



## ПРЕССОВАЯ СВАРКА АЛЮМИНИДА ТИТАНА С ДРУГИМИ ТИТАНОВЫМИ СПЛАВАМИ

**В. К. САБОКАРЬ**, канд. техн. наук, **С. В. АХОНИН**, д-р техн. наук,  
**И. К. ПЕТРИЧЕНКО**, **А. В. ЯСИНСКИЙ**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведена металлографическая оценка качества сварных соединений интерметаллидного сплава Ti–32Al–2Cr с конструкционными сплавами ВТ1-0 и ВТ6, полученных сваркой давлением. Показано, что при прессовой сварке обеспечиваются условия для получения бездефектных сварных соединений.

*Ключевые слова:* прессовая сварка, алюминид титана, титан, микроструктура, соединения, микротвердость

Современные условия эксплуатации машин и механизмов требуют создания новых материалов конструкционного назначения с высокой удельной прочностью, способных выдерживать нагрузку при тяжелых условиях работы.

Преыдушие исследования показали, что титановым сплавам системы Ti–Al–Cr присуща низкая пластичность в литом состоянии при нормальной температуре, которая существенно ограничивает их применение в реальных изделиях [1]. Для повышения комплекса физико-механических характеристик при комнатной температуре и получения высокой жаропрочности и жаростойкости таких сплавов проводится оптимизация их химического состава, разработка режимов горячего деформирования, исследование их структуры и механических свойств в литом и деформированном состояниях.

В связи с этим определены закономерности изменения физико-механических характеристик сплавов системы Ti–Al–Cr при эксплуатационных температурах 20...700 °С и оценка влияния структуры и механизмов разрушения этих материалов являются актуальными научными и прикладными задачами [2].

Проведены технологические эксперименты и исследования структур сварных соединений алюминид титана с титановыми сплавами разного состава, полученных прессовой сваркой. Целью настоящей работы стало проведение серии исследований, позволяющих установить особенности структурных изменений, а также влияние на них технологических факторов.

Для получения сварных соединений с алюминидом титана Ti–32Al–2Cr использовали прутки из сплава ВТ1-0 (технический титан) и ВТ6 (Ti–6Al–4V) диаметром 30 мм. В эксперименте отрабатывали принципиальную технологию получения разнородных сварных соединений перечис-

ленных металлов и исследовали процессы, протекающие в зоне соединения под действием параметров прессовой сварки.

При прессовой сварке алюминид титана соединения выполняются при температурах ниже температуры ( $\alpha + \gamma$ )-перехода, поэтому структура материала практически не изменяется и устраняются явления, обусловленные быстрым охлаждением соединения от высоких температур (выше температуры ( $\alpha + \gamma$ )-перехода), характерных для большинства других способов соединения (особенно для сварки плавлением).

К сварке были подготовлены образцы из сплавов ВТ1-0 и ВТ6 диаметром 23 мм, длиной 29 мм, а из алюминид титана — такого же диаметра, но длиной 16 мм. Сварку проводили в технологических кассетах со свободным деформированием пластического металла в пределах 5...8 мм от поверхности стыка.

Сварку алюминид титана с указанными титановыми сплавами осуществляли в вакуумной камере установки У-874 при температуре 820...830 °С. Образцы нагревали до этой температуры, выдерживали 15 мин с целью выравнивания температуры по всему сечению технологической оснастки, а затем прикладывали давление 300 МПа в течение 10 мин. Охлаждение образцов до температуры 200...300 °С осуществляли в вакуумной камере. Нагрев образцов в установке производили молибденовым нагревательным элементом со скоростью около 20 °С/мин.

Микроструктура зоны контакта полученных сварных соединений алюминид титана с техническим титаном ВТ1-0 и сплавом ВТ6 приведена на рис. 1. Зоны контакта обоих соединений имеют четко выраженную границу раздела между металлами и не имеют дефектов.

