

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НА КОНТАКТНОЙ ГРАНИЦЕ МЕДИ И ЦИРКОНИЯ, СВАРЕННЫХ ВЗРЫВОМ

А. М. Ставер, Т. М. Соболенко, Т. С. Тесленко

(Новосибирск)

В работе исследовалось соединение поверхностей медь — цирконий непосредственно после сварки взрывом и в процессе последующих отжигов полученного соединения.

Поверхности медь — цирконий соединялись по двум схемам сварки взрывом: 1) лист на лист (цирконий толщиной 1 мм на медь толщиной 5 мм), 2) цилиндр на стержень (циркониевый стержень  $\varnothing 1$  мм и медный цилиндр  $\varnothing 5$  мм) [1]. Из полученных заготовок вырезались образцы для металлографического анализа, замеров микротвердости, визуального наблюдения за поверхностью контакта в процессе нагрева на приборе «Вакутерм», а также рентгеноструктурного и рентгеноспектрального анализов.

Металлографический анализ шлифов металлов, соединенных взрывом, показал, что в случае листового соединения волны на поверхности контакта малы и нерегулярны, вихри и явно выраженные расплавы отсутствуют, схватывание качественное по всей поверхности (рис. 1). В случае цилиндрических образцов поверхность соединения имеет также некоторые волны, иногда наблюдаются застывшие расплавы и в них небольшие трещины и усадочные поры, по остальной контактной границе прилегание плотное (рис. 2).

Результаты замеров микротвердости показали, что при листовом соединении цирконий по сечению имеет практически твердость исходного проката, однако в зоне пластического течения на  $10\div 50$  мк от контакта упрочнен примерно на 10%, медь у контактной границы упрочнена существеннее — на 20%, а вне ее твердость равна твердости исходного медного листа. В случае цилиндрического соединения цирконий у контактной границы упрочнен на 25 и на 10% по сечению. Медь упрочнена аналогично предыдущему случаю. Разница в упрочнении циркония обусловлена цилиндрической схемой нагружения, когда существенную роль играет не только течение на поверхности соударения, но и сходящиеся к центру ударные волны [1]. Твердость участков застывших расплавов высока ( $\approx 800$  Hv), что характерно для интерметаллических соединений. Попытка с помощью травителей [2] определить, какие из возможных по диаграмме состояния интерметаллоидов образовались в данном случае, не удалась, так как четкого окрашивания или ограничения фаз, как в [2], не происходит. Расплав выглядит как однофазное целое, с причудливыми цветами побежалости серо-фиолетовых оттенков.

Микрорентгеноспектральным анализом, проведенным по методике [3], показано, что там, где нет видимого под микроскопом взаимодействия меди и циркония, граница между металлами резкая, без переходов, т. е. диффузия медь — цирконий отсутствует. Там, где есть расплав (участок в образце, сваренном по схеме 2), средний состав около 35% Zr и 65% Cu, переходного слоя из расплавов к металлам не обнаружено.

Контактная поверхность циркония после постепенного механического удаления меди исследовалась на фазовый состав с помощью рентгеноструктурного анализа. При этом на дебаграммах, снятых с контактной поверхности листового соединения, никаких других линий, кроме принадлежащих меди и цирконю, зафиксировать не удалось. Дебаграммы, снятые с цилиндрической поверхности циркония, кроме

