

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ СХЕМЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКЕ СПЛАВОВ АМГ6 И ВТ6

Е. В. Половецкий, мл. науч. сотр.<sup>1</sup>;  
О. О. Новомлинец, канд. техн. наук<sup>1</sup>;  
А. В. Лабарткава, канд. техн. наук, доц.<sup>2</sup>;  
М. В. Матвиенко, канд. техн. наук<sup>2</sup>;  
К. К. Трунин, магистр<sup>2</sup>;  
В. О. Мартыненко, канд. техн. наук<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт электросварки им. Е.О. Патона, г. Киев

<sup>2</sup>Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

**Аннотация.** Рассмотрено влияние формирующей матрицы на микроструктуру, свойства и напряженно-деформированное состояние сварных соединений АМГ6+АД1+ВТ6, получаемых диффузионной сваркой в вакууме.  
**Ключевые слова:** диффузионная сварка в вакууме, формирующая матрица, промежуточная прослойка, микротвердость, микроструктура, напряженно-деформированное состояние.

**Анотація.** Розглянуто вплив формуючої матриці на микроструктуру, властивості та напружено-деформований стан зварних з'єднань АМГ6+АД1+ВТ6, отриманих дифузійним зварюванням у вакуумі.  
**Ключові слова:** дифузійне зварювання у вакуумі, формуюча матриця, проміжний прошарок, микротвердість, микроструктура, напружено-деформований стан.

**Анотація.** The effect of the forming matrix on the microstructure, properties and stress-strained state of АМГ6+АД1+ВТ6 welded joints obtained by diffusion welding in vacuum have been considered.

**Keywords:** diffusion welding in vacuum, forming matrix, key, micro hardness, microstructure, stress-strained state.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

При создании различных узлов во многих областях производства возникает необходимость изготовления деталей из разнородных металлов. Одним из таких соединений являются титан-алюминиевые биметаллические элементы, для получения которых целесообразно использовать способ диффузионной сварки в вакууме (ДСВ) [1–3, 6].

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Важную роль в создании качественных сварных соединений при ДСВ играет процесс образования физического контакта, т. е. сближения атомов соединяемых материалов за счет пластической деформации на расстояние, при котором возникает физическое взаимодействие с последующей активацией контактных поверхностей и объемным взаимодействием. Одним из способов интенсификации пластической деформации является применение схемы сварки с принудительным деформированием зоны соединения [5, 7, 8] за счет формирующих матриц (ФМ).

**ЦЕЛЬЮ РАБОТЫ** является изучение влияния ФМ на структуру сварных соединений сплава АМГ6 со сплавом ВТ6.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Для изучения влияния ФМ на микроструктуру сварного соединения АМГ6+АД1+ВТ6 были сварены образцы без матрицы и с ее применением при следующих параметрах режимов ДСВ: толщина прослойки – 150 мкм, давление – 20 МПа, время выдержки – 20 мин, температура сварки – 540 °С (рис. 1, а, б). При этом высота матрицы отличалась от высоты части узла, изготовленной из АМГ6 на  $\delta = 2$  мм.

Металлографические исследования проводили на шлифах, полученных ионным травлением с помощью установки Fine coat ion sputter JFC-1100 фирмы JEOL (Япония). Дальнейшие исследования микроструктуры и распределения химических элементов протравленных шлифов сварных соединений проводили с помощью ОЖЕ-микронзонда JAMP 9500F фирмы JEOL, оборудованного энергодисперсионным рентгеновским спектрометром системы ИНКА компании Oxford Instruments (Великобритания). Изменение микротвердости изучали на микротвердомере модели M400 фирмы LECO (США).

Результаты исследований показали, что применение ФМ приводит к удельной деформации прослойки на 25...28 %, ее значение в центре и на краях сварного соединения отличается на 3...5 %, при этом удельная деформация на 5...8 % меньше по сравнению со сварными соединениями, полученными без применения ФМ.

