



ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ И РАСПЛАВЛЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ (АЛЮМИНИЙ–ТАНТАЛ)

Б. А. ГРИНБЕРГ, д-р физ.-мат. наук, **О. А. ЕЛКИНА**, науч. сотру-д., **А. М. ПАЦЕЛОВ**, канд. физ.-мат. наук, **А. В. ИНОЗЕМЦЕВ**, **А. В. ПЛОТНИКОВ**, науч. сотру-дники, **А. Ю. ВОЛКОВА**, инж. (Ин-т физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург, РФ), **М. А. ИВАНОВ**, д-р физ.-мат. наук (Ин-т металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Укра-ины, г. Киев), чл.-кор. РАН **В. В. РЫБИН** (С.-Петербургский гос. политехн. ун-т, г. Санкт-Петербург, РФ), **Ю. П. БЕСШАПОШНИКОВ**, канд. техн. наук (ОАО «Уралхиммаш», г. Екатеринбург, РФ)

Представлены результаты исследования структуры переходной зоны соединений алюминий–тантал, имеющих разную плоскую и волнообразную форму границ раздела. Независимо от формы границ обнаружены два типа фрагментации: одна подобна фрагментации при взрыве, а другая — при интенсивной пластической деформации. Эти же типы фрагментации ранее наблюдались и в соединениях металлов медь–тантал, не имеющих в отличие от алюминий–тантал взаимной растворимости. Обнаружено расплавление в переходной зоне исследуемых соединений. Структура расплавленных областей существенно зависит от того, имеют ли свариваемые металлы взаимную растворимость или не имеют.

Ключевые слова: сварка взрывом, фрагментация, переходная зона, локальное расплавление, взаимная растворимость, интерметаллид

При всем многообразии материалов и режимов сварки основной является проблема перемешивания в переходной зоне вблизи границы раздела [1, 2]. Именно структура переходной зоны определяет возможность сцепления обоих материалов. Перемешивание происходит в результате сильного внешнего воздействия, которое предполагает большую пластическую деформацию (включая давление, сдвиговые компоненты, поворотные моменты напряжений, неоднородность деформации и т. д.), трение поверхностей, влияние кумулятивной струи и другие факторы. Однако до сих пор остается неясным, как при таком сильном внешнем воздействии успевает произойти перемешивание за столь короткое время, пока длится сварка.

Сварку взрывом проводили ФГУП ЦНИИКМ «Прометей» (С.-Петербург), Волгоградский государственный технический университет, Уральский завод химического машиностроения (Екатеринбург). В зависимости от режима сварки были получены различные соединения, у которых была волнообразная или плоская форма границ раздела.

Первоначально были исследованы сварные соединения металл–интерметаллид с нормальной взаимной растворимостью [3–7]. В качестве металла был выбран технически чистый титан, а в качестве интерметаллида — орторомбический алюминид титана (далее для краткости — алюминид). В зависимости от режима сварки получены различные соединения, которые для удобства были названы следующим образом: A_w , A_p , B_w , B_p , где нижний индекс указывает форму гра-

ницы (плоская, волнообразная). Для соединений А использовали орторомбический сплав, содержащий 16 ат. % Nb, для соединений В — 23,5 ат. % Nb. У любого из указанных соединений расплавленные области представляют собой истинные растворы, в которых перемешивание происходит на атомном уровне.

Для того чтобы выяснить, насколько важным фактором является наличие взаимной растворимости исходных материалов, для сварки взрывом были выбраны металлы (медь–тантал, железо–серебро), которые как в твердом, так и в жидком состояниях практически не имеют взаимной растворимости, причем в жидком состоянии образуют несмешивающиеся взвеси. Обнаружено, что у соединений C_p , C_w медь–тантал [8, 9] и D_p железо–серебро [10] зоны локального расплавления заполнены именно такими коллоидными растворами.

Используя полученные результаты, были выяснены возможные причины хорошего качества соединения медь–тантал, благодаря которым удалось провести сварку взрывом на больших площадях пластин [11], из которых сконструирован химический реактор. Корпус реактора сделан из композита: углеродистая сталь–медь–тантал. Внутренней оболочкой служит тантал и именно его коррозионная стойкость положена в основу всей конструкции. Для коллоидных растворов существует опасность расслоения эмульсии [12]. Однако у зон локального расплавления соединения C_w расслоение не наблюдалось [9]. Суспензия же, состоящая из частиц тантала в медной матрице, напротив, содействует дисперсионному упрочнению соединения.



В настоящей работе, являющейся продолжением работ [8, 9], исследуются сварные соединения E_p и E_w металлов алюминий–тантал с нормальной взаимной растворимостью. Параметры сварки (γ — угол соударения; v_k — скорость точки контакта) для этих соединений приведены на рис. 1. При уменьшении параметров сварки алюминий–тантал ($\gamma = 7,5^\circ$, $v_k = 1900$ м/с) сварка вообще не происходила. На рисунке приведены также параметры сварки для соединений C_p , C_w медь–тантал. Как видно из рис. 1 параметры для соединений E_p и C_p , имеющих плоские поверхности раздела, находятся вблизи нижней границы свариваемости. Если сравнивать соединения E_w и C_w , то параметры сварки для соединения E_w существенно выше. На основе сопоставления результатов, полученных для указанных соединений, авторы попытались выявить процессы, являющиеся общими как для металлов, имеющих взаимную растворимость, так и не имеющих ее. При этом удачным оказалось одновременное использование для одной и той же пары металлов двух соединений с разной формой границы (плоская, волнообразная).

