

РАСЧЕТНАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРВИЧНОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА ШВА С ТУГОПЛАВКИМИ ИНОКУЛЯНТАМИ

Д. Ю. ЕРМОЛЕНКО, В. В. ГОЛОВКО

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

Рассмотрена возможность управления структурой и свойствами металла шва высокопрочных низколегированных сталей с помощью введения в сварочную ванну дисперсных тугоплавких инокулянтов в качестве поверхностно активных элементов. Описана методика проведенных экспериментальных исследований по введению различных тугоплавких инокулянтов (TiC, TiN, SiC, TiO₂, Al₂O₃, ZrO₂, MgO) в сварочную ванну при сварке высокопрочных низколегированных сталей. Приведены результаты исследований влияния вводимых инокулянтов на параметры первичной структуры и основные механические свойства металла исследованных швов. Кратко рассмотрена модель взаимодействия тугоплавких инокулянтов с фронтом кристаллизации. Было проведено сравнение параметров первичной структуры металла шва с тугоплавкими инокулянтами, полученных путем экспериментальных исследований и вычислительного эксперимента. Результаты данного сравнения показали адекватность предложенной модели взаимодействия тугоплавкого инокулянта с фронтом кристаллизации. Библиогр. 9, табл. 2, рис. 7.

Ключевые слова: дуговая сварка, высокопрочные низколегированные стали, дендритная структура, первичная структура, дисперсные тугоплавкие инокулянты, кристаллизация

Введение в сварочную ванну тугоплавких инокулянтов в качестве поверхностно активных частиц является перспективным способом оптимизации структуры и свойств металла шва высокопрочных низколегированных (ВПНЛ) сталей за счет управления параметрами структуры и, соответственно, механическими свойствами металла шва. Известно [1, 2], что размер зерен первичной структуры оказывает влияние на характер процессов $\gamma \rightarrow \alpha$ превращений. Если в дисперсной дендритной структуре зарождение α -фазы начинается на границах зерен аустенита в верхней области бейнитного превращения, то для более крупных дендритов характерным является зарождение феррита внутри первичных зерен на границах с неметаллическими включениями при температурах близких к завершению бейнитного превращения [3, 4].

В предыдущих работах [5, 6] была предложена модель кристаллизации, которая позволяет моделировать качественные изменения дендритной структуры металла шва в зависимости от поверхностных свойств вводимых инокулянтов. Для верификации данной модели проводились экспериментальные исследования влияния дисперсных тугоплавких инокулянтов, выступающих в роли поверхностно активных частиц, на первичную структуру и механические свойства металла шва ВПНЛ сталей.

Методика. Для исследования влияния тугоплавких инокулянтов на величину межфазной энергии в процессе кристаллизации и формирова-

ния конечной структуры металла шва при сварке ВПНЛ сталей изготавливались сварные швы с различными тугоплавкими инокулянтами. Для сварки в среде защитного газа (Ar + CO₂) использовалась порошковая проволока диаметром 1,6 мм. Сборку и сварку стыковых соединений из листов стали Ст3сп толщиной 20 мм выполняли в соответствии с требованиями ISO 14171:2010 [7] на постоянном токе обратной полярности 240...250 А при напряжении на дуге 31...32 В. Скорость сварки выдерживали в пределах 10...12 м/ч. Инокулянты вводились в сердечник порошковой проволоки. Проводилось 2 серии экспериментов. В первой серии экспериментов в качестве тугоплавких инокулянтов вводились карбиды и нитриды TiC, TiN, SiC, во второй серии экспериментов вводились оксиды TiO₂, Al₂O₃, ZrO₂, MgO. Базовая система легирования C–Mn–Cr–Ni–Mo–Si–Cu (без введения тугоплавких инокулянтов), реализованная в вариантах НН-0 (первая серия экспериментов, погонная энергия 20...23 Дж/см) и НН-20 (вторая серия экспериментов, погонная энергия 26...28 Дж/см), имела целью формирование металла швов с бейнитной структурой, которая по своим механическим свойствам соответствует низколегированной стали категории прочности К65 (табл. 1).