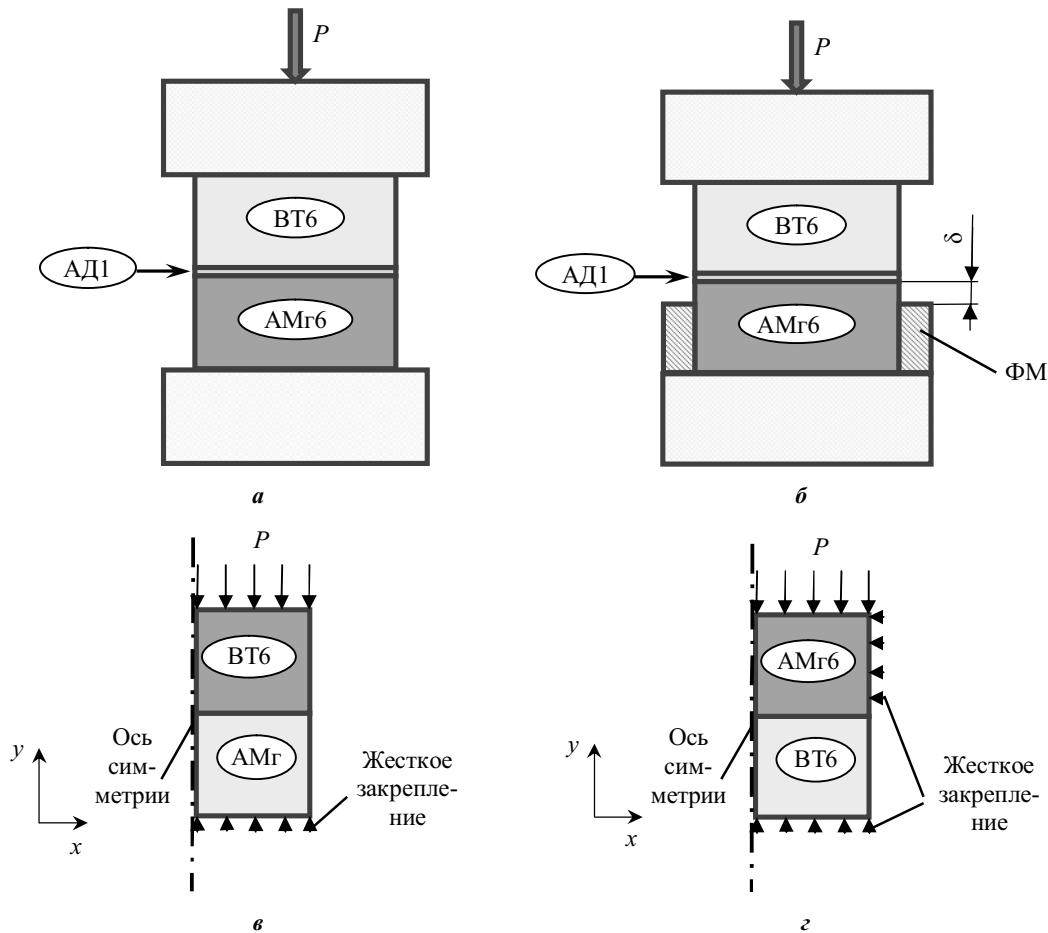


Рис. 1. Схемы ДСВ (*a, б*) и расчетные модели (*в, з*): *a, в* – сварка без ФМ; *б, з* – сварка с ФМ; *x, y* – оси координат

Исследования показывают качественное соединение сплава алюминия с прослойкой (рис. 2,*а-в*) в случае сварки с ФМ и без нее. На снимках микроструктуры (см. рис. 2,*б,в*) зона соединения АД1 и АМг6 похожа по внешнему виду на границы зерен, различным же является наличие отдельных участков скопившихся на ней мелких (до 0,1 мкм) включений.