Металлографический анализ проводили на оптическом микроскопе «Eriquant», снабженном вы-

числительным комплексом SIAMS. Микроструктуру исследовали с помощью просвечивающих электронных микроскопов JEM 200CX и CM-30 Super Twin, сканирующего электронного микроскопа Quanta 200 3D. Рентгеновскую съемку выполняли на дифрактометре «ДРОН-3М» в монохроматизированном $Co-K_\alpha$ -излучении.

Изображения поверхности раздела, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), плоские для соединения E_p (рис. 2, а) и волнообразные для соединения E_w , приведены на рис. 2. Для волнообразной поверхности раздела период составляет примерно 300 мкм, амплитуда — 30 мкм.

Фрагментация при взрыве. Явление фрагментации как процесса разделения твердого тела на части (осколки), происходящего под сильным внешним воздействием, известно давно. Оно вошло даже в название оружия: fragmentation warhead, fragmentation shell, fragmentation bomb. Описание разлета осколков связано с именем Н. Мотта [13]. Им, совместно с другими авторами (см., например, работу [14]), было показано, что с помощью методов простой геометрической фрагментации можно описать динамическую фрагментацию цилиндрической оболочки.

Полагаем, что фрагментация при взрыве, исследованная Моттом, происходит и при сварке взрывом. В соединениях A_w титан–алюминид разлет микронных частиц алюминида удивительно похож на происходящий при взрыве разлет осколков, только других размеров [15]. При этом следует отметить, что при взрыве разлет осколков происходит в открытом пространстве, тогда как при сварке взрывом частицы разлетаются в замкнутом пространстве, ограниченном материалом пластин.

Для фрагментации, наблюдаемой при сварке взрывом, ранее нами использовался термин «фрагментация типа дробления» (ФТД). Хотя в обоих случаях наблюдается образование и разлет частиц,

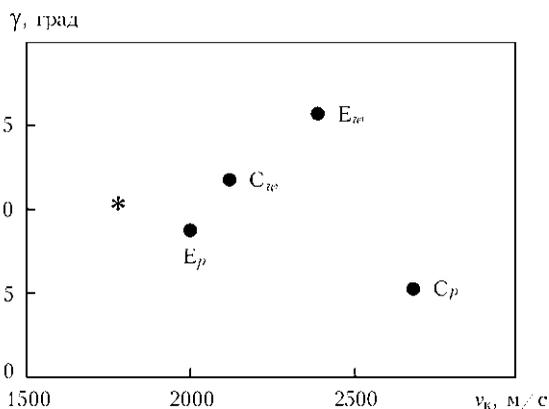


Рис. 1. Параметры сварки для исследуемых соединений (звездочка — режим, принятый в работе [11])

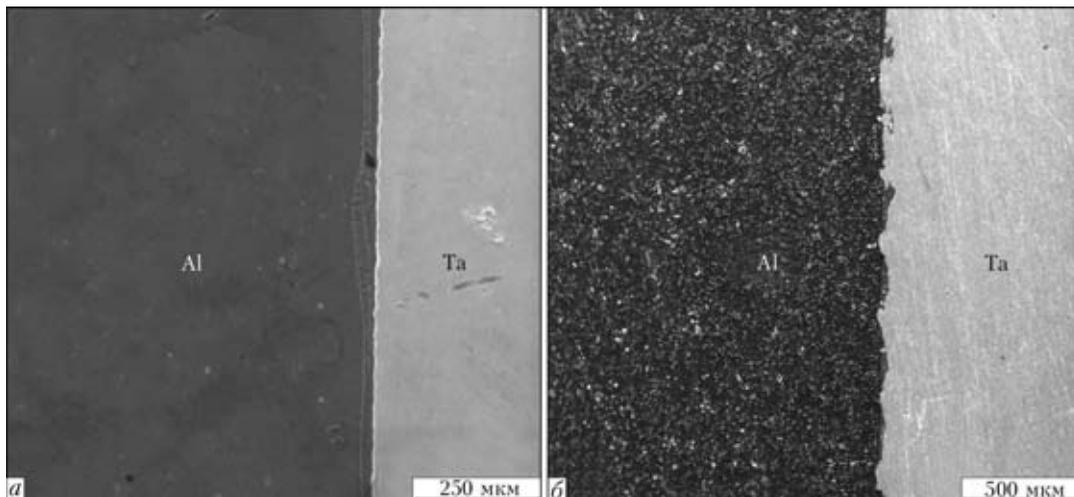


Рис. 2. Поверхность раздела (поперечное сечение) для соединений алюминий–тантал: а — соединение E_p ; б — соединение E_w



эти виды фрагментации не являются тождественными. ФТД представляет собой процесс разделения на частицы, которые либо разлетаются либо стыкуются друг с другом. Как и фрагментация при взрыве, ФТД представляет собой быстротечный процесс, который успевает произойти за время взрыва.

На рис. 3, *a* видно множество частиц тантала произвольной формы на фоне алюминия. Полагаем, что наблюдаемый при сварке взрывом разлет частиц тантала, как и упоминаемый выше разлет частиц алюминидов, подобен разлету осколков при взрыве. На рис. 3, *b* после того, как алюминий был полностью вытравлен, на поверхности тантала видны частицы тантала, которые высыпаются при вытравливании алюминия. На рис. 3, *в* видны крупные частицы тантала, достигающие размеров 20...40 мкм, которые гораздо больше наблюдаемых у соединения E_p . Возможная причина такого различия состоит в том, что соединение E_w получено при более сильном внешнем воздействии, чем соединение E_p (см. рис. 1).

