

15 %, то на периферии она может достигать 20...23 %. При этом в металле внутреннего шва вблизи линии проплавления наружного шва полигональный доэвтектоидный феррит образует сетку по границам бывшего аустенитного зерна, который приводит к снижению ударных свойств сварных швов трубных сталей, выполненных дугowymi методами сварки.

#### Список использованных источников

1. *Матросов Ю. И.* Сталь для магистральных трубопроводов / Ю. И. Матросов, Д. А. Литвиненко, С. А. Голованенко. – М. : Металлургия, 1989. – 228 с.
2. *Гаген Ю. Г.* Сварка магистральных трубопроводов / Ю. Г. Гаген, Н. А. Воробьев. – М. : Недра, 1976. – 151 с.
3. *Файнберг Л. И.* Микролегирующие швов титаном и бором при многодуговой сварке газонефтепроводных труб большого диаметра / Л. И. Файнберг, А. А. Рыбаков и др. // Автоматическая сварка. – 2007. – № 5. – С. 2-25.

УДК 621.791.4

**Е.В. Половецкий**, мл. науч. сотруд.

**Л.М. Капитанчук**, науч. сотруд.

Институт электросварки им. Е.О. Патона Национальной академии наук Украины, г. Киев, Украина

**О.А. Новомлинец**, канд. техн. наук

Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

### ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ПРОСЛОЙКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВА АЛЮМИНИЯ АМГ6 СО СПЛАВОМ ТИТАНА ВТ6 СПОСОБОМ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКИ В ВАКУУМЕ

*Рассмотрено влияние толщины промежуточной прослойки из АД1 на структуру и свойства, получаемых диффузионной сваркой в вакууме сварных соединений сплава алюминия АМГ6 со сплавом титана ВТ6. Показано, что оптимальной является прослойка толщиной 150 мкм.*

**Ключевые слова:** диффузионная сварка в вакууме, сварное соединение, параметры сварки, промежуточная прослойка, микротвердость, микроструктура.

*Розглянуто вплив товщини проміжної прошарку з АД1 на структуру і властивості, одержуваних дифузійним зварюванням у вакуумі зварних з'єднань сплаву алюмінію АМГ6 зі сплавом титану ВТ6. Показано, що оптимальним є прошарок товщиною 150 мкм.*

**Ключові слова:** дифузійне зварювання у вакуумі, зварне з'єднання, параметри зварювання, проміжний прошарок, микротвердість, микроструктура.

*The influence of the thickness of the intermediate layer of AD1 on the structure and the properties of diffusion welding in vacuum welded joints aluminum alloy with titanium alloy AMg6 VT6. It is shown that the optimum layer thickness of 150 microns.*

**Key words:** diffusion welding in vacuum, welded joints, the welding parameters, the intermediate layer, microhardness, microstructure.

**Постановка проблемы.** Потребность в сварке разнородных металлов возникает при изготовлении самых разнообразных объектов во многих областях науки и техники. Одними из широко применяемых биметаллических соединений являются соединения сплавов титана со сплавами алюминия, для получения которых целесообразно использовать способ диффузионной сварки в вакууме (ДСВ). Ввиду большой разности в свойствах свариваемых металлов важную роль в получении бездефектных соединений имеет правильный выбор технологических параметров сварки, которые определяют и структурно-фазовый состав зоны соединения. Ввиду нерастворимости магния в титане невозможно получение качественного соединения без применения промежуточных прослоек из чистого алюминия [1-3]. Поэтому важной частью технологии является выбор оптимальной толщины применяемой прослойки.

**Цель статьи.** Главной целью этой работы является исследование влияния толщины промежуточной прослойки чистого алюминия марки АД1 на качество сварных соединений алюминия АМГ6 с титаном ВТ6.

Металлографические исследования проводили на шлифах, изготовленных из исследуемых сварных соединений с последующим их ионным травлением с помощью установки Fine coat ion sputter JFC-1100 фирмы JEOL (Япония) на специально подобранных и отработанных для исследуемых биметаллических пар режимах. Последующие исследования микроструктуры и распределения химических элементов протравленных шлифов сварных соединений проводили с помощью ОЖЕ-микросонда JAMP 9500F фирмы JEOL (Япония), оборудованном энергодисперсионным рентгеновским спектрометром системы ИНКА компании Oxford Instruments (Великобритания). Изменение микротвердости изучали на микротвердомере модели M400 фирмы LECO (США).