Соединение сплава титана с прослойкой носит неудовлетворительный характер. В зоне соединения АД1+ВТ6 как при больших, так и при малых увеличениях на растровом электронном микроскопе видны расслоения различного размера. Их общая доля составляет около 40 % от протяженности линии соединения (см. рис. 2,*д,е*).

В сплаве АМг6 на глубину до 400 мкм у зоны соединения АМг6+АД1 наблюдается уменьшение размеров зерен и стремление их формы к глобулярной. В структуре ВТ6 особых изменений не наблюдается.

При сварке без ФМ на снимках микроструктуры (см. рис. 2,*а,з*) видно, что соединения АД1+АМг6 и АД1+ВТ6 выполнены качественно. В зоне соединения АД1 со сплавом титана ВТ6 при больших увеличениях на растровом электронном микроскопе

видны мелкие области несхватывания, но их общая доля составляет не более 5 % от площади контакта.

В зоне соединения прослойки со сплавом титана АД1+ВТ6 образуется участок шириной около 3 мкм со столбчатыми зёрнами (см. рис. 2,*д,е*). В центре сварного соединения эти зёрна расположены перпендикулярно соединению. При удалении от центра наблюдается наклон зерен в сторону края сварного соединения, т. е. в направлении пластического течения прослойки во время процесса сварки, что вызвано применением ФМ.

Исследования неоднородности химического состава по нормали к зоне сварного соединения АМг6+АД1+ВТ6 проведены для центральной и крайних частей сварного соединения (рис. 3 и 4). Результаты исследований показали, что при протекании процесса сварки происходит перераспределение легирующих элементов сплава АМг6. При сварке с ФМ и без нее магний диффундирует в прослойку, тем самым легируя ее, что приводит к образованию у зоны соединения АМг6+АД1 области с пониженным содержанием магния глубиной до 200 мкм.

