



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАДЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ КОНТАКТА ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ С МУНДШТУКОМ ГОРЕЛКИ ПРИ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ СПОСОБАХ ДУГОВОЙ СВАРКИ

И. В. ПЕНТЕГОВ, д-р техн. наук, **О. И. ПЕТРИЕНКО**, **С. В. ПУСТОВОЙТ**, инженеры,
В. Н. СИДОРЕЦ, канд. техн. наук, **А. В. ЛАВРЕНЮК**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Описаны эксперименты по определению падения напряжения в области контакта электродной проволоки с мундштуком сварочной горелки. По результатам компьютерной обработки опытных данных предложены эмпирические формулы зависимости контактного падения напряжения от различных параметров сварки.

Ключевые слова: дуговая сварка, контактное падение напряжения, контактное сопротивление

В работах [1, 2] описана математическая модель тепловых и электрических процессов при дуговой сварке плавящимся электродом в защитных газах в системе источник питания–сварочная дуга. В модели используется предполагаемое известным значение падения напряжения $U_{\text{кон}}$ в области контакта электродной проволоки с мундштуком сварочной горелки.

Определению падения напряжения и сопротивления в области контакта электродной проволоки с мундштуком сварочной горелки посвящено много работ [3–10], однако большинство из них не позволяют использовать эти данные в разработанной математической модели из-за своих недостатков. Например, в работе [3] значения $U_{\text{кон}}$ были установлены не экспериментальным путем, а методом экстраполяции зависимостей, полученных опытным путем, на «нулевой» вылет. Согласно данным этой работы, падение напряжения между мундштуком и электродной проволокой при токе 350 А составляет 0,6...0,9 В и незначительно увеличивается с уменьшением диаметра электродной проволоки. Однако из работы [3] не ясно, при какой скорости подачи проволоки зафиксированы эти результаты. Поэтому нельзя получить функциональную зависимость между $U_{\text{кон}}$ и скоростью подачи проволоки $v_{\text{п}}$.

Методика исследования, описанная в работе [4], основана на осциллографировании падения напряжения между мундштуком и скользящим вольфрамовым щупом, перемещаемым по поверхности электрода по направлению к изделию. Щуп в процессе осциллографирования последовательно проходит собственно вылет, «горячий» конец электрода и зону дуги, что дает возможность определить распределение напряжений на этих участках. Методика позволила получить значительное количество осциллограмм, показывающих, что падение напряжения на вылете нелинейно увеличивается по мере приближения к «горячему» концу, на

границе с которым оно резко возрастает. Но эти данные дают лишь косвенную информацию о значениях $U_{\text{кон}}$, полученных посредством экстраполяции кривых в начало вылета электродной проволоки.

Измерения $U_{\text{кон}}$, проведенные в работах [5, 6], показали, что на уровень $U_{\text{кон}}$ также влияет кривизна электродной проволоки и форма токоподводящего наконечника. Так, при сварке проволокой Св-08Х20Н9Г7Т диаметром 2 мм значения $U_{\text{кон}}$ изменяются от 2 до 4 В, а при сварке предварительно выровненной проволокой с цилиндрическим токоподводящим наконечником через 1...2 ч сварочного процесса $U_{\text{кон}}$ может достигать 10...15 В. Авторы работы [5] утверждают, что при износе наконечника возрастает отклонение значений $U_{\text{кон}}$ от установленного. Однако они не указывают значения ни скорости подачи электродной проволоки $v_{\text{п}}$, ни сварочного тока I , при которых проводились эксперименты.

Результаты измерений $U_{\text{кон}}$ в работах [3, 5] расходятся на порядок.

В работе [7] определено сопротивление контакта мундштук–проволока и приведены данные о режимах (скорость подачи, сварочный ток, диаметр проволоки), при которых получены значения контактных сопротивлений, имеющие большой разброс, что делает использование их в математической модели невозможным. Поэтому получение достоверных сведений об уровне падения напряжения в контакте мундштук–проволока, которые можно было бы использовать в математической модели тепловых и электрических процессов при дуговой сварке плавящимся электродом в защитных газах, является актуальной задачей.

В настоящей работе описываются эксперименты по определению падения напряжения в месте контакта электродной проволоки с мундштуком сварочной горелки с использованием компьютерных методов обработки полученных опытных данных. Измерения проводились по схеме, приведенной на рис. 1.

