическим составом и свойствами, находят широкое применение в качестве материалов функционального назначения. Традиционное получение таких материалов способами прокатки и спекания не обеспечивает возможность вариации толщины и химического состава слоев. С этой точки зрения перспективным является способ электронно-лучевого осаждения в вакууме. Так, возможность использования в электронно-лучевой установке нескольких электронно-лучевых пушек обеспечивает одновременное испарение веществ разного химического состава с последовательным осаждением их паровых фаз на подложку. Разработка технологических параметров получения слоистых структур на основе компонентов с разным химическим составом и структурой за один технологический цикл и установление корреляционных зависимостей между их структурными характеристиками и свойствами открывает возможность для создания технологических основ получения новых материалов функционального назначения.

Разработка технологических основ получения способом электронно-лучевого осаждения слоистых конденсатов разного структурного типа в виде фольг и покрытий и установление корреляционных соотношений между структурными характеристиками и свойствами материалов, обеспечивающих возможность их использования в качестве функциональных — задача, которую поставили перед собой сотрудники ИЭС.

На примере двухслойной структуры вакуумных конденсатов на основе двух материалов с различающимися физико-механическими характеристиками (инвара и меди) показана возможность получения

тонких биметаллических фольг для термочувствительных элементов, которые способны к знакопеременной деформации при изменении температуры в диапазоне от -100 до 500 °С. Циклическая стойкость характеристик биметаллической фольги обеспечивается высоким уровнем прочности и термомеханической стойкости за счет наноразмерной структуры слоев нанодвойниковой меди и инвара с нанофрагментированными зернами.

На основе двухслойной системы, состоящей из слоев Al и TiO_2 , способом электронно-лучевого осаждения получены термостабилизирующие покрытия, которые при определенном соотношении толщин слоев обеспечивают соотношение коэффициентов поглощения и эмиссии солнечной энергии в интервале значений $0,7...1,4$, что обеспечивает минимальное колебание температуры поверхности при изменении интенсивности солнечного излучения. Такие покрытия могут быть использованы для термической защиты металлических конструкций, работающих в условиях открытого космоса и подвергающихся неравномерному нагреву.

На примере многослойных металлических эвтектических систем, которые характеризуются термической нестабильностью, изучено влияние технологических параметров электронно-лучевого осаждения в вакууме на формирование их структурных характеристик, обеспечивающих функциональные свойства материалов. Показано, что в многослойной системе Al/Si присутствие алюминия обеспечивает низкотемпературную кристаллизацию аморфного кремния, что может быть использовано при изготовлении солнечных батарей с многослойной структурой.

Установлено, что структурная нестабильность многослойных фольг на основе эвтектических си-

стем при нагреве обусловлена значительной диффузионной подвижностью компонентов и реализуется фрагментацией слоев и генерацией вакансий, что приводит к формированию композиционной пористой структуры и обеспечивает низкотемпературную сверхпластическую деформацию фольги при термомеханическом воздействии. Полученные результаты позволили разработать технологические основы диффузионной сварки давлением труднодеформируемых материалов, таких как алюминий-матричные композиты, интерметаллиды титана и жаропрочные никелевые сплавы, с использованием многослойных фольг на основе

эвтектических систем в качестве промежуточной прослойки. Термическая нестабильность и низкотемпературная сверхпластичность многослойной фольги облегчают установление физического контакта свариваемых поверхностей и обеспечивают интенсивное протекание диффузионных процессов в области соединения, что позволяет снизить температуру, давление и продолжительность сварки. Это открывает новые возможности для разработки технологии изготовления деталей на основе жаропрочных и разнородных материалов без ухудшения их эксплуатационных характеристик.

