



## СТРУКТУРА ЗОНЫ ОПЛАВЛЕНИЯ ЛИТОГО ВЫСОКОНИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ХН56МБЮДШ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ

А. А. ПОЛИШКО, В. Я. САЕНКО, А. Ю. ТУНИК, С. Н. СТЕПАНИЮК

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Лазерная поверхностная обработка оказывает существенное влияние на структуру и эксплуатационные свойства изделий. Представляет интерес изучение влияния такой обработки на высоконикелевые сплавы, применяемые в ответственных конструкциях. Оценено влияние лазерной поверхностной обработки на структуру и свойства литого высоконикелевого сплава ХН56МБЮДШ. Представлены результаты исследований дисперсности дендритной структуры полученного методом электрошлакового переплава полого слитка из высоконикелевого сплава ХН56МБЮДШ и зоны оплавления после его лазерной поверхностной обработки в атмосфере азота и гелия. Показано, что в зоне оплавления расстояние между осями дендритов на два порядка меньше, чем в литом металле в состоянии после ЭШП без лазерной обработки. Приведены результаты дюрOMETрических исследований. Установлено, что после лазерной обработки показатели микротвердости усредняются во всем объеме оплавленного слоя. При этом наблюдается повышение уровня микротвердости оплавленного слоя в атмосфере азота. В целом установлено положительное влияние данной обработки на структуру и микротвердость зоны оплавления. Библиогр. 6, табл. 4, рис. 8.

*Ключевые слова:* лазерная поверхностная обработка, высоконикелевый сплав, зона оплавления, металлографические исследования, дендритная структура, расстояние между первичными ветвями дендритов, расстояние между вторичными ветвями дендритов, дюрOMETрические исследования, микротвердость

Лазерная обработка поверхности является одним из перспективных методов решения задач современного материаловедения в формировании поверхностного рабочего слоя с заданными структурой и свойствами. При лазерной обработке сталей и сплавов с оплавлением за очень короткое время поверхностные слои успевают нагреться до высоких температур и расплавиться. В перегретом металле примеси могут перераспределяться, если они до этого содержались в виде включений. Поскольку время нагрева и толщина расплавленного слоя очень малы, охлаждение при кристаллизации жидкого слоя происходит с высокой скоростью. В результате высокоскоростная кристаллизация оплавленного лазерным лучом поверхностного слоя открывает новые возможности для получения качественно иного структурного состояния в зоне оплавления литых сплавов по сравнению с традиционными сварочными и металлургическими процессами. Многими исследователями показано [1, 2], что существенный упрочняющий эффект поверхностного слоя может быть получен при лазерной обработке с оплавлением, которая позволяет легко регулировать толщину упрочненного слоя, а при наличии фазовых превращений и степень его упрочнения. Важным является также возможность лазерного поверхностного легирования из газовой фазы, в частности, азотом [3]. Упрочнение в этом случае связано с образованием

пересыщенных твердых растворов и новых фаз. Несомненным преимуществом использования лазерного метода является возможность поверхностной обработки тонкостенных деталей с регулируемой толщиной и свойствами упрочненного слоя при их минимальных поводках, а также развитых, в том числе внутренних, поверхностей.

Целью настоящей работы является исследование влияния лазерной поверхностной обработки на структуру и твердость зоны оплавления слитка из высоконикелевого сплава марки ХН56МБЮДШ (ТУ-14-1-4025-85), полученного методом ЭШП.

В качестве объекта исследования использовали образцы литого металла, вырезанные из полого слитка, полученного методом ЭШП, диаметром 350/230 мм высотой 1600 мм из сплава ХН56МБЮДШ.

Технология получения методом ЭШП толстостенных полых заготовок из сплава ХН56МБЮДШ впервые была разработана еще в 1988–1990 гг. в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины под руководством академика Б. И. Медовара совместно с Научно-исследовательским и конструкторским институтом энерготехники им. Н. А. Доллежалы РАН применительно к высоконагруженным элементам конструкций ядерных энергетических установок с газовыми теплоносителями [4-6].

