

ФОРМИРОВАНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ МНОГОПРОХОДНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ

В. М. НЕСТЕРЕНКОВ, Л. А. КРАВЧУК, Ю. А. АРХАНГЕЛЬСКИЙ, Ю. В. ОРСА

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В работе рассмотрены особенности формирования соединения литейного магниевого сплава МЛ10 толщиной 8 мм при импульсной электронно-лучевой сварке в вакууме. Исследования проводили на образцах сплава системы легирования Mg–Zn–Zr–Nd при оптимальной частоте следования импульсов и повышенной скорости сварки. Установлено, что для обеспечения высокого качества формирования и прочностных свойств сварных соединений сварку необходимо выполнять в несколько проходов со ступенчатым увеличением тока электронного пучка в импульсе. Показано, что прочностные характеристики сварных соединений находятся на уровне не ниже 92 % аналогичных свойств основного металла. Библиогр. 11, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, магниевые сплавы, импульсный режим сварки, прочность сварных соединений, термический цикл, микроструктура металла шва, ЗТВ, основной металл

По сравнению с известными способами сварки плавлением импульсная электронно-лучевая сварка (ИЭЛС) характеризуется высокой удельной концентрацией энергии, низкими значениями погонной энергии, небольшой шириной зоны термического влияния (ЗТВ), узкой зоной проплавления и незначительными деформациями свариваемых деталей [1–4].

ИЭЛС легко поддается механизации и автоматизации, а наличие перемещения электронного пучка с помощью отклоняющей системы электронно-лучевой пушки по заданной траектории (круг, эллипс, дуга, штрих, треугольник, прямоугольник и др.) значительно расширяет технологические возможности этого процесса. Сохранение заданной удельной мощности пучка и параметров зоны проплавления при изменении рабочего расстояния от электронной пушки до поверхности изделия выгодно отличают ИЭЛС от дуговых способов сварки плавлением, и могут способствовать широкому ее применению при сварке деформируемых и литейных магневых сплавов в изделиях ответственного назначения.

Исследования по влиянию ИЭЛС на формирование сварных соединений магневых сплавов выполняли на установке УЛ-209М с компьютерным управлением всеми параметрами и системами, созданной в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины [5]. Установка УЛ-209М укомплектована энергетическим комплексом на базе ЭЛА-60/60 и электронно-лучевой пушкой, перемещаемой внутри вакуумной камеры по линейным координатам X , Y , Z , а также поворачиваемой вокруг оси Y – Y на угол $0...90^\circ$. При ускоряющем напряже-

нии $U_{\text{уск}} = 60$ кВ электронно-лучевая пушка с металлическим вольфрамовым катодом диаметром 3 мм обеспечивает диапазон тока электронного пучка $I_{\text{имп}} = 0...500$ мА, а также выполнение технологических разверток пучка в процессе электронно-лучевой сварки. Обеспечивается точность позиционирования электронно-лучевой пушки по координатам не хуже 0,1 мм, совмещение электронного пучка со стыком обеспечивается системой РАСТР с точностью не хуже 0,1 мм [6].

Импульсный режим работы реализован при подключении на вход энергетического комплекса ЭЛА-60/60 импульсного генератора типа HAMEG HM8130, который обеспечивал 100%-ю модуляцию электронного пучка по току. Форма и величина импульса сварочного тока фиксировались непосредственно перед сваркой образцов или макетов изделий на цилиндре Фарадея при помощи электронно-лучевого осциллографа TECTRONIX TDS 1002, схема подключения которых приведена на рис. 1.

Исследования по формированию сварных соединений магневых сплавов различных систем легирования дуговыми способами сварки приведены в работах [7]. Однако, как показал анализ работ по свариваемости магневых сплавов, практически полностью отсутствуют сведения по формированию сварных соединений магневых сплавов электронным пучком в импульсном режиме.