При выборе типа инокулянтов для исследований исходили из их поверхностной активности при взаимодействии с расплавом на основе железа. Размер инокулянтов выбирался с учетом их последующего растворения в расплаве металла сварочной ванны. Характеристики материалов,

Таблица 1. Результаты измерения параметров первичной структуры металла швов и их механические свойства

Тип инокулянта	Номер шва	Среднее значение размера первичных дендритов $\lambda_{1\text{эксп.}}$, мкм	Угол смачивания инокулянта расплавленным железом θ , град	Временное сопротивление разрушению σ_B , МПа	Ударная вязкость, КСV, Дж/см ²	
					+20 °С	-20 °С
–	НН-0	25,23	–	774	92	74
TiC	НН-6	26,89	125	715	112	85
TiN	НН-7	23,10	132	712	55	40
SiC	НН-9	30,20	82	726	85	65
–	НН-20	34,94	–	693	97	75
TiO ₂	НН-22	41,63	≈ 0	709	85	60
Al ₂ O ₃	НН-23	31,60	40	728	82	50
MgO	НН-24	27,22	123	644	103	69
ZrO ₂	НН-25	29,41	102	622	120	73

Таблица 2. Свойства тугоплавких инокулянтов $T_{пл}$ и их краевые углы смачивания расплавом железа θ [8]

Тип инокулянта	Температура плавления, $T_{пл}$, °С	Поверхностное натяжение жидкой фазы σ_1 , мДж/м ²	Краевой угол смачивания θ , град	Работа адгезии W_a , мДж/м ²
TiC	3260	1780	125	760
TiN	2930	1780	132	590
SiC	2730	1780	82	2030
TiO ₂	1843	1780	≈ 0	3560
Al ₂ O ₃	2044	1785	40	3155
ZrO ₂	2715	1785	102	1020
MgO	2852	1810	123	825

выбранных для проведения экспериментов, приведены в (табл. 2).

Первичную структуру металла шва исследовали методами оптической металлографии (оптический микроскоп «НЕОРНОТ-30») на полированных образцах, протравленных в кипящем растворе пикрата натрия $C_6H_2(NO_2)_3ONa$ в воде. Исследовали микроструктуру последнего прохода многопроходного металла шва (т. е. литую структуру). Образцы вырезали в направлении перпендикулярном продольной оси шва таким образом, чтобы на поверхности шлифа были видны дендриты, которые выросли в направлении наибольшего термического градиента в сварочной

ванне (рис. 1). Механические свойства металла сварных швов определяли согласно ГОСТ 6996–66 [9].

При исследовании первичной структуры по изображениям, полученным методом оптической микроскопии, определяли размеры столбчатых дендритов (размеры λ_1 на рис. 2). Размеры вторичных дендритов не определяли, так как они крайне слабо выражены при данных условиях сварки. Изображения характерных дендритных структур исследуемых образцов приведены на рис. 1. Результаты измерения параметров первичной структуры и механических свойств исследованных образцов приведены в табл. 1.

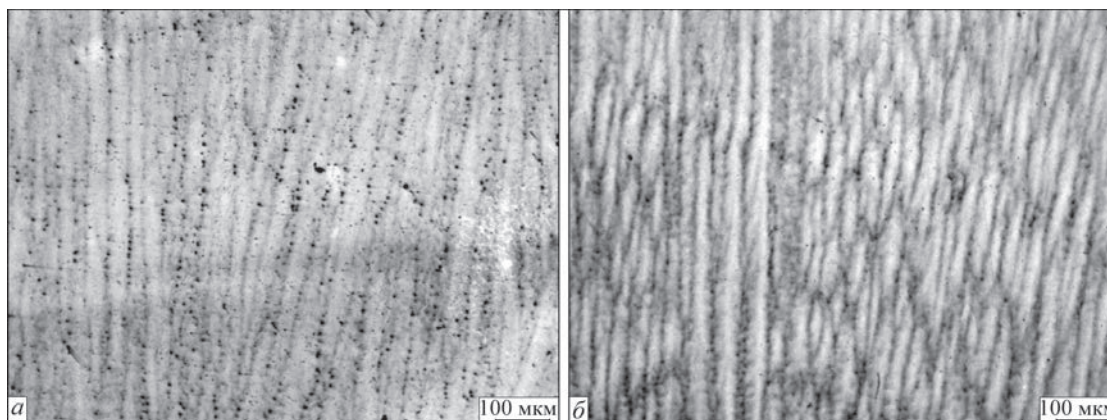


Рис. 1. Первичная структура (×320) металла шва исследованных образцов: а — образец НН-23; б — образец НН-25

