



ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Чл.-кор. НАН Украины А. Я. ИЩЕНКО, Ю. А. ХОХЛОВА, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрена методика оценки механических свойств образцов малого размера, основанная на определении микротвердости по глубине внедрения индентора Берковича при непрерывном вдавливании. Проведена оценка технических возможностей данной методики для определения свойств неразъемного соединения интерметаллида γ -TiAl при диффузионной сварке. Получены статистические данные о локальном распределении микротвердости, определены значения твердости по Берковичу, модуля Юнга и коэффициента пластичности структурных составляющих в зоне диффузионного соединения.

Ключевые слова: диффузионная сварка, сплав γ -TiAl, алюминид титана, фольга, сварное соединение, механические испытания, индентор Берковича, микротвердость, модуль Юнга, коэффициент пластичности

Развитие новых способов сварки перспективных материалов требует новых подходов к оценке их механических свойств. Полученные сварные соединения характеризуются малыми размерами и многообразием структурных составляющих. Испытания таких объектов на прочность обычными разрушающими методами весьма проблематичны, что сопряжено с влиянием дополнительных внутренних напряжений, возникающих при изготовлении изделий, что снижает точность результатов исследования. В связи с этим предлагается методика оценки механических свойств диффузионных соединений, основанная на определении микротвердости по глубине внедрения индентора Берковича при непрерывном вдавливании [1–5]. Указанная методика применима для неразрушающего контроля изделий и позволяет изучать локальные изменения свойств материалов, включая градиент микротвердости в зонах термического влияния сварных соединений.

Для определения механических свойств диффузионных соединений на микроструктурном уровне использовали трехгранный индентор Берковича [6]. Он представляет собой алмазную пирамиду с основанием в виде равностороннего треугольника; ребра пирамиды образуют с осью угол $76^{\circ}54'$, а грани — угол 65° . Преимуществом индентора такой формы является его остроконечность, т. е. отсутствие гребня на вершине, неизбежного для пирамид Виккерса и Кнупа. Наличие такого гребня приводит к нарушению геометрического подобия отпечатков и в свою очередь — к от-

клонению микротвердости от действительных ее значений в области микроотпечатков. Основными преимуществами трехгранной пирамиды являются простота его изготовления и остроконечность, позволяющая измерять микротвердость таких твердых тел, как алмазы. При этом отпечатки могут иметь минимальные размеры. Индентор Берковича стандартизирован (ISO 14577-2) как инструмент для микро- и наноиндентирования. По данным работы [7], тестирование микротвердости таким индентором является наиболее применяемым аналитическим методом контроля механических свойств современных материалов с тонкими структурами. Точность цифровой техники позволяет осуществлять исследование механических свойств микро неоднородностей структуры материала. Во время испытаний регистрируется зависимость глубины внедрения индентора от нагрузки на него как при ее росте, так и при снижении. Это позволяет получить значения «невосстановленной» твердости, что исключает влияние упругого восстановления материала на фактическое значение микротвердости [8, 9].

В работе проведена оценка технических возможностей индентирования для определения микромеханических свойств диффузионных соединений γ -