СОЗДАНИЕ НОВОГО ВЫСОКОПРОЧНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА И РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНЫХ СПОСОБОВ СВАРКИ

Развитие авиационной и ракетной техники требует повышения эксплуатационных характеристик титановых сплавов. Максимальный весовой эффект обеспечивают титановые сплавы с высокой прочностью. Это связано с тем, что заметная экономия массы в результате применения титановых сплавов возможна только при вполне определенном уровне их прочности. Новые сложнoleгированные сплавы должны иметь более высокие механические характеристики при сохранении хорошей свариваемости.

Основываясь на результатах расчетов и проведенных экспериментов по определению механических характеристик, разработан новый высокопрочный ($\alpha + \beta$)-титановый сплав Т120 на основе 8-компонентной системы легирования Ti-Al-Mo-V-Nb-Cr-Fe-Zr, которая обеспечивает прочность на уровне не менее 1200 МПа в условиях приемлемого уровня пластических характеристик.

Проведены экспериментальные плавки по получению слитков диаметром 150 мм высокопрочного ($\alpha + \beta$)-титанового сплава Т120 способом ЭЛП. Слитки характеризуются химической однородностью, отсутствием включений низкой (LDI) и высокой (HDI) плотности. Определены режимы термомеханической обработки слитков нового высокопрочного ($\alpha + \beta$)-титанового сплава Т120, которые обеспечивают необходимый комплекс механических свойств полуфабрикатов и значение на уровне $\sigma_b = 1270$ МПа при $KCV = 14$ Дж/см².

Построена трехмерная математическая модель тепловых процессов в титане при сварке перемещаемым источником нагрева, основу которой составляет дифференциальное уравнение теплопроводности. Разработанная модель позволяет определить размеры и форму шва, а также размеры

и форму ЗТВ, в которых протекают полиморфные превращения при аргонодуговой сварке (АДС) титанового сплава Т120. Полученные поля температур позволили определить мгновенные скорости охлаждения при остывании сварного соединения.

Исследования механических свойств сварных соединений высокопрочного титанового сплава Т120, выполненных ЭЛС с последующей локальной термической обработкой, показали значения прочности $\sigma_b = 1258$ МПа и ударной вязкости металла шва $KCV = 7$ Дж/см².

Определены свойства соединений сплава Т120, выполненных АДС без подачи и с подачей присадочной проволоки. Высокие значения прочности ($\sigma_b = 1110$ МПа) при удовлетворительной ударной вязкости ($KCV = 24$ Дж/см²) соединений сплава Т120, выполненных АДС вольфрамовым электродом, обеспечиваются при использовании присадочной проволоки ВТ1-00св и режимах сварки, при которых содержание металла присадочной проволоки в металле шва составляет 10 % от основного металла, в сочетании с послесварочным отжигом. При содержании металла ВТ1-00св в количестве 20 % от основного металла шва уровень прочности ($\sigma_b = 1047$ МПа) снижается ниже 85 % от прочности основного металла, а ударная вязкость металла шва максимальная ($KCV = 27$ Дж/см²).

Экспериментально показано, что снижение погонной энергии при АДС вольфрамовым электродом по слою флюса АНТ25 титанового сплава Т120 с 1300 до 900 Дж/м обеспечивает повышение предела прочности сварных соединений с 1040 до 1150 МПа при неизменных показателях ударной вязкости и формирование в металле шва и ЗТВ более однородной структуры.

Исследовано влияние 2-х видов упрочняющей термообработки (закалки и регламентированного ступенчатого отжига) на свойства сварных соединений титанового сплава Т120, которые выполнены ЭЛС и АДС. Применение ступенчатого отжига при температурах 870, 800, 550, 380 °С для сварных соединений сплава Т120 обеспечивает в металле шва и ЗТВ структуру корзинчатого типа с большим разнообразием параметров структурных элементов, повышает предел прочности до 1300 МПа и значение ударной вязкости до 16...18 Дж/см².

Таким образом, проведенные исследования позволили разработать высокопрочный титановый сплав Т120, который хорошо сваривается АДС и ЭЛС, а также определить, что микроструктура сплава Т120 с размером пластин α -фазы толщиной 1,0...1,5 мкм и β -фазы в пределах 150...200 мкм обеспечивает наибольший показатель относительного удлинения ($\delta > 12\%$) как основного металла, так и сварного соединения.