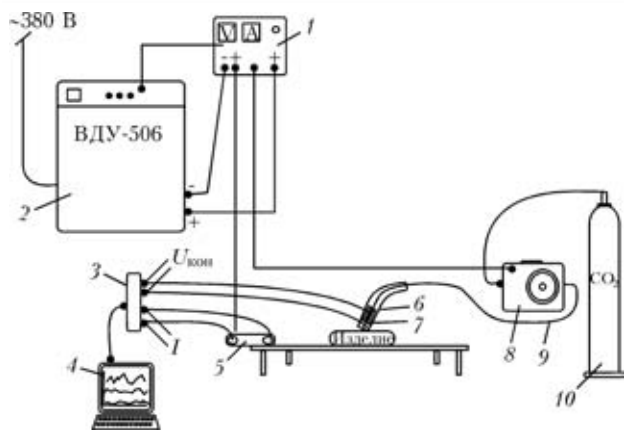


Рис. 1. Схема подключения оборудования и приборов при проведении экспериментов: 1 — пульт управления; 2 — источник питания ВДУ-506; 3 — делитель напряжения и блок гальваноразвязки; 4 — персональный компьютер со встроенным АЦП (L-154); 5 — шунт; 6 — горелка; 7 — мундштук; 8 — подающий механизм; 9 — сварочная проволока; 10 — баллон с углекислым газом

Для эксперимента использовали нерихтованную проволоку Св-08Г2С диаметрами 0,8 (омедненная) и 1,2 мм (неомедненная) при различных значениях скорости подачи сварочной проволоки (обратная полярность) в углекислом газе. Для питания сварочной дуги применяли источник с жесткой внешней характеристикой ВДУ-506. Экспериментальные данные обрабатывали на компьютере со специально встроенной платой L-154 (LCARD, Россия), в которой реализовано аналого-цифровое преобразование (АЦП) входных сигналов. В АЦП было задействовано два канала, на вход которых подавали через блок усиления и гальваноразвязки текущие значения контактного падения напряжения $U_{кон}$ и сварочного тока I . Сигнал $U_{кон}$ поступал на блок гальваноразвязки через делитель напряжения, а сигнал I снимался с шунта.

Затем экспериментальные данные обрабатывали с помощью программы «PowerGraph», предназначенной для регистрации, обработки и хранения аналоговых сигналов, записанных с помощью АЦП в цифровом виде. Это позволяет использовать персональный компьютер в качестве обычного ленточного самописца, но с возможностью применения методов компьютерной обработки данных. Частота измерений $U_{кон}$ и I составляла 20 кГц. Значения $R_{кон}$ были получены в результате математической обработки данных $U_{кон}$ и I .

Снятие значений контактного падения напряжения производили с помощью вольфрамового щупа, установленного на расстоянии 1 мм от торца мундштука сварочной горелки. Щуп подпружиненно закрепляли в вырезе насадки сварочной горелки специально изготовленным приспособлением (рис. 2) и осуществляли скользящий контакт с проволокой. Второй вывод измерительной цепи припаивали к медному мундштуку.

Фрагменты осциллограмм падения напряжения и тока, а также сопротивления в области контакта электродной проволоки с мундштуком сварочной горелки, полученные описанным способом при различных диаметрах проволоки и скоростях подачи проволоки, приведены на рис. 3, 4. Необходимо

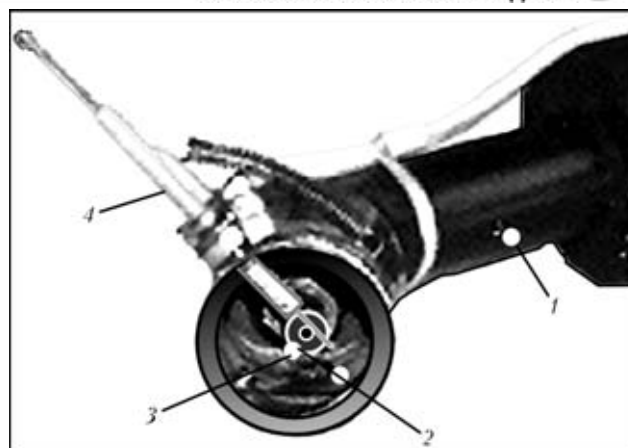


Рис. 2. Внешний вид мундштука сварочной горелки с установленным на нем щупом: 1 — сварочная горелка; 2 — сопло сварочной горелки; 3 — щуп; 4 — мундштук

отметить, что в опытах измеряли чистое контактное падение напряжения плюс падение напряжения на скрытом участке вылета электрода. Разделить эти два напряжения невозможно и в этом нет необходимости, так как для тепловых расчетов нужна именно сумма этих напряжений.

