



# СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДУГИ ВОЛЬФРАМ–АЛЮМИНИЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ

**В. А. КОСОВИЧ, И. Е. ЛАПИН**, кандидаты техн. наук, **А. Н. ПОТАПОВ, А. В. САВИНОВ**, инженеры,  
**В. И. ЛЫСАК**, д-р техн. наук (Волгоград. гос. техн. ун-т, РФ)

Рассмотрена зависимость напряжения в дуговом промежутке в импульсах тока при прямой и обратной полярности, а также действующих значений напряжения от тока и длительности импульсов тока при обратной полярности. Отмечается снижение напряжения в импульсах тока при прямой полярности до аномально низких значений при увеличении длительности импульсов тока при обратной полярности.

*Ключевые слова:* вольт-амперная характеристика, неплавящийся электрод, аргонодуговая сварка, дуга переменного тока, прямоугольная форма напряжения

В последнее время созданы и находят применение источники питания дуги переменного тока, на выходных клеммах которых напряжение изменяется по прямоугольной кривой. Если при этом индуктивность сварочной цепи близка к нулю, источник питания работает на активную нагрузку, т. е. на дугу, и ток дуги изменяется по тому же закону (кривая изменения импульсов имеет прямоугольную форму). Применение таких источников питания расширяет технологические возможности аргонодуговой сварки алюминиевых сплавов, позволяя отдельно регулировать частоту и длительность импульсов тока при прямой и обратной полярности, а также их амплитуду. Заметим, что термин «импульсы» вместо традиционного «полупериоды» здесь применяется из-за возможного неравенства их длительностей.

На основании выполненных исследований дуги, питаемой от таких источников, были получены данные об ее энергетических и технологических свойствах [1–4], которые свидетельствовали о перспективности применения переменного тока прямоугольной формы при сварке алюминиевых сплавов. Однако для реализации этого необходимо выполнить исследования дуги с целью выяснения ее технологических особенностей и электрических свойств, и прежде всего, вольт-амперных характеристик. Данные о последних необходимы для эффективного применения такой дуги для сварки, поскольку использование известной методики оценки энергетических параметров дуги с близким к синусоидальному изменению тока в рассматриваемом случае вряд ли возможно.

В настоящей работе представлены результаты исследования вольт-амперных характеристик дуги переменного тока прямоугольной формы.

В качестве неплавящегося электрода применяли прутки из лантанированного вольфрама, рабочий торец которых затачивали на полусферу. Вторым

электродом служили пластины из сплава АМг5, перемещаемые под неподвижно закрепленной горелкой со скоростью 12 м/ч. Установочная длина межэлектродного промежутка составляла 2 мм. При проведении экспериментов применяли разработанный авторами источник питания, состоящий из однофазного тиристорного мостового инвертора напряжения с принудительной параллельной коммутацией, а также основного и дополнительного регулируемых источников постоянного тока. Источник питания обеспечивает возможность изменения соотношения амплитуд импульсов тока в диапазоне 0,25...40,00 и раздельное регулирование длительностей импульсов тока от 2 до 20 мс при прямой  $\tau_{пр}$  и обратной  $\tau_{обр}$  полярности. При этом

