

УДК 669.117.56

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭШП ПО ДВУХКОНТУРНОЙ СХЕМЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТАЛЕМЕДНЫХ ЗАГОТОВОК АНОДОВ ДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В. А. Зайцев, Л. Б. Медовар, П. И. Тищенко,  
Б. Б. Федоровский, В. М. Журавель

Рассмотрен электрошлаковый переплав по двухконтурной схеме (ЭШП ДС) с заменой электродов в процессе выплавки для получения биметаллических слитков. Приведено сравнение влияния ЭШП ДС и стандартного ЭШП составных расходимых электродов на размер переходной зоны биметаллического слитка. Показана возможность выплавки сталемедных слитков высокого качества с применением технологии ЭШП ДС для получения заготовок анодов — подовых электродов дуговых печей постоянного тока.

Electroslag remelting using two-circuit diagram (ESR TC) with a replacement of electrodes during melting for producing bimetal ingots is described. The comparison of effect of ESR TC and standard ESR of composite consumable electrodes on size of transition zone of bimetal ingot is given. The capability of melting of steel-copper ingots of high quality using technology of ESR TC for producing billets of anodes, i.e. hearth electrodes of d.c. arc furnaces, is shown.

**Ключевые слова:** биметалл; электрошлаковый переплав; двухконтурная схема питания; подовый электрод дуговой печи постоянного тока; токоведущий кристаллизатор

Биметаллы довольно широко применяются в технике благодаря своим особым свойствам, отличающимся от таковых составляющих их материалов. Существует большое количество различных способов их получения. В некоторых областях техники требуется применение биметаллических заготовок (литых и/или деформированных) значительного поперечного сечения. Это биметаллические листы, крупногабаритные переходники для сварки разнородных металлов, роторы паровых турбин с различным химическим составом стали по длине (для ступеней низкого, среднего и высокого давления), сталемедные подовые электроды (аноды) дуговых печей постоянного тока и другие изделия ответственного назначения.

Сварка (неразъемное соединение) разнородных металлических материалов в больших сечениях связана со значительными трудностями. Для получения биметаллических полуфабрикатов и изделий больших сечений целесообразно использование электрошлакового переплава и других электрошла-

ковых технологий, подробный анализ которых приведен в работе [1].

В связи с новым витком развития дуговых сталеплавильных печей постоянного тока (ДСППТ) появилась потребность в получении биметаллических слитков сталь–медь больших размеров [2]. В частности, для подовых электродов самой большой в мире 420-тонной ДСП постоянного тока, построенной фирмой Даниэли в Японии, необходимы сталемедные слитки диаметром более 600 мм [3].

Попытки получения подобных заготовок путем последовательного электрошлакового переплава составных электродов из разнородных материалов описаны в работах [4–7] (рис. 1).

Установлено, что при последовательном сплавлении расходимого электрода, состоящего из двух разнородных металлов *A* и *B*, состав металлической ванны изменяется с момента поступления первых капель металла *B* в жидкую металлическую ванну, образованную ранее сплавленным металлом *A*. Постепенно концентрация металла *A* в ванне уменьшается, а металла *B* — увеличивается. И, наконец, наступает момент, когда в металлической ванне практически содержится только металл *B*. Зона, в

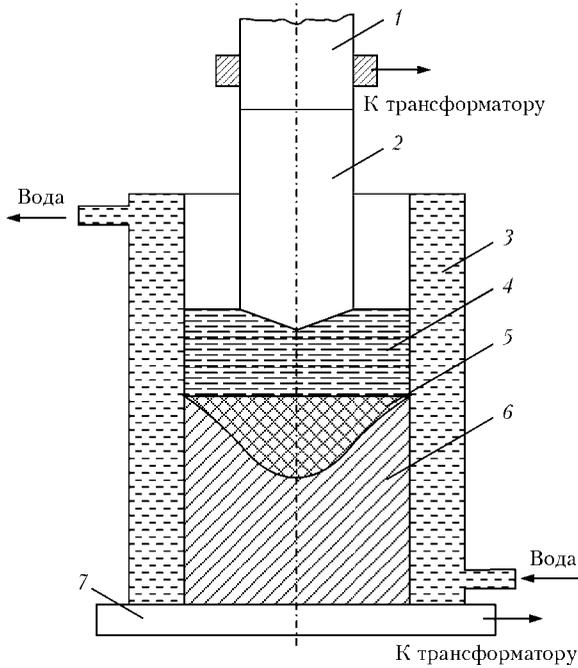


Рис. 1. Схема электрошлакового переплава составного расходоуемого электрода: 1 – металл *Б*; 2 – металл *А*; 3 – кристаллизатор; 4 – шлаковая ванна; 5 – металлическая ванна; 6 – слиток; 7 – поддон

