



УДК 621.791.44.+539.219.3

# ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕДИ С НЕРАСТВОРИМЫМИ ПРИМЕСЯМИ В УСЛОВИЯХ ИМПУЛЬСНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ СВАРКЕ ДАВЛЕНИЕМ

В. В. АРСЕНЮК, канд. техн. наук (НАН Украины)

Изучено взаимодействие меди с галлием, углеродом и инертными газами в условиях ударной сварки в вакууме, магнитно-импульсной сварки и сварки взрывом. Наблюдалось образование твердых растворов в зоне массопереноса. Определены зависимости концентрации растворенного элемента и глубины его проникновения от температуры, скорости деформации и способа сварки.

*Ключевые слова:* ударная сварка, магнитно-импульсная сварка, сварка взрывом, массоперенос, растворение элементов, твердый раствор

В работе [1] определено, что при ударной сварке в вакууме разнородных металлов фазовый состав диффузионной зоны отличается от равновесного, выраженного, например, отсутствием интерметаллических соединений при сварке меди с оловом или алюминием, фиксированием растворимости между медью и молибденом — двумя нерастворимыми металлами с кристаллической структурой атомов в форме кубической решетки. Более того, при введении в металл атомов инертного газа в процессе последующей импульсной обработки или сварки давлением происходит их перераспределение и миграция, что приводит к образованию твердого раствора металл–инертный газ [2]. Поэтому при сварке разнородных конструкционных материалов, имеющих, как правило, сложный химический фазовый состав, необходимо учитывать возможность образования соединений элементов, считавшихся ранее взаимно нерастворимыми. В этой связи представляет интерес изучение особенностей взаимодействия меди с нерастворяющимися в ней в равновесных условиях элементами — металлом и легким элементом — в случае наложения импульсных деформаций при различных способах сварки давлением.

Процессы перераспределения атомов и изменения фазового состава в зоне контакта меди с различными элементами при ударной сварке в вакууме [3], магнитно-импульсной сварке [4] и сварке взрывом [5] исследовали методами послойного радиометрического, рентгеноструктурного, микрорентгеноспектрального анализов и мессбауэровской спектроскопии.

В качестве нерастворимой металлической примеси был выбран галлий, поскольку его кристаллическая структура (орторомбическая решетка) резко отличается от гранецентрированной решетки меди. Кроме того, для равновесных условий при полном отсутствии растворимости меди в галлии, имеет место проникновение галлия в медь с растворением его до 20 % [6].

В результате проведенных исследований установлено, что при всех используемых способах сварки наблюдается взаимное проникновение этих элементов и образование твердых растворов. Однако растворимость галлия в меди при импульсных де-

формациях во всем интервале скоростей деформации ( $\dot{\epsilon} = 1 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ ), осуществляемого по методикам [3–5], выше, чем меди в галлии. Следовательно, отсутствие растворимости в равновесных условиях не является препятствием для растворения при воздействии нагрузок, но при этом количество растворенного вещества меньше, чем в случае, если металлы растворяются в условиях изотермической выдержки. При переходе от ударной сварки в вакууме к магнитно-импульсной и сварке взрывом, т. е. с ростом скорости деформации наблюдается увеличение глубины проникновения и концентрации растворенного вещества. При  $\dot{\epsilon} \approx 5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$  (в случае сварки взрывом) глубина проникновения достигает 4 мм, концентрация составляет 48 %, т. е. состав металла шва приближается к эквиатомному (рис. 1).

При взаимодействии меди с углеродом в интервале температур 300... 1073 К при ударном сжатии также образуется твердый раствор, хотя в равновесных условиях между этими элементами какой-либо контакт отсутствует. Однако в условиях импульсного нагружения со скоростью деформации приблизительно  $25 \text{ с}^{-1}$

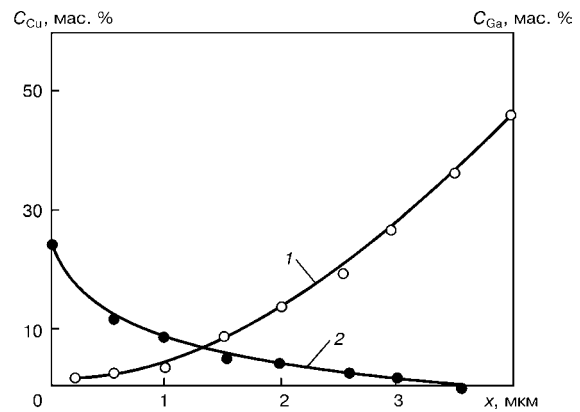


Рис. 1. Распределение галлия в меди (1) и меди в галлии (2) в случае сварки взрывом при  $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$