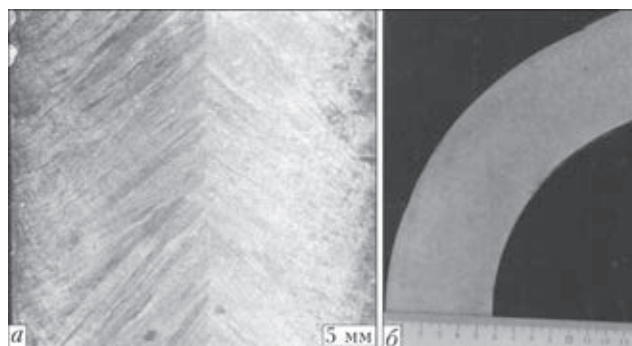


Рис. 1. Макроструктура фрагментов продольного (а) и поперечного (б) темплетов полого слитка, полученного методом ЭШП, диаметром 350/230 мм высотой 1600 мм из сплава ХН56МБЮДШ

Химический состав сплава ХН56МБЮДШ (ТУ-14-1-4025–85) следующий, мас. %: 0,04 С; 1,65 Al; 0,4 Si; 0,48 Ti; 0,4 V; 19,0 Cr; 10,0 Fe; 5,3 Mo; 4,8 Nb; 0,04 Mn; 0,002 S; 0,006 P; Ni — основа.

В качестве расходимых электродов использовали полученные методом ВДП прутки диаметром 55 мм из сплава ХН56МБЮД. После выплавки слитков подвергается термообработке по режиму: гомогенизация (1150 °С, 1 ч); закалка (980 °С, 1 ч) и старение (730 °С, 15 ч) с повторным старением (650 °С, 10 ч).

Для оценки структурной однородности из слитка вырезали продольный и поперечный макротемплеты. Макроструктура, приведенная на рис. 1, характеризуется однородным плотным строением. Дефектов усадочного происхождения, пор, трещин, шлаковых включений не обнаружено.

Таблица 1. Технологические параметры лазерной обработки с оплавлением ( $I = 17 \text{ А}$ ,  $P_{\text{изл.}} \approx 3 \text{ кВт}$ ; диаметр луча 1,2...1,5 мм; скорость линейного перемещения 630 мм/мин)

Защитная среда	Ширина оплавленного слоя, мкм	Глубина проплавления, мкм
Азот	2050	270
Гелий	1850	240

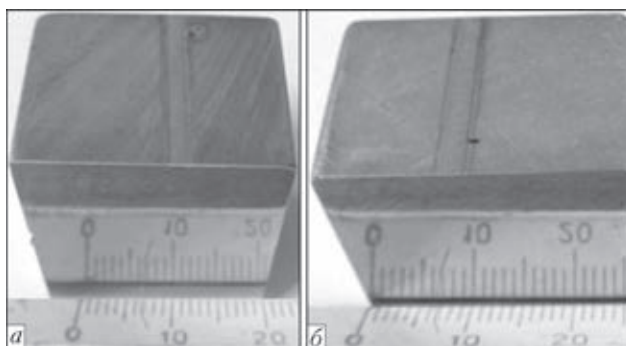


Рис. 2. Внешний вид образцов после лазерного оплавления в атмосфере азота (а) и гелия (б)

Лазерную поверхностную обработку образцов проводили на непрерывном CO<sub>2</sub>-лазере в атмосфере защитного газа азота и гелия (табл. 1).

На рис. 2 показаны образцы после лазерного оплавления в атмосфере азота и гелия. Структура зоны оплавления приведена на рис. 3.

При помощи сканирующего электронного микроскопа JSM-35CF фирмы «JEOL» (Япония) и рентгеновского спектрометра с дисперсией по энергии рентгеновских квантов (модель INCA Energy-350 фирмы «Oxford Instruments») (Великобритания) и металлографического микроскопа «Неофот-32», оснащенного приставкой для цифрового фотографирования, проведена оценка структуры литого высоконикелевого сплава ХН56МБЮДШ до и после его поверхностной лазерной обработки с оплавлением в атмосфере азота и гелия. Учитывая специфику проявления микроструктуры литого сплава для электронного микроскопа, использовали режим ВЕИ (изображение во вторичных электронах) (рис. 3).