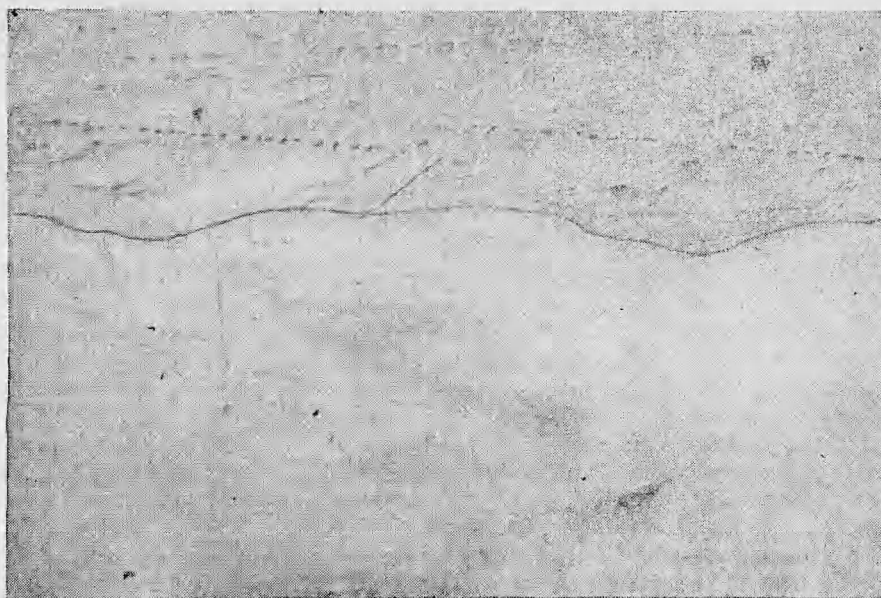


Рис. 1. Соединение медь — цирконий. Сварка взрывом; лист на лист, без травления.  $\times 100$ .

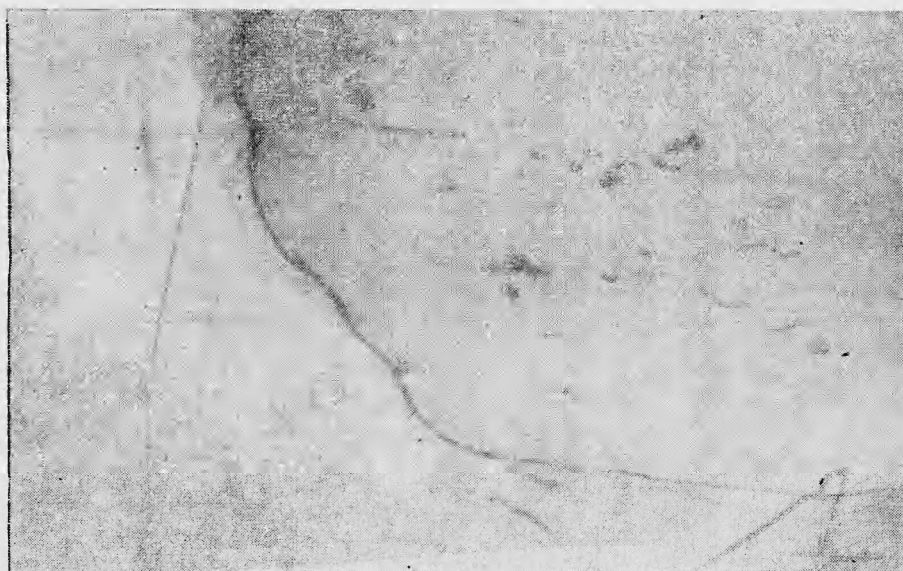


Рис. 2. Соединение медь — цирконий. Сварка взрывом; цилиндр и стержень.  $\times 150$ .

линий основных металлов, показывают наличие  $\omega$ -фазы циркония, а также еще двух слабых линий (см. таблицу);  $\omega$ -фаза циркония была обнаружена в [4], как фаза высокого давления в статике, которую в некоторых условиях можно сохранить при нормальной температуре и давлении. Появление в нашем случае статической фазы высокого давления может показаться несколько странным, так как в [5] при ударных деформациях получена другая «новая» фаза. Однако в нашем случае  $\omega$ -фаза зафиксирована именно на контактной поверхности, где

## Рентгеноструктурные исследования

| Материал и место выборки анализа                                                  | Результаты расшифровки     | Нерасшифрованные линии, межплоскостные расстояния $d$ , Å                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Контактные поверхности листового взрывного соединения                             | Cu, Zr                     | —                                                                                                                              |
| Контактные поверхности цилиндрического взрывного соединения                       | Cu, Zr, WZr                | 2,36; 1,71                                                                                                                     |
| Цирконий, полностью прореагировавший в расплаве с медью                           | Zr <sub>2</sub> Cu         | 2,36; 1,81; 1,71                                                                                                               |
| Прослойка, образованная в интервале 750—800°С                                     | Cu, Zr                     | 2,87; 2,59; 2,15; 1,93; 1,49; 1,26;                                                                                            |
| Поверхность разрушения от напряжения после 860°С (2 мин)<br>а) на медной пластине | Zr <sub>2</sub> Cu (следы) | 2,39; 2,304; 2,15; 2,058; 1,98; 1,64; 1,58; 1,54; 1,48; 1,43; 1,375; 1,331; 1,281; 1,255; 1,17; 1,099; 3,23; 2,88; 2,58; 2,48; |
| б) на циркониевой пластине                                                        | Zr <sub>2</sub> Cu         | 2,38; 2,31; 2,15; 1,98; 1,93; 1,81; 1,73; 1,64; 1,558; 1,554; 1,49; 1,43; 1,381; 1,30; 1,26;                                   |

существовало как высокое давление, так и значительная пластическая деформация, причем время существования давления было примерно на порядок больше, чем в случае листового соединения, когда  $\omega$ -фазы зафиксировать не удалось. Таким образом,  $\omega$ -фаза циркония может появиться не только при статическом всестороннем сжатии, но и при скоростной пластической деформации с большими давлениями.