пределах которой происходит изменение состава металла от *А* к *Б* в результате их взаимного перемешивания, является переходной. Однако, как показано в работе [7], уже на первых этапах развития этого способа проявился и основной его недостаток: значительная протяженность переходной зоны. Еще в 1967 г. определили протяженность и состав переходной зоны в слитках ЭШП, полученных из составных расходоуемых электродов, при условии, что объем жидкой металлической ванны к моменту оплавления второй части электрода полностью стабилизируется. В этом случае в биметаллическом слитке ЭШП образуется переходная зона, относительный состав  $C'$  которой изменяется по экспоненциальному закону

$$C' = e^{V_n/V_0},$$

где  $V_n$  – объем металла, наращенного с момента оплавления второй части электрода;  $V_0$  – исходный объем жидкой металлической ванны.

Нетрудно подсчитать, что при переплаве составного электрода из металлов *А* и *Б* необходимо сплавить металл *Б* в объеме, равном  $5V_0$ , чтобы вновь образованная металлическая ванна состояла из 1 % металла *А* и 99 % металла *Б*. Иными словами, протяженность переходной зоны составляет в этом случае примерно пять глубин металлической ванны. При условии, что глубина металлической ванны равняется половине диаметра слитка, переходная зона составит 2,5 диаметра слитка, что является довольно значительным размером, не приемлемым на практике.

Если объем жидкой металлической ванны по мере наплавления слитка непрерывно увеличивается,

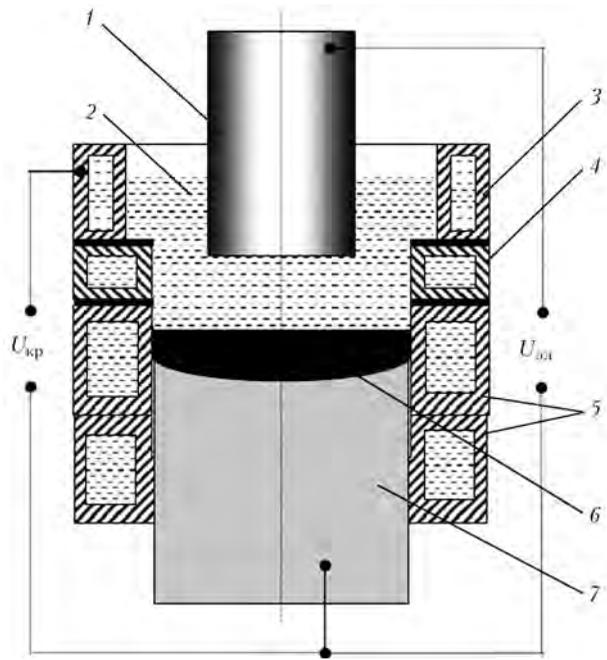


Рис. 2. Схема ЭШП ДС: 1 – расходоуемый электрод; 2 – шлаковая ванна; 3 – токоподводящая секция; 4 – разделительная секция; 5 – формирующие секции; 6 – металлическая ванна; 7 – слиток

то состав переходной зоны формируется иным способом. В работе [8] показано, что в этих условиях состав переходной зоны изменяется по следующему закону:

$$C' = (V_T/V_0)^{-S}, \quad S = u/(u - 1),$$

где  $V_T$  – текущий объем ванны жидкого металла;  $u$  – соотношение скоростей наплавления слитка и кристаллизации.

Из этого выражения следует, что протяженность зоны переменного состава зависит от соотношения скоростей переплава и кристаллизации и будет тем меньшей, чем это отношение больше, а также от объема металлической ванны, существовавшей к моменту начала оплавления второй части электрода. Как показали расчеты и практика стандартного ЭШП, существенно уменьшить зону переменного состава, варьируя указанные параметры в разумных пределах, не удастся [9]. Кроме того, применение ЭШП составного электрода позволяет получить переходную зону лишь с плавным переходом от одного металла к другому.