Исследование соединений алюминид титана+ВТ1-0 в состоянии после сварки (рис. 1, а) показало, что в зоне контакта соединяемых поверхностей образования общих зерен (при данных параметрах режима сварки) не обнаружено. При

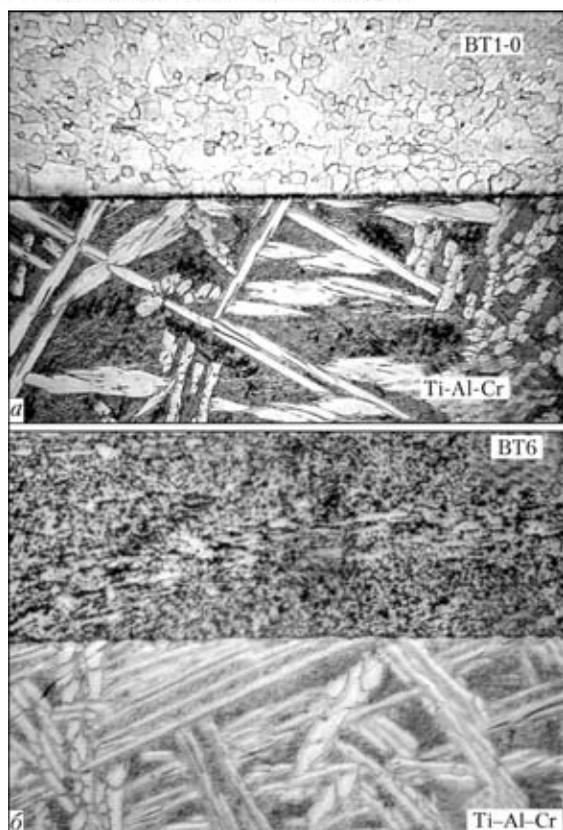


Рис. 1. Микроструктура зон контакта сварного соединения алюминид титана с техническим титаном BT1-0 (а,  $\times 100$ ) и сплавом BT6 (б,  $\times 200$ )

большом увеличении (рис. 2) четко выявляется наличие диффузионной зоны как со стороны титана, так и со стороны алюминид титана.

С помощью микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) установлено, что более светлая фаза (рис. 2, позиция 1) в интерметаллидном сплаве имеет следующий химический состав, мас. %: 78,9 Ti; 18,88 Al; 2,16 Cr (рис. 3), а зерна более темной фазы с наличием продуктов распада (рис. 2, позиция 2) — 74,82 Ti; 18,63 Al; 6,55 Cr. Эти данные свидетельствуют о сложном внутреннем строении, в частности, о присутствии мелкодисперсных включений  $\beta$ -фазы, образовавшихся вследствие увеличения содержания хрома.

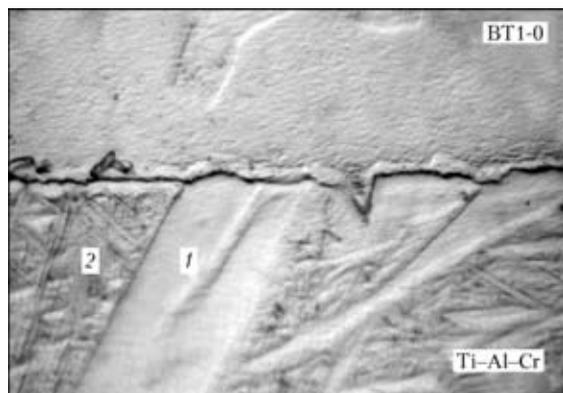


Рис. 2. Микроструктура ( $\times 1250$ ) диффузионной зоны в сварном соединении алюминид титана+BT1-0

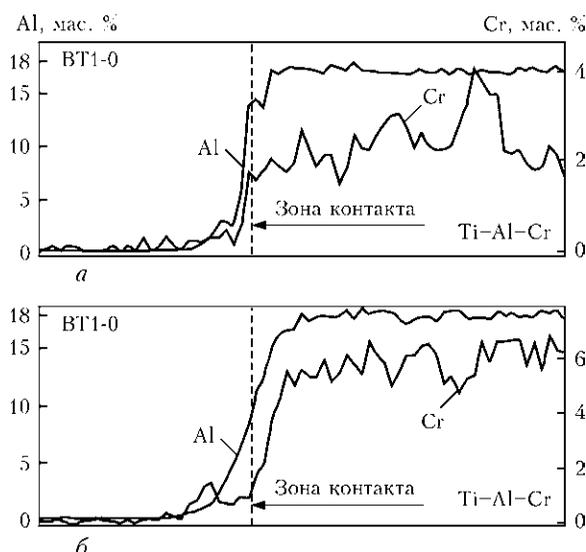


Рис. 3. Распределение алюминия и хрома в зоне контакта сварного соединения алюминид титана+BT1-0: а — светлые зерна; б — зерна с распадом