В процессе сварки исследуемые сплавы подвергались определенному термомеханическому воздействию, вследствие чего в них происходили рекристаллизационные и диффузионные процессы, оказывающие влияние на структуру и свойства металла зоны сварного соединения и основного металла [4-6]. Сварные соединения АМг6 + АД1 + ВТ6 получены при постоянных значениях давления (20 МПа), температуры (540 °С) и времени (20 мин.). Толщины исследуемых прослоек были следующими: 100, 150 и 200 мкм.

При толщине прослойки 100 мкм удельная деформация прослойки составляет 45-47 %. На снимках микроструктуры четко видна зона соединения (рис. 1, а, з) с участками скопившихся на ней мелких включений. Качество соединения сплава титана ВТ6 с прослойкой из АД1 носит удовлетворительный характер (рис. 1, а, ж). В зоне соединения АД1-ВТ6 четко видны области, в которых не произошел процесс схватывания, их общая доля составляет более 30 % от общей площади соединения.

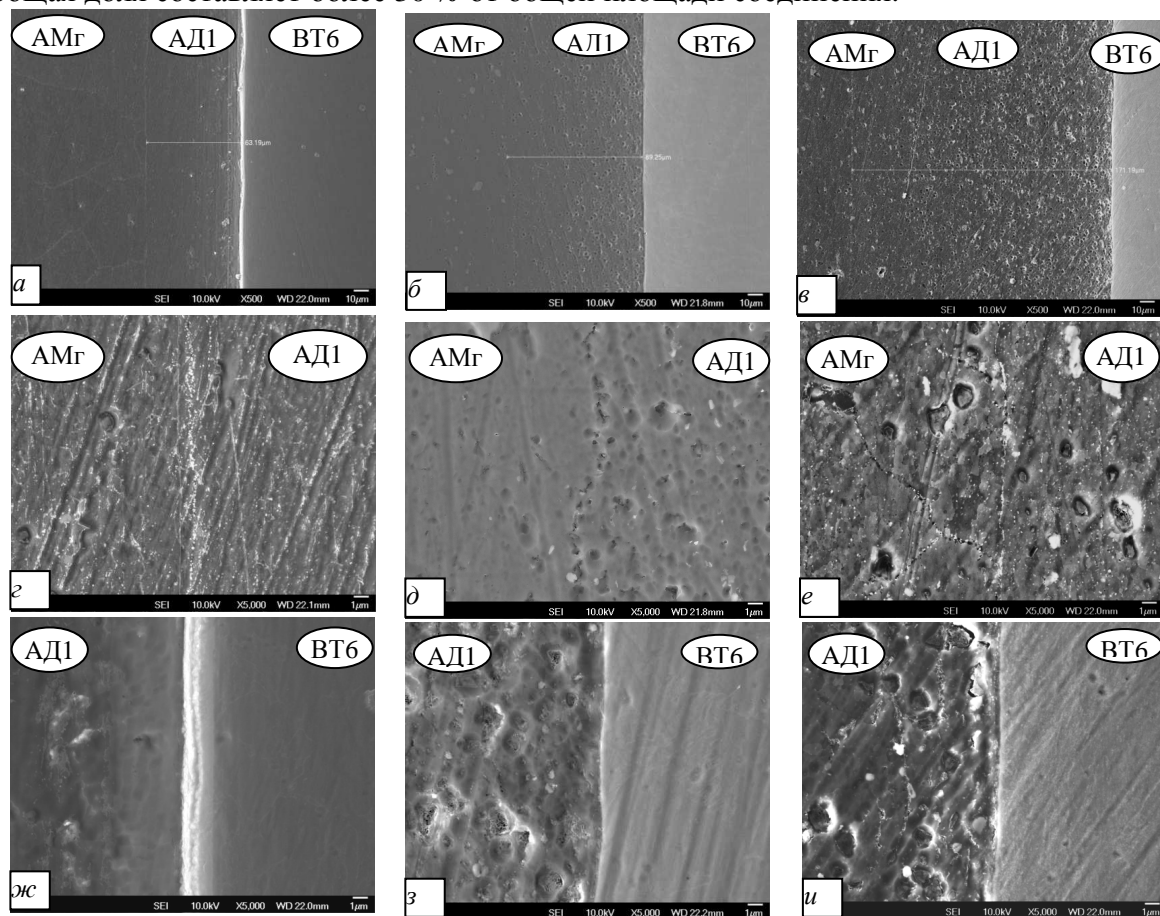