Записанные с помощью программы «PowerGraph» через равные интервалы времени в 0,05 с точечные цифровые массивы значений сварочного тока, контактного падения напряжения и сопротивления позволяют построить вольт-амперные (ВАХ) и ом-амперные характеристики (ОАХ) контакта мундштук–проволока при различных диаметрах проволоки и скоростях подачи проволоки и исследовать характер их изменений в процессе дуговой сварки в инертных газах. Эти точечные зависимости приведены на рис. 5. Здесь показаны области выборочного ряда мгновенных значений $U_{кон}$ и I при сварке с короткими замыканиями (КЗ) и без КЗ для электродной проволоки разных диаметров (0,8, 1,2 мм) и различных значений $v_{п}$.

Из рассмотрения приведенных точечных массивов можно сделать вывод, что ВАХ контакта не зависит от режима сварки (с КЗ или без КЗ), все точки при одних и тех же токах располагаются в узкой области независимо от режимов. Это объясняется тем, что контакт — малоинерционный объект и его состояние обусловлено значением тока в данный момент времени и не зависит от предыстории процесса. Поэтому ВАХ контакта не зависит не только от режимов, но и от параметров сварочной цепи (индуктивности сварочного дросселя, напряжения источника питания и длины вылета). Прослеживается зависимость ВАХ контакта от диаметра электродной проволоки d и скорости ее подачи $v_{п}$. Параметр $U_{кон}$ растет при увеличении скорости подачи $v_{п}$ и уменьшается при возрастании диаметра электродной проволоки d . При фиксированных d и $v_{п}$ среднее значение $U_{кон}$ определяется только мгновенным значением сварочного тока I . Напряжение $U_{кон}$ плавно возрастает с повышением тока через контакт и для неизношенного медного мундштука в рабочем интервале токов находится в диапазоне 0,2... 1,5 В. Омеднение про-



волокни или его отсутствие практически не сказывается на $U_{\text{кон}}$.

Разброс значений $U_{\text{кон}}$ вызван стохастическими изменениями как контактного сопротивления, так и длины «скрытого» участка вылета электрода, обусловленных блужданиями точки контакта.

Для того чтобы использовать массивы полученных данных в математической модели, необходимо сделать аппроксимации ВАХ контакта мундштук-проволока. В данном случае нами использована степенная форма аппроксимации зависимостей математического ожидания $U_{\text{кон}}$ от тока, скорости подачи проволоки и диаметра проволоки, которая при неизношенном медном мундштуке имеет вид

$$U_{\text{кон}}(d, v_{\text{п}}, I) = \left[2,55 \left(\frac{Id_{\text{баз}}}{I_{\text{баз}}d} \right)^{0,2} - 1,78 \right] \left(\frac{v_{\text{п}}}{v_{\text{баз}}} \right)^{0,2} \text{ [В]}, \quad (1)$$

где $I_{\text{баз}}, d_{\text{баз}}, v_{\text{баз}}$ — базовые значения соответственно сварочного тока, диаметра электрода и скорости подачи, которые подбирались как опорные значения при показателе степени, равном 0,2:

$$I_{\text{баз}} = 180 \text{ А}, d_{\text{баз}} = 1 \text{ мм}, v_{\text{баз}} = 0,035 \text{ м/с}.$$

Формула (1) может использоваться для областей изменения параметров, при которых $U_{\text{кон}} > 0$.

Полученные математические зависимости $U_{\text{кон}}$ от I при дуговой сварке плавящимся электродом в защитных газах могут служить элементами математической модели тепловых процессов в вылете электрода, частично описанной в работах [1, 2].