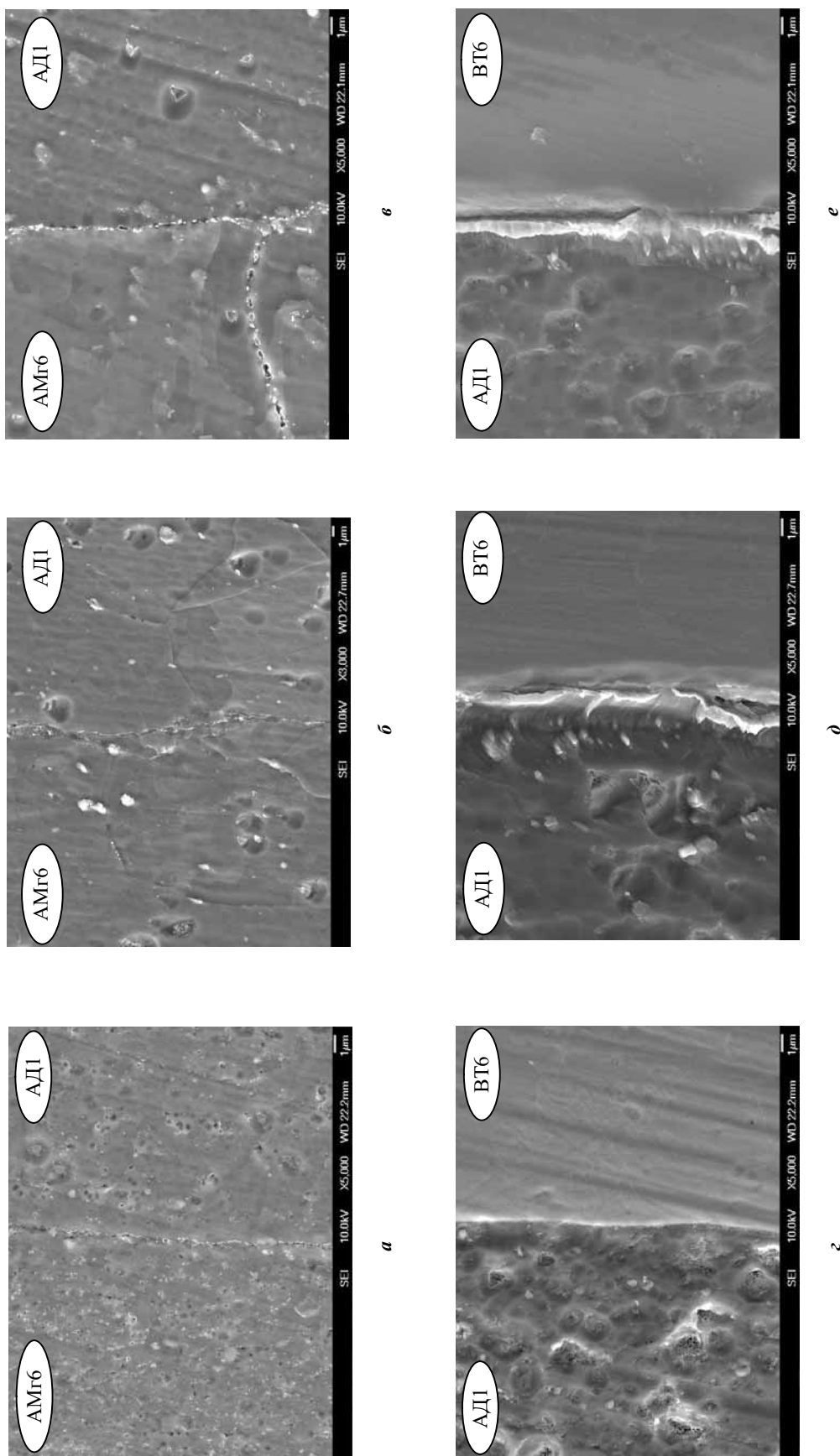


Рис. 2. Сравнение микроструктур зон соединения AMg6+AD1 (a–e) и AD1+BT6 (z–e) сварных соединений AMg6+AD1+BT6, полученных ДСВ без ФМ (a, z) и с ее применением: б, d – край соединения; e, e – центральная часть соединения

Следует отметить, что изменение значений микротвердости у границы соединения сплава алюминия с прослойкой как со стороны сплава алюминия, так и со стороны прослойки прямо зависит от концентрации магния. В прослойке наблюдаются включения оксидного типа, количество которых возрастает ближе к границе соединения прослойки со сплавом титана.

В зоне соединения прослойки со сплавом титана наблюдается область диффузионного взаимодействия с повышенным содержанием кислорода. Размер данной зоны 5–6 мкм в центральной части и до 2 мкм в крайней части сварного соединения, причем в центральной части соединения количество кислорода в 2 раза больше, чем на краях. Это обусловлено разницей в величине пластических деформаций, ко-

торые практически отсутствуют в центральной части и достигают максимальных значений по краям.

Проанализировав результаты металлографических исследований, можно предположить, что неудовлетворительный характер соединения сплава ВТ6 с прослойкой АД1 связан с большим количеством остаточных оксидов, которые не раздробились вследствие перераспределения внутренних напряжений, вызванного применением ФМ.

Для определения влияния остаточных напряжений и их уровня в сварном соединении проведено исследование напряженно-деформированного состояния с применением метода конечных элементов на осесимметричных моделях (см. рис. 1, в, г), при этом ФМ моделировалась жестким закреплением.