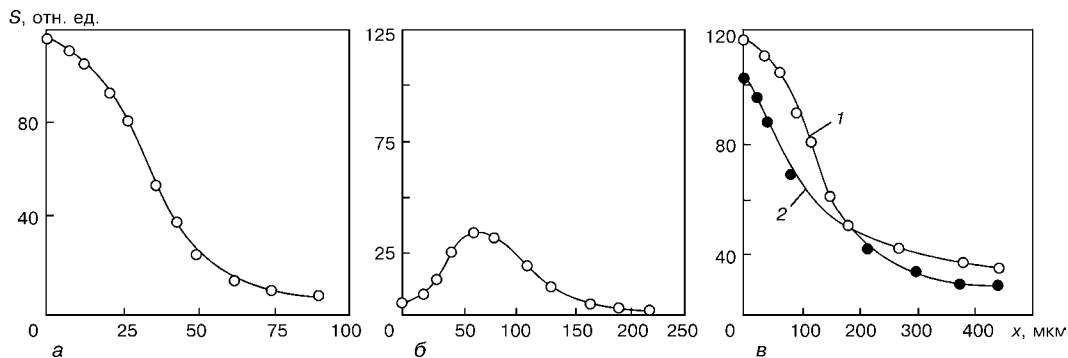


Рис. 2. Распределение  $^{14}\text{C}$  в меди после импульсного нагружения: а — ударная сварка в вакууме при  $\dot{\epsilon} = 25 \text{ с}^{-1}$ ; б — магнитно-импульсная сварка при  $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ ; в — сварка взрывом при  $\dot{\epsilon} = 3 \cdot 10^5$  (1) и  $7 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$  (2)

© В. В. Арсенюк, 2001



при нагреве до 1073 К железа, содержащего  $^{14}\text{C}$ , находящегося в контакте с медью, углерод проникает в медь на глубину приблизительно 80...90 мкм (рис. 2, а), его концентрация составляет около 1 %. При этом следует учитывать, что одновременно в медь мигрируют атомы железа. Это, безусловно, способствует растворению углерода в медной матрице, как это происходило в некоторых случаях в стационарных изотермических условиях [7, 8]. Для исключения влияния указанного фактора схема эксперимента была изменена таким образом, чтобы медь и углерод взаимодействовали в чистом виде. Одним из способов введения углерода в медь является обработка меди в метане, меченом  $^{14}\text{C}$  в тлеющем разряде. Последующее импульсное нагружение с  $\dot{\epsilon} \approx 1 \cdot 10^3 \dots 1 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$  при температуре 373...673 К приводит к перераспределению атомов углерода и переносу их на глубину около 200 мкм (рис. 2, б). При этом концентрация углерода в приповерхностных слоях меди доходила до 5 %. Повышение скорости деформации до  $(3 \dots 7) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$  в случае сварки взрывом способствует проникновению углерода в медь на еще большую глубину, составляющую приблизительно 400 мкм (рис. 2, в). Следует отметить, что проникновение углерода в медь происходило в процессе нагружения при непосредственном контакте графита, содержащего  $^{14}\text{C}$ , с медью.

Анализ данных, представленных на рис. 2, показал, что с увеличением скорости деформации углерод, подобно элементам, имеющим взаимную растворимость, проникает в медь на все большую глубину. Причем повышение температуры от комнатной до 400 °С при скорости деформации  $1 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$  и выше практически не влияет на протяженность зоны массопереноса. При более низких скоростях пластической деформации с повышением температуры, при которой осуществляется импульсная сварка давлением, несколько увеличивается глубина проникновения и скорость миграции углерода в медь.

Дальнейшая обработка полученных соединений показала, что при последующей деформации без нагрева происходит перераспределение растворенных галлия и углерода, а также увеличение общей глубины их проникновения. Однако повышение

температуры в процессе изотермического нагрева или статического деформирования способствует выходу исследуемых элементов из твердого раствора. При этом возникают интерметаллические соединения меди с галлием и появляется прослойка графита.

Таким образом, импульсная деформация в процессе сварки давлением приводит к растворению в меди тех элементов, которые не взаимодействовали с ней в равновесных условиях. Но поскольку образующиеся твердые растворы являются метастабильными, при последующей обработке происходит их распад, в результате чего фазовый состав металла шва приходит в соответствие с диаграммой состояний.