Наблюдение при сварке взрывом разлета частиц подтверждает концепцию о фрагментации, подобной фрагментации при взрыве. ФТД наблюдается как у соединений металл–металл, так и металл–интерметаллид и при нормальной растворимости, и в отсутствии взаимной растворимости свариваемых металлов, независимо от формы границы раздела. Это является доказательством доминирующей роли взрыва при исследуемом способе сварки.

ФТД обеспечивает мощный канал для диссипации подводимой энергии, поскольку поверхность разлетающихся частиц имеет большую суммарную площадь. ФТД возникает в результате микроразрушений и является процессом, альтернативным разрушению. Вместо свободных поверхностей, возникновение которых привело бы к разрушению, происходит связанное с микроразрушением образование поверхностей, которые либо принадлежат разлетающимся частицам либо «залечиваются» при их консолидации. В результате ФТД повышает «живучесть» материала, препятствуя его разрушению даже при таком сильном внешнем воздействии, каким является сварка взрывом.

Фрагментация при интенсивной деформации. При сварке взрывом наблюдается фрагментация еще одного типа, когда вообще не происходит образования новых частиц. Имеется в виду фрагментация [16], существование которой подтверждено многочисленными наблюдениями структуры материалов при сильной деформации. Такая, в известной степени, традиционная фрагментация [15] включает накачку дислокаций (двойников), формирование клубковой, ячеистой и полосовой структур, рекристаллизацию.

В настоящей работе для соединения E_p алюминий–тантал приведены ТЭМ изображения сильно деформированной, но не перемешанной с танталом структуры алюминия: области с высокой дислокационной плотностью (рис. 4, *a*) и рекристаллизованные области (рис. 4, *б, в*). Так, на рис. 4, *б* видно формирование тройного стыка. Изображения сильно деформированной структуры тантала подобны наблюдаемым для соедине-

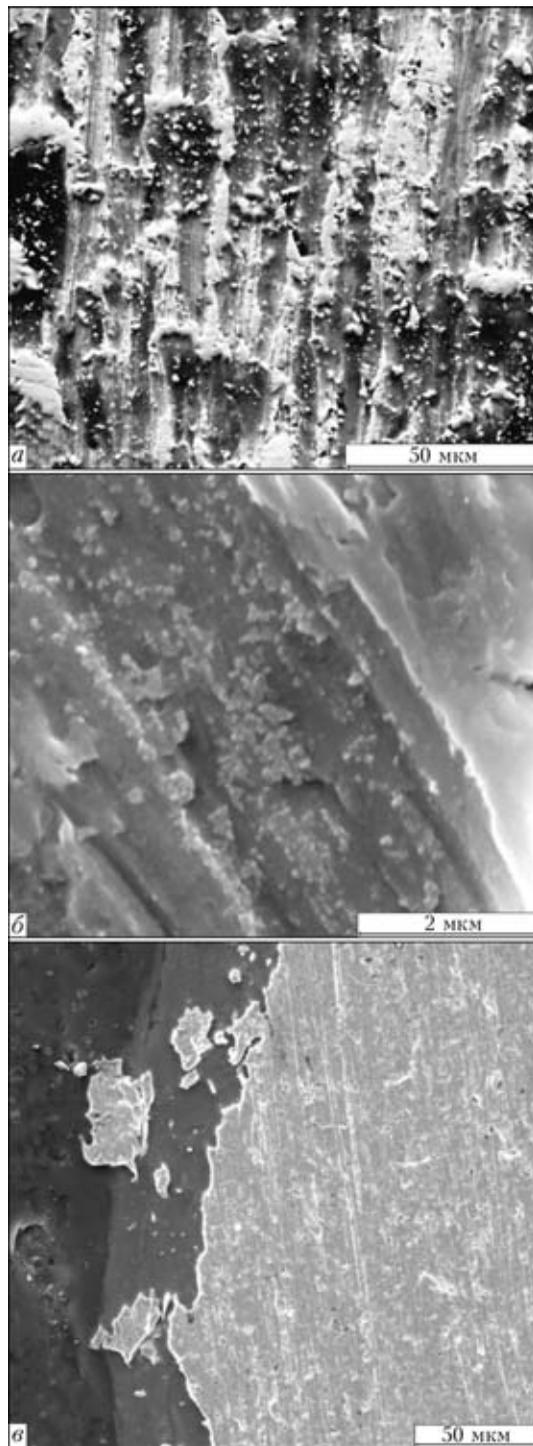


Рис. 3. Микроструктуры продольного сечения переходной зоны (*a, б*) и поперечного сечения (*в*): *a* — соединение E_p ; *б* — соединение E_p , алюминий вытравлен; *в* — соединение E_w