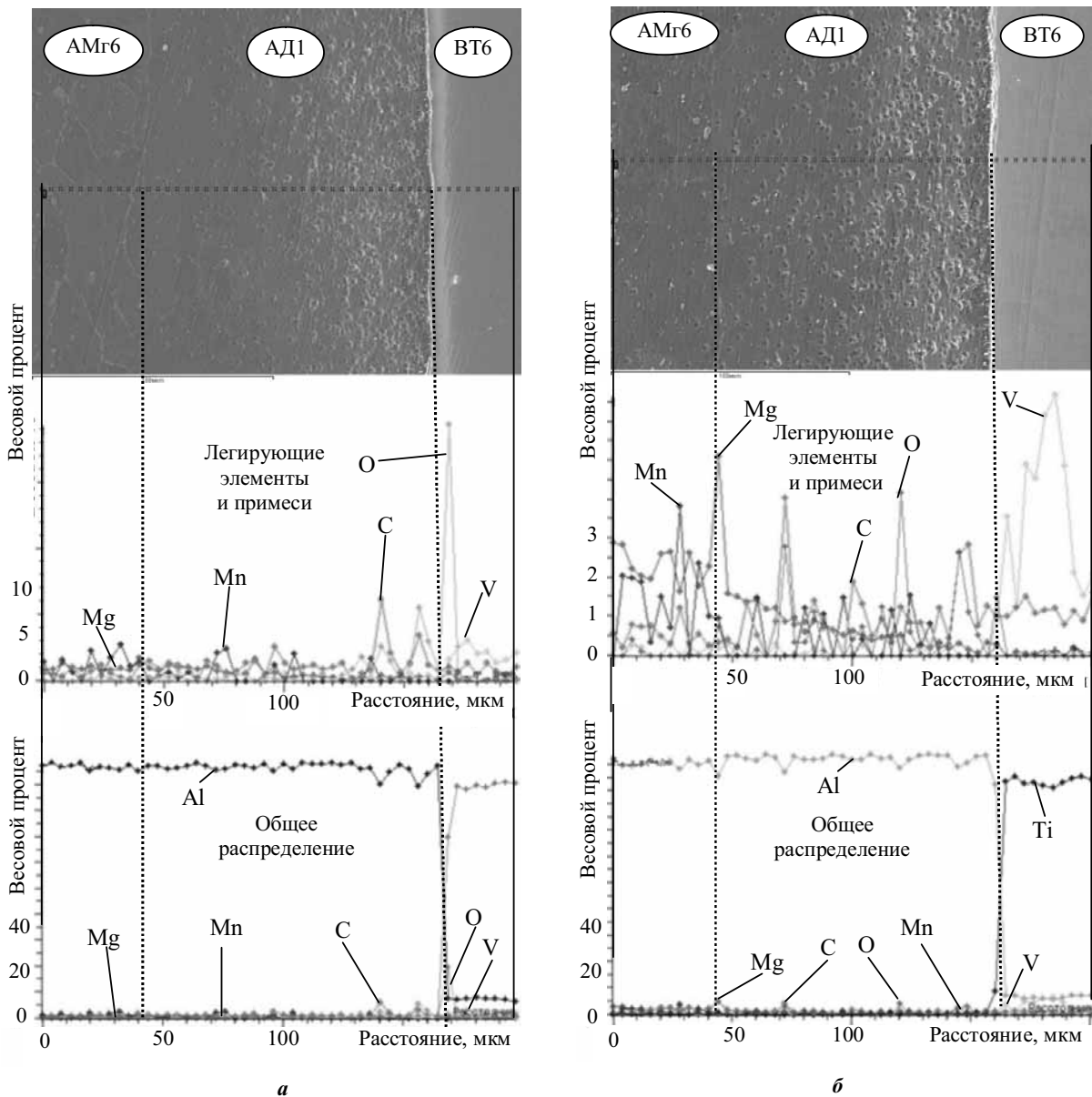


Рис. 3. Микроструктура и распределение концентрации химических элементов по нормали к зоне сварного соединения АМг6+АД1+ВТ6, полученного ДСВ с ФМ (а – центральная часть соединения; б – крайняя часть соединения)