Были предприняты попытки применить для преодоления указанных трудностей ЭШП со сменой электродов по ходу переплава. Однако в этом случае существенно уменьшить глубину металлической ванны невозможно. Если же при смене электродов для получения короткой переходной зоны дать возможность частично закристаллизоваться металлу одного состава перед началом плавления металла другого состава, то неизбежно появление неприемлемых поверхностных дефектов.

Предложенный в ИЭС им. Е. О. Патона способ электрошлакового переплава по двухконтурной

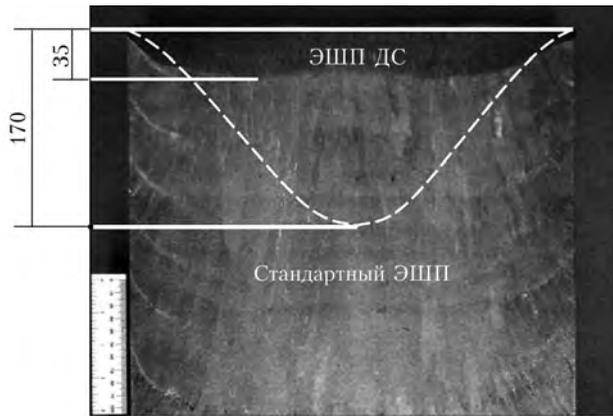


Рис. 3. Профиль металлической ванны при ЭШП ДС слитка диаметром 350 мм (штриховой линией показан профиль при стандартном ЭШП)

схеме (ЭШП ДС) позволяет устранить указанные недостатки [10]. На рис. 2 приведена принципиальная схема ЭШП ДС. Многочисленные эксперименты показали, что при этом способе реализации ЭШП в значительной мере разорвана связь между вводимой в шлаковую ванну электрической мощностью и скоростью наплавления слитка. Это означает, что при ЭШП ДС можно существенно, в сравнении со стандартным ЭШП, изменять скорость наплавления слитка и, соответственно, глубину жидкометаллической ванны. Таким образом, ЭШП ДС является родственным холодноподовым процессам переплава. На рис. 3 приведен серный отпечаток слитка диаметром 350 мм, иллюстрирующий указанную возможность применения ЭШП ДС для управления затвердеванием.

Возможности ЭШП ДС для получения слитков переменного по длине химического состава изучали на сталях и сплавах со значительным интервалом кристаллизации. В частности, изготовили модельные биметаллические слитки диаметром 350 мм, в которых к низкоуглеродистой стали приплавляли быстрорежущую сталь и никелевый сплав. Оба эти материала имеют значительный интервал затвердевания. Применение ЭШП ДС позволило получить переходную зону в этих слитках протяженностью менее 100 мм. Распределение основных химических элементов вблизи линии их сплавления показано на рис. 4 [9].

На основании данных результатов принято решение о применении ЭШП ДС для изготовления сталемедных биметаллических слитков в качестве заготовок для производства анодов ДСППТ. Предпринимались попытки применения ЭШП составного сталемедного расходуемого электрода для получения указанных заготовок, которые из-за образования протяженной переходной сталемедной зоны признаны нецелесообразными.

Анод (подовый электрод) является основным конструктивным элементом ДСППТ [2]. Конструкция анода должна обеспечивать эффективное охлаждение, надежность электрического контакта с шихтой при минимальных тепловых потерях, простоту и технологичность его изготовления. Материал подового электрода следует выбирать с учетом надежной работы при высоких тепловых и токовых нагрузках, стойкости против механических и тепловых ударов, чистоты расплава и отсутствия его взаимодействия с футеровкой подины.