Характерной особенностью взаимодействия алюминид титана с техническим титаном BT1-0 под влиянием параметров режима сварки является диффузия алюминия через зону контакта из алюминид титана в титан по механизму зернограничной диффузии с образованием фазы. Наиболее интенсивно этот процесс происходит со стороны зерен с наличием продуктов распада (рис. 4).

Со стороны светлой фазы алюминид титана за время сварки в титан диффундируют как алюминий, так и хром, но последний — со значительно меньшей скоростью (рис. 3).

Исследование распределения микротвердости в направлении, перпендикулярном зоне контакта сварного соединения алюминид титана+BT1-0 (рис. 5), показало наличие диффузионной зоны шириной 5...7 мкм в направлении титана. Как установлено МРСА, происходит преимущественно диффузия алюминия со стороны алюминид титана (рис. 3, а), а также алюминия и хрома со стороны зерен фазы с распадом (рис. 3, б).

Исследования структуры сварного соединения алюминид титана+BT6 (рис. 6) показали, что существенных изменений в структуре обоих металлов не произошло. МРСА установлено распределение легирующих элементов в зоне контакта сварного соединения алюминид титана+BT6 (рис. 7). По данным МРСА, ширина диффузионной зоны от зоны контакта в титановом сплаве BT6 составляет 2,5 мкм, а в алюминид титана — 2,0 мкм.

Полученная микроструктура зоны сварки в оптическом микроскопе (рис. 6) показала, что вдоль зоны контакта двух металлов в алюминид титана сформировались мелкие зерна  $\alpha_2$ -фазы с 11...15 мас. % Al. Кроме того, в пределах диффузионной зоны содержится 1,8...1,4 мас. % Cr и 0,4...1,8 мас. % V, который диффундирует из сплава BT6.

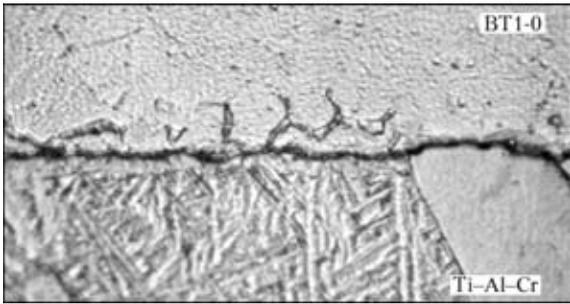


Рис. 4. Микроструктура ( $\times 1250$ ) диффузионной зоны с зернограничной диффузией алюминия в титан

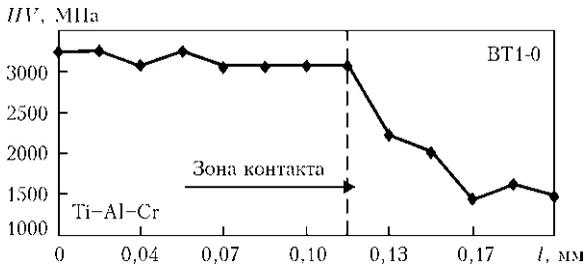


Рис. 5. Распределение микротвердости в зоне контакта сварного соединения алюминид титана+VT1-0 ( $l$  — расстояние между уколами индентора)