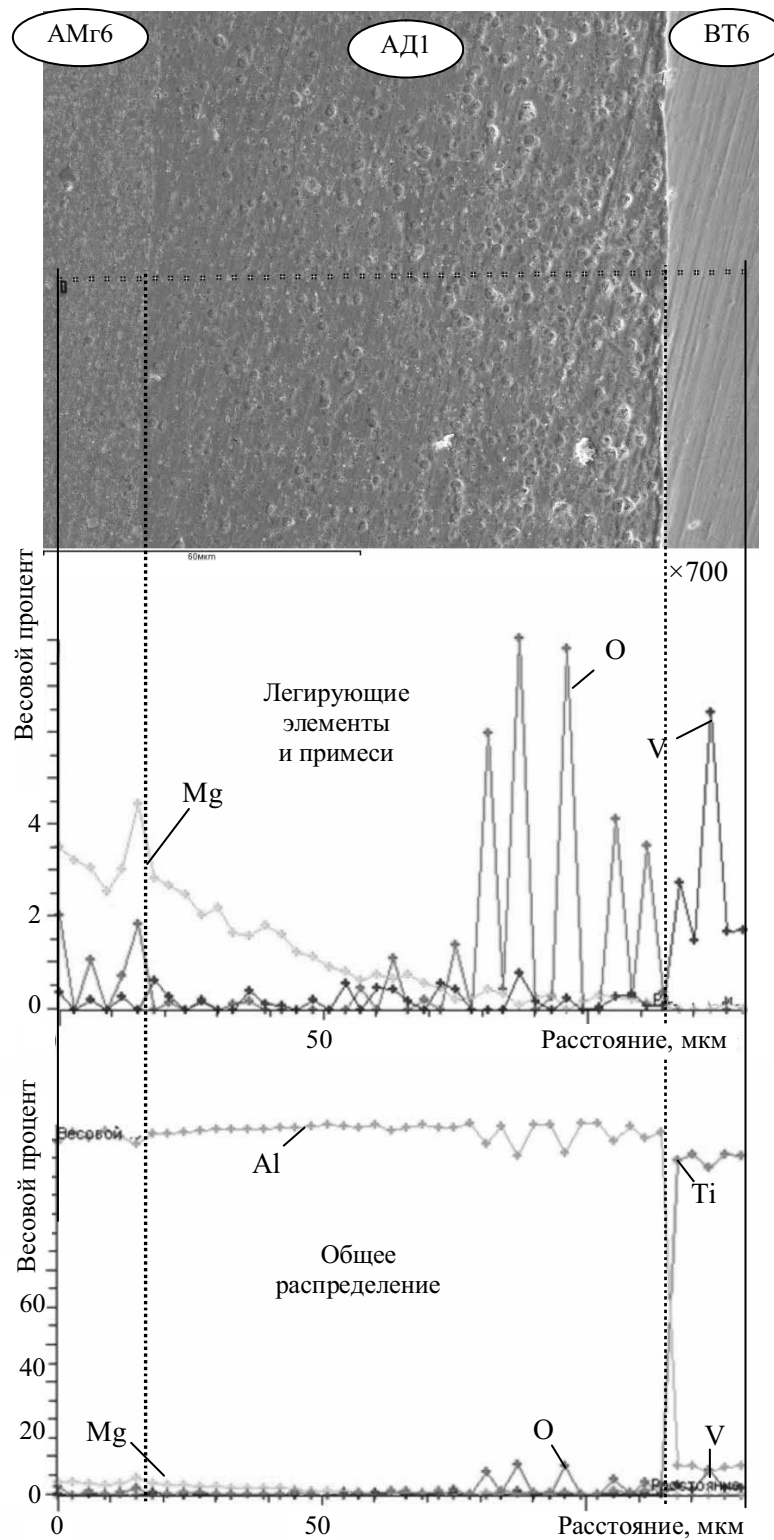


Рис. 4. Микроструктура и распределение концентрации химических элементов по нормали к зоне соединения AMg6+AD1+VT6, полученного с помощью ДСВ без ФМ

В результате компьютерного моделирования получены эпюры эквивалентных ( $\sigma_{\text{экв}}$ ), касательных ( $\tau_{xy}$ ), осевых ( $\sigma_y$ ) и радиальных ( $\sigma_x$ ) напряжений вдоль стыка (рис. 5) и поля эквивалентных пластических деформаций (рис. 6) для соединений с ФМ и без нее.