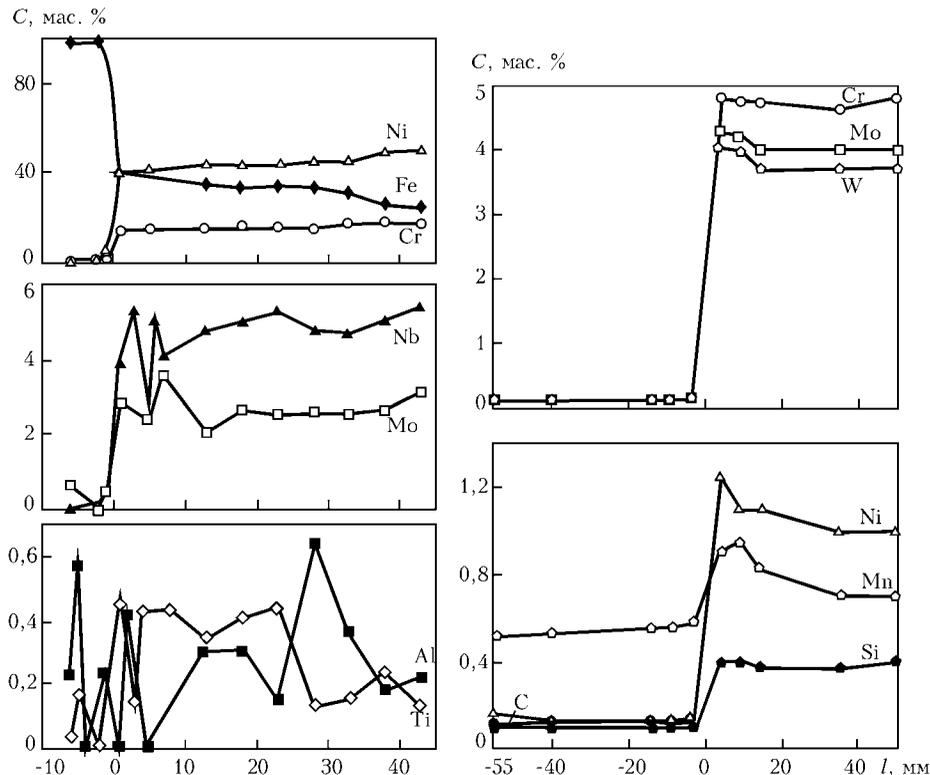


Рис. 4. Распределение основных химических элементов вблизи линии сплавления биметаллических слитков, полученных с применением ЭШП ДС;  $C$  – содержание элементов;  $l$  – расстояние от линии сплавления

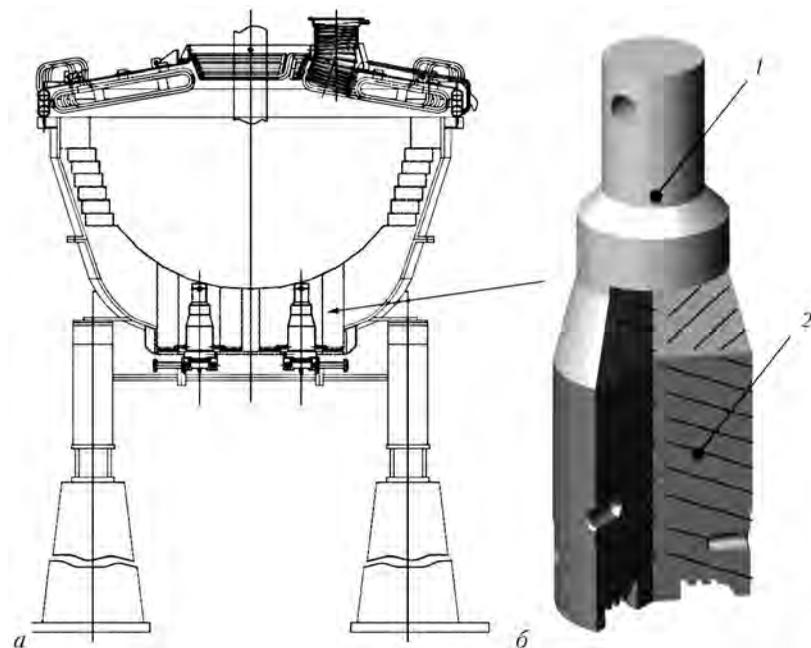


Рис. 5. Схема установки двух подовых электродов в 12-тонной дуговой печи постоянного тока (а) и модель подового электрода с сечением в корпусе (б) [11]: 1 — сталь; 2 — медь

Таким образом, указанные факторы определяют основные требования к конструкции анодов — хороший электрический контакт и высокую стойкость.

На территории Украины в дуговых печах постоянного тока применяют в основном стержневые сталемедные подовые электроды (рис. 5). Верхняя стальная часть такого электрода контактирует с жидким металлом и в процессе работы частично оплавляется, а нижняя медная — располагается ниже плавильной зоны и охлаждается водой (рис. 6).