В обзорной работе [6] показано, что изученность диаграммы состояния медь — цирконий недостаточная, поэтому представляет интерес поведение металлов в зоне контакта в процессе нагрева от комнатной температуры до плавления [7].

В настоящей работе проводился как ступенчатый нагрев образцов на 300, 500 и 700°С с выдержкой 30 мин и на 900°С с выдержкой 5 мин, так и более медленный нагрев со скоростью 10 градусов в минуту в интервале температур 300—900°С, когда остановки на определенной температурной точке производились, если под микроскопом наблюдались значительные изменения в зоне контакта медь — цирконий. Нагрев осуществлялся излучением, вакуум составлял  $10^{-4}$ — $10^{-5}$  мм рт. ст. Визуальные наблюдения велись непрерывно, фотографирование производилось выборочно.

Обнаружено, что начало взаимодействия системы цирконий — медь через контактную границу, полученную сваркой взрывом, лежит при 600°С. Значительный по времени рост прослойки начинается при 750°С, причем идет сильнее, если температура изменяется непрерывно. Контактная прослойка раздваивается параллельно контактной поверхности, когда становится более 50 мк толщины, и разбивается на столбчатые кристаллиты перпендикулярно границе контакта (рис. 3). Замечено, что фронт взаимодействия более интенсивно развивается в сторону циркония, особенно при появлении признаков плавления. Зафиксировано начало плавления цирконий — прослойка при 860°С (рис. 4), а по [8] самое легкоплавкое соединение имеет точку плавления 890°С. (Оговоримся, что это расхождение может быть вызвано тем, что опыты проводились на промышленных материалах: медь — МЗ, а в цирконии воз-

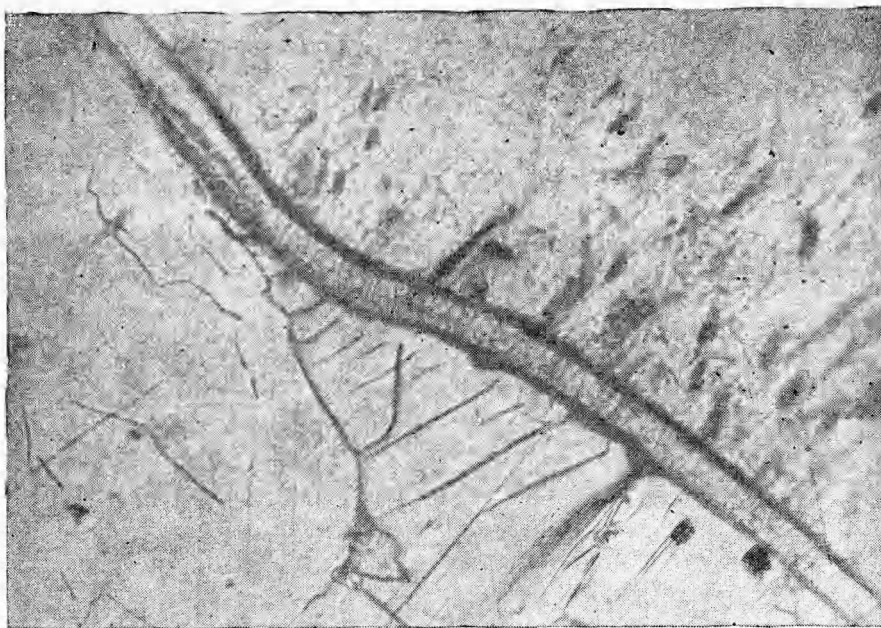


Рис. 3. Контактная прослойка между медью и цирконием, выросшая при температуре 750—800° С.  $\times 150$ .

можны примеси до 1%.) Разница в коэффициентах линейного расширения меди образовавшейся прослойки и циркония, вероятно, настолько велика, что наблюдаются деформационные ступени на медной поверхности шлифа, а затем иногда и повторная рекристаллизация ранее равноосных зерен меди ( $\approx 800^\circ\text{C}$ ). При охлаждении даже со скоростями  $10^\circ/\text{мин}$  в толстой прослойке образуются трещины и возникает напряжение приконтактных областей металлов, что ведет к увеличению микротвердости в них в 1,5 раза.