На новый высокопрочный титановый сплав Т120 получен патент Украины.

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ У ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЕЙ ТА РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Одним з пріоритетних завдань розвитку сучасного машинобудування, будівельної галузі, автомобільного, залізничного та спеціального транспортного машинобудування є підвищення техніко-економічних показників зварних металевих конструкцій на основі зниження їх металоемності, підвищення енергоефективності, збільшення їх надійності та довговічності.

Широке використання зварних конструкцій з високоміцних сталей з ферито-перлітною і бейнітно-мартенситною структурами дозволить ефективно вирішити багато завдань народного господарства. Однак успішне вирішення цих завдань можливе лише за умови всебічного вивчення процесів, які протікають в зварних з'єднаннях високоміцних сталей, з урахуванням детального аналізу кінетики структурно-фазових перетворень, розвитку структурної і хімічної неоднорідності, ролі зовнішніх факторів у формуванні зварного з'єднання.

В ході роботи розроблений і успішно використаний комплекс сучасних методик дослідження структурно-фазового складу і структури з залученням унікальних дослідних комплексів Gleeble 3800 і JAMP 9500F. Досліджено структуру та визначено механічні властивості зварних з'єднань високоміцних сталей в залежності від параметрів термомодеформаційного циклу зварювання, вивчено структурні перетворення, кінетику фазових перетворень, визначено вплив параметрів зварювання на зміни температур фазових перетворень, встановлено особливості протікання структурних перетворень в рейкових ферито-перлітних (КС2, 65Г, М76), конструкційних ферито-бейнітних (15ХСА-ТЮД, 10Г2ФБ, 06ГБД), в бейнітно-мартенситних спеціального призначення (броньової сталі 71 типу 30Х2Н2МФ), високоміцних конструкційних зарубіжних (S355J2, S460M, NA-XTRA®700, WELDOX 1300) сталях. Встановлено вплив тер-

момодеформаційного циклу зварювання на кінетику розпаду аустеніту і формування микроструктури в металі ЗТВ високоміцних сталей.

Вивчено вплив швидкості охолодження на формування структурно-фазового складу (фериту, бейніту і мартенситу), механічні властивості (міцність, пластичність, ударна в'язкість). Побудовані термокінетичні діаграми розпаду аустеніту при різних швидкостях охолодження, визначені температури початку утворення фаз, встановлені особливості формування структури і здатність зварних з'єднань високоміцних сталей до утворення холодних тріщин.

Проведена математична обробка результатів досліджень та отримані рівняння регресії для прогнозування температур початку феритного, бейнітного і мартенситного перетворень. На підставі отриманих результатів запропонована математична модель і реалізована програма прогнозування структурного складу металу ЗТВ і його схильності до утворення холодних тріщин з метою оптимізації структури, яка забезпечує високі показники міцності, пластичності і ударної в'язкості.

Встановлено, що параметри структури середньовуглецевої ферито-перлітної сталі КС2 по різному впливають на характеристики першої і другої ділянок кінетичної діаграми втомлювального руйнування. Це пов'язано зі зміною розмірів зони пластичної деформації навколо якої розвиваються втомлювальні тріщини, які мають мінімальні розміри при низьких значеннях максимального коефіцієнта інтенсивності напружень K_{\max} .

Показано, що холодні тріщини в однопрохідних зварних з'єднаннях сталі 65Г утворюються в ділянці перегріву металу ЗТВ. Для запобігання утворенню тріщин необхідно забезпечити температуру попереднього підігріву не нижче: $T_{\text{пп}} \geq 200$ °С при погонній енергії зварювання $Q_{\text{зв}} =$

$= 8,6 \text{ кДж/см}$; $T_{\text{пп}} \geq 150 \text{ }^\circ\text{C}$ при $Q_{\text{зв}} = 11,5 \text{ кДж/см}$;
 $T_{\text{пп}} \geq 100 \text{ }^\circ\text{C}$ при $Q_{\text{зв}} = 15,0 \text{ кДж/см}$.