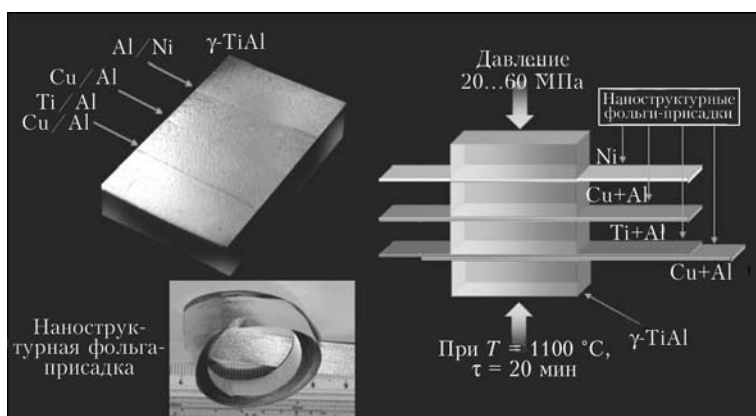


Рис. 1. Макет диффузионного сварного соединения интерметаллидного сплава γ -TiAl

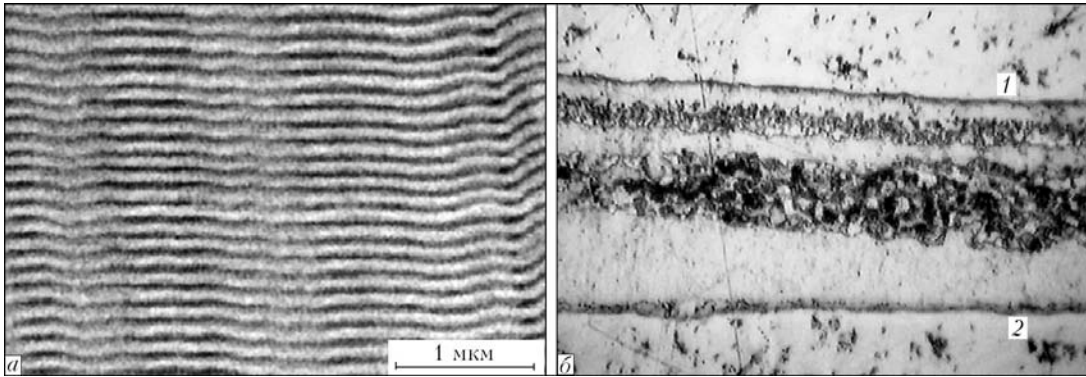


Рис. 2. Слоистая структура присадочной наноструктурной фольги (растровая электронная микроскопия) (а) и микрофотография (б, $\times 600$) прослоек Ti/Al (верхний крупнозернистый слой 1) и Cu/Al (нижний слой 2) в диффузионном сварном соединении

TiAl, полученных с применением наноструктурных метастабильных присадочных фольг (рис. 1). γ -TiAl — жаропрочный материал (ГЦТ решетка сохраняется при 1440 °С) с высоким уровнем сопротивления окислению и горению при температуре до 900 °С, с низкой плотностью (3,8...4,0 г/см³) и повышенным модулем упругости (160...175 ГПа при комнатной температуре и 150 ГПа при 900...1000 °С) является новым перспективным материалом для производства авиакосмической техники и альтернативой титановым и никелевым суперсплавам. Однако его промышленное использование сдерживается по причине его хрупкости, низкой пластичности и большого сопротивления деформированию.

Используемые в соединении присадочные фольги Cu/Al, Ni, Ti/Al являются многослойными метастабильными наноструктурами [10], состоящими из чередующихся нанослоев различных материалов, толщина слоев составляет менее 100 нм, их количество — несколько тысяч (рис. 2). Благодаря возможности плотного сопряжения слоев из различных материалов такие наноламинаты являются уникальными материалами, сочетающими качество как слоистых систем, так и специфические свойства нанообъектов. Такие многослойные метастабильные структуры состоят из компонентов, которые могут вступать в экзотермическое взаимодействие между собой [11]. При определенных температурных условиях в такой системе инициируется процесс самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). В результате этого исходная слоистая структура исчезает, уступая место фазам новых химических соединений, образованных вследствие взаимодействия продуктов синтеза.

Многослойные метастабильные материалы отличаются рядом преимуществ: монолитностью исходной структуры и отсутствием пор в про-

дуктах реакции; высокой однородностью состава продукта реакции; малой толщиной исходных слоев, что позволяет реализовать процессы СВС с очень высокой скоростью; отсутствием между слоями оксидных пленок и хорошим контактом между слоями. Перечисленные выше особенности делают перспективным их применение в технологии соединения материалов в твердой фазе, основанной на СВС.

Объектом исследования является четырехслойное сварное соединение сплава γ -TiAl (толщина листов 4 мм), полученное диффузионной сваркой (ДСВ) в течение 20 мин при 600 °С с применением наноструктурированных метастабильных присадочных фольг Cu/Al, Ni/Al и двойной присадки Cu/Al+Ti/Al. Толщина внутренних слоев фольги Ti/Al для титана равна 23 нм, для алюминия — 24 нм. Толщина присадочных фольг в соединениях в среднем составляет от 0,015 до 0,050 мм.

В исследованиях используется прибор «Микрон-гамма» (рис. 4), предназначенный для определения механических свойств материалов методами непрерывного вдавливания индентора, сканирования индентором (склерометрия), металлографии и топографии [12].