Возможное максимальное отклонение экспериментальных данных $\Delta U_{\text{кон}}$ (максимальный разброс значений $U_{\text{кон}}$) от средних значений $U_{\text{кон}}$, рассчитанных по формуле (1), для всего допустимого диапазона изменения сварочного тока I при неизношенном медном мундштуке не превышает

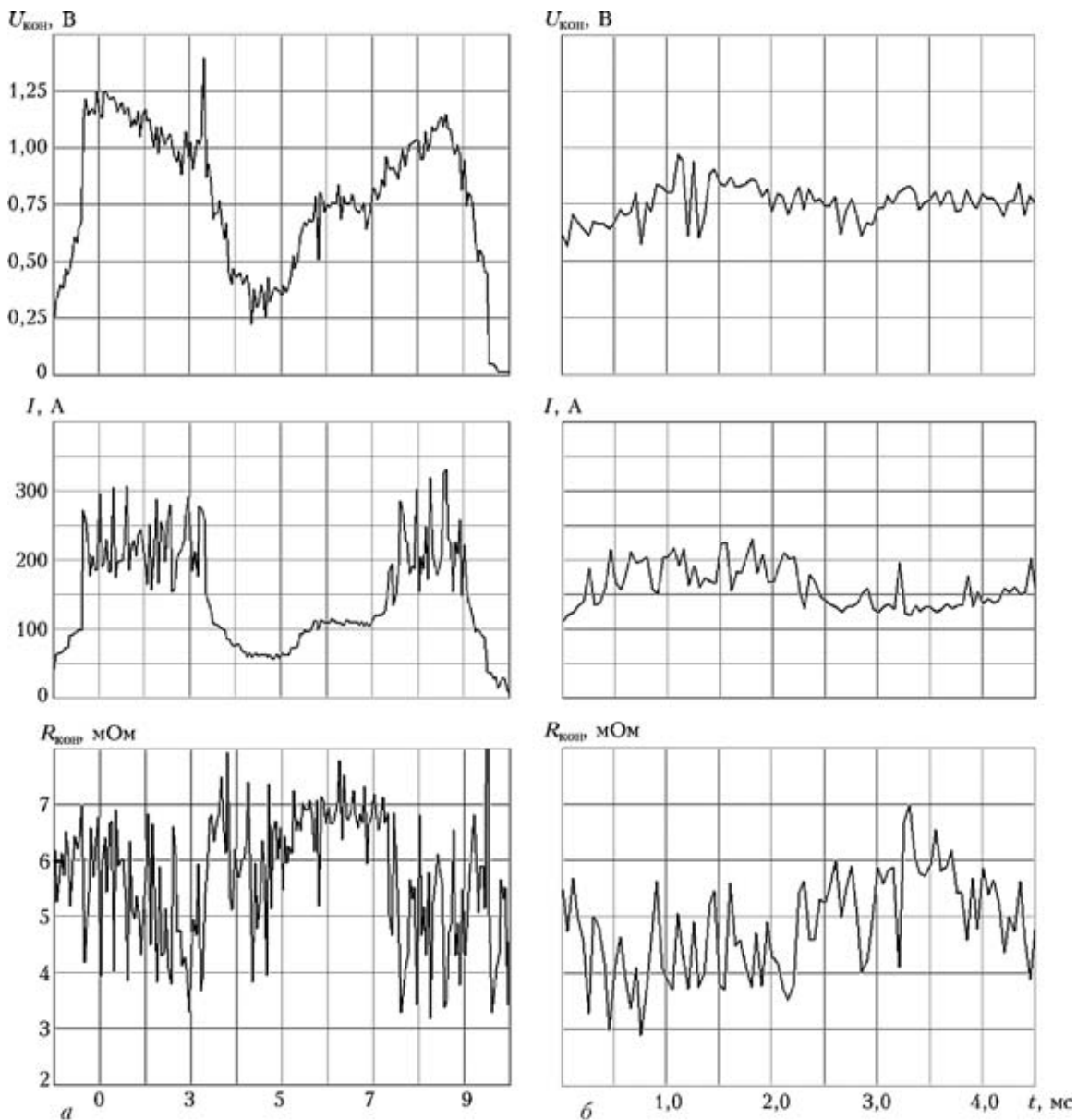


Рис. 3. Фрагменты обрабатываемых осциллограмм при сварке с КЗ (а) и без КЗ (б) при $d = 0,8 \text{ мм}, v_{\text{п}} = 0,053 \text{ м/с}$