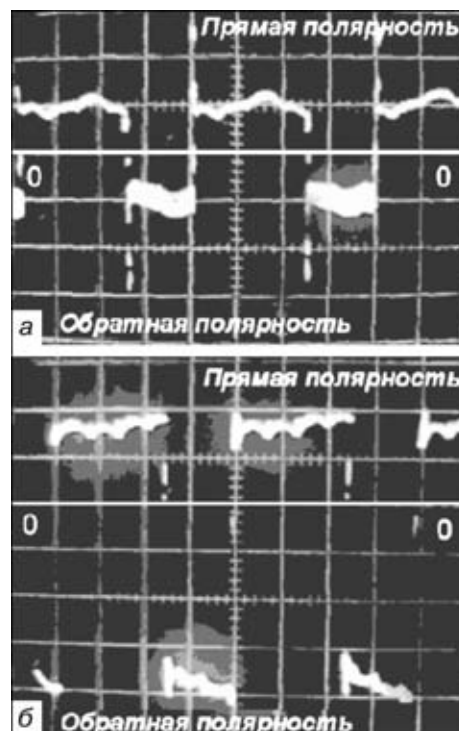


Рис. 1. Осциллограммы тока (а) и напряжения дуги (б) при  $I_d = 200$  А,  $\tau_{пр} = 12,5$  и  $\tau_{обр} = 7,5$  мс (масштаб по напряжению 5 В/дел.)

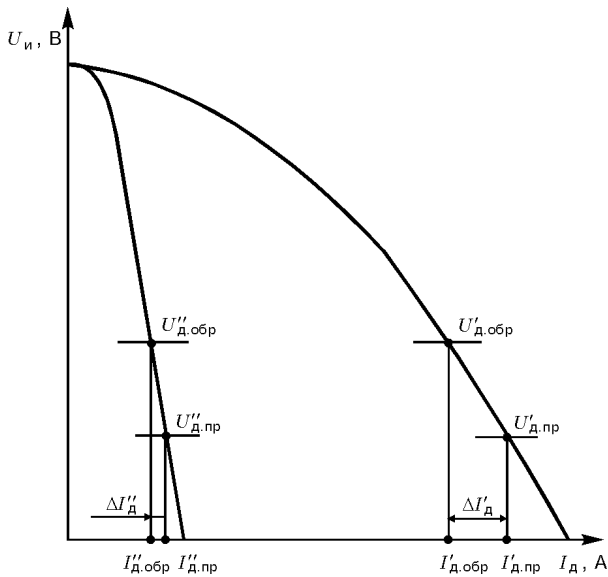


Рис. 2. Влияние крутизны падения внешних вольт-амперных характеристик источника питания на  $I_{д.пр} - I_{д.обр}$

устойчивое горение дуги без применения импульсного стабилизатора обеспечивается в диапазоне тока 6... 350 А. Расход аргона составлял 8 л/мин. Ток, напряжение дуги, длительность импульсов тока измеряли и контролировали с помощью двухлучевого запоминающего осциллографа С8-14. Осциллограммы тока и напряжения рассматриваемой дуги представлены на рис. 1. Как видно из него, после смены полярности возбуждения дугового разряда происходит практически мгновенно, без паузы, а значения напряжения и тока дуги в течение длительности импульса могут быть приняты постоянными лишь с определенными допущениями. Значения напряжения дуги на протяжении импульса как при прямой, так и обратной полярности не всегда остаются неизменными. Так, при сравнительно больших значениях тока наблюдается некоторое возрастание значений напряжения дуги. Их увеличение в течение длительности импульса при прямой полярности предположительно можно

объяснить снижением температуры катодного пятна на электроде, так как нагрев его выше в импульсах тока при обратной полярности. Рост напряжения в импульсах при обратной полярности связан, по-видимому, с увеличением «блуждания» (во времени) активного пятна на алюминиевом катоде. Такое изменение напряжения согласуется с данными работы [5]. Ее авторы считают, что интенсивное перемещение активного пятна на катод из алюминия является следствием высокой эмиссионной способности оксидов этого металла. Разрушение оксидов в процессе горения дуги под воздействием катодного распыления приводит к непрерывному смещению активного пятна в сторону окисленных участков, и, как следствие, — к росту зоны катодной очистки. По абсолютному значению напряжение в дуговом промежутке в импульсах тока при обратной полярности  $U_{д.обр}$  заметно больше значений аналогичной величины при прямой полярности  $U_{д.пр}$ . Это объясняется различиями в катодных процессах, происходящих на вольфрамовом электроде и алюминиевой пластине.