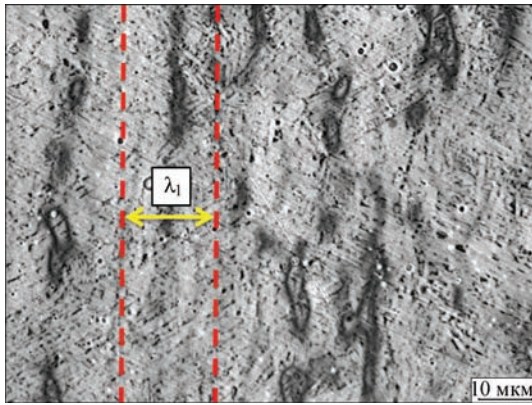


Рис. 2. Первичная структура ($\times 1000$) исследуемого образца: λ_1 — расстояние между осями первичных дендритов

На рис. 3 и 4 показаны графики зависимости параметров первичной структуры от угла смачивания тугоплавких иноксулянтов расплавом железа для первой и второй серии экспериментов соответственно. Полученные результаты говорят о том, что с помощью введения тугоплавких иноксулянтов в сварочную ванну в качестве поверхностно активных элементов возможно управлять параметрами первичной структуры, в частности размером первичных дендритов. Уменьшение размера столбчатых дендритов с увеличением угла смачивания связано с уменьшением локальной скорости кристаллизации в зоне контакта тугоплавкого иноксулянта с расплавом металла сварочной ванны. Однако уменьшение локальной скорости кристаллизации в зоне контакта расплава и иноксулянта также подразумевает качественное изменение морфологии первичной структуры металла шва. Данное предположение подтверждается экспериментально при анализе изображений первичной структуры металла швов с иноксулянтами, имеющими различные углы смачивания расплавом металла сварочной ванны. Это различие можно увидеть на рис. 1. При инокулировании металла шва оксидом алюминия Al_2O_3 наблюдаются

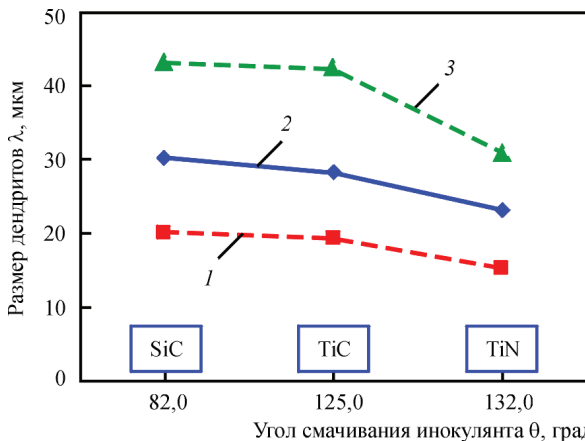


Рис. 3. Зависимость параметров первичной структуры от угла смачивания тугоплавких иноксулянтов расплавом железа первой серии экспериментов: 1 — минимальные значения; 2 — усредненные; 3 — максимальные

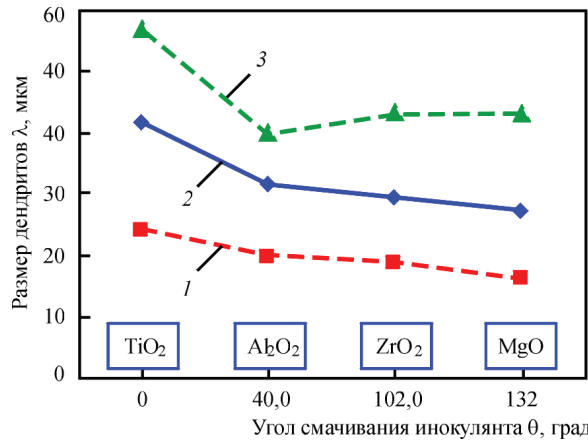


Рис. 4. Зависимость параметров первичной структуры от угла смачивания тугоплавких иноксулянтов расплавом железа второй серии экспериментов: 1 — минимальные значения; 2 — усредненные; 3 — максимальные