Ранее проведенные исследования [7] свидетельствуют о том, что литейный магневый сплав системы легирования Mg–Zn–Zr–Nd может быть удовлетворительно сварен дуговыми способа-

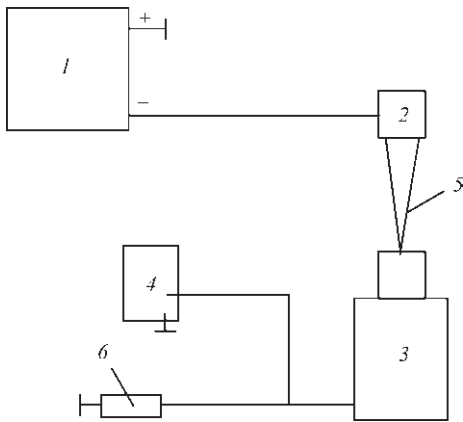


Рис. 1. Схема регистрации параметров импульсного электронного пучка: 1 — энергетический комплекс ЭЛА-60/60; 2 — электронно-лучевая пушка; 3 — массивная мишень с цилиндром Фарадея; 4 — осциллограф; 5 — электронный пучок; 6 — резистор $R = 10$ Ом

ми при условии обязательного предварительного подогрева свариваемых кромок от постороннего источника до температуры $200 \dots 250$ °С.

Основной проблемой при сварке магниевых сплавов является предупреждение образования горячих трещин в сварных соединениях, а также формирование сварных швов без подрезов с лицевой и корневой части шва.

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины были проведены исследования по формированию бездефектных сварных соединений литейного магниевых сплавов МЛ10 (0,1...0,7 % Zn, 0,4...1,0 % Zr, 2,2...2,8 % Nd, Mg — остальное), полученных при ИЭЛС и выполнении в едином технологическом цикле дополнительной чистки околошовных поверхностей остросфокусированным маломощным электронным пучком, предварительный подогрев стыкуемых кромок пучком до температуры порядка $200 \dots 250$ °С и сопутствующий подогрев пучком в процессе многопроходной сварки. Формирование лицевого и корневого валиков шва без подрезов и занижений достигается путем применения локальной технологической развертки электронного пучка по эллипсу, причем большая полуось ориентирована вдоль направления сварки. Сплав МЛ10 системы легирования Mg–Zn–Zr–Nd отличается повышенной коррозионной стойкостью, хорошими литейными свойствами, малой склонностью к образованию микрорыхлот, удовлетворительно сваривается дуговыми способами, термически упрочняется закалкой и искусственным старением. Сплав может длительно работать при температурах до 250 °С. При отработке режимов и техники ИЭЛС по схеме вертикальным электронным пучком в нижнем положении использовали образцы размером $150 \times 150 \times 8$ мм.

В процессе проведения исследований образцы сваривали без присадочных материалов, а сборку

образцов под сварку осуществляли с минимально возможными зазорами. Подготовку свариваемых кромок под сварку выполняли путем обезжиривания органическими растворителями и шабрения на глубину до 0,1 мм непосредственно перед загрузкой образцов в вакуумную камеру установки. После загрузки образцов в вакуумную камеру и получения рабочего вакуума выполняли чистку и предварительный подогрев поверхностей остросфокусированным электронным пучком с круговой или пилообразной разверткой.

При ИЭЛС наряду с временными параметрами электронного пучка (длительность импульса и длительность паузы) существенное влияние на качество сварного соединения оказывает скорость сварки, от выбора которой зависит степень перекрытия отдельных участков проплавления. Другими словами, при известном диаметре электронного пучка на изделии и амплитуде его локальной развертки, его путь за время паузы между импульсами является решающим фактором для формирования качественного сварного соединения. Выражение для скорости сварки при шовной ИЭЛС может быть записано:

$$V_{\text{ИЭЛС}} = \frac{(1-K)f_{\text{имп}}S(A_{\text{лок}} + d_{\text{п}})}{S-1},$$

где K — коэффициент перекрытия сварочных точек; $f_{\text{имп}}$ — частота следования импульсов, Гц; $S = \tau_{\text{и}} + \tau_{\text{п}}/\tau_{\text{и}}$ — скважность следования импульсов; $\tau_{\text{п}}$ — длительность паузы; $\tau_{\text{и}}$ — длительность импульса; $d_{\text{п}}$ — диаметр электронного пучка на изделии, мм; $A_{\text{лок}}$ — амплитуда локальной развертки электронного пучка (например, выбрав $K = 0,8$; $\tau_{\text{и}} = 5$ мс; $\tau_{\text{п}} = 5$ мс; $f_{\text{имп}} = 100$ Гц; $d_{\text{п}} = 0,5$ мм; $A_{\text{лок}} = 1$ мм, получим $V_{\text{ИЭЛС}} = 60$ мм/с).