Значение тока дуги в импульсах тока при прямой  $I_{д.пр}$  и обратной полярности  $I_{д.обр}$  близки и могут быть приняты равными. Допускаемая при этом ошибка равна разности  $I_{д.пр} - I_{д.обр}$  и зависит от крутизны падения внешних вольт-амперных характеристик источника питания — чем больше крутизна падения, тем меньше ошибка (рис. 2). Применяемый в опытах источник питания имел внешние вольт-амперные характеристики с крутизной падения в рабочей области 0,25... 1,50 В/А, что позволяло считать  $I_{д.пр} \cong I_{д.обр} \cong I_{д.}$ . В тех случаях, когда значения тока в импульсах при прямой и обратной полярности исходно заданы различными ( $I_{д.пр} \neq I_{д.обр}$ ), действующее значение тока следует определять из выражения

$$I_{д.} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{д.}^2 dt}, \quad (1)$$

где  $i_{д.}$  — мгновенное значение тока дуги;  $T$  — длительность периода.

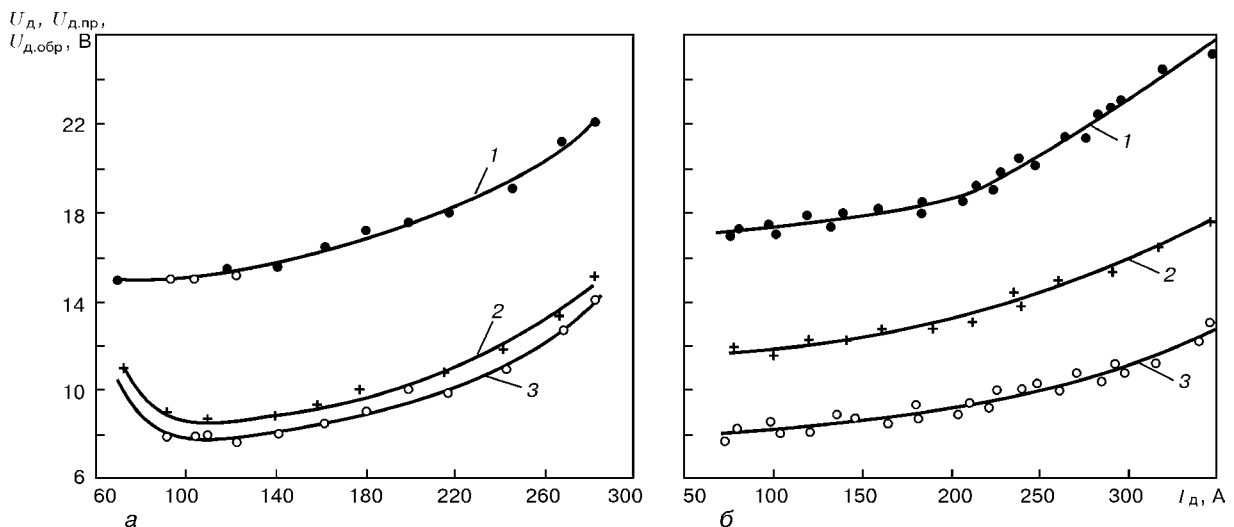


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики дуги вольфрам-алюминий (частота импульсов переменного тока 50 Гц): а —  $\tau_{обр} = 1,25$  мс; б —  $\tau_{обр} = 6,25$  мс; 1 —  $U_{д.обр}$ ; 2 —  $U_{д.}$ ; 3 —  $U_{д.пр}$