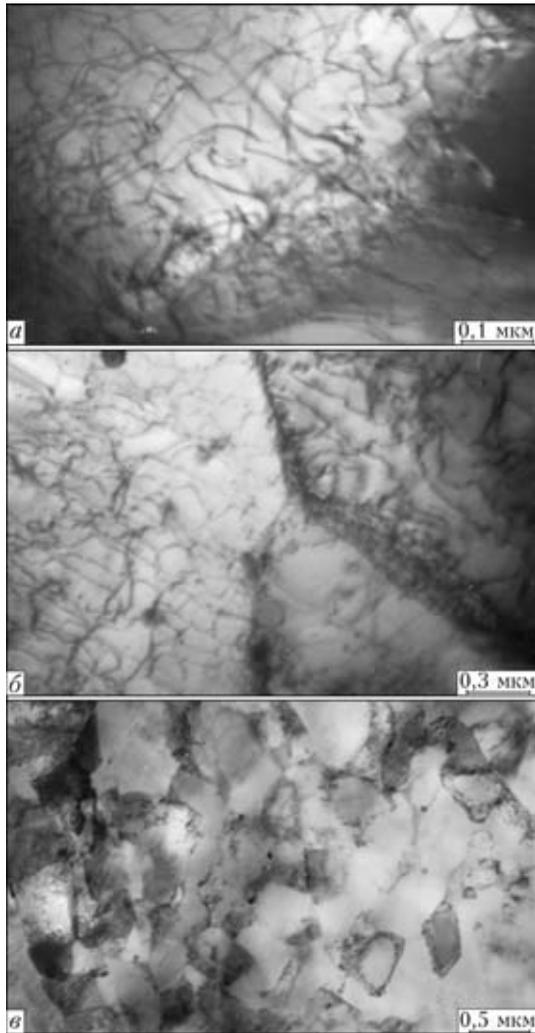


Рис. 4. ТЭМ изображение структуры сильно деформированного алюминия: *а* — наклеп; *б, в* — рекристаллизованные области

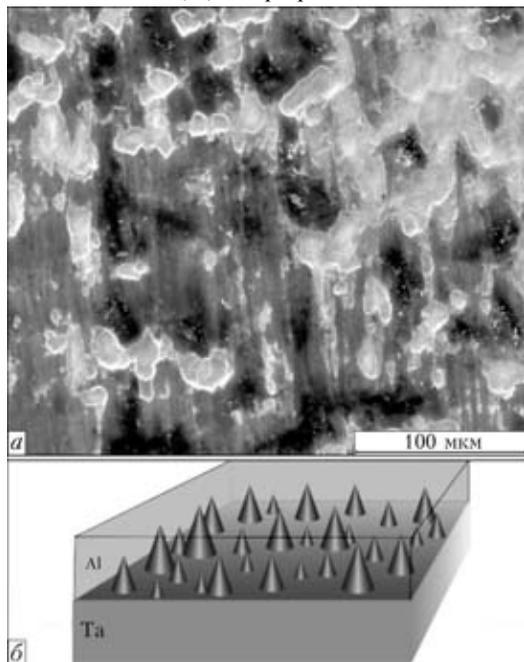


Рис. 5. Переходная зона для соединения E_p : *а* — микроструктура с области тантала, алюминия и зоны локального расплавления (продольное сечение); *б* — схематическое изображение выступов (конусы) на плоской поверхности раздела

ния C_p медь–тантал [15]. Если же сопоставить изображения деформированной структуры алюминия и меди [15], то видно, что рекристаллизация алюминия проходит более полно по сравнению с рекристаллизацией меди. Это связано с тем, что алюминий является, во-первых, легкоплавким, а во-вторых, имеет более высокую энергию дефекта упаковки.

Хотя температура в зоне контакта при сварке взрывом может быть достаточно высокой, но при быстротечном взрывном воздействии протекание термоактивированных процессов, определяющих движение и перестройку дислокаций, затруднено и едва ли возможно. Можно полагать, что эти процессы, как и диффузия, становятся возможными лишь при остаточных температурах и напряжениях. Именно эти процессы определяют традиционную фрагментацию. В отличие от традиционной фрагментации ФТД происходит только в узкой области вблизи границы раздела, где внешнее воздействие является наиболее сильным. Традиционная же фрагментация наблюдается несколько дальше от поверхности раздела. Соответственно ФТД — несравнимо более быстрый процесс, чем традиционная фрагментация. Характерные времена можно оценить примерно как микросекунду для ФТД и $10^8 \dots 10^9$ мкс (время структурной релаксации) для традиционной фрагментации.

Неоднородности поверхности раздела: выступы, зоны локального расплавления. На рис. 5, *а* изображение состоит из пятен трех цветов: белого, черного и серого. Соответственно переходная зона состоит из областей трех типов, что является результатом возникновения выступов на поверхности раздела. Впервые выступы были обнаружены у соединений титан–алюминид [5]. Данные по химическому составу указанных областей, образующих переходную зону, получены с помощью СЭМ по многочисленным замерам. Показано, что белому цвету соответствует зона тантала, черному — зона алюминия, серому — смесь исходных металлов.

Выступы скорее всего возникают в результате бездиффузионного (из-за быстротечности сварки) выброса одного металла в другой (рис. 5, *б*). На самом деле они, конечно, не имеют идеальной конической формы: вершины являются закругленными, а поверхности не такими гладкими. Только образованием выступов можно объяснить картину переходной зоны для соединения E_p на рис. 5, *а*. В результате поверхность представляет собой хаотический рельеф с большим количеством выступов одного материала в другом, аналогично наблюдаемому в работе [8].

У обоих соединений E_p и C_p отчетливо видно выстраивание выступов вдоль некоторого выделенного направления. Можно предположить, что существует связь между самоорганизацией выс-



тупов и волнообразованием, но это требует специальных исследований.

Если бы поверхность раздела была гладкой, то возникали бы проблемы со сцеплением и требовались бы либо реконструкция металлических связей, либо транспорт точечных дефектов. Однако наличие выступов решает эту проблему: выступы играют при этом роль «клиньев», связывая контактирующие материалы между собой. Трение на поверхности выступа, усиленное за счет того, что сам выступ не является гладким, содействует сцеплению поверхностей.