Рис. 1. Микроструктура сварного соединения АМг6+АД1+ВТ6, полученного с помощью диффузионной сварки в свободном состоянии при толщине прослойки АД1: а, з, ж – 100 мкм; б, д, з – 150 мкм; в, е, и – 200 мкм; а, б, в – общий вид соединения ( $\times 500$ ); з, д, е – зона соединения АМг6-АД1 ( $\times 5000$ ); ж, з, и – зона соединения АД1-ВТ6 ( $\times 5000$ )

Распределение микротвердости у границы соединения АМг6-АД1-ВТ6 имеет следующие значения (рис. 2): для сплава титана ВТ6 3500...3700 МПа, для сплава алюминия АМг6 600...700 МПа. Микротвердость прослойки из сплава алюминия АД1 650...700 МПа.

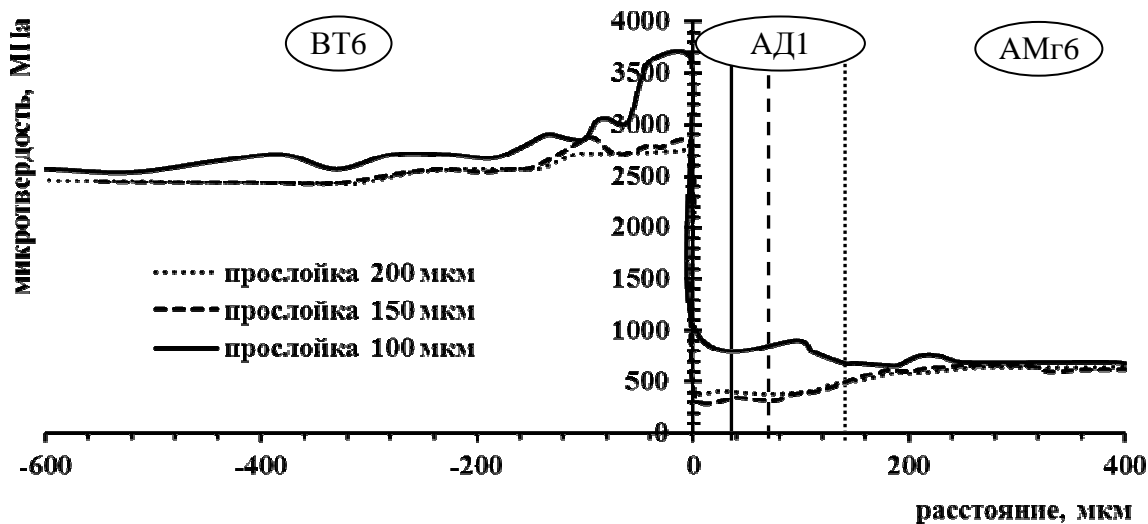


Рис. 2. Сравнение изменения значений микротвердости в сварных соединениях ВТ6+АД1+АМг6, полученных с помощью диффузионной сварки в свободном состоянии

Измерения микротвердости показали, что она повышается для сплава алюминия АМг6 у границы соединения с прослойкой из АД1 на 10 %, для сплава титана ВТ6 у границы соединения с прослойкой из АД1 на 30...35 % по сравнению с основным металлом (рис. 2). Изменения значений микротвердости вглубь от зоны соединения с прослойкой из АД1 для сплава титана ВТ6 составляет ~ 160...200 мкм и ~ 50...60 мкм для сплава алюминия АМг6.