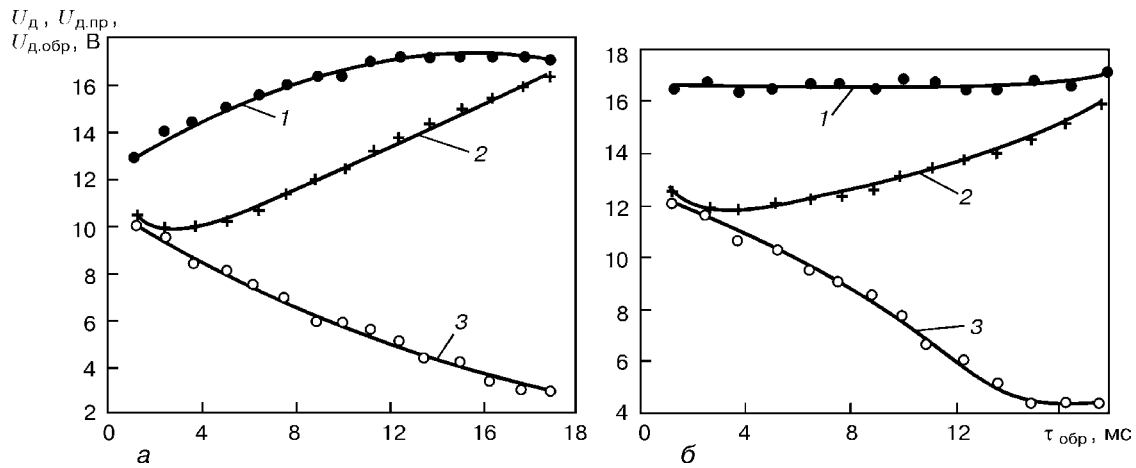


Рис. 4. Влияние длительности импульса тока при обратной полярности на напряжение дуги вольфрам–алюминий: а —  $I_d = 50$  А; б —  $I_d = 100$  А (1–3 — см. обозначения рис. 3)

Из-за сложности процессов, происходящих в дуговом разряде, статические вольт-амперные характеристики дуги обычно представляют графически. В рассматриваемом случае возможны два варианта графического выражения характеристик. Первый предполагает построение двух вольт-амперных характеристик (для дугового промежутка одной величины): первая — для импульсов тока при обратной полярности (катод–алюминиевая пластина); вторая — при прямой полярности (катод–вольфрамовый электрод). Фактически первая является вольт-амперной характеристикой дуги постоянного тока при обратной полярности, вторая — при прямой полярности. Такой подход вполне правомерен, так как  $\tau_{пр}$  и  $\tau_{обр}$  многократно превышают время установления дугового разряда [6]. Отмеченное выше при отдельных режимах некоторое увеличение напряжения в течение длительности импульсов тока происходит в условиях стационарного горения дуги [7].

Второй вариант предполагает построение вольт-амперной характеристики, в которой функцией служит действующее значение напряжения. В общем случае его значение определяется выражением

$$U_d = \sqrt{1/T \int_0^T u_d^2 dt}, \quad (2)$$

где  $u_d$  — мгновенное значение напряжения.

Если принять значения напряжений в импульсах тока при прямой  $U_{д.пр}$  и обратной  $U_{д.обр}$  полярности постоянными, то выражение (2) для дуги переменного тока преобразуется следующим образом:

$$U_d = \sqrt{1/T (U_{д.пр}^2 \tau_{пр} + U_{д.обр}^2 \tau_{обр})}. \quad (3)$$

Строго говоря, только при втором варианте обеспечивается получение вольт-амперных характеристик дуги переменного тока, поскольку, как уже отмечалось выше, построенные по первому варианту вольт-амперные характеристики фактически являются характеристиками дуги постоянного тока при прямой и обратной полярности. Однако для анализа дуговых процессов необходимы как первый, так и второй варианты этих характеристик.

Полученные по обоим вариантам вольт-амперные характеристики дуги представлены на рис. 3. В обоих случаях частота импульсов переменного тока составляла 50 Гц, диаметр электрода 3 мм, длительность импульса тока при обратной полярности  $\tau_{обр}$  составляла 1,25 мс, т. е.  $0,0625T$  (рис. 3, а) и 6,25 мс, т. е.  $0,3125T$  (рис. 3, б). Следует иметь в виду, что значения  $U_{д.пр}$  и  $U_{д.обр}$  противоположны по знаку, хотя для удобства анализа на рис. 3 они показаны однозначными. Как видно, характеристики  $U_d = f(I_d)$ ,  $U_{д.пр} = f(I_d)$  и  $U_{д.обр} = f(I_d)$  имеют возрастающий характер. Исключение составляют кривые вольт-амперных характеристик, показанные на рис. 3, а, имеющие падающий участок в диапазоне тока 70...120 А.