Существует точка зрения [17], что прочность биметалла, получаемого сваркой взрывом, может быть повышена, благодаря предварительному профилированию поверхности неподвижной пластины, которое можно осуществить, например, за счет продольных углублений и выступов, ориентированных примерно параллельно направлению распространения детонации. А. З. Богунов и др. [17] считают, что при наличии выступов можно говорить о клепке взрывом, которая в случае профилирования сопровождается сварку взрывом.

Полагаем, что аналогичная ситуация имеет место при сварке взрывом из-за выступов, возникающих естественным путем, хотя их размеры меньше, чем при предварительном профилировании. В исследуемых нами случаях размеры выступов меняются от микрометра до сотен микрометров, тогда как после профилирования размеры выступов варьировались в пределах от нескольких миллиметров до десятков миллиметров [17].

Более того, можно предположить, что существование нижней границы свариваемости как раз и связано с невозможностью образования выступов на плоской поверхности раздела. Ниже указанной границы выступы либо вообще не образуются, либо оказываются слишком маленькими. Существует, по-видимому, некоторая критическая высота выступов, когда они обеспечивают сцепление поверхностей. По мере увеличения внешнего воздействия выступы растут, выстраиваются в ряды. Далее начинается волнообразование.

Рентгеновская дифрактограмма переходной зоны (рис. 6, а) содержит линии тантала, алюминия и не содержит линий других фаз. Полученные с помощью СЭМ результаты точечных замеров химического состава серой зоны показали, что концентрация тантала здесь не превышает 5 ат. %, так что серая зона представляет собой зону локального расплавления алюминия, легированного танталом. Но для этого необходимо расплавление узкой кромки тантала.

Именно серая зона, являющаяся зоной перемешивания, оказалась чувствительной к тому, имеют ли свариваемые металлы взаимную растворимость или не имеют. При нормальной растворимости они образуют истинные растворы.

При отсутствии взаимной растворимости возникают коллоидные растворы, как в случае медь-тантал [8].

Расплавление вдоль поверхности раздела.

У волнообразной границы в отличие от плоской поверхность раздела является гофрированной, так что ее продольное сечение представляет собой набор чередующихся полос обоих материалов с почти параллельными границами. Продольное сечение переходной зоны у соединения E_w алюминий-тантал, приведенное на рис. 7, а, на самом деле представляет собой слегка наклонное сечение из-за малой амплитуды волнообразной поверхности. На продольном сечении переходной зоны у того же соединения после того, как был вытравлен алюминий (рис. 7, б), видны полосы тантала, а также частицы, которые высыпались после растворения алюминия.

Для сравнения на рис. 8, а приведено продольное сечение переходной зоны для соединения C_w медь-тантал. Система полос на рис. 7, а и 8, а не является регулярной. Если по приведенным изображениям восстановить поверхность раздела, то в обоих случаях она будет несовершенной. На рис. 8, а отчетливо видны многочисленные зоны локального расплавления, имеющие вихреобразную структуру. Как видно из рис. 8, б, для обоих соединений C_p и C_w медь-тантал независимо от формы границы зона локального расплавления заполнена коллоидным раствором.

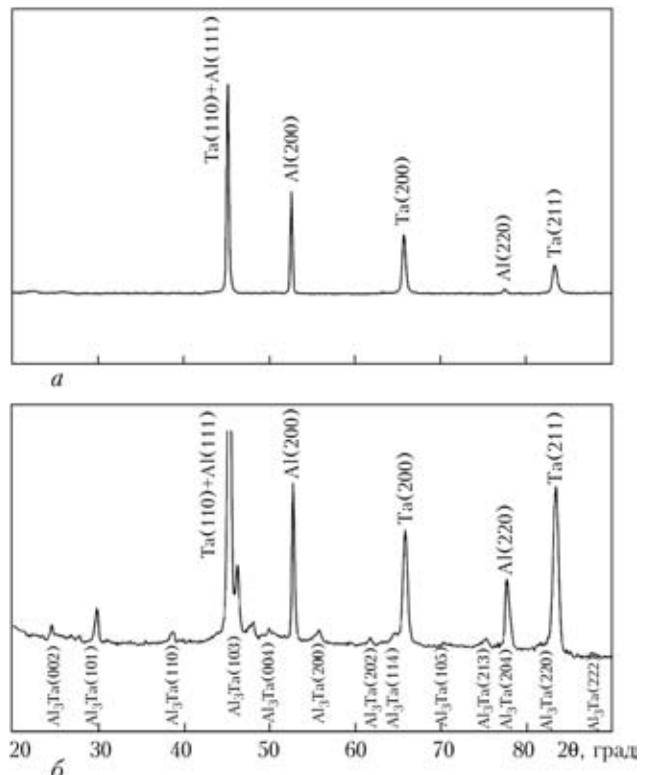


Рис. 6. Дифрактограмма переходной зоны (продольная поверхность шлифа): а — соединение E_p ; б — соединение E_w