Исследования неоднородности химического состава по нормали к зоне сварного соединения показали следующее. Во время протекания сварочного процесса происходит перераспределение основного легирующего элемента сплава алюминия АМг6 – магния. Магний диффундирует на всю остаточную после процесса сварки толщину прослойки из АД1 к зоне ее соединения со сплавом титана ВТ6. Концентрация магния в прослойке носит равномерный характер и составляет более 1 % (рис. 3). В сплаве алюминия АМг6 у границы соединения АМг6-АД1 образуется зона с пониженным содержанием магния глубиной до 150-200 мкм. В области соединения АД1-ВТ6 фиксируется повышенное содержание кислорода, что говорит о присутствии остатков оксидных пленок.

В зоне соединения прослойки со сплавом титана видна переходная зона шириной 3-4 мкм с химическим составом, который отличается как от состава прослойки, так и от состава сплава титана. Более детальные исследования показали, что она имеет в своем составе магний, ванадий, а также повышенное содержание кислорода. Зона соединения насыщена остатками оксидной пленки прослойки АД1. Область соединения сплава титана ВТ6 с прослойкой также насыщена кислородом на глубину до 2 мкм.

При толщине прослойки 150 мкм удельная деформация прослойки составляет 30...33 %. На снимках микроструктуры (рис. 1, б, д, з) видно, что получено качественное сварное соединение в зоне соединения прослойки АД1 как со сплавом алюминия АМг6, так и со сплавом титана ВТ6. Зона соединения АМг6-АД1 сравнима с границей зерна сплава алюминия АМг6. В зоне соединения прослойки со сплавом титана при больших увеличениях на растровом электронном микроскопе видны мелкие зоны, в которых не произошло схватывание, но их общая доля составляет не более 5 % от площади соединения.