Известно, что предварительный или сопутствующий подогрев изделия снижают вероятность появления кристаллизационных трещин, поскольку при этом уменьшается интенсивность нарастания упругопластических деформаций при затвердевании металла шва. Благодаря уменьшению разности между максимальной температурой при сварке и начальной температурой изделия снижается скорость охлаждения на разных участках сварного соединения, улучшается их структура и повышается пластичность. При нагреве до температуры $200 \dots 250$ °С снижение растягивающих продольных напряжений может достигать 50 % [8].

При исследованиях с применением модулированного электронного пучка и его локальных колебаний по различным траекториям и с различными амплитудами ставилась задача повысить качество сварных соединений магниевых сплавов толщиной до $\delta_{\text{м}} = 15$ мм, изменить форму проплавления сварного шва и его кристаллизацию в процессе сварки, принудительно изменяя параметры колебаний жидкого

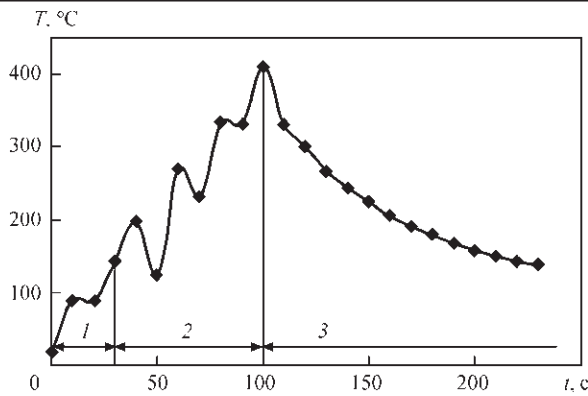


Рис. 2. Термический цикл околошовной зоны при ИЭЛС образца из магниевого сплава МЛ10 размером 150×50×8 мм: 1 — чистка остросфокусированным электронным пучком за два прохода; 2 — сварка за четыре прохода со ступенчатым увеличением тока пучка в импульсе; 3 — охлаждение после сварки

металла в парогазовом канале. Исследовали диапазоны частот импульсов тока электронного пучка на изделие $f_{имп} = 20...250$ Гц при скважности модуляции тока пучка $S = 1,2...5,0$. Установлено, что при частоте модуляции пучка $f_{имп} = 70...120$ Гц устраняется расширение шва в корневой части, где возникают дефекты формирования, улучшается форма швов, боковые стенки проплавления становятся практически параллельными. Наиболее благоприятная форма проплавления получена при частоте модуляции $f_{имп} = 100...120$ Гц. Снижение частоты модуляции ниже $f_{имп} = 60$ Гц приводит к увеличению глубины проплавления, однако форма шва приближается к форме швов, выполненных без модуляции пучка.

В нашем случае ИЭЛС магниевого сплава МЛ10 толщиной $\delta_m = 8$ мм выполнялась за несколько проходов путем ступенчатого увеличения тока электронного пучка в импульсе и предварительного подогрева во время чистки околошовной зоны остросфокусированным электронным пучком. Параллельно проводился замер термического цикла сварки с помощью термопары типа К (хромель-алюмель, ГОСТ 6615–94) диаметром 0,5 мм, зачеканенная на расстоянии 2 мм от оси шва. Как показано на рис. 2, температура предварительного подогрева образца во время чистки электронным пучком за два прохода ($U_{уск} = 60$ кВ, $I_{п} = 10$ мА, $V_{ч} = 10$ мм/с, $\Delta I_{ф} = 0$ мА, $A_{круг} = 10$ мм, $l_{раб} = 200$ мм) составила примерно 140 °C и могла регулироваться изменением мощности пучка и количеством проходов. Режим импульсной сварки за четыре прохода с сопутствующим подогревом составил:

первый проход: $U_{уск} = 60$ кВ, $I_{имп} = 15$ мА; $v_{св} = 10$ мм/с, $\Delta I_{ф} = 0$ мА, $A_{эллипс} = 1,5/0,5$, $l_{раб} = 200$ мм, $\tau_{и} = 5$ мс, $\tau_{п} = 5$ мс, $f_{имп} = 100$ Гц. Большая полуось эллипса направлена вдоль направления сварки; второй проход: $I_{имп} = 25$; третий — 35; четвертый — 45 мА. Во втором, третьем, четвертом проходах остальные параметры сохраняются.