Исследования литого металла в состоянии после выплавки показали, что структура содержит фазовые включения (эвтектику) – светлые участки, которые содержат повышенное количество молибдена, ниобия и кремния (спектр 3, 4, рис. 4, табл. 2), по сравнению с металлом матрицы (спектр 5, рис. 4, табл. 2). Обнаружены также темные включения карбонитрида титана в структуре матрицы, которые содержат повышенное ко-

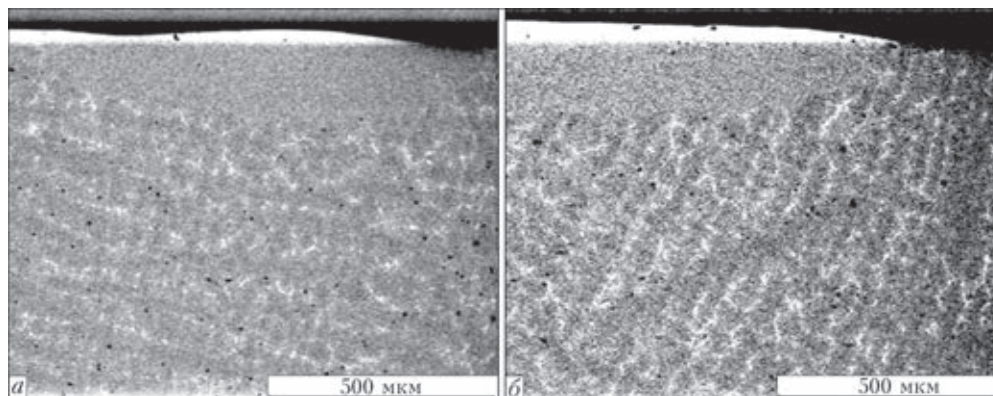


Рис. 3. Микроструктура зоны оплавления, полученная с применением сканирующего электронного микроскопа в режиме вторичных электронов в атмосфере азота (а) и гелия (б)

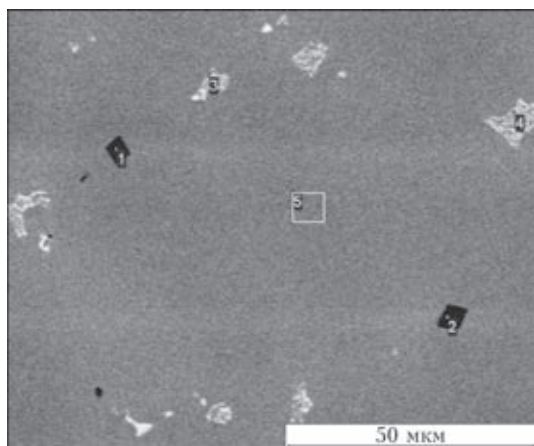


Рис. 4. Микроструктура литого металла сплава ХН56МБЮДШ без лазерной обработки  
 количество углерода, азота, титана и ниобия (спектр 1, 2, рис. 4, табл. 2).

Исследование металла после лазерной обработки в атмосфере азота показало, что в результате оплавления происходит диспергирование эвтектики — светлых участков в структуре матрицы, содержащих повышенное количество ниобия и молибдена. Происходит измельчение включений карбонитридов титана (темные включения в структуре матрицы) (рис. 5, а, табл. 3), Наружная поверхность переплавленного металла имеет золотистый оттенок, характерный для нитрида титана.

Исследование металла после лазерной обработки с оплавлением высоконикелевого сплава ХН56МБЮДШ в атмосфере гелия показало, что в результате лазерного оплавления в металле ЗТВ также происходит диспергирование эвтектики (светлых участков в структуре матрицы), содержащих повышенное количество ниобия и молибдена, измельчение карбонитридов титана (темные включения в структуре матрицы). Однако в зоне оплавления наблюдается практически полное отсутствие включений карбонитридов титана (рис. 5, б, табл. 4).