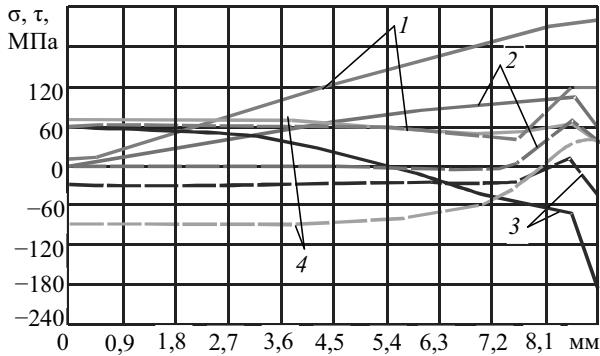


Рис. 5. Эпюры напряжений вдоль стыка (1 –  $\sigma_{\text{экв}}$ ; 2 –  $\tau_{xy}$ ; 3 –  $\sigma_y$ ; 4 –  $\sigma_x$ ): — — обычное соединение; - - - - - соедине- ние с формирующей матрицей

Анализ эпюр напряжений соединений без ФМ (см. рис. 5) показал, что характер распределения напряжений вдоль стыка аналогичен распределению напряжений подобных конструкций, описанных в публикации [4].

Эквивалентные напряжения превышают уровень 60 МПа на расстоянии более 1,8 мм от оси симметрии, что свидетельствует о сосредоточении пластических деформаций в районе стыка и подтверждается полем пластических деформаций (см. рис. 6,а).

Касательные напряжения, оказывающие наибольшее влияние на формирование соединения, имеют уровень более 50 МПа на расстоянии более 2,7 мм от оси симметрии, что положительно сказывается на процессе ДСВ.

Пластические деформации в материале АМГ6 сосредоточены в районе стыка, их минимум сосредоточен в центральной области соединения, что может привести к отсутствию схватывания металлов.

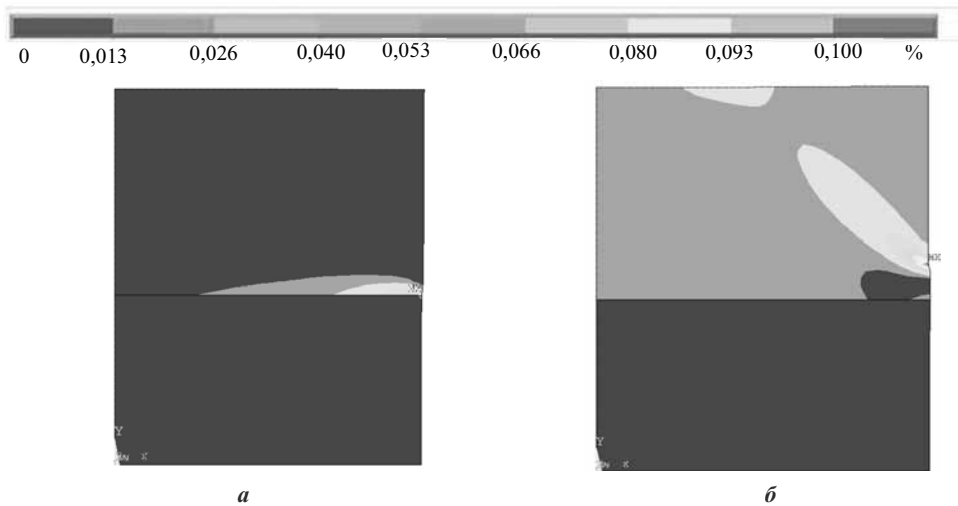


Рис. 6. Поле пластических деформаций в соединении без ФМ (а) и с ФМ (б)

Применение ФМ резко изменяет характер эпюр напряжений в соединении (см. рис. 5), что выражается в более равномерном распределении всех напряжений вдоль стыка и изменении осевых и радиальных напряжений с растягивающих на сжимающие по сравнению с ДСВ без ФМ. При этом низкий уровень касательных напряжений вдоль всего стыка приводит к образованию некачественного соединения.