Ранее данные подовые электроды получали из отдельно прокатанных медных и стальных заготовок, соединенных между собой с помощью ручной

сварки, прошедших механическую обработку до чистового размера. Такая технология производства подовых электродов весьма затруднительна. В биметалле сталь-медь компонентам присущи различные физико-механические свойства. Кроме того, медь и сталь имеют ограниченную взаимную растворимость в твердом состоянии, плохую смачиваемость в жидком и сильно различающиеся температуры кристаллизации. Все это значительно ограничивает возможность соединения этих металлов традиционными способами сварки.

Эксперименты по применению ЭШП ДС проводили на опытно-промышленной печи УШ-149, работающей с заменой электродов. Печь переоборудовали для работы по способу ЭШП ДС. Второй контур короткой сети для питания тоководящего кристаллизатора соединили с источником питания 720 кВ·А. В качестве материалов для выплавки слитков выбрали сталь типа СтЗсп и медь М1. Процесс осуществляли на «жидком» старте. Специальный шлак для реализации переплава разнородных материалов основан на стандартном шлаке типа АНФ-28.

Процесс ЭШП ДС сталемедных слитков со смесью электродов в процессе переплава производили следующим образом. После наведения шлаковой ванны в кристаллизаторе при помощи электрической цепи токоподводящий кристаллизатор-поддон вводили стальной расходуемый электрод, включали вторую цепь электрод-поддон и начинали

в качестве материалов для выплавки слитков выбрали сталь типа СтЗсп и медь М1. Процесс осуществляли на «жидком» старте. Специальный шлак для реализации переплава разнородных материалов основан на стандартном шлаке типа АНФ-28.

Процесс ЭШП ДС сталемедных слитков со смесью электродов в процессе переплава производили следующим образом. После наведения шлаковой ванны в кристаллизаторе при помощи электрической цепи токоподводящий кристаллизатор-поддон вводили стальной расходуемый электрод, включали вторую цепь электрод-поддон и начинали

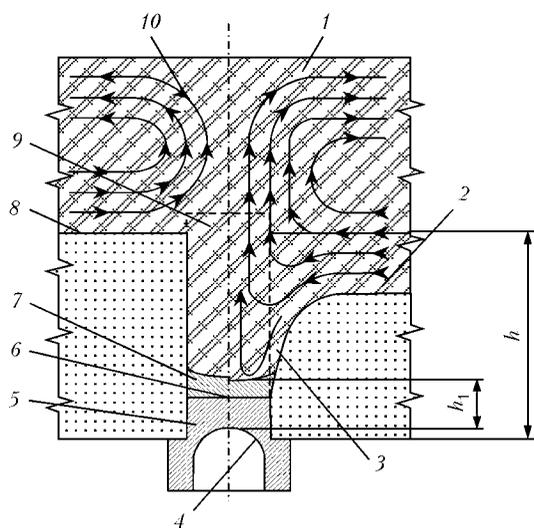


Рис. 6. Схема работы подового электрода в дуговой печи постоянного тока [12]: 1 — жидкая ванна; 2 — огнеупорная кладка после износа; 3 — анодная яма; 4 — водоохлаждение электрода; 5 — медная часть электрода; 6 — сталемедное соединение; 7 — нерасплавленная стальная часть электрода; 8 — исходная огнеупорная кладка; 9 — исходная стальная часть электрода; 10 — потоки жидкой стали



Рис. 7. Вытяжки из кристаллизатора сталемедного слитка



процесс ЭШП ДС с вытяжкой слитка. После переплава стального электрода заданной длины электрическая цепь электрод–поддон размыкалась, огарок выводили из шлаковой ванны и производили его замену медным расходуемым электродом.

Во время замены стального огарка медным расходуемым электродом за счет увеличения мощности в электрической цепи токоподводящий кристаллизатор–поддон производили электрошлаковый обогрев поверхности головной части слитка, что позволило сохранить надлежащее формирование слитка. Далее в шлаковую ванну вводили медный расходуемый электрод, вновь включали цепь электрод–поддон и осуществляли его переплав по схеме ЭШП ДС, вплоть до получения слитка заданной длины. Управление процессом осуществляли автоматически.