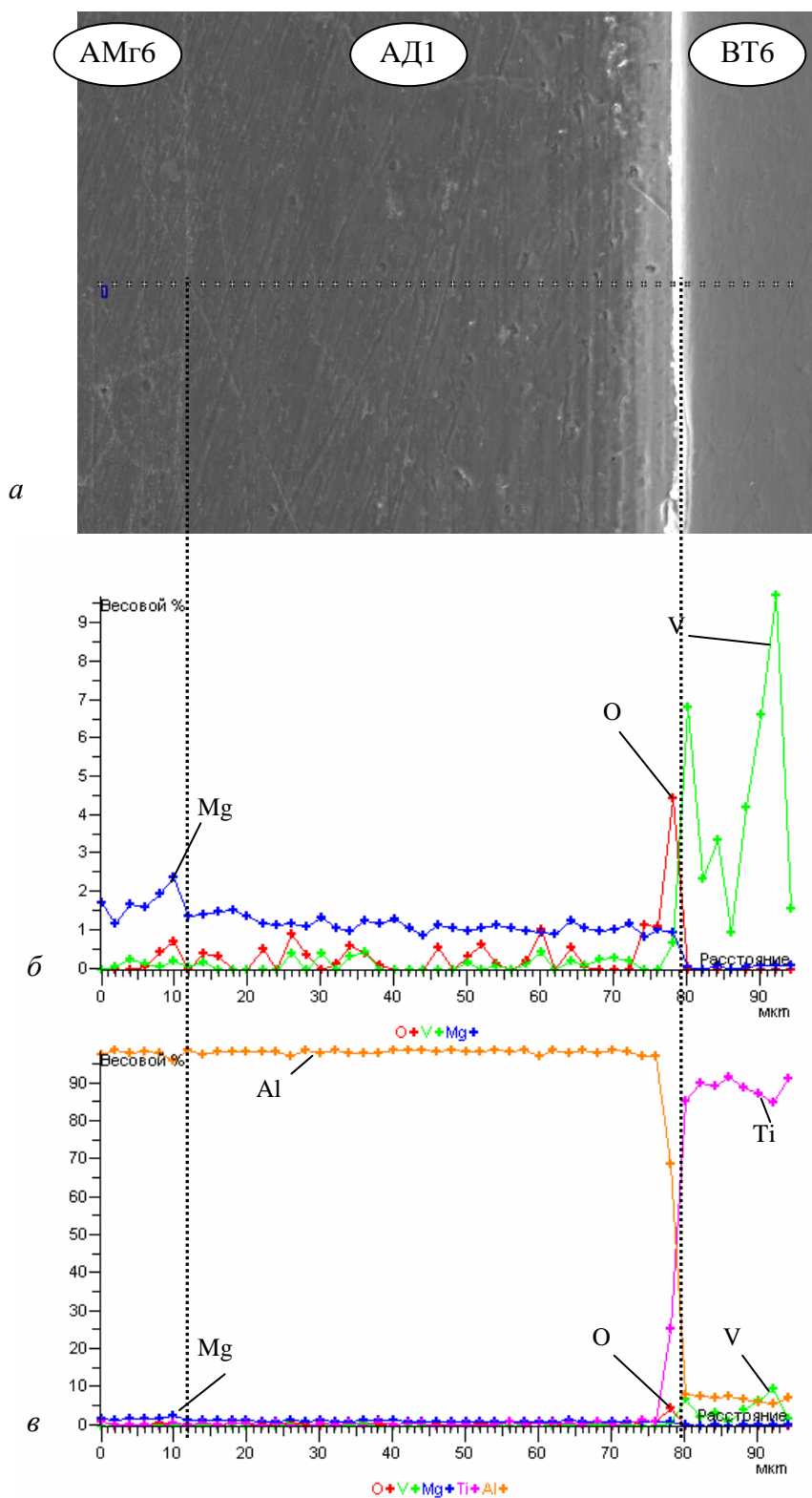


Рис. 3. Распределение концентрации примесей (б) и легирующих элементов (в) по нормали к зоне сварного соединения АМгб+АД1+ВТб, полученного через прослойку толщиной 100 мкм и микроструктура области анализа (а)