1. *Особливості* фазоутворення при взаємодії металів під впливом імпульсних навантажень / В. В. Арсениук, Д. С. Герцирик, В. Ф. Мазанко и др. // Метал. і оброб. матер. — 1997. — № 2. — С. 21–25.
2. *Міграція* атомів в метастабільному твердому розчині залізо–аргон / В. В. Арсениук, Д. С. Герцирик, В. Ф. Мазанко та ін. // Доп. НАНУ. — 1997. — № 8. — С. 108–112.
3. *Особенности* массопереноса при сварке железа–армко в твердом состоянии / Л. Н. Лариков, В. М. Фальченко, В. Ф. Мазанко и др. // Автомат. сварка. — 1974. — № 5. — С. 19–21.
4. *О механизме* влияния импульсного магнитного поля на подвижность атомов в железе и алюминии / Л. Н. Лариков, В. М. Фальченко, Д. С. Герцирик и др. // Докл. АН СССР. — 1978. — 239, № 2. — С. 312–314.
5. *Кудинов В. М., Коротеев А. Я.* Сварка взрывом в металлургии. — М.: Металлургия, 1978. — 266 с.
6. *Двойные* и многокомпонентные системы на основе меди / М. Е. Дриц, Н. Р. Бочвар, Л. С. Гузей и др. — М.: Наука, 1979. — 248 с.
7. *Гегузин Я. Е.* Диффузионная зона. — М.: Наука, 1979. — 344 с.
8. *Особенности* фазообразования при импульсном воздействии / А. М. Гусак, В. Ф. Мазанко, Н. А. Томашевский и др. // Металлофизика. — 1992. — 14, № 3. — С. 33–36.

The paper considers copper interaction with gallium and carbon under the conditions of vacuum percussion, magnetic-pulse and explosion welding. Formation of solid solutions in mass transfer zone is noted. Dependencies of dissolved element concentration and its penetration depth on temperature, deformation rate and welding process are determined.

Поступила в редакцию 22.03.2001,  
в окончательном варианте 31.05.2001

УДК 621.791.624.046.5

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНАХ КОНЦЕНТРАТОРА И ТРЕЩИНЫ УСТАЛОСТИ

В. А. БРОДОВОЙ, инж., О. И. ГУЩА, д-р техн. наук, А. З. КУЗЬМЕНКО, инж., П. П. МИХЕЕВ, д-р техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Экспериментально показано, что в результате взаимодействия остаточных напряжений, которые возникают под влиянием циклического нагружения в зонах концентратора и трещины усталости, с напряжениями, наводимыми упрочняющими обработками, формируется результирующее поле остаточных напряжений, которое может существенно отличаться от первоначального.

*Ключевые слова:* остаточные напряжения, концентрация напряжений, сопротивление усталости, усталостная трещина, упрочняющая обработка

Для повышения циклической прочности сварных соединений применяют различные способы упрочнения. Весьма эффективными являются способы, основанные на наведении в зоне концентратора остаточных напряжений сжатия [1]. Эти напряжения взаимодействуют со сварочными остаточными напряжениями, а также с возникающими под влиянием циклического нагружения в зонах концентратора и усталостной трещины. В результате формируется новое поле остаточных напряжений, которое может существенно отличаться от его первоначально составляющих по знаку, уровню и характеру распределения компонент напряже-

ния. При циклическом нагружении эти остаточные напряжения в свою очередь претерпевают изменения и перераспределяются.

Таким образом, при оценке влияния остаточных напряжений на процессы зарождения и распространения усталостного разрушения возникает необходимость учитывать взаимодействие и кинетику этих напряжений.

В настоящей работе рассмотрено взаимодействие остаточных напряжений в зонах концентратора и трещины усталости с остаточными напряжениями сжатия, наводимыми дополнительно высокочастотной проковкой и точечным нагревом, а также их кинетику под влиянием внешнего циклического нагружения.

Образец из стали СтЗсп размерами 14×160×240 мм с концентраторами в виде боковых выкружек (рис.1) нагружали осевым отнудевым циклическим сжатием. Теоретический коэффициент концентрации напряжений  $\alpha_\sigma = 2,48$ . Максимальные напряжения номинального цикла нагружения составляли

© В. А. Бродовой, О. И. Гуца, А. З. Кузьменко, П. П. Михеев, 2001