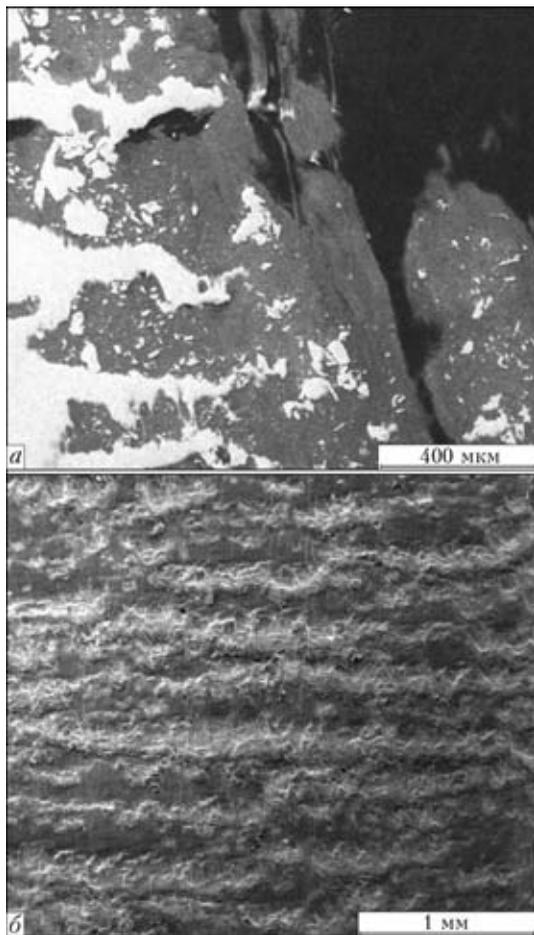


Рис. 7. Микроструктуры переходной зоны для соединения E_w , продольное сечение: *a* — полосы алюминия и тантала; *б* — алюминий полностью вытравлен

На рис. 8, *a* видно множество выступов разных размеров от нескольких микрометров до 100...150 мкм. Некоторые из них начинаются на одной полосе, пересекают другую и образуют перетяжку между полосами. О роли выступов, содействующих образованию соединений, отмечалось выше при анализе соединения E_p .

Как видно из рис. 7 и 9, у соединения E_w в отличие от S_w не наблюдаются зоны локального расплавления, т. е. изолированные расплавленные области. Вместо них на рис. 9, если двигаться от твердой фазы алюминия, видны слои расплавленного алюминия, вначале не содержащие, а затем содержащие частицы другой фазы (с малой, затем с большой плотностью частиц). Размеры частиц изменяются в широких пределах: от 50 до 500 нм. Обращает на себя внимание достаточно резкая огранка частиц. Далее идет кромка тантала, наблюдаемая на рис. 9, *a*, *б*, как светящаяся линия. Такую светящуюся границу («жгут»), которая представляет собой расплавленную пленку, авторы наблюдали ранее у соединения A_p титан-алюминид [5].

На дифрактограмме, снятой с продольной поверхности шлифа (см. рис. 6, *б*), отчетливо видно, как регистрируются рентгеновские пики не только

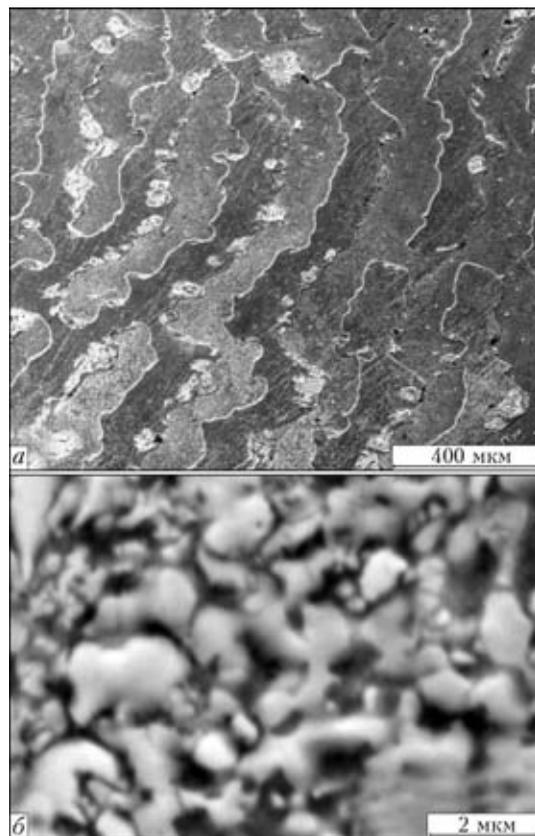


Рис. 8. Микроструктуры продольного сечения поверхности раздела для соединения S_w : *a* — полосы меди и тантала, видны многочисленные зоны локального расплавления; *б* — зона локального расплавления

от тантала и алюминия, но от интерметаллической фазы Al_3Ta . Соединения Al_3Ta имеет тетрагональную кристаллическую решетку, пространственная группа 14/mmm, структурный тип Al_3Ti . Именно частицы Al_3Ta видны на рис. 9, *б*. Очевидно, что для протекания интерметаллической реакции требуется расплавление тантала. Действительно, на рис. 9, *в* видны сферолиты, которые являются свидетелями расплавления тантала. Подобную структуру имеет упоминаемая выше расплавленная пленка для соединения A_p титан-алюминид, где также наблюдались сферолиты (см. рис. 5, *д* в работе [5]).

На рис. 9, *г* приведена структура слоя, содержащего интерметаллические включения, после отжига при 500 °С в течение 1 ч. Видно, что структура является неоднородной, но в целом произошло укрупнение частиц по сравнению с наблюдаемыми на рис. 9, *б*.

У соединения E_w пленка включает кромку тантала шириной 2...2,5 мкм и упоминаемый выше расплавленный слой с шириной примерно 40 мкм (30 мкм с частицами, 10 мкм — без частиц). Наблюдаемая структура переходной зоны формируется следующим образом: вначале расплавление алюминия как более легкоплавкого, затем подплавление поверхности тантала, образование твердого раствора на основе алюминия, по достиже-



нию определенных концентраций образование частиц интерметаллической фазы. Указанные частицы сохраняются при растворении алюминия и наблюдаются (см. рис. 7, б) наряду с частицами тантала.