Встановлено, що пластичні властивості сталі 65Г при статичному розтягуванні після 4-х годин витримки при $100 \text{ }^\circ\text{C}$ поліпшуються: δ на 11 %, ψ майже у 1,8 рази. При кімнатній температурі ударна в'язкість металу сталі 65Г після 2-х годин витримки при $100 \text{ }^\circ\text{C}$ зростає у три рази до 23 Дж/см^2 .

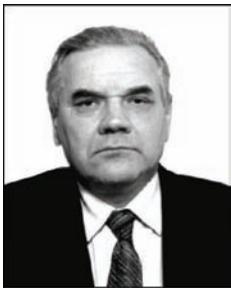
Підвищена опірність уповільненому руйнуванню металу ЗТВ сталі М76 на рівні $\sigma_{\text{кр}} \geq 0,45\sigma_{0,2}$ забезпечується при температурі попереднього підігріву вище $200 \text{ }^\circ\text{C}$, коли швидкість охолодження металу

становить не більше $5...7 \text{ }^\circ\text{C/с}$ і при цьому в металі формується бейнітно-мартенситна структура.

Метал ЗТВ зварних з'єднань зі спеціальної сталі 71 з вмістом кремнію менше 0,05 % має більш високу стійкість до утворення холодних тріщин, ніж з'єднання кремнійвмісної сталі.

На підставі проведених досліджень були обрані оптимальні режими зварювання і температури попереднього підігріву, які гарантовано забезпечують зварним з'єднанням високоміцних сталей різного класу високий опір крихкому руйнуванню.

ПАМ'ЯТИ А. К. ЦЫКУЛЕНКО



На 79-м году ушел из жизни известный ученый в области специальной электрометаллургии доктор технических наук (1987), старший научный сотрудник отдела физико-металлургических проблем электрошлаковых технологий Анатолий Константинович Цыкуленко.

Вся трудовая и научная деятельность Анатолия Константиновича связана с Институтом электросварки им. Е. О. Патона, куда он поступил после окончания в 1961 г. Киевского политехнического института и прошел путь от инженера до заведующего отделом НИЦ ЭШТ, и где проработал более полвека.

С первых дней работы в ИЭС Анатолий Константинович занимался исследованием физико-химических процессов при сварке разнородных сталей. Уже на этом этапе он проявил присущие ему целеустремленность и изобретательность в решении научно-технических задач различной степени сложности.

С 1966 г. А. К. Цыкуленко трудился над решением задач, стоящих перед специальной электрометаллургией и прежде всего над разработкой теоретических основ электрошлаковых технологий,

созданием технологического оборудования для их осуществления и внедрения в производство, изучением физических и химических явлений, сопровождающих протекание ЭШП и созданием новых технологий на его базе. Исследовал всевозможные аспекты процесса — от выплавки до кристаллизации слитков.

Среди основных прикладных направлений, где получены выдающиеся практические результаты, выделяются разработки в области технологии изготовления танковой гомогенной и гетерогенной брони, а также суперсплавов для энергетического машиностроения, ставшие стержнем докторской диссертации.

А. К. Цыкуленко — автор более 300 научных трудов, в том числе семи монографий и более 100 изобретений.

Надежный, цельный человек, настоящий ученый, он следовал традициям Патоновской школы и всегда старался воплотить результаты исследований в заводских цехах. Его хорошо знали и уважали на машиностроительных и металлургических заводах страны — в Краматорске, Мариуполе, Запорожье, Донецке и др.

Друзья и коллеги высоко ценили не только широкую эрудицию и всесторонние знания, которыми А. К. Цыкуленко щедро делился, но и его исключительную порядочность.