Более крутое восхождение кривых вольт-амперных характеристик при токе свыше 200 А объясняется, по-видимому, нарастающим (с увеличением тока) заглублением дуги в алюминиевую пластину и, как следствие, удлинением дуги. Известно, что с увеличением длины дуги кривые ее вольт-амперной характеристики смещаются в сторону больших значений напряжений. Следовательно, кривые на рис. 3 являются вольт-амперными характеристиками только в диапазоне значений тока, не превышающих 200 А, когда заглубление дуги в металл отсутствует или невелико; при больших значениях тока эти кривые представляют собой траектории перехода с одних вольт-амперных характеристик на другие, соответствующие большей длине дуги. Поскольку такое заглубление дуги при сварке неизбежно, нецелесообразно вносить соответствующие поправки для получения физически точных вольт-амперных характеристик.

Сравнение данных, представленных на рис. 3, показывает, что при увеличении  $\tau_{обр}$  вольт-амперная характеристика  $U_d = f(I_d)$  смещается в сторону больших напряжений. Как свидетельствуют результаты опытов, длительность  $\tau_{обр}$  влияет не только на действующее значение напряжения  $U_d$ , что вполне очевидно, но и на значения  $U_{д.пр}$  и  $U_{д.обр}$ . На рис. 4 представлены зависимости  $U_d = f(\tau_{обр})$ ,  $U_{д.пр} = f(\tau_{обр})$  и  $U_{д.обр} = f(\tau_{обр})$ . Отметим, что значение  $\tau_{обр}$  выбрано в качестве аргумента не случайно. Именно от этого параметра существенно зависят наиболее важные характеристики дуги при



Рис. 5. Динамическая вольт-амперная характеристика дуги переменного тока прямоугольной формы при  $I_d = 100$  А,  $\tau_{пр} = 16,25$  и  $\tau_{обр} = 3,75$  мс (масштаб по напряжению 10 В/дел.)

сварке на переменном токе алюминия и его сплавов — стойкость неплавящихся электродов, качество катодной очистки свариваемой поверхности, проплавляющая способность [2]. Как видно, значение напряжения  $U_d$  с ростом  $\tau_{обр}$  сначала немного понижается (при этом уменьшается и мощность дуги), а затем начинает возрастать, приближаясь к значению  $U_{d,обр}$ . Напряжение  $U_{d,обр}$  при токе дуги 50 А сначала увеличивается до 17 В (с ростом  $\tau_{обр}$ ), а затем остается неизменным (рис. 4, а). При токе 100 А (рис. 4, б) напряжение  $U_{d,обр}$  имеет практически постоянное (16,5... 17,0 В) значение во всем диапазоне изменений  $\tau_{обр}$ .

Большой интерес представляет зависимость  $U_{d,пр} = f(\tau_{обр})$ . С увеличением длительности  $\tau_{обр}$  значение напряжения импульса тока при прямой полярности  $U_{d,пр}$  монотонно уменьшается, приближаясь к 3,0... 4,5 В, когда  $\tau_{обр}$  составляет преобладающую часть периода. Ранее нам не приходилось встречать столь низкое значение напряжения на дуге в своих опытах, а также в работах других авторов. Можно предположить, что уменьшение  $U_{d,пр}$  в какой-то мере обусловлено повышением температуры рабочего участка вольфрамового электрода одновременно с  $\tau_{обр}$ . В результате увеличивается плотность тока термоэмиссии и уменьшается падение напряжения в катодной области в импульсах тока при прямой полярности. Однако этим обстоятельством вряд ли объясняется такое аномально низкое значение напряжения на дуге. По-видимому, этот вопрос требует отдельного рассмотрения.