Компьютеризированная микронзондовая система прибора (рис. 3) включает индентор Берковича, шток с датчиком регистрации глубины вне-

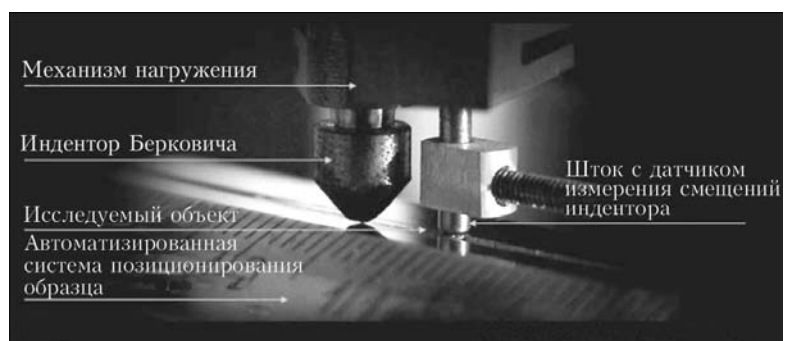


Рис. 3. Компьютеризированная система с индентором Берковича для испытания механических свойств диффузионных сварных соединений



Рис. 4. Прибор «Микрон-гамма»

рения индентора, механизм нагружения с широким диапазоном нагрузок, видеокамеру с разрешающей способностью 5 Мпс и микроскоп (с увеличением 200...1200), автоматизированную систему позиционирования образца с программой цифровой навигации по исследуемому объекту, позволяющую произвести прицельный укол индентором в выбранный микрообъект структуры. Для уменьшения вибрации прибор установлен на виброизолирующей подставке. Перемещение индентора, замеренное с точностью 1 нм, позволяет проводить испытания при нагрузке от 0,1 до 500 г и небольшой глубине отпечатков. Полученная диаграмма нагружение–разгрузка состоит из 2000

точек (рис. 5, *a*). Обработка результатов индентирования осуществляется специализированной программой, которая позволяет автоматически определять значения твердости и модуля Юнга при регистрации перемещения вершины индентора.

В данном испытании твердость определяли по максимальной глубине внедрения индентора при нагрузке 20 г. Каждая серия уколов состояла из 16 последовательных внедрений индентора с шагом 20 мкм. Скорость нагружения составляла 2 г/с без выдержки. Испытания проводили по схеме: нагружение/разгрузка без выдержки. Расчетные данные сведены в электронную таблицу.

При металлографическом анализе соединения с наноструктурной прослойкой системы Cu/Al обнаруживается частичная, а отдельных местах и полная диффузия прослойки в основной материал (рис. 5, *б*). Максимальное значение микротвердости для этого соединения составило 1,2 ГПа при модуле упругости Юнга $E = 86,9$ ГПа и коэффициенте пластичности $k_{\text{пласт}} = 0,755$, а минимальное — 0,536 ГПа при $E = 61,6$ ГПа и $k_{\text{пласт}} = 0,853$. При металлографическом анализе соединения с наноструктурной прослойкой Ni/Al видимой диффузии не обнаружено (рис. 5, *в*). Заметна четко выделенная рекристаллизационная зона на границе основного материала и прослойки с повышенными значениями микротвердости. Максимальное значение микротвердости этой зоны