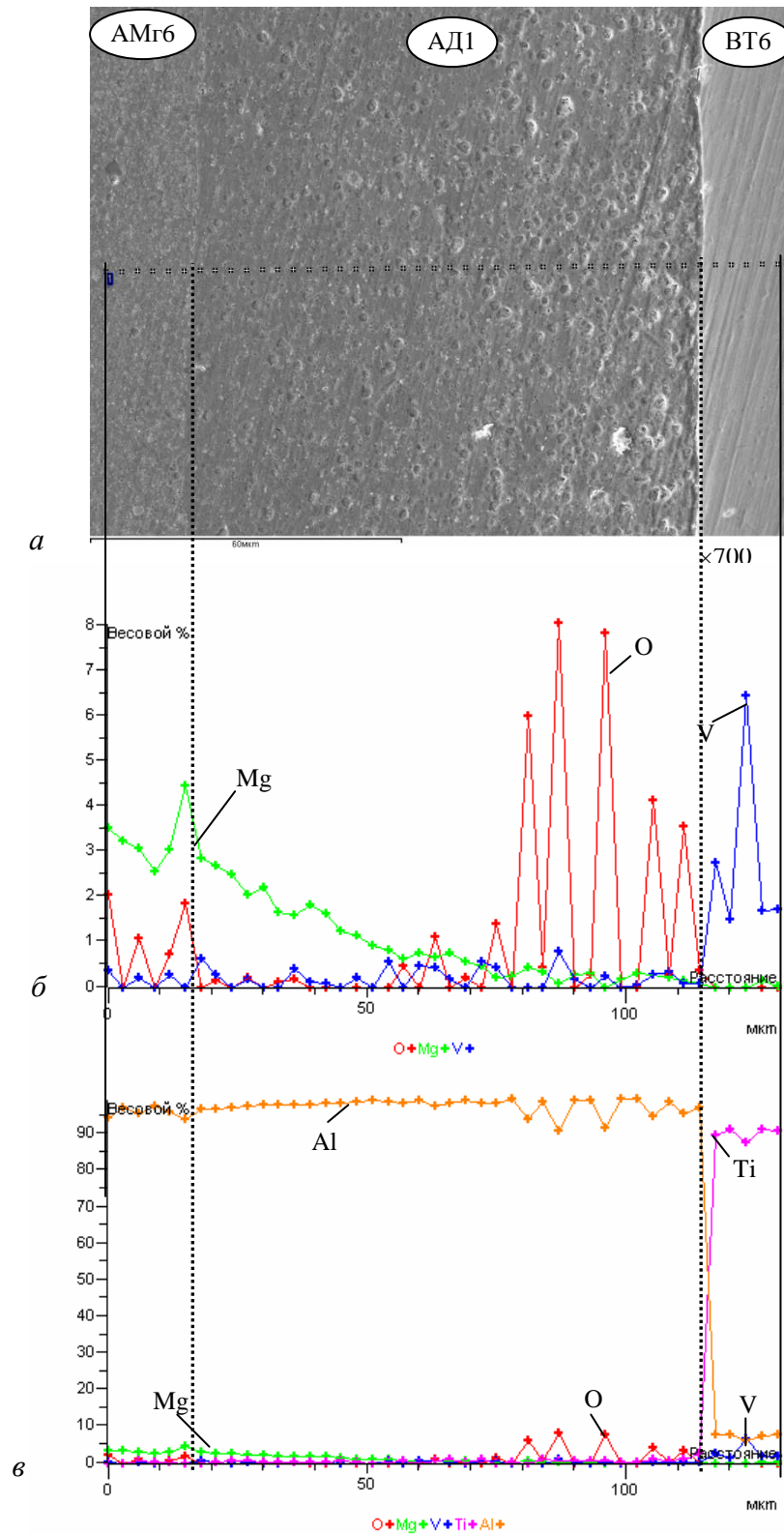


Рис. 4. Распределение концентрации примесей (б) и легирующих элементов (в) по нормали к зоне сварного соединения АМгб+АД1+ВТ6, полученного через прослойку толщиной 150 мкм и микроструктура области анализа (а)

Микротвердость у границы соединения ВТ6-АД1-АМгб имеет следующие значения: для сплава титана ВТ6 2780...2800 МПа, для сплава алюминия АМгб 410...420 МПа. Из-

мерения микротвердости показали, что для сплава алюминия АМгб у границы контакта с прослойкой она ниже на 25...30 %, а для сплава титана ВТб у границы контакта с прослойкой она выше на 10...13 % по сравнению с основным металлом (рис. 2). Глубина изменения значения микротвердости вглубь от поверхности соединения с прослойкой для ВТб составляет ~ 125...220 мкм и ~ 60...80 мкм для АМгб. Микротвердость прослойки из сплава алюминия АД1 310...350 МПа и повышается в сторону соединения со сплавом алюминия АМгб.

Исследования неоднородности химического состава по нормали к зоне сварного соединения с помощью энергодисперсионного рентгеновского спектрометра показали следующее. Как и в предыдущем случае во время протекания сварочного процесса происходит перераспределение легирующих элементов сплава алюминия АМгб. Магний диффундирует из АМгб в прослойку АД1 на глубину 60...70 мкм, тем самым легируя ее, а в сплаве алюминия АМгб у границы соединения с прослойкой образуется зона с пониженным содержанием магния глубиной до 200 мкм.

В прослойке наблюдаются включения с повышенным содержанием кислорода, их количество растет по мере приближения к зоне соединения прослойки со сплавом титана. На границе соединения прослойки со сплавом титана наблюдается зона диффузионного взаимодействия размером 1,2-1,6 мкм (рис. 4). Дефекты и включения различного рода не наблюдаются.

При толщине прослойки 200 мкм ее удельная деформация составляет 15-20 %. На снимках микроструктуры (рис. 1, в, е, и) в зоне соединения прослойки со сплавом алюминия видны отдельные участки мелких (менее 0,1 мкм) включений, а ее внешний вид подобен границе зерна (рис. 1, в, е). В зоне соединения прослойки со сплавом титана включений и фазовых выделений не наблюдается. Доля областей несхватывания составляет не более 3-5 % от общей площади зоны соединения. У границы соединения АМгб-АД1 в сплаве алюминия на глубине до 400 мкм наблюдается изменение размеров и формы зерна, оно увеличивается и становится более глобулярной формы. В сплаве титана особых изменений не наблюдается.

Распределение микротвердости у границы соединения АМгб-АД1-ВТб имеет следующие значения (рис. 2): для сплава титана ВТб 2650...2700 МПа, для сплава алюминия АМгб 550...600 МПа. Микротвердость прослойки из алюминия АД1 составляет 300...320 МПа и повышается в сторону соединения со сплавом алюминия АМгб до 450...500 МПа. Измерения микротвердости показали, что для сплава алюминия АМгб у границы соединения с прослойкой из АД1 она снижается на 17 %, а для сплава титана ВТб у границы соединения с прослойкой из АД1 она повышается на 5...8 % по сравнению с основным металлом (рис. 2).