Динамические вольт-амперные характеристики дуги вольфрам-алюминий переменного тока прямоугольной формы также имеют ряд особенностей в сравнении с дугой переменного тока синусоидальной формы. Эти особенности связаны прежде всего с высокой скоростью изменения напряжения в дуговом промежутке в моменты смены полярности и постоянством тока (если пренебречь незначительной его пульсацией) в течение длительности импульсов тока при прямой и обратной полярности.

На рис. 5 представлена типичная вольт-амперная характеристика такой дуги. Следует отметить, что в целях сохранения масштабного фактора при снятии характеристик в качестве датчика тока использовался шунт с линейной вольт-амперной ха-

рактеристикой. В связи с этим некоторые участки вольт-амперной характеристики дуги, соответствующие быстро протекающим процессам, на осциллограмме не видны. Особый интерес представляют собой процессы, связанные с повторными возбуждениями дуги при обратной полярности с катодом из алюминия, которые, как известно, играют весьма значимую роль для стабильности горения дуги [5, 6]. Как видно из приведенной динамической характеристики, после смены полярности с прямой на обратную из-за высокой скорости этого процесса, а следовательно, низкого уровня деионизации плазмы напряжение на дуговом промежутке скачкообразно достигает значения, близкого напряжению горения дуги в установившемся режиме (точка 1 на рис. 5). Однако дуговой разряд в этот момент отсутствует, и в межэлектродном промежутке протекают преддуговые процессы, характеризующиеся ростом напряжения при некотором снижении значений тока (участок 1-2). Полученные с помощью осциллографа данные показали, что начальное значение преддугового тока колеблется в пределах от 5 до 30 А, а время его протекания составляет 20... 80 мкс. После завершения формирования катодных процессов на алюминии вступают в действие и начинают развиваться механизмы, свойственные электрической дуге, что сопровождается резким увеличением значения тока и снижением напряжения на дуговом промежутке (участки 2-5). Участок 5-6 характеризует горение дуги в установившемся режиме в течение продолжительности импульса тока при обратной полярности, а его длина определяется пульсацией выходного напряжения источника питания.

В случае возбуждения дуги тока при прямой полярности, вследствие значительной термоэлектронной эмиссии с поверхности вольфрамового электрода и обеспечиваемой ею высокой проводимости катодной зоны, развитие дуговых процессов начинается, как только напряжение на дуговом промежутке после смены полярности превысит напряжение дуги. Время паузы на кривой тока в этом случае не превышает 3... 5 мкс и определяется, по-видимому, скоростью нарастания напряжения в дуговом промежутке. Заметим, что время переходных процессов в момент смены полярности при сварке на переменном токе синусоидальной формы может достигать 4... 6 мс. В связи с этим при значении тока менее 70 А дуга имеет недостаточную устойчивость несмотря на применение стабилизатора импульсов [8].

В силу указанных особенностей протекания переходных процессов при смене полярности переменного тока дуги вольфрам-алюминий прямоугольной формы этот разряд отличается более высокими эластичностью и стабильностью при растяжении по сравнению дугой переменного тока синусоидальной формы. Как показала практика, применение такой дуги для сварки алюминия возможно при токе 5 А и более. При этом не требуются дополнительные стабилизирующие устройства. Для обеспечения устойчивого горения дуги достаточно импульсов перенапряжений, возникающих в дуговом промежутке в результате коммутации



силовых тиристорных инверторов. Возможно, формированием этих импульсов объясняется наличие характерного для всех режимов горения дуги участка осциллограммы (рис. 5), расположенного вблизи нулевой отметки.

1. *Аргонодуговая* сварка алюминиевого сплава 01420 разнополярными прямоугольными импульсами тока // А. Я. Ищенко, А. Г. Чаюн, В. А. Мищенко и др. // Автомат. сварка. — 1978. — № 10. — С. 48–50.
2. *Влияние* асимметрии разнополярного тока прямоугольной формы на параметры швов при аргонодуговой сварке сплава АМг6 // А. Я. Ищенко, А. Г. Покляцкий, М. Р. Яворская и др. // Там же. — 1990. — № 1. — С. 26–28.