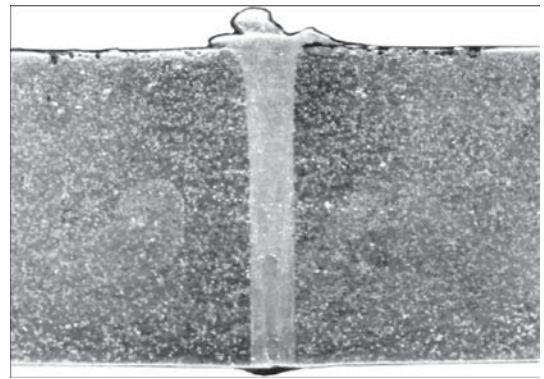


Рис. 3. Макроструктура ($\times 10$) сварного соединения магниевого сплава МЛ10 толщиной $\delta_m = 8$ мм

Выявление структуры сварных соединений на литейном магнии сплаве МЛ10 проводили химическим травлением в 10%-м растворе лимонной кислоты. Исследования выполняли на оптическом микроскопе «Neophot-32», твердость измеряли на микротвердомере М-400 фирмы «Лесо», цифровое изображение структур получено при помощи фотокамеры «Olympus». Как показано на поперечном макрошлифе сварного соединения магниевого сплава МЛ10 толщиной $\delta_m = 8$ мм (рис. 3), полученного в режиме многопроходной ИЭЛС по схеме в нижнем положении вертикальным электронным пучком на подкладке из того же материала, боковые стенки шва практически параллельные по всей глубине проплавления, расширения в корневой части шва нет, подрезы и занижения на лицевой части шва отсутствуют, трещин нет.

Структура металла шва на сплаве МЛ10 мелкодисперсная (размер ячеек 10...12 мкм) по всей высоте шва (рис. 4, а), состоит из α -твердого раствора с располагающейся по границам зерен эвтектики и интерметаллидной фазы $(MgZr)_{12}Nd$. Твердость металла шва составляет $HV_{0,5} = 394...490$ МПа, что согласуется с результатами исследований, приведенных в работе [9].

Линия сплавления с основным металлом практически ровная, четко выраженная. В некоторых местах крупные зерна ЗТВ смещают линию сплавления в металл шва (рис. 4, б). Структура в металле ЗТВ крупнозернистая, эвтектика расположена равномерно, твердость металла составляет $HV_{0,5} = 409...539$ МПа.

Основной металл имеет такую же структуру, как и металл ЗТВ. Отличается более крупным размером зерна (70...80 мкм) и количеством сферических образований эвтектики (рис. 4, в).

Контроль качества сварных соединений магниевого сплава МЛ10 выполнен посредством проведения механических испытаний. В результате испытаний на разрыв кроме величины σ_b определялись и другие параметры прочности сварного соединения: $\sigma_{0,2}$, δ и Y .

Механические свойства литейного магниевого сплава МЛ10 после импульсной ЭЛС

Объект исследования	Механические свойства						Место разрушения
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	$\sigma_{B\text{ СВ}}/\sigma_{B\text{ ОМ}}$	α_H , кДж/м ²	
Основной металл	220	140	5,0	11	-	62,7	-
Сварное соединение	202	135	6,5	12	0,92	82,0	По линии сплавления, ЗТВ