Рентгеноспектральный анализ показывает, что зона взаимодействия имеет состав  $\approx 65\%$  меди и  $35\%$  циркония, независимо от того получена ли она путем плавления по контактной поверхности, нагревом при температуре ниже плавления или при сварке взрывом (отклонения от среднего состава 5—7%). Однако рентгеноструктурный анализ фиксирует существенную разницу кристаллических фаз, образующихся в каждом случае (см. таблицу).

В работе [9] имеется относительно полная расшифровка только соединения  $\text{CuZr}_2$ , а остальные фазы определены только при металлографическом построении диаграммы состояния [2, 10, 11], причем относительно кристаллографической расшифровки этих фаз указано, что она представляет большие трудности. Нам также не удалось их преодолеть. По методике [2] фазы, возникшие при контактном взаимодействии, не определяются. Однако, исходя из результатов рентгеноструктурного анализа, можно сделать следующие выводы:

- 1) при плавлении возникает определенная система рефлексов, причем, как при взрывном соединении, так и при статическом плавлении. Однако после обычного нагрева присутствует также и фаза  $\text{CuZr}_2$ , видимо, возникающая при относительно медленном охлаждении;
- 2) существование плавления у границы  $\text{Zr}$  — прослойка при  $860^\circ\text{C}$  подтверждается появлением линий, присущих расплаву (см. таблицу);
- 3) при нагреве в интервале 750—800° С взаимодействие идет за счет образования фазы на основе циркония. Этот вывод можно сделать, исходя из того, что после разрушения расслоенной прослойки