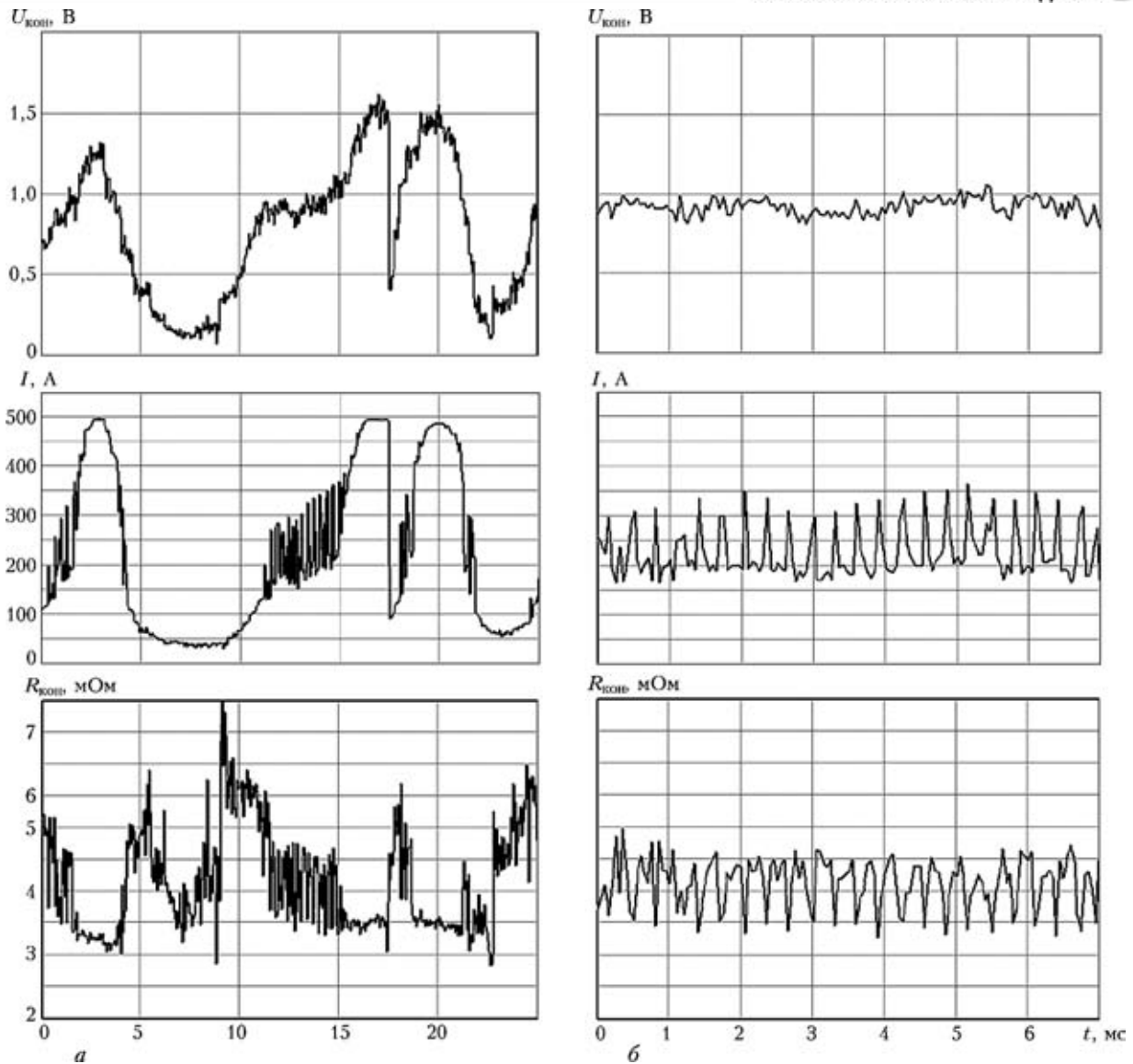


Рис. 4. Фрагменты обрабатываемых осциллограмм при сварке с КЗ (а) и без КЗ (б) при $d = 1,2$ мм, $v_{п} = 0,085$ м/с

$$\Delta U_{кон} = (d, v_{п}, I) = \pm 0,33 \left(\frac{I d_{баз} v_{п}}{I_{баз} d v_{баз}} \right)^{0,2} \text{ [В]}. \quad (2)$$

Формула справедлива при $U_{кон} > \Delta U_{кон}$.
 На рис. 5 приведены также кривые аппроксимации усредненной зависимости экспериментальных данных $U_{кон}$ от I по формуле (1) при сварке с КЗ и без КЗ. Как следует из рисунка, аппроксимация ВАХ контакта правильно отражает все особенности точечных массивов данных и ею можно пользоваться для оценки среднего значения падения напряжения в области контакта мундштук–проволока.