Заметим, что хотя пластические деформации вдоль стыка при ДСВ с ФМ выше, чем без ФМ, зона их максимальных значений находится под углом к зоне соединения, что вызвано различием в размерах ФМ и части узла, изготовленной из АМГ6 (см. рис. 6,б).

Таким образом, применение ФМ требует дополнительных исследований, связанных как с параметра-

ми режима сварки, так и с формой используемых матриц и вариациями установки образцов перед сваркой.

### ВЫВОДЫ

1. Применение формирующей матрицы имеет как положительное, так и отрицательное влияние на образование качественного диффузионного соединения.

2. Отрицательным при применении формирующей матрицы является следующее: в зоне соединения АД1+ВТ6 присутствуют расслоения, общая доля которых составляет около 40 % от протяженности линии соединения; низкий уровень касательных напряжений вдоль всего стыка приводит к образованию некачественного соединения; зона максимальных значений пластических деформаций находится под углом к зоне соединения.

3. Положительным при применении формирующей матрицы является следующее: уменьшение удельной деформации прослойки на 5...8 %, более равномерное распределение всех напряжений вдоль стыка и изменение осевых и радиальных напряжений с растягивающих на сжимающие.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Гуляев, А. П.** *Металловедение* [Текст] : учеб. для вузов / А. П. Гуляев. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : *Металлургия*, 1986. – 544 с.
- [2] **Казаков, Н. Ф.** *Диффузионная сварка в вакууме* [Текст] / Н. Ф. Казаков. – М. : *Машиностроение*, 1968. – 331 с.
- [3] **Каракозов, Э. С.** *Соединение металлов в твердой фазе* [Текст] / Э. С. Каракозов. – М. : *Металлургия*, 1976. – 264 с.
- [4] **Квасницкий, В. В.** *Закономерности формирования напряженно-деформированного состояния при диффузионной сварке разнородных металлов применительно к узлам цилиндр–цилиндр и втулка–втулка* [Текст] / В. В. Квасницкий, Г. В. Ермолаев, М. В. Матвиенко // *Зб. наук. праць НУК*. – Миколаїв : *НУК*, 2007. – № 5 (416). – С. 57–65.
- [5] **Лебедев, В. К.** *Контактная стыковая сварка сопротивлением с формированием соединения. Сущность способа и его возможности* [Текст] / В. К. Лебедев, Г. П. Сахацкий, Р. М. Широковский // *Контактная стыковая сварка сопротивлением с формированием соединения* : сб. науч. тр. – К. : *ИЭС им. Е.О. Патона*, 1988. – С. 70.
- [6] **Рабкин, Д. М.** *Сварка разнородных металлов* [Текст] / Д. М. Рабкин, В. Р. Рябов, С. М. Гуревич. – К. : *Техника*, 1976. – 208 с.
- [7] *Структура соединений титана с медью, выполненных диффузионной сваркой, при различных схемах деформирования* [Текст] / Л. Н. Лариков, М. Н. Белякова, В. Н. Замков, В. К. Сабокарь // *Автоматическая сварка*. – 1982. – № 6. – С. 21–23.
- [8] **Терновский, А. П.** *Диффузионная сварка с принудительным деформированием (аналитический обзор)* [Текст] / А. П. Терновский // *Сварочное производство*. – 1988. – № 9. – С. 1–4.

---

© Колектив авторів

Надійшла до редколегії 03.04.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК

д-р техн. наук, проф. *В. Ф. Квасницький*

Статтю розміщено у Віснику НУК № 2, 2013