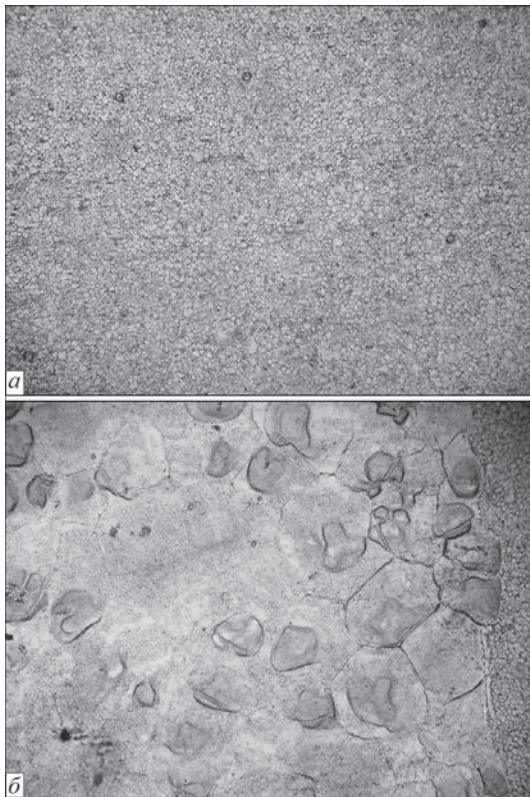


Рис. 4. Микроструктура ($\times 200$) сварного соединения магниевого сплава МЛ10, выполненного в режиме ИЭЛС: а — сварной шов; б — шов, ЗТВ, основной металл

Для проведения прочностных испытаний были изготовлены образцы из основного металла МЛ10 в состоянии поставки и из сварных соединений, полученных методом ИЭЛС. Испытания сварных соединений на разрыв проводились на цилиндрических образцах с диаметром рабочей части $d_0 = 3$ мм.

Как следует из рис. 5, разрушение образцов из магниевого сплава МЛ10 после ИЭЛС происходит преимущественно по линии сплавления и ЗТВ. Пластичность сварных соединений ψ увеличивается незначительно по сравнению с пластичностью основного металла, а вязкость α_H увеличивается примерно на 30 %. Коэффициент прочности сварных соединений, полученных в режиме ИЭЛС с предварительным подогревом при очистке острогофокусированным электронным пучком и последующей сваркой за четыре прохода путем ступенчатого увеличения тока пучка в импульсе, достигает величины $\sigma_{B\text{ СВ}}/\sigma_{B\text{ ОМ}} = 0,92$ % (таблица).

Анализ микроструктуры различных участков сварных соединений магниевого сплава МЛ10 показывает, что структура металла шва при ИЭЛС практически не отличается от той, которая имеет

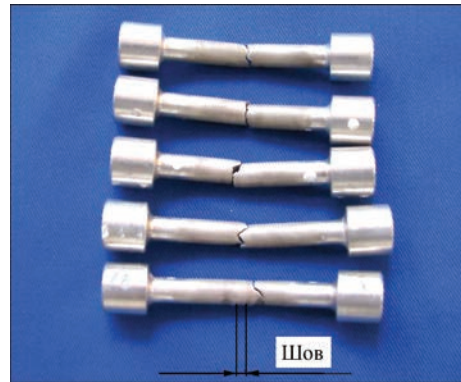


Рис. 5. Образцы после механических испытаний на разрыв сварных соединений магниевого сплава МЛ10

место для сплавов в литом состоянии. С учетом высоких скоростей кристаллизации при ИЭЛС наблюдается меньшая величина зерна и толщина межзеренных прослоек по сравнению со структурой швов, которые имеют место при дуговых способах сварки [10, 11].

Выводы

1. Установлено, что обеспечение высокого качества формирования и прочностных свойств сварных соединений магниевого сплава МЛ10 достигается путем применения многопроходной импульсной ЭЛС со ступенчатым увеличением тока пучка в каждом проходе.

2. Установлено, что при ИЭЛС с применением локальной развертки пучка по эллипсу боковые стенки проплавления становятся практически параллельными.

3. Показано, что прочностные характеристики сварных соединений литейного магниевого сплава МЛ10 находятся на уровне не ниже 92 % аналогичных свойств основного металла.

Список литературы

1. Matting A., Sepold G. Beitrag zum Schweißen mit impuls-gesteuerten Elektronenstrahlen: DVS-Berichte 1 «El-schweißen». – Deusseldorf: Schweißtechnik, 1967. – S. 123–133.
2. Indenbrand H.-D., Schlenk R. Untersuchungen zum Elektronenstrahlimpulsschweißen // Schweißtechnik. – 1970. – № 6. – S. 253–257.
3. Худышев А. Ф., Славин Г. А. Исследование технологических возможностей импульсной электронно-лучевой сварки тонколистовых материалов // Физика и химия обработки материалов. – 1971. – № 3. – С. 13–19.
4. Хохловский А. С., Лопатко А. П., Крылов В. Г. Свариваемость сплава на основе магния электронным лучом // Электронно-лучевая сварки. – М.: Моск. Дом науч.-техн. пропаганды, 1978. – С. 68–72.