Точечные массивы экспериментальных данных имеют свои особенности при малых и больших токах. При токах, меньших 30...40 А, как для омедненной, так и для неомедненной проволоки наблюдается стохастически повторяющееся снижение $U_{кон}$ до 0,01...0,04 В, которое может быть объяснено тем, что при малых токах на проволоке образуется устойчивая медная прослойка из материала мундштука, а сопротивление контакта

медь–медь намного меньше сопротивления контакта медь–сталь. Этот вопрос требует самостоятельного исследования.

При больших плотностях тока в электродной проволоке, превышающих 400 А/мм², характер контакта становится искровым, что приводит к резкому увеличению уровня $U_{кон}$ (рис. 5, е). Эти режимы желательно не допускать, поскольку они сопровождаются повышенным износом мундштука и возникновением тепловых волн, движущихся вместе с вылетом и приводящих к разрушению устойчивости сварочного процесса.

Все это накладывает ограничение сверху на выбор допустимого тока сварки, причем, чем меньше диаметр электродной проволоки, тем меньше допустимый сварочный ток. Так, например, при $d = 0,8$ мм и $v_{п} = 0,066$ м/с критическая плотность тока достигается при токе 180 А, а при $d = 1,2$ мм она не достигается даже при токе 400 А независимо от скорости подачи.

Граница возникновения искрового контакта смещается в сторону меньших плотностей тока в проволоке при износе мундштука, при этом $U_{кон}$ может