Выплавили опытную партию сталемедных слитков диаметром 350 мм, высотой 1000...1300 мм с примерно равными по длине стальной и медной частями. Процесс вытяжки из кристаллизатора биметаллического слитка показан на рис. 7.

Приемку электрошлаковых слитков производили после механической обработки на токарном станке до состояния «как чисто», что в среднем составляло 10...15 мм на сторону. При этом не допускалось наличие как в основном металле, так и в районе переходной зоны (особенно) шлаковых включений, пор, несплошностей, несплавлений, трещин и других дефектов.

Изготовленные в дальнейшем подовые электроды дуговых печей постоянного тока садкой 0,5...12,0 т из сталемедных слитков, выплавленных по схеме ЭШП ДС с заменой электродов в процессе выплавки, успешно эксплуатируются на отечественных предприятиях.

1. *Изготовление* многослойной стали способом электрошлакового переплава / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, А. К. Цыкуленко и др. // Спец. электрометаллургия. — 1973. — Вып. 20. — С. 3–9.
2. *Зайцев В. А., Медовар Л. Б.* Подовые электроды дуговых печей постоянного тока // Современ. электрометаллургия. — 2009. — № 2. — С. 3–8.
3. <http://www.danieli.com/>
4. *Изготовление* переходников для сварки разнородных металлов с помощью электрошлакового переплава / Б. И. Медовар, Л. В. Чекотило, В. Л. Артамонов и др. // Электрошлаковый переплав / Тр. III Всесоюз. конф. по электрошлаковому переплаву. — Часть II. — 1969. — С. 401–407.
5. *Никитенко З. Л., Спийко В. Я., Шварцер Л. Я.* Особенности технологии получения проволоки с закономерно изменяющимися свойствами // Цв. металлы. — 1981. — № 5. — С. 5–10.
6. *Электрошлаковая* выплавка заготовок бандажей валков холодной прокатки с переменным химическим составом по длине бочки / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. Я. Саенко и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1980. — Вып. 12. — С. 3–5.
7. *Определение* величины переходной зоны в электрошлаковым слитке из разнородных металлов / Б. И. Медовар, Л. В. Чекотило, В. Л. Артамонов и др. // Спец. электрометаллургия. — 1973. — Вып. 9. — С. 9–12.
8. *Оценка* величины переходного слоя в многослойных биметаллических листовых слитках ЭШП / В. Ф. Демченко, Б. И. Медовар, А. К. Цыкуленко и др. // Там же. — 1975. — Вып. 27. — С. 12–17.
9. *Перспективы* получения изделий ответственного назначения с регулируемыми свойствами / А. К. Цыкуленко, Б. Е. Патон, Б. И. Медовар и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1993. — Вып. 1. — С. 3–9.
10. *Двухконтурная* схема электрошлакового переплава расходного электрода / А. К. Цыкуленко, И. А. Ландман, Л. Б. Медовар и др. // Там же. — 2000. — № 3. — С. 16–20.
11. <http://www.roud.com.ua/index.php>
12. *Подовый* электрод с жидкометаллическим теплоносителем для дуговой печи постоянного тока / П. И. Тищенко, С. Н. Тимошенко, С. Ю. Пасечник и др. // Наукові праці ДонНТУ. Металургія. — 2010. — Вып. 12. — С. 164–170.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев  
 ЧП «Элмет-Рол», Киев  
 ООО «Украинские металлургические технологии», Донецк  
 Поступила 17.05.2011

## ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ

**Объявляет ежегодный набор по следующим специальностям:**

### ДОКТОРАНТУРА

- сварка и родственные процессы и технологии
- материаловедение
- металлургия черных и цветных металлов и специальных сплавов
- диагностика материалов и конструкций

### АСПИРАНТУРА

- сварка и родственные процессы и технологии
- материаловедение
- металлургия черных и цветных металлов и специальных сплавов
- диагностика материалов и конструкций

*Прием в аспирантуру проводится в сентябре.*

*Контактный телефон: 289-84-11.*

*Подробная информация на сайте института (раздел аспирантура): [www.paton.kiev.ua](http://www.paton.kiev.ua)*

*Документы направлять по адресу: 03680, Украина, Киев-150, ГСП, ул. Боженко, 11,*

*Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, ученому секретарю*