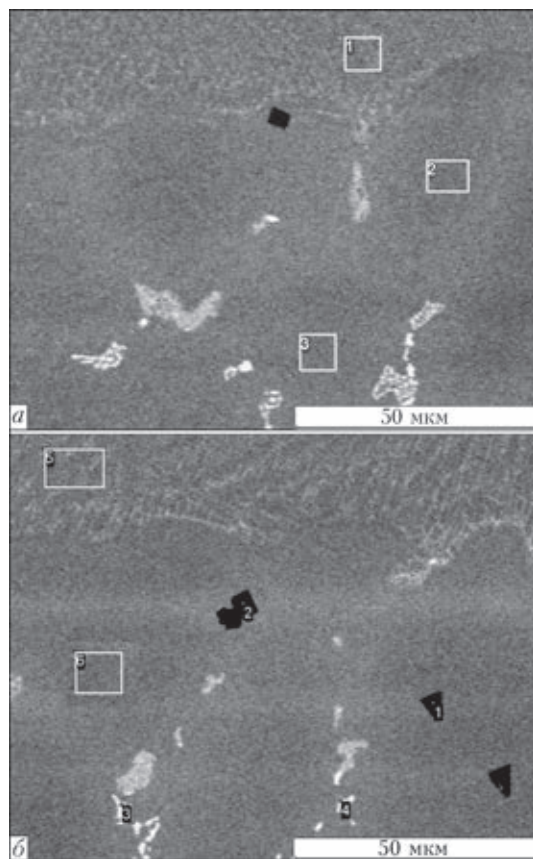


Рис. 5. Микроструктура зоны оплавления (верхний участок) и литого металла (нижний) сплава ХН56МБЮДШ после лазерной обработки в атмосфере азота (а) и гелия (б)

Оптические металлографические исследования литого металла высоконикелевого сплава ХН56МБЮДШ проводили на травленных шлифах (в реактиве  $\text{CuCl}_2 - 5 \text{ мг} + \text{HCl} - 100 \text{ мл} + \text{этанол} - 100 \text{ мл}$ ) с применением микроскопа «Неофот-32», оснащенного приставкой для цифрового фотографирования.

В основном металле высоконикелевого сплава ХН56МБЮДШ и после его лазерной поверхностной обработки в атмосфере азота и гелия выявлена характерная для литого металла ярко выраженная дендритная структура (рис. 6, 7).

Таблица 2. Химический состав (мас. %) локальных областей (см. рис. 4)

Номер спектра	C	N	Al	Si	Ti	V	Cr	Fe	Ni	Nb	Mo
1	6,87	17,77	0,00	0,00	49,28	2,58	2,16	0,35	1,31	19,09	0,59
2	6,99	17,97	1,03	0,27	50,74	0,34	1,66	1,77	3,44	14,68	0,91
3	2,94	0,0	0,59	1,23	0,31	0,20	13,11	10,51	40,28	15,30	13,55
4	4,14	0,0	0,75	0,92	0,47	0,25	13,28	10,15	42,24	17,31	10,48
5	0,0	0,0	1,19	0,22	0,15	0,36	17,78	15,62	55,53	2,47	5,01

Таблица 3. Химический состав (мас. %) локальных областей (см. рис. 5, а)

Номер спектра	C	N	O	Al	Ti	V	Cr	Fe	Ni	Nb	Mo
1	3,68	0,00	0,00	1,18	0,36	0,30	16,82	14,02	54,02	3,94	5,67
2	2,60	0,00	1,01	1,20	0,19	0,40	17,67	15,33	53,76	2,68	5,16
3	2,82	0,00	0,00	1,26	0,25	0,43	17,58	13,98	54,45	3,56	5,67



Таблица 4. Химический состав (мас. %) локальных областей (см. рис. 5, б)

Номер спектра	C	N	O	Al	Si	Ti	V	Cr	Fe	Ni	Nb	Mo
1	5,58	18,70	3,94	0,00	0,00	48,79	1,78	1,64	0,27	1,34	17,12	0,83
2	6,56	15,23	5,04	0,11	0,00	49,19	1,65	1,23	0,43	1,33	18,53	0,70
3	5,51	0,00	0,00	1,22	0,14	0,30	0,30	15,66	12,21	53,96	5,35	5,35
4	5,91	0,00	1,72	0,54	1,26	0,23	0,20	13,42	9,79	38,28	14,81	13,83
5	2,68	0,00	0,00	1,25	0,17	0,28	0,50	17,12	14,14	54,16	3,92	5,79
6	0,00	0,00	0,00	1,23	0,14	0,00	0,45	18,14	15,84	57,33	2,07	4,80

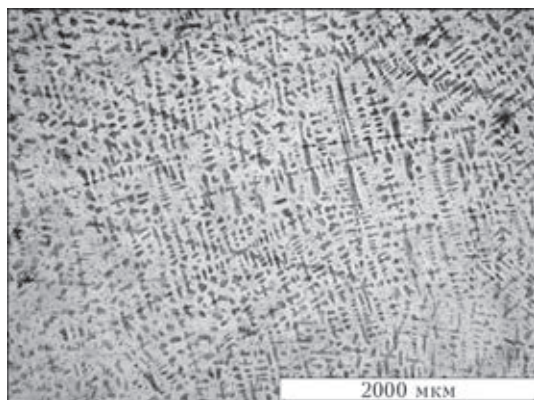


Рис. 6. Микроструктура литого металла сплава XH56МБЮДШ в состоянии после выплавки