Глубина изменения значений микротвердости вглубь от поверхности соединения с прослойкой для ВТб составляет ~ 130...140 мкм и ~ 80...100 мкм для АМгб.

На рис. 5 представлены результаты исследования неоднородности химического состава по нормали к зоне сварного соединения АМгб-АД1-ВТб. Данные исследований показали следующее. Во время протекания сварочного процесса происходит перераспределение магния как основного легирующего элемента сплава алюминия АМгб (рис. 5). Магний диффундирует в прослойку на глубину 100-120 мкм, что составляет 60-70 % от толщины прослойки, оставшейся после процесса сварки, а в сплаве алюминия АМгб у границы соединения образуется зона шириной 100...150 мкм с пониженным его содержанием.

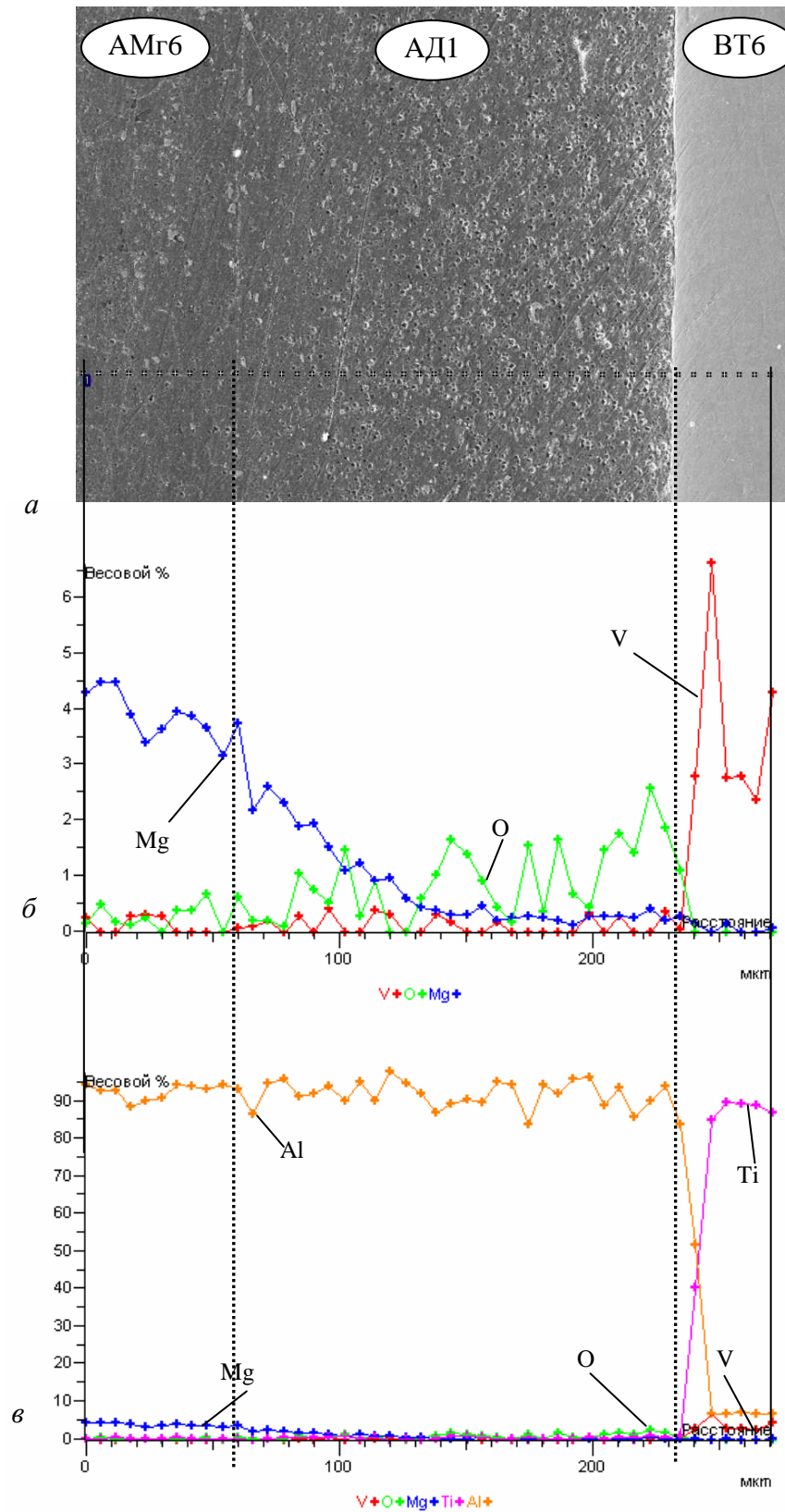


Рис. 5. Распределение концентрации примесей (б) и легирующих элементов (в) по нормали к зоне сварного соединения АМг6+АД1+ВТ6, полученного через прослойку толщиной 200 мкм и микроструктура области анализа (а)

На границе соединения прослойки из АД1 со сплавом титана ВТ6 наблюдается зона диффузионного взаимодействия размером ~1,2-1,6 мкм, характерной особенностью которой есть диффузия титана и ванадия в АД1 на глубину 0,5 мкм. Интерметаллиды и другие включения не наблюдаются.

**Выводы.** Во всех случаях в прослойке наблюдается повышенное содержание оксидных включений, со стороны сплава титана ВТ6 их количество увеличивается. Как в сплаве алюминия АМг6, так и в прослойке из АД1 после процесса сварки наблюдаются включения экзогенного типа сложного химического состава. Их происхождение и наличие связано с процессом производства металла (остатки футеровки). Наблюдается изменение в размере и форме зерна в сплаве АМг6 у границы соединения АМг6-АД1, на глубину 400 мкм увеличивается его размер, а форма принимает более глобулярный вид. В сплаве ВТ6 и у границы соединения АД1-ВТ6 изменений в структуре не наблюдается, поскольку температура сварки мала для начала изменений структуры в ВТ6.