преимущественно прямые столбчатые дендриты, пролегающие через всю видимую область снимка (рис. 1, а). А при инокулировании металла шва оксидом циркония ZrO_2 наблюдаются короткие столбчатые дендриты, образованные в результате конкурирующего роста (рис. 1, б).

Расчетные эксперименты. В основу модели взаимодействия тугоплавких иноксулянтов с фронтом кристаллизации была положена база данных, построенная на массиве экспериментальных результатов. Эта модель описывает взаимодействие тугоплавкого иноксулянта с границей раздела фаз на фронте кристаллизации, в результате которого происходит изменение межфазной энергии, что приводит к изменению локальной скорости движения фронта кристаллизации. В модели принято, что тугоплавкие иноксулянты распределены равномерно в объеме сварочной ванны с некоторым коэффициентом ϕ ($0 \leq \phi \leq 1$). Также принято, что тугоплавкие иноксулянты являются неподвижными в процессе кристаллизации и имеют одинаковый размер, который сопоставим с размером ячейки использованной вычислительной сетки ($\approx 0,4$ мкм). Параметр распределения тугоплавких иноксулянтов в металле сварочной ванны ϕ был принят равным 0,3 для всех вычислений; данный выбор основан на результатах работы [5].

На рис. 5 показано визуальное соответствие дендритных структур образцов НН-0 и НН-20, полученных экспериментальным способом и путем расчетного эксперимента. Следует отметить, что в результате расчета были получены структуры, отражающие морфологию дендритной структуры реальных образцов.

Измерения расстояния между осями первичных дендритов $\lambda_{1\text{расч}}$ образцов с добавлением различных тугоплавких иноксулянтов (TiC , TiN , SiC , TiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO), полученные путем вычислительного эксперимента, проводились анало-

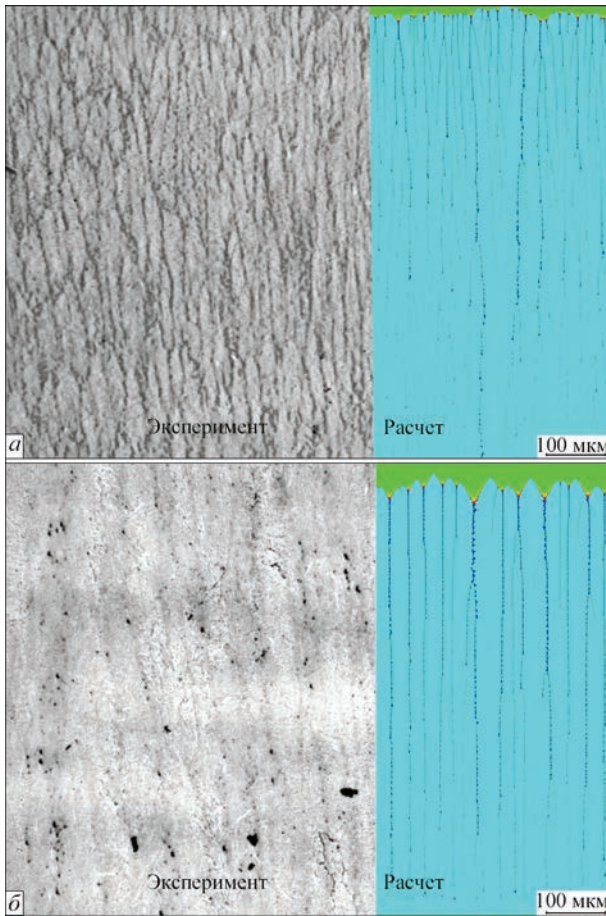


Рис. 5. Визуальное соответствие первичной структуры образцов НН-0 (а) и НН-20 (б) с первичной структурой, полученной путем вычислительного эксперимента

гично методике обработки изображений первичной структуры, полученных методом оптической металлографии (рис. 2).