Для сравнения и количественного описания дендритной структуры выбрали параметр в виде расстояния между первичными ветвями дендритов. Показателем дисперсности дендритной структуры выбрали расстояние между вторичными ветвями дендритов. Расстояние между ветвями дендритов оценивали с помощью металлографи-

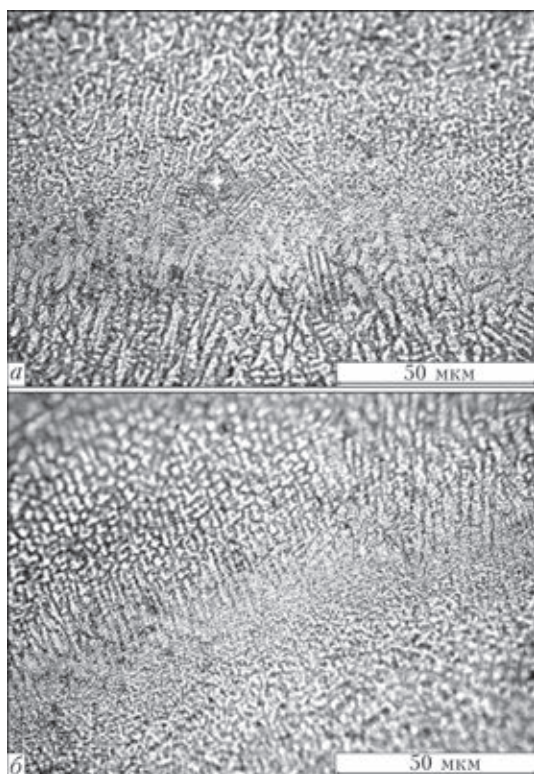


Рис. 7. Микроструктура зоны оплавления литого металла сплава XH56МБЮДШ после лазерной поверхностной обработки в атмосфере азота (а) и гелия (б)

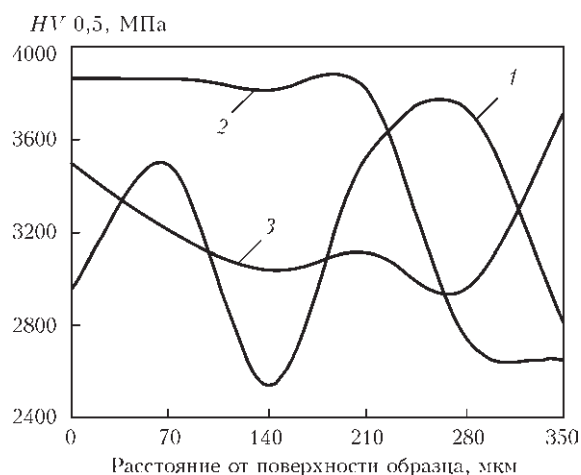


Рис. 8. Распределение микротвердости в литом металле сплава XH56МБЮДШ: 1 — в состоянии после выплавки; 2, 3 — в зоне оплавления после лазерной обработки соответственно в атмосфере азота и гелия

ческих исследований с применением компьютерной программы Tescan.

В результате проведенных исследований установлено, что в литом металле высоконикелевого сплава XH56МБЮДШ в состоянии после выплавки расстояние между первичными ветвями дендритов колеблется от 224 до 862 мкм, а между вторичными — от 60 до 245 мкм, т. е. расстояние между первичными ветвями дендритов почти в 3 раза больше, чем между вторичными.

В зоне оплавления в атмосфере азота расстояние между первичными ветвями дендритов составляет 1,8...5,0 мкм, между вторичными 1,6...4,2 мкм; в атмосфере гелия расстояние между первичными ветвями дендритов 1,9...4,5 мкм, между вторичными 1,5...4,2 мкм. Расстояния между первичными и вторичными ветвями дендритов в зоне оплавления в атмосфере азота и гелия практически одинаковы, кроме того, они на два порядка меньше, чем в литом металле в состоянии после выплавки без лазерной обработки.

Диаметрические исследования проводили на твердомере LECO-M400 при нагрузке 0,05 кг. Результаты анализа распределения микротвердости в зоне оплавления поверхностного слоя, полученного в результате лазерной обработки в атмосфере азота и гелия, а также литого металла в зоне оплавления наблюдается более равномер-



ное распределение микротвердости по сравнению с литым металлом без лазерной обработки. Кроме того, обнаружено, что уровень микротвердости зоны оплавления после лазерной обработки в среде азота выше, чем поверхностного слоя зоны оплавления в среде гелия.