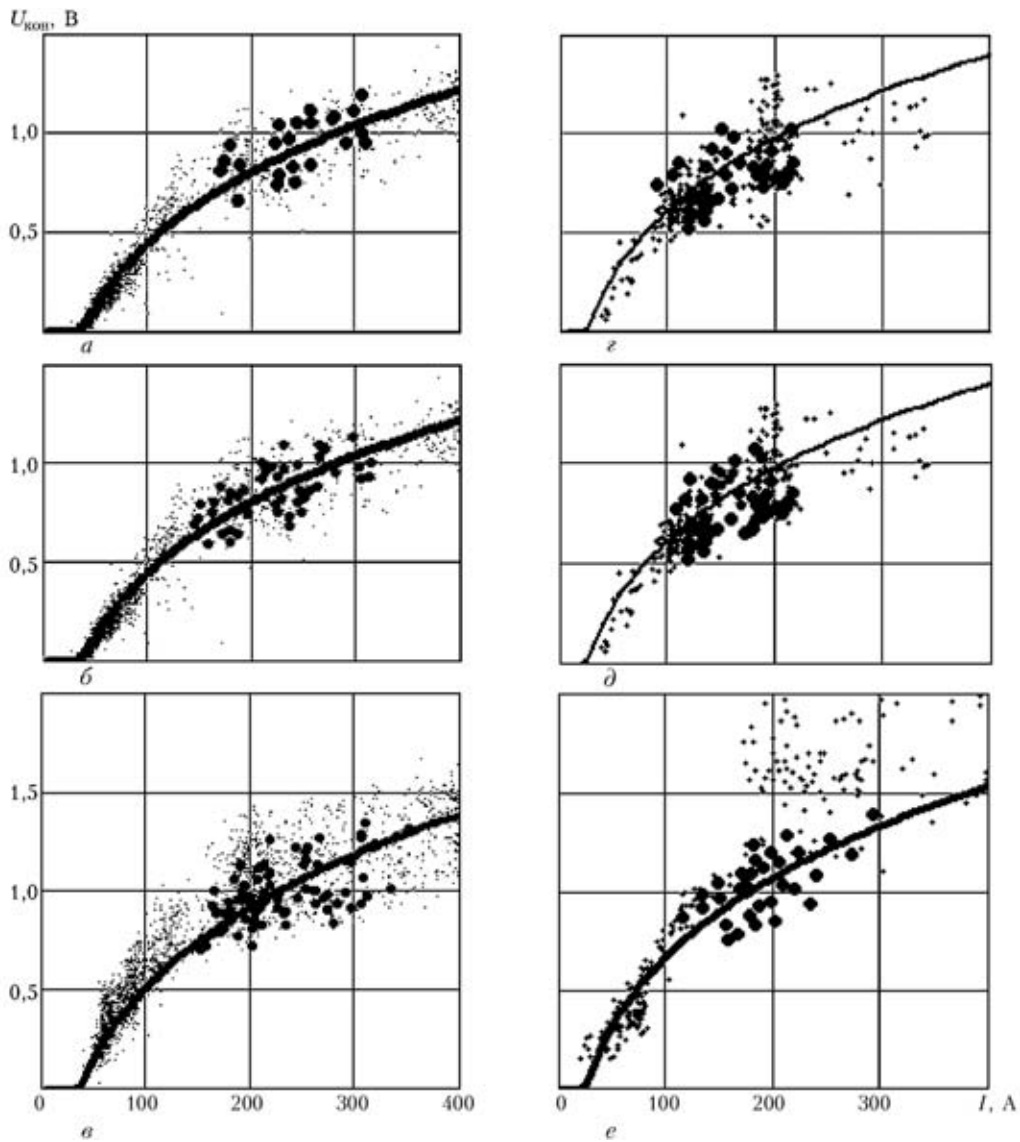


Рис. 5. Массивы экспериментальных значений $U_{кон}$ и I при сварке с КЗ (плюсы) и без КЗ (точки) и аппроксимации ВАХ (кривая): $a - d = 1,2$ мм; $v_{п} = 0,055$ м/с; $b - d = 0,8$ мм; $v_{п} = 0,041$ м/с; $e - d = 1,2$ мм; $v_{п} = 0,085$ м/с; $z - d = 0,8$ мм; $v_{п} = 0,053$ м/с; $д - d = 1,2$ мм; $v_{п} = 0,108$ м/с; $e - d = 0,8$ мм; $v_{п} = 0,066$ м/с

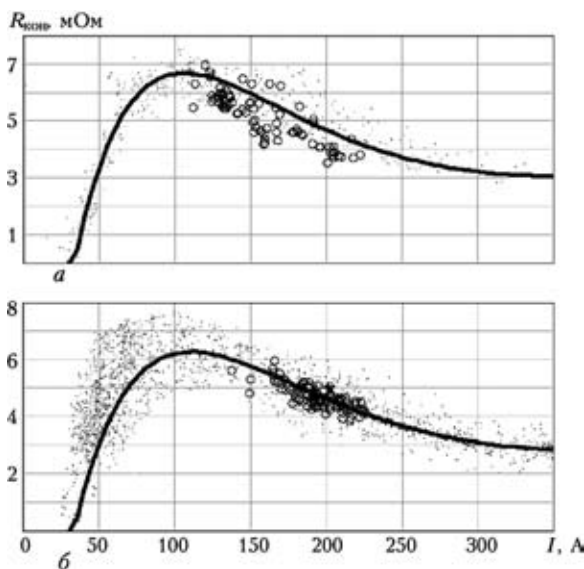


Рис. 6. Массивы экспериментальных значений $R_{кон}$ и I при сварке с КЗ (точки) и без КЗ (кружочки) и типичная усредненная ОАХ (кривая) контакта при $d = 0,8$ (а) и $1,2$ (б) мм

резко возрастать, достигая значений до 6... 10 В. Поэтому при работе с изношенным мундштуком качественные сварные соединения получить невозможно.

На рис. 6 приведены точечный массив $R_{кон}$ и типичная усредненная ОАХ контакта, определяемая как тангенс угла наклона прямой, проведенной из начала координат к текущей точке ВАХ и построенной с использованием выражения (1), по формуле

$$R_{кон}(d, v_{п}, I) = \frac{U_{кон}(d, v_{п}, I)}{I} [\text{Ом}]. \quad (3)$$

Максимум этой кривой определяется точкой касания луча, проведенного из начала координат касательно к ВАХ контакта.

Выводы

1. Проведены эксперименты по определению падения напряжения в месте контакта электродной проволоки с мундштуком сварочной горелки с ис-



пользованием компьютерных методов обработки опытных данных. Получены массивы экспериментальных значений падения напряжения, тока и сопротивления в области контакта электродной проволоки с мундштуком сварочной горелки.

2. Построены ВАХ и ОАХ контакта мундштук-проволока при различных диаметрах проволоки и скоростях подачи. Установлено, что ВАХ контакта не зависит от режимов сварки (с КЗ или без КЗ) и параметров сварочной цепи.

3. Выявлена зависимость ВАХ контакта от диаметра электродной проволоки d и скорости подачи v_{II} .