Однако прежде чем в соответствии с предложенным выше сценарием начинается расплавление, происходит самый быстротечный процесс: разлет твердых частиц тантала, которые видны на рис. 3, в, 7, а, 9, а.

Тот факт, что у соединения E_w расплавленная область представляет собой пленку на поверхности раздела, тогда как у соединения E_p — изолированные зоны согласуются с интенсификацией режима сварки, используемого для получения соединения E_w по сравнению с соединением E_p (см. рис. 1). С этим же связано наблюдение интерметаллических включений у соединения E_w и их отсутствие у соединения E_p .

Расплавление и склеивание. Сильное взрывное воздействие при получении соединения E_w свидетельствует о приближении к верхней границе свариваемости. В этом случае расплавление становится опасным для сплошности соединения. Однако, как полагают авторы, в благоприятном случае (при не слишком высоких значениях параметров взрывного воздействия) расплавление,

напротив, содействует образованию соединения, благодаря склеиванию поверхностей. В этом отношении чрезвычайно убедительной является микрофотография (см. рис. 9, а), которая демонстрирует переход от алюминия к танталу, происходящий через расплавленный алюминий, алюминий с частицами, расплавленный тантал. Очевидно, что такой переход облегчает сцепление алюминия и тантала по сравнению с резким твердофазным переходом.

Для других материалов, а именно полимеров, лучшим клеящим веществом считается раствор или расплав данного полимера [18]. Это в какой-то степени подтверждает возможность склеивания также исследуемых металлов за счет их расплавления при сварке взрывом, поскольку при расплавлении сразу решаются проблемы смачивания, адгезии и защиты от контактной коррозии. Обратим внимание на следующее обстоятельство. Алюминий — один из немногих металлов, склеивание которого невозможно без предварительной химической обработки поверхности [19]. Одной механической обработки оказывается недостаточно. Однако пластина алюминия перед сваркой не подвергалась химической обработке. Тем не менее сварное соединение с танталом было получено. Здесь, скорее всего, проявилась замеча-

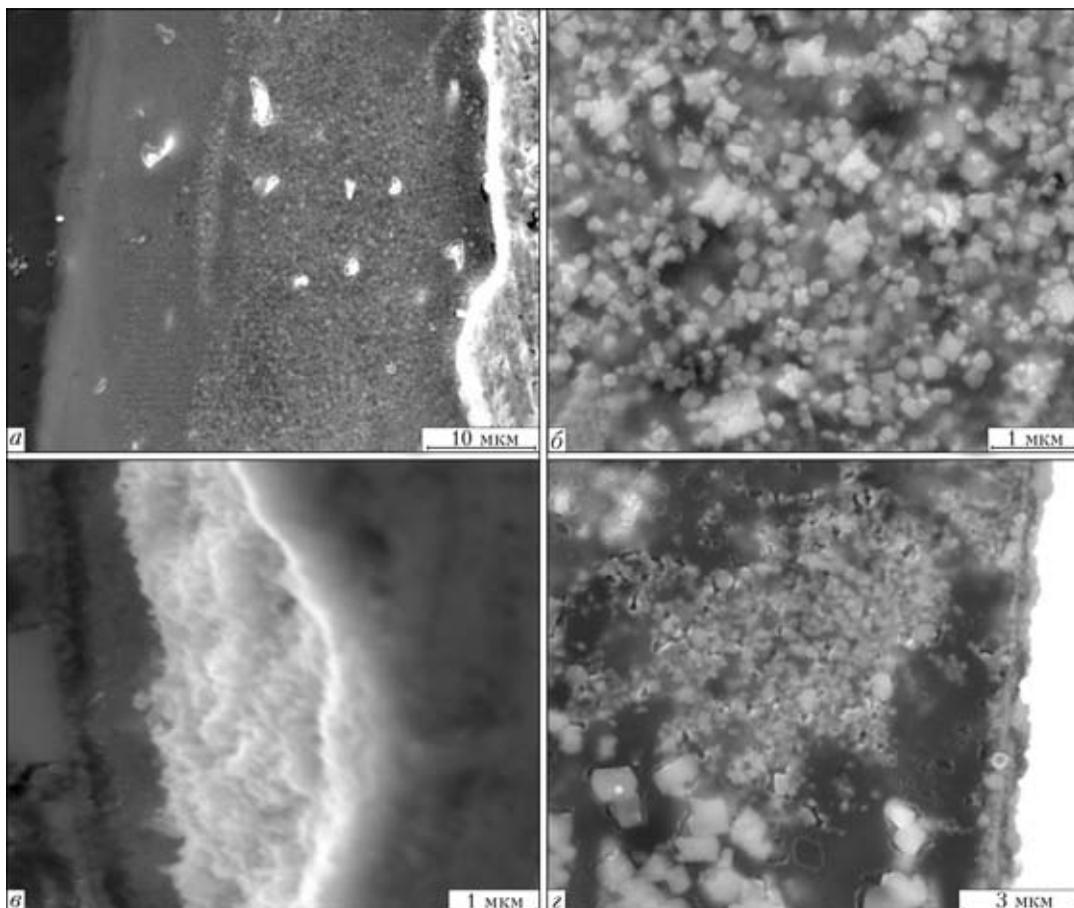


Рис. 9. Микроструктуры поперечного сечения переходной зоны для соединения E_w : а — слои расплавленного алюминия без частиц и с частицами; б — частицы интерметаллида Al_3Ta в расплаве алюминия; в — сферолиты; г — после отжига



тельная особенность сварки взрывом: самоочищение свариваемых поверхностей благодаря кумулятивному эффекту [1, 20].