На рис. 6 и 7 представлено сравнение размеров дендритов первичной структуры, полученных расчетным $\lambda_{\text{расч.}}$ и экспериментальным путем $\lambda_{\text{эксп.}}$ для образцов первой и второй серии соответственно. Проанализировав данные зависимости, можно сделать вывод о том, что тенденция уменьшения расстояния между осями первичных дендритов с увеличением угла смачивания тугоплавких инокулянтов расплавом металла сварочной ванны сохраняется в соответствии с полученными экспериментальными данными, описанными выше. Таким образом, следует предположить, что предложенная математическая модель и разработанное на ее основе программное обеспечение позволяют получить адекватные прогнозы параметров первичной структуры металла шва ВПНЛ сталей.

Средняя ошибка данных, полученных путем вычислительного эксперимента, составляет около 25 %. Такую разницу в полученных результатах следует связать с выбором параметра распределения тугоплавких инокулянтов в металле сварочной ванны φ равным 0,3, что, видимо, не точно соответствует условиям проведенных экс-

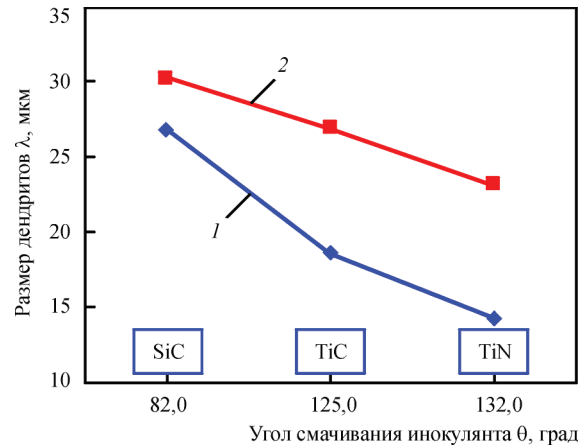


Рис. 6. Сопоставление экспериментальных и расчетных результатов измерения параметров первичной структуры металла швов образцов первой серии экспериментов: 1 — $\lambda_{\text{расч.}}$; 2 — $\lambda_{\text{эксп.}}$

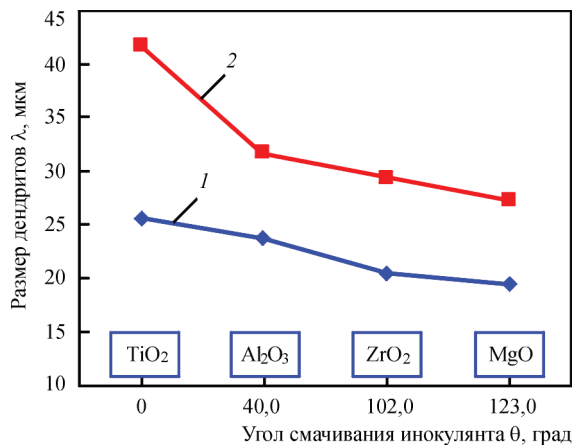


Рис. 7. Сопоставление экспериментальных и расчетных результатов измерения параметров первичной структуры металла швов образцов второй серии экспериментов: 1 — $\lambda_{\text{расч.}}$; 2 — $\lambda_{\text{эксп.}}$

периментальных исследований. Незначительное увеличение ошибки с увеличением угла смачивания инокулянта расплавом металла сварочной ванны следует связать с изменением характера их распределения в металле шва за счет качественного изменения морфологии дендритной структуры при введении инокулянтов с высокими углами смачивания. Данные замечания следует учесть в дальнейшей разработке модели.

Выводы

Предложенная модель влияния тугоплавких инокулянтов как поверхностно активных частиц на процесс кристаллизации металла сварочной ванны подходит для прогнозирования размерных параметров и морфологии первичной структуры металла швов ВПНЛ сталей. Разработанное на основе данной модели программное обеспечение позволяет выбрать тугоплавкие инокулянты и их количество для оптимизации параметров первичной структуры металла шва, а как следствие – его

механических свойств в соответствии с поставленными требованиями.