5. Назаренко О. К., Нестеренков В. М., Непорожний Ю. В. Конструирование и электронно-лучевая сварка вакуумных камер // Автоматическая сварка. – 2001. – № 6. – С. 50–52.
6. Компьютерное управление процессом электронно-лучевой сварки с многокоординатными перемещениями пушки и изделия / Б. Е. Патон и др. // Там же. – 2004. – № 5. – С. 3–7.
7. Магнєвє сплавє: сб. ст. Ин-та металлургии им. А. А. Байкова. – М.: Наука, 1978. – 223 с.
8. Kanz H. G. Eigenspannungen verwerfungen und Masshaltigkeit bei Schweissen // Schweissen und Schneiden. – 1959. – 11, № 3. – S. 139–142.
9. Гибридная технология, совмещающая электронно-лучевую сварку и сварку трением с перемешиванием в процессах восстановления элементов конструкций авиационной техники из магниевых сплавов / А. Л. Майстренко и др. // Автоматическая сварка. – 2016. – № 5-6. – С. 99–106.
10. Бондарев А. А., Нестеренков В. М. Исследование свариваемости магниевых сплавов МА2 электронным лучом в вакууме // Компрессорное энергетическое машиностроение. – 2013. – № 2. – С. 21–28.
11. Бондарев А. А., Нестеренков В. М. Технологические особенности сварки деформируемых магниевых сплавов электронным лучом в вакууме // Автоматическая сварка. – 2014. – № 3. – С. 18–22.

В. М. Нестеренков, Л. А. Кравчук,
Ю. О. Архангельский, Ю. В. Орса
ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ФОРМУВАННЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ МАГНІЄВИХ СПЛАВІВ ПРИ ІМПУЛЬСНОМУ БАГАТОПРОХІДНОМУ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОМУ ЗВАРЮВАННІ

У роботі розглянуто особливості формування з'єднання ливарного магнієвого сплаву МЛ10 товщиною 8 мм при імпульсному електронно-променевому зварюванні в вакуумі. Дослідження проводили на зразках сплаву системи легування Mg–Zn–Zr–Nd при оптимальній частоті проходження імпульсів і підвищеній швидкості зварювання. Встановлено, що для забезпечення високої якості формування та міцних властивостей зварних з'єднань зварювання необхідно виконувати в кілька проходів із ступінчастим збільшенням струму електронного пучка в імпульсі. Показано, що характеристики міцності зварних з'єднань знаходяться на рівні не нижче 92 % аналогічних властивостей основного металу. Бібліогр. 11, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: електронно-променеє зварювання, магнієві сплави, імпульсний режим зварювання, міцність зварних з'єднань, термічний цикл, мікроструктура металу шва, ЗТВ, основний метал

Поступила в редакцію 06.03.2017

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є. О. ПАТОНА НАНУ
МІЖНАРОДНА АСОЦІАЦІЯ «ЗВАРЮВАННЯ»





**Міжнародна конференція
ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНІ ТЕХНОЛОГІЇ – СЬОГОДЕННЯ І МАЙБУТНЄ**

Присвячується 100-річчю
Національної академії наук України

5 – 6 грудня, 2018 р.
Україна, м. Київ

Голова:
академік НАН України Л. Лобанов
НАУКОВІ НАПРЯМКИ КОНФЕРЕНЦІЇ

- Технології, матеріали і обладнання для зварювання і споріднених процесів
- Міцність зварних конструкцій, теоретичні та експериментальні дослідження напружено-деформуючих станів та їх регулювання
- Вдосконалення зварних конструкцій, автоматизація їх розрахунку і проектування, оцінка і подовження ресурсу
- Нові конструкційні матеріали

- Неруйнівний контроль і технічна діагностика
- Інженерія поверхні
- Зварювання в медицині – технології, обладнання; наноматеріали і нанотехнології
- Проблеми екології зварювального виробництва
- Спеціальна електрометалургія
- Стандартизація, сертифікація продукції зварювального виробництва, підготовка і атестація спеціалістів

Відправлення тез доповідей для участі в роботі конференції – до 01.11.2017 р.

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича (Боженка), 11, м. Київ, 03680
тел. (38044) 200-60-16, 200-47-57, факс: (38044) 528-04-86
E-mail: office@paton.kiev.ua
www.paton.kiev.ua | www.patonpublishinghouse.com