Известно, что пленка клеящего вещества не должна по толщине превышать определенное значение [18]. В применении к сварным соединениям это может означать ограничение на толщину расплавленной области. При интенсификации режима сварки и приближении к верхней границе свариваемости будет достигнута критическая толщина расплавленной области, при которой склеивание становится невозможным.

Таким образом, сварка взрывом в той или иной степени вбирает в себя и другой способ соединения материалов, а именно их склеивание путем образования расплавленных областей.

Электронно-микроскопические исследования выполнены в Центре коллективного пользования электронной микроскопии УрО РАН.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант № 10-02-00354, проекта Президиума РАН № 12-П-2-1053, проектов УрО РАН № 12-У-2-1011, 12-2-006-УТ и Государственной целевой программы Украины «Нанотехнологии и наноматериалы» № 1.1.1.3-4/10-Д.

1. Дерибас А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. — Новосибирск: Наука, 1980. — 220 с.
2. Lysak V. I., Kuzmin S. V. Lower boundary in metal explosive welding. Evolution of ideas // J. Mat. Proc. Technol. — 2012. — 212. — P. 150–156.
3. Биметаллическое соединение орторомбического алюминид титана с титановым сплавом (диффузионная сварка, сварка взрывом) / В. В. Рыбин, В. А. Семенов, И. И. Сидоров и др. // Вопр. материаловедения. — 2009. — 59, № 3. — С. 17–31.
4. Образование вихрей при сварке взрывом (титан — орторомбический алюминид титана) / В. В. Рыбин, Б. А. Гринберг, О. В. Антонова и др. // Физика мет. и металлостроение. — 2009. — 108, № 4. — С. 371–384.
5. Структура зоны соединения титана с орторомбическим алюминидом титана при сварке взрывом. I. Границы раздела разных типов / В. В. Рыбин, Б. А. Гринберг, М. А.

- Иванов и др. // Деформация и разрушение материалов. — 2010. — № 11. — С. 27–33.
6. Структура зоны соединения титана с орторомбическим алюминидом титана при сварке взрывом. II. Локализованные вихревые расплавленные зоны / Б. А. Гринберг, М. А. Иванов, В. В. Рыбин и др. // Там же. — 2010. — № 12. — С. 26–34.
7. Nanostructure of vortex during explosion welding / V. V. Rybin, B. A. Greenberg, M. A. Ivanov et al. // J. Nanosci. and Nanotechnol. — 2011. — 11, № 10. — P. 8885–8895.
8. Особенности формирования структуры переходной зоны соединения Cu–Ta, полученного сваркой взрывом / Б. А. Гринберг, О. А. Елкина, О. В. Антонова и др. // Автомат. сварка. — 2011. — № 7. — С. 24–30.
9. Неоднородности поверхности раздела при сварке взрывом / Б. А. Гринберг, М. А. Иванов, В. В. Рыбин и др. // Физика мет. и металлостроение. — 2012. — 113, № 2. — С. 187–200.
10. Сварка взрывом: процессы перемешивания металлов, не имеющих взаимной растворимости (железо–серебро) / Б. А. Гринберг, М. А. Иванов, В. В. Рыбин и др. // Там же. — 2012. — 113, № 11 (В печати).
11. Frey D., Banker J. Recent successes in tantalum clad pressure vessel manufacture: A new generation of tantalum clad vessels // Proc. of corrosion solutions conf., 2003, USA. — Wah Chang, 2003. — P. 163–169.
12. Коллоидная химия / М. И. Гельфман, О. В. Ковалевич, В. П. Юстратов и др. — СПб.: Лань, 2004. — 336 с.
13. Mott N. F. Fragmentation of shell cases // Proc. Royal Soc. A. — 1947. — 189, Jan. — P. 300–308.
14. Grady D. Fragmentation of rings and shells. The legacy of N. F. Mott. — Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg, 2006. — 361 p.
15. Процессы фрагментации при сварке взрывом / Б. А. Гринберг, М. А. Иванов, В. В. Рыбин и др. // Деформация и разрушение материалов. — 2012. — № 8. — С. 2–13.
16. Рыбин В. В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. — М.: Металлургия, 1986. — 224 с.
17. Богунов А. З., Кузовников А. А. Получение биметалла алюминий–сталь с профилированной контактной границей // Автомат. сварка. — 2009. — № 11. — С. 74–77.
18. Фрейдин А. С., Турусов П. А. Свойства и расчет адгезионных соединений. — М.: Химия, 1990. — 256 с.
19. Капелюшник И. И., Михалев И. И., Эйдельман Б. Д. Технология склеивания деталей в самолетостроении. — М.: Машиностроение, 1972. — 224 с.
20. Захаренко И. Д. Сварка металлов взрывом. — Минск: Наука і тэхніка, 1990. — 205 с.

Presented are the results of investigation of structure of transition zone of aluminium-tantalum joints, having different flat and wavy shape of the interfaces. Independently of the shape of boundaries, two types of fragmentation were revealed: one of them is similar to fragmentation in explosion, another one — at intensive plastic deformation. The same types of segmentation were earlier observed also in joints of copper-tantalum metals, having no mutual solubility unlike aluminium-tantalum. Melting was observed in transition zone of joints being investigated. Structure of melted areas depends greatly on the availability of mutual solubility in metals being welded.

Поступила в редакцию 03.07.2012