1. Головки В. В. Влияние введения в сварочную ванну титаносодержащих инокулянтов на структуру и свойства металла швов высокопрочных низколегированных сталей / В. В. Головки, С. Н. Степанюк, Д. Ю. Ермоленко // Автоматическая сварка. – 2015. – № 2. – С. 16–20.
2. Головки В. В. Технология сварки высокопрочных низколегированных сталей с введением титаносодержащих инокулянтов / В. В. Головки, С. Н. Степанюк, Д. Ю. Ермоленко // Наноразмерные системы и наноматериалы: исследования в Украине / [Коллективная монография; под. ред. А. Г. Наумовец]. – НАН Украины. – К.: Издательский дом «Академперіодика», 2014. – 768 с, 4 с. ил. – ISBN 978-966-360-260-8. – С. 395–399.
3. Influence of aluminum content on the characterization of microstructure and inclusions in high-strength steel welds / W. Vanovsek, C. Bernhard, M. Fiedler, G. Posch // Welding in the World. – 2013. – V. 57, Issue 1. – P. 73–83.
4. Effects of soluble Ti and Zr content and austenite grain size on microstructure of simulated heat affected zone in Fe–C–Mn–Si alloy / ISIJ International. – 2011. – V. 51, № 9. – P. 1542–1533.
5. Ермоленко Д. Ю. Прямое численное моделирование развития дендритной структуры металла шва при сварке плавлением высокопрочных низколегированных сталей с учетом влияния дисперсных тугоплавких инокулянтов / Д. Ю. Ермоленко, А. В. Игнатенко, В. В. Головки // Автоматическая сварка. – 2016. – № 12. – С. 15–22.
6. Галенко П. К. Изотермический рост кристаллов в переохлажденных бинарных сплавах / П. К. Галенко, М. Д. Кривилев // Математическое моделирование. – 2000. – Т. 12. – № 11. – С. 17–37.
7. ISO 26304:2011: Welding consumables. – Solid wire electrodes, tubular cored electrodes and electrode- flux combinations for submerged arc welding of high strength steels. – Classification.

8. Панасюк А. Д. Стойкость неметаллических материалов в расплавах / А. Д. Панасюк, В. С. Фоменко, Т. Г. Глебова. – К.: Наукова думка, 1986. – 351 с.
9. ГОСТ 6996–66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств.

Д. Ю. Ермоленко, В. В. Головки

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.

03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

РОЗРАХУНКОВА ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ФОРМУВАННЯ ПЕРВИННОЇ СТРУКТУРИ МЕТАЛУ ШВА З ТУГОПЛАВКИМИ ІНОКУЛЯНТАМИ

Розглянуто можливість управління структурою і властивостями металу шва високоміцних низьколегованих сталей за допомогою введення в зварювальну ванну дисперсних тугоплавких інокулянтів як поверхнево активних часток. Описана методика проведених експериментальних досліджень по введенню різних тугоплавких інокулянтів (TiC, TiN, SiC, TiO₂, Al₂O₃, ZrO₂, MgO) в зварювальну ванну при зварюванні високоміцних низьколегованих сталей. Наведено результати досліджень впливу введення інокулянтів на параметри первинної структури і основні механічні властивості металу досліджених швів. Коротко розглянута модель взаємодії тугоплавких інокулянтів з фронтом кристалізації. Було проведено порівняння параметрів первинної структури металу швів з тугоплавкими інокулянтами, отриманих шляхом експериментальних досліджень та обчислювального експерименту. Результати даного порівняння показали адекватність запропонованої моделі взаємодії тугоплавкого інокулянту з фронтом кристалізації. Бібліогр. 9, табл. 2, рис. 7.

Ключові слова: дугове зварювання, високоміцні низьколеговані сталі, дендритна структура, первинна структура, дисперсні тугоплавкі інокулянти, кристалізація

Поступила в редакцію 19.10.2016

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