3. *Короткова Г. М., Славин Г. А., Филиппов М. А.* Исследование процесса сварки дугой переменного тока прямоугольной формы // Свароч. пр-во. — 1971. — № 10. — С. 4–6.
4. *Влияние* переменного тока и состояния поверхности алюминиевых сплавов на эффективный КПД при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом // О. М. Новиков, В. О. Токарев, В. А. Казаков, О. Е. Островский // Там же. — 1990. — № 8. — С. 43–44.
5. *Финкельбург В., Меккер Г.* Электрические дуги и термическая плазма. — М.: Изд-во иностр. лит., 1961. — 370 с.
6. *Лесков Г. И.* Электрическая сварочная дуга. — М.: Машиностроение, 1970. — 335 с.
7. *Мирдель Г.* Электрофизика / Пер. с нем. — М.: Мир, 1972. — 608 с.
8. *Короткова Г. М.* Динамические характеристики дуги переменного тока при сварке алюминиевых сплавов // Автомат. сварка. — 1984. — № 11. — С. 30–32.

Dependences of the arc gap voltage in pulses of current of straight and reverse polarity and also effective values of voltage on current and duration of current pulses at reverse polarity are considered. The decrease in voltage in pulses of current at straight polarity down to anomalously low values at increase in duration of current pulses at reverse polarity is outlined.

Поступила в редакцию 14.09.2000,  
в окончательном варианте 15.12.2000

## УРАЛЬСКИЕ ВЫСТАВКИ-2000

## URAL EXHIBITIONS-2000

### СВАРКА-2001

специализированная выставка

4–7 декабря 2001 г.

Екатеринбург

Выставочное общество Уральские Выставки-2000 проводит с 4–7 декабря 2001г. в городе Екатеринбурге специализированную выставку «Сварка-2001».

Одновременно пройдут выставки «Газификация и Газовое оборудование-2001», «Химия-2001».

**Цель выставки** — представление и продвижение на российский рынок современного оборудования, технологий, материалов, инструментов, средств контроля и защиты от вредных производственных факторов для всех видов сварки, развития и укрепления деловых связей между производителями и торгующими организациями России и зарубежных стран.

#### Основные направления выставки:

- ✓ Оборудование и технологии для электродуговой сварки металлов (ручная, полуавтоматическая, автоматическая, роботизированная)
- ✓ Оборудование и технологии для плазменной, лазерной, газопламенной сварки, резки, наплавки (ручной, механизированной, роботизированной)
- ✓ Оборудование и технологии для сварки сопротивлением (контактной сварки)
- ✓ Оборудование и технологии для сварки пластмасс
- ✓ Вспомогательное сварочное оборудование (кантователи, вращатели, центраторы, домкраты и т. п.)
- ✓ Оборудование и технологии контроля качества сварных соединений и исходных материалов
- ✓ Оборудование и технологии для производства сварочных электродов
- ✓ Оборудование и технологии для пайки
- ✓ Материалы для сварки, резки, пайки (электроды, проволоки, припои и т. п.)
- ✓ Инструменты для сварки
- ✓ Средства и методы защиты от вредных производственных факторов в сварочном производстве (рабочая одежда сварщиков и обслуживающего персонала, системы вентиляции, респираторы и т. д.)
- ✓ Методы обучения и повышения квалификации сварочного персонала

**В расписании выставки:** пресс-конференции; презентации отечественных и зарубежных фирм; продажа выставочных экспонатов; конкурс на золотую и серебряную, бронзовую медали, дипломы Выставочного Общества «Уральские Выставки-2000».

**За дополнительной информацией обращаться к менеджеру выставки — Стрежнёвой Алёне Ивановне**

Россия, 620027 Екатеринбург, ул. Свердлова, 11а, офис 505.

Тел./факс: +7 (3432) 701796, 701795, 703374, 703375

E-mail: [vystavka@dialup.mplik.ru](mailto:vystavka@dialup.mplik.ru), <http://vystavka.ru>