Изменение значений микротвердости у границы соединения сплава алюминия АМг6 с прослойкой из АД1 как со стороны сплава алюминия, так и со стороны прослойки имеет схожий характер при применении прослойки толщиной 150 и 200 мкм, т. е. прямо зависит от перераспределения магния как основного легирующего элемента сплава АМг6, который влияет на его механические свойства. В сплаве АМг6 в зоне с пониженным содержанием магния микротвердость снижается, а в прослойке из АД1, в зоне насыщенной магнием, она возрастает (рис. 2).

При толщине прослойки 100 мкм нет достаточного пластического течения материала во время процесса сварки в зоне соединения ВТ6-АД1, что приводит к повышению микротвердости в этой зоне и самой прослойки на 30...40 % вследствие приконтактного упрочнения материала, а также большому количеству остаточных оксидов. Остаточной после процесса сварки толщины применяемой прослойки не достаточно для полного перераспределения магния из АМг6, что влечет за собой образование областей, в которых не происходит процесс схватывания.

При ДСВ сплава титана ВТ6 со сплавом алюминия АМг6 во избежание негативного влияния магния необходимо применять прослойки из АД1 с толщиной 150 мкм.

#### Список использованных источников

1. Рабкин Д. М. Сварка разнородных металлов / Д. М. Рабкин, В. Р. Рябов, С. М. Гуревич. – К. : Техника, 1976. – 208 с.
2. Ларииков Л. Н. Диффузионные процессы в твердой фазе при сварке / Л. Н. Ларииков, В. Р. Рябов, В. М. Фальченко. – М. : Машиностроение, 1975. – 192 с.
3. Диффузионная сварка жаропрочных сплавов / Р. А. Мусин, В. Н. Анциферов, В. Ф. Кващницкий [и др.]. – М. : Металлургия, 1979. – 207 с.
4. Цвиккер У. Титан и его сплавы / У. Цвиккер. – М. : Металлургия, 1979. – 511 с.
5. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов : пер. с англ. / Л. Ф. Мондольфо. – М. : Металлургия, 1979. – 640 с.
6. Хэтч Дж. Е. Алюминий: свойства и физическое металловедение : справочник / Дж. Е. Хэтч ; под ред. И. Н. Фридляндера. – М. : Металлургия, 1989. – 426 с.