4. Получены аппроксимации усредненной зависимости экспериментальных данных $U_{кон}$ от I при сварке с КЗ и без КЗ. Установлено, что аппроксимация ВАХ контакта отражает все особенности точечных массивов данных и ею можно пользоваться для оценки среднего значения падения напряжения в области контакта мундштук-проволока.

5. Даны рекомендации по выбору допустимых режимов сварки.

1. *Пентегов И. В., Петриенко О. И.* Метод расчета падения напряжения по длине вылета электрода с учетом не-

Experiments are described on determination of voltage drop in the area of electrode wire contact with the welding torch nozzle. Results of computer processing of experimental data were the basis to suggest empirical formulas of contact voltage drop dependence on different welding parameters.

- линейности теплофизических параметров // Автомат. сварка. — 2002. — № 4. — С. 30–33.
2. *Пентегов И. В., Петриенко О. И.* Расчет распределения температуры по длине вылета электрода с учетом тепла, поступающего от капли // Там же. — 2003. — № 7. — С. 23–28.
3. *Кошкарев Б. Т., Михайлов А. Н., Будник Н. М.* Влияние вылета на процесс плавления электрода при сварке в CO_2 // Свароч. пр-во. — 1971. — № 11. — С. 30–32.
4. *Кутенов Ю. Н.* Анализ и разработка систем автоматического регулирования вылета электрода при сварке в углекислом газе: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1970. — 16 с.
5. *Бригидин В. Я.* О работе токоподводящих наконечников при дуговой сварке // Свароч. пр-во. — 1979. — № 8. — С. 20–21.
6. *Бригидин В. Я., Копотон Д. А.* Распределение тока в контактной паре электродная проволока – наконечник сварочного автомата или полуавтомата // Автомат. сварка. — 1977. — № 6. — С. 21–24.
7. *Чубуков А. А.* Сопротивление в контакте наконечник – сварочная проволока при сварке в углекислом газе // Свароч. пр-во. — 1980. — № 12. — С. 31–32.
8. *Вахалин В. А.* К вопросу о токопередаче скользящим контактом // Там же. — 1971. — № 1. — С. 2–3.
9. *Zwickert H.* Untersuchung der Kontaktverhältnisse bei der Stromübertragung auf den Schweißdraht // Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität «Otto von Guericke». — Magdeburg, 1987. — Heft 4. — S. 96–102.
10. *Berger H., Pfeiffer G.* Kontaktduesen beim MAG-Schweißen // ZIS-Mitt. — 1986. — 28, № 6. — S. 641–643.

Поступила в редакцию 29.09.2004,
в окончательном варианте 17.11.2004



РЫНОК МЕТИЗОВ СНГ-2005

I Ежегодная международная конференция

29 июня–1 июля 2005 г.

г. Ялта, АР Крым, Украина

Организаторы: Центр Держзовнишинформ и объединение «Укрметиз»

Цель проведения: Конференция проводится с целью анализа и обобщения опыта производства и торговли метизами, а также прогнозирования конъюнктуры рынка метизов на ближайшую перспективу. Предусматривается обсуждение проблем реализации инноваций в рамках малого, среднего и крупного бизнеса. Кроме того, Вам предоставляется прекрасная возможность совместить деловую поездку с гостеприимной атмосферой крымского курорта Южного берега Крыма.

Тематика конференции:

- ✓ новое в производстве метизов (сертификация продукции, гармонизация нормативной базы, технологии, оборудование, защитные покрытия, новая продукция);
- ✓ сырьевые материалы для производства метизов (качество, объемы, цены);
- ✓ торговля метизами (внутренний и внешний рынки, прогноз конъюнктуры, торговые ограничения, конкуренция, потребление, ценовая политика);
- ✓ инновации и управление метизным бизнесом (консолидация, импортозамещение, государство и инновации, проблемы кредитования, экспертиза инноваций);
- ✓ презентации фирмами оборудования и технологий для производства метизов.

Контактное лицо: Гнатуш Виталий Аполлонович
тел. +38(044) 246-41-09; 246-43-67; 482-05-56
факс: 246-41-09; 246-43-67; 482-05-56
E-mail: gnat@dze.mfert.gov.ua
www.eximbase.com

ул. Воровского 22, г. Киев, ГСП-601, 01601, Украина ООО «Экономедиа»