### Выводы

В результате лазерной поверхностной обработки с оплавлением литого высоконикелевого сплава ХН56МБЮДШ на его поверхности толщиной 240...270 мкм образуется однородный слой, в котором происходит диспергирование эвтектики, обогащенной молибденом и ниобием, и измельчение карбонитридных включений титана.

ДюрOMETрические исследования показали, что микротвердость усредняется во всем объеме оплавленного слоя по сравнению с литым металлом без лазерной обработки, при этом микротвердость матрицы литого металла на уровне 2600...2900 МПа, оплавленного слоя при использовании гелия 3100...3500 МПа, а оплавленного слоя при использовании азота 3800...3900 МПа. Увеличение уровня микротвердости оплавленного слоя при использовании азота в качестве защитного газа может быть обусловлено некоторым уровнем азотирования металла, о чем свидетельствует золотистый оттенок наружной поверхности, характеризующий наличие на поверхности нитридов титана.

В результате металлографических исследований установлено, что в литом металле без лазерной обработки расстояние между первичными

ветвями дендритов примерно в 3 раза больше, чем между вторичными, в то время как в зоне оплавления расстояние между первичными и вторичными ветвями дендритов практически одинаково. Кроме того, в зоне оплавления расстояние между ветвями дендритов на два порядка меньше, чем в литом металле в состоянии после выплавки без лазерной обработки.

В целом лазерная обработка с оплавлением благотворно влияет на структуру и свойства литого высоконикелевого сплава ХН56МБЮДШ: обеспечивается формирование качественного однородного поверхностного рабочего слоя.

1. *Лазерный нагрев и структура стали: Атлас микроструктур* / В. Д. Садовский, В. Д. Счастливцев, Т. М. Табатникова, И. Л. Яковлева. – Свердловск: УрО АН СССР, 1989. – 102 с.
2. *Бровер А. В., Дьяченко Л. Д.* Особенности структурообразования в зонах лазерного оплавления металлов и сплавов // *Металловедение и терм. обработка мет.* – 2009. – № 1. – С. 29–33.
3. *Чудина О. В., Александров В. А., Брежнев А. А.* Комбинированное поверхностное упрочнение углеродистых сталей лазерным легированием с последующим азотированием // *Упрочняющие технологии и покрытия.* – 2010. – № 4. – С. 33–37.
4. *Получение полых заготовок из высоконикелевого сплава методом ЭШЛ* / В. А. Тихонов, Б. И. Медовар, В. Я. Саенко и др. // *Пробл. спец. электрометаллургии.* – 1990. – № 2. – С. 39–42.
5. *Баинин Ю. А., Коростылев А. Б.* Выбор режимов закалки сплава ХН56МБЮД электрошлакового переплава // *Металловедение и терм. обработка мет.* – 1993. – № 3. – С. 19–23.
6. *Перспективы применения электрошлаковых технологий в производстве сосудов высокого давления* / Б. Е. Патон, А. Д. Чепурной, В. Я. Саенко и др. // *Современ. электрометаллургия* – 2004. – № 1. – С. 3–9.

Поступила в редакцию 24.12.2013

## МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ»

16-18 июня 2014 г. в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины состоится Международная научно-техническая конференция «Сварочные материалы».

### ОРГАНИЗАТОРЫ:

- ◆ Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
- ◆ Ассоциация «Электрод» предприятий стран СНГ, Международная ассоциация «Сварка»
- ◆ Общество сварщиков Украины
- ◆ Российское научно-техническое сварочное общество

На конференции предполагается обсудить актуальные вопросы разработки, производства и промышленного применения сварочных и наплавочных материалов, включая покрытые электроды, проволоки порошковые и сплошного сечения, ленты, флюсы, порошки. Планируется издание сборника по итогам работы конференции.

Для участия в работе конференции необходимо до 1 марта 2014 г. прислать заявку на адрес:  
office@association-electrode.com или journal@paton.kiev.ua.

**Контакты:** 03680, г. Киев, ул. Горького, 54, Дирекция Ассоциации «Электрод».

Тел.: +38 (044) 200-63-02, +38 (044) 200-82-77, +38 (044) 200-80-62.

Факсы: +38 (044) 287-72-35, +38 (044) 200-82-77.

E-mail: association-electrode.com; journal@paton.kiev.ua. <http://www.association-electrode.com>