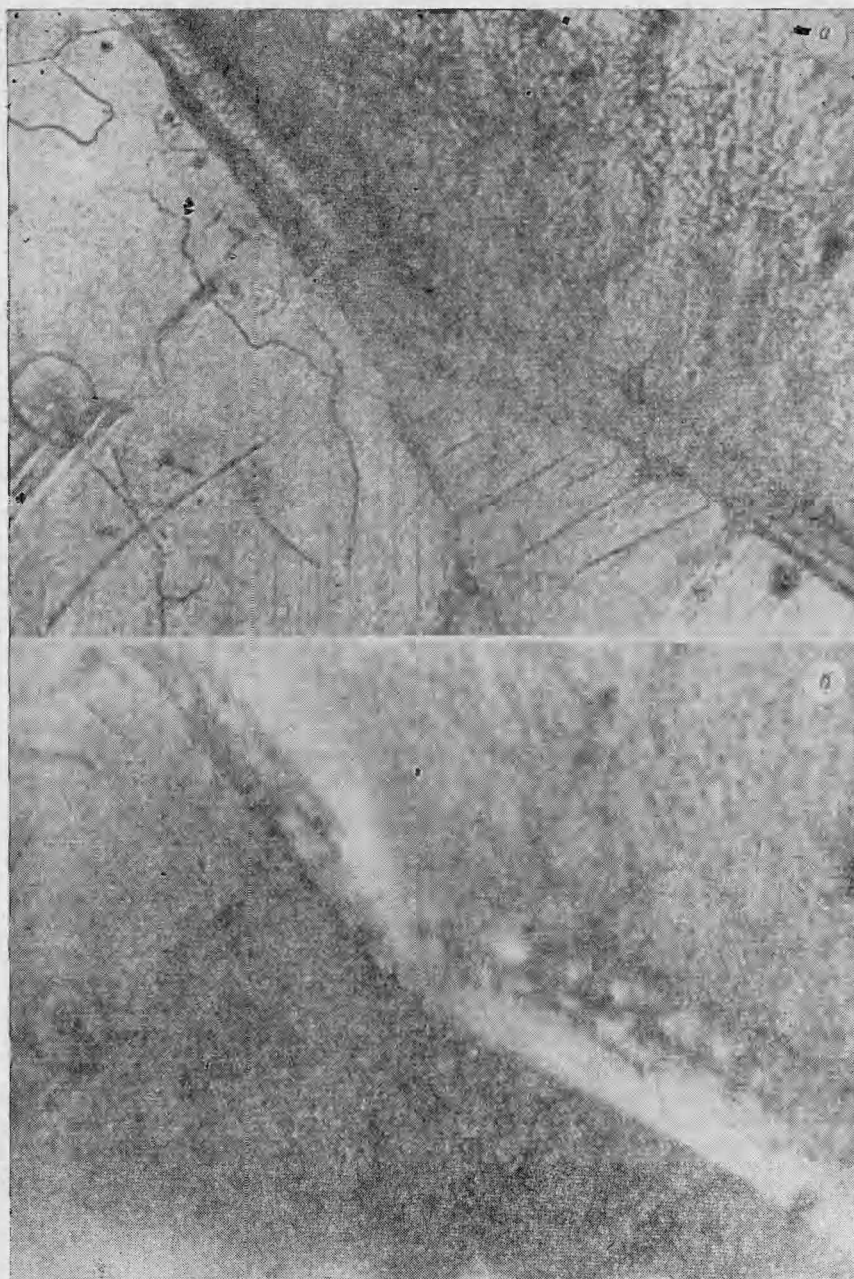


Рис. 4. Начало плавления на границе прослойка — цирконий.  
а) 30 с, б) 2 мин.

идентичное положение линий фиксируется сильнее на пластине циркония, а на медной пластине зафиксировано, кроме того, много иных линий, видимо, принадлежащих другим фазам, растущим уже в толстой прослойке.

Таким образом, результаты рентгеноструктурного анализа находятся в хорошем соответствии с результатами наблюдений микроструктуры при высоких температурах.

Поступила в редакцию  
13/II 1974

## ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Дерибас. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск, «Наука», 1972.
2. G. E. Lundin, D. I. McPherson, M. Hansen. Trans. Met. Soc. AIME. 1953, 197, 273.
3. Г. В. Бердичевский, Т. М. Соболенко. Автоматич. сварка, 1968, 9, 12.
4. J. C. Jamieson. Science, 1963, 140, 3562.
5. Г. Н. Герман, А. А. Баканова и др. ФТТ, 1970, 12, 2.
6. Е. М. Тарараева, О. С. Иванов. В сб. «Диаграммы состояния металлических систем». М., «Наука», 1971.
7. Hirozo Kimura, Iukio Minode a. o. J. Jap. Inst. Metals, 1973, 37, 5.
8. М. Хансен, К. Андерко. Структуры двойных сплавов. Т. 2. М., Металлургиздат, 1962.
9. Amer. society for testing materials, X-ray powder data file.
10. E. Rauh. M. Engel. Z. Metallkunde, 1948, 39, 127.
11. Л. Л. Рохлин, Н. Р. Бочвар, Е. В. Лысова. Изв. вузов, Цветные металлы, 1972, 4.

УДК 537.566

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ЭНЕРГИЯМ И ПЛАЗМЕ ПЛАМЕНИ МЕТОДОМ ПРИРАЩЕНИЯ ПОСТОЯННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ЗОНДОВОГО ТОКА

А. С. Зайцев

(Днепропетровск)

Подавляющее большинство работ по определению функции распределения электронов по энергиям относится к газоразрядной плазме. Первые сведения получены в работе [1], где функция распределения определялась методом второй гармоники. Поскольку в литературе отсутствуют работы по определению функции распределения в плазме пламени, полученные нами и другими исследователями данные нельзя сопоставить и сравнить, имеет смысл найти функцию распределения способом, отличающимся от ранее примененного в работе [1].

В данном исследовании функция распределения  $f(eU)$  определялась на основе использования формулы Дрювестейна [2]

$$f(eU) = \frac{2}{eSn} \sqrt{\frac{2mU}{e}} \frac{d^2 I}{dU^2}, \quad (1)$$

где  $I$  — электронный ток на зонд;  $U$  — потенциал зонда относительно плазмы;  $S$  — площадь рабочей поверхности зонда;  $n$  — концентрация электронов;  $m$  — масса электрона;  $e$  — элементарный заряд.

Вторая производная зондового тока по потенциалу зонда находилась методом, впервые предложенном в работе [3]. На медленно изменяющееся напряжение зонда  $U$  накладывается слабый сигнал синусоидальной формы  $\varepsilon = a \sin \omega t$ . Если разложить модулированный электронный ток в ряд Тейлора, то получим

$$I(u + a \sin \omega t) = I + \frac{a^2}{4} I^{II} + \frac{a^4}{64} I^{IV} + \left[ a I^I + \frac{a^3}{8} I^{III} + \dots \right] \sin \omega t - \left[ \frac{a^2}{4} I^{II} + \frac{a^4}{64} I^{IV} + \dots \right] \cos 2\omega t - \left[ \frac{a^3}{24} I^{III} + \dots \right] \sin 3\omega t + \dots \quad (2)$$