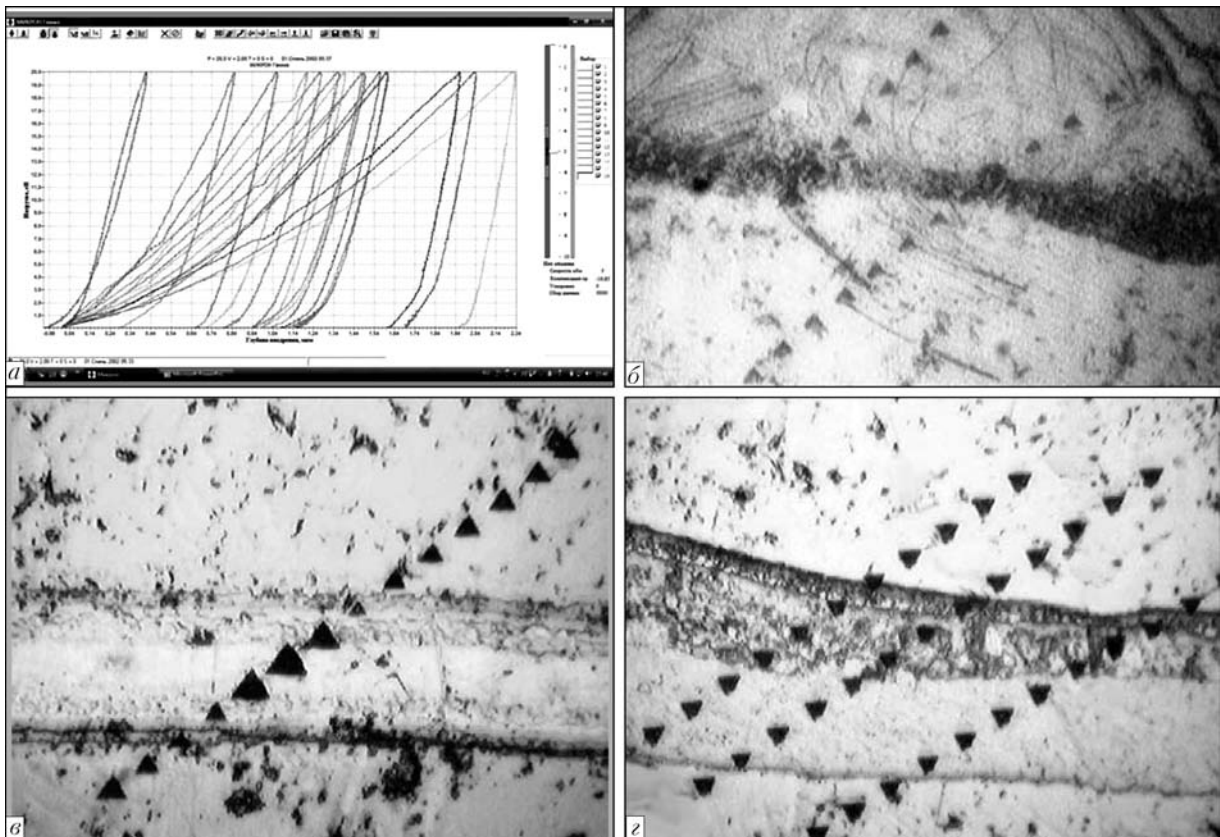


Рис. 5. Диаграмма нагружение–разгрузка при индентировании соединения с прослойкой Ni/Al (*a*) и микрофотографии ($\times 600$) наноструктурных прослоек Cu/Al (*б*), Ni/Al (*в*) и Cu/Al с Ti/Al (*з*) с отпечатками (\blacktriangledown) индентора



составляет 1,905 ГПа при $E = 121,9$ ГПа и $k_{\text{пласт}} = 0,705$, а минимальное значение микротвердости — 0,432 ГПа зафиксировано в центральной части прослойки при $E = 89,8$ ГПа и $k_{\text{пласт}} = 0,938$. При металлографическом анализе соединения с двумя наноструктурными прослойками систем Cu/Al и Ti/Al заметна незначительная диффузия прослойки Cu/Al с образованием крупнозернистой интерметаллидной прослойки темного цвета и формирование однородного шва из прослойки Ti/Al (рис. 5, з). Градиент изменения микротвердости и модуля упругости для этих прослоек незначительный. Среднее значение микротвердости прослойки системы Ti/Al составило 1,972 ГПа при усредненном $E = 159,8$ ГПа и $k_{\text{пласт}} = 0,781$, а прослойки системы Cu/Al — 1,180 ГПа при $E = 120,3$ ГПа и $k_{\text{пласт}} = 0,823$.

Таким образом, получены статистические данные локального распределения микротвердости в зоне термического воздействия сварного диффузионного соединения сплава γ -TiAl. Точность цифровой видеонавигации и прицельного укола индентором позволила выявить и проиндентировать микронеоднородности структуры в виде отдельных выделений интерметаллидов в прослойке, а также зоны с различными значениями микротвердости. Нежелательное изменение микротвердости необходимо рассматривать и учитывать в комплексе с изменениями модуля упругости Юнга и коэффициента пластичности.

Suggested is the procedure for evaluation of micromechanical properties of small-size specimens, based on determination of microhardness in depth of penetration of the Berkovich indenter in a case of continuous indentation. Technical capabilities of this method have been assessed by evaluating properties of the γ -TiAl joints made by diffusion bonding. Statistical data on local distribution of microhardness have been generated, and values of Berkovich hardness, Young modulus and ductility coefficient of structural components within the zone of the diffusion bond have been determined.

Поступила в редакцию 01.04.2008

ПРИМЕНЕНИЕ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ В УНИКАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЯХ И МАССОВОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

12 марта 2009

г. Москва, Россия

Приглашаем Вас принять участие в Международной научно-практической конференции, которая пройдет в Международном выставочном центре «Крокус Экспо» в рамках выставки METALBUILD 2009.

Организатор конференции: ЦНИИПСК им. Мельникова, выставочный оператор М-ЭКСПО

Спикер конференции: Эдуард Айрумян, главный специалист ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова»

Основные темы

- Расчет конструкций и проектирование
- Гнутые и гнуто-сварные профили
- Изготовление, монтаж и возведение металлических конструкций
- Современные технологии изготовления и монтажа
- Защита от коррозии и огнестойкость конструкций

Контакты: +7 (495) 956 4822; +7 (903) 203 4176; www.metal-build.ru