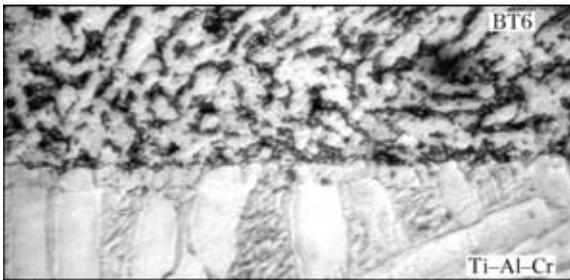


Рис. 6. Микроструктура ( $\times 1250$ ) зоны контакта сварного соединения алюминид титана+VT6

В сплаве VT6 в диффузионной зоне содержание алюминия изменяется от 6,5 до 11,0 мас. %. Диффузионная зона обеднена ванадием (от 2,8 до 1,8 мас. %) за счет его диффузии в алюминид титана, но обогащена хромом (от 1,0 до 1,4 мас. %), который диффундирует из алюминид титана.

Исследовано распределение микротвердости поперек зоны контакта. Представленные на рис. 8 данные подтверждают наличие диффузионной зоны как в сплаве VT6, так и в алюминиде титана.

Таким образом, прессовой сваркой были получены бездефектные сварные соединения алюминид титана Ti-Al-Cr с титановыми сплавами

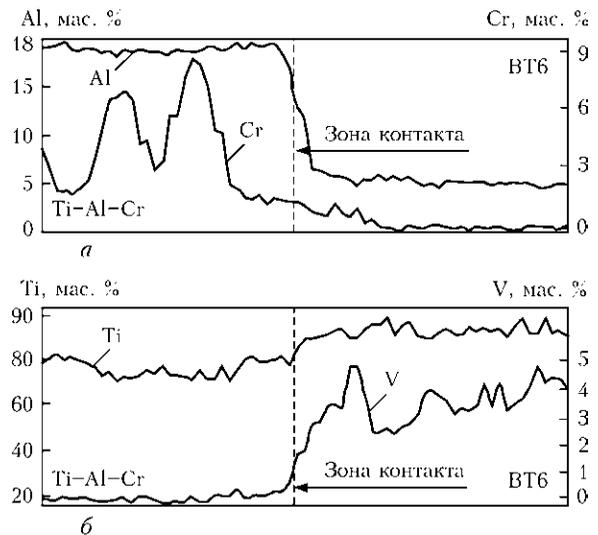


Рис. 7. Распределение алюминия, хрома (а) и титана, ванадия (б) в зоне контакта сварного соединения алюминид титана+VT6

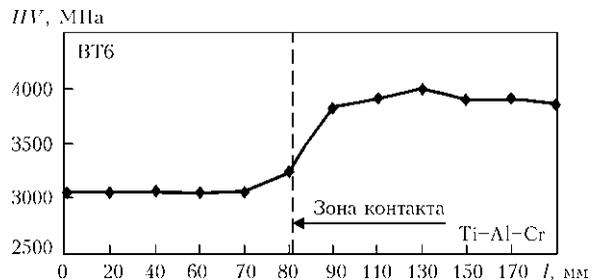


Рис. 8. Распределение микротвердости в зоне контакта сварного соединения алюминид титана+VT6

VT1-0 и VT6. Характерной особенностью взаимодействия алюминид титана с титаном VT1-0 под действием параметров режима сварки является диффузия алюминия через зону контакта по механизму зернограничной диффузии с образованием некоторой фазы.

При исследовании сварного соединения алюминид титана+VT6 наличия существенных изменений в структуре обоих металлов зафиксировано не было.

1. Новые подходы к деформационно-термической обработке литых интерметаллидных сплавов на основе  $\gamma$ -TiAl+ $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al / В. М. Имаев, Р. М. Имаев, А. В. Кузнецов и др. // Физ. металлов и металловедение. — 2005. — 100, № 2. — С. 51–62.
2. Dimiduk D. M. Gamma titanium aluminides alloys — an assessment within the competition of aerospace structural materials // Mater. Sci. and Eng. A. — 1999. — 263. — P. 281–288.

The paper gives metallographic evaluation of the quality of welded joints of intermetallic alloy Ti-32Al-2Cr with VT1-0 and VT6 structural alloys made by pressure welding. It is shown that in pressure welding conditions are in place for producing sound welded joints.

Поступила в редакцию 08.04.2009