

Сварка давлением наноструктурных листов из титанового сплава Ti-6Al-4V в условиях низкотемпературной сверхпластичности

Мухаметрахимов М.Х. [†]

[†] msia@mail.ru

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Халтурина 39, 450001 г. Уфа

Pressure welding of nanostructured Ti-6Al-4V titanium alloy sheets under conditions of low temperature superplasticity

M.Kh. Mukhametrakhimov

Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, Khalturin St. 39, 450001 Ufa

Исследована свариваемость нанокристаллического титанового сплава Ti-6Al-4V в области температур 650...750°C. Установлена деформационная природа формирования твердофазного соединения при сварке давлением нанокристаллического сплава Ti-6Al-4V в условиях низкотемпературной сверхпластичности (СП). С понижением температуры сварки давлением от 750°C до 650°C прочность на сдвиг как основного материала, так и материала с твердофазным соединением (ТФС), заметно повышается.

Ключевые слова: низкотемпературная сверхпластичность, нанокристаллический титановый сплав, твердофазное соединение, сварка давлением, прочность, механические свойства, электронная микроскопия

The solid-phase weldability of titanium microcrystalline structures allow Ti-6Al-4V in the temperature range 650...750°C is studied. The deformation origin of solid state joining of the nanostructured alloy during pressure welding in the conditions of low temperature superplasticity. As the pressure welding temperature is decreased from 750°C to 650°C the shear strength of both the base material and the SSB material is noticeably increased.

Keywords: low temperature superplasticity, nanocrystalline titanium alloy, solidphase joining, pressure welding, strength, mechanical properties, electron microscopy.

1. Введение

Рост потребности в новой технике и развитие современного машиностроения связаны с изысканием новых экономически эффективных технологий формообразования деталей сложной конфигурации из традиционно труднообрабатываемых материалов. Одним из перспективных технологических направлений машиностроения является сварка давлением совмещенная со сверхпластической формовкой (СПФ/СД) [1,2]. Однако, при использовании диффузионной сварки, являющейся разновидностью сварки давлением, не всегда возможно получение гарантированного высокого качества ТФС на уровне основного материала. Дело в том, что диффузионная сварка – это структурно неконтролируемый процесс, осуществляемый при температуре, как правило, не ниже $0,8T_{пл}$ и напряжениях, меньших предела текучести материала. Решение задачи получения гарантированного качества ТФС возможно при сварке давлением в условиях традиционной сверхпластичности (СП) [3].

На современном этапе развития технологий горячего формообразования титановых сплавов весьма актуаль-

ным является вопрос снижения температуры осуществления технологического цикла. В частности, известно, что температура 760°C, по мнению зарубежных специалистов [4], могла бы рассматриваться как оптимизированная температура для серийной технологии изготовления изделий сложной конфигурации авиационного назначения путем сверхпластической формовки (СПФ) и СД из листовых заготовок титанового сплава Ti-6Al-4V, являющегося аналогом российского сплава ВТ6.

Применение нанокристаллических (НК) материалов [5,6] повышает актуальность использования сварки давлением в сверхпластичном состоянии как одной из наиболее приемлемых технологий их обработки для достижения высоких механических свойств изделий, полученных ТФС двух или одновременно нескольких заготовок в условиях низкотемпературной СП.

Целью работы являлось изучение свариваемости листовых титановых заготовок из НК сплава Ti-6Al-4V в температурном интервале проявления низкотемпературной СП.

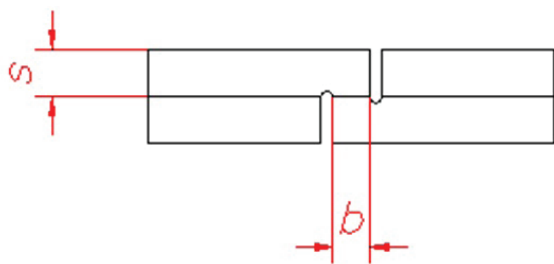


Рис. 1. Поперечное сечение образца для испытаний на сдвиговую прочность.

2.Материал и методика исследования

Материалом для исследования был выбран промышленный двухфазный титановый сплав Ti-6Al-4V стандартного химического состава по ГОСТ 19807-91. Исходные заготовки сплава имели МК структуру со средним размером зерен 3-5 мкм. В результате всестороннейковки исходных заготовок в них была сформирована наноструктура со средним размером зерен/субзерен около 0,3 мкм [7]. Соединение листовых заготовок, собранных в пакет, выполняли в штамповом блоке, включающем силовые плиты и крепежные элементы [8]. Штамповый блок устанавливали в вакуумную печь СНВЭ-1,3.1/16-ИЗ-УХЛЧ.1. Полученную таким образом сборку стягивали силовыми элементами штампа, а затем устанавливали в вакуумную печь. Сварку в твердом состоянии осуществляли при температурах 650-750°C в течение 120 мин. приложением газообразного аргона (давление 5 МПа) из штуцера через гибкую мембрану на свариваемые образцы. Качество ТФС оценивали по результатам механических испытаний на сдвиг по методике подробно представленной в [9], а также металлографических исследований с помощью сканирующего электронного микроскопа «TESCAN MIRA3 LMU» по относительной объемной доле (протяженности) пор в поперечном сечении зоны соединения. Средний размер зерен определяли методом секущих [10]. Для механических испытаний использовали универсальную машину фирмы «Инстрон» модели 5982.

Образцы вырезались таким образом, что условная линия ТФС располагалась в средней части образца параллельно оси растяжения (рис. 1).

Механические свойства исследуемого сплава на сдвиговую прочность определяли при комнатной температуре.

Успешное решение ряда сложнейших технологических задач производства возможно с использованием процесса твердофазной деформационной сварки объемных полуфабрикатов в НК состоянии [11,12,13,14,15,16,17] на основе эффекта низкотемпературной СП. Поэтому эксперименты по соединению листовых заготовок из НК сплава Ti-6Al-4V проводили при повышенном сварочном давлении (5 МПа) в интервале температур от 650 - 750°C.

3.Результаты и их обсуждение

Металлографические исследования показали, что в зоне ТФС присутствуют преимущественно единичные поры сферической формы и относительная протяженность микропор в зоне ТФС при температуре 650°C составила 0,5, при 700°C – 0,1 и с повышением температуры до 750°C уменьшилась до 0,06. При этом средний размер зерен в образцах, соединенных при 750°C, возрос до 3 мкм (рис. 2 а,б и в).

Результаты механического испытания на сдвиг при комнатной температуре образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V с НК структурой, соединенных давлением при температурах 650,700 и 750°C представлены на рис.3.

Результаты механических испытаний при комнатной температуре показали, что сдвиговая прочность ТФС составила примерно 98% от соответствующей прочности основного материала. Максимальное значение напряжения сдвига наблюдали на образце, полученном сваркой при температуре 650°C.

При всех исследованных температурах, сдвиговая прочность ТФС лишь на менее чем на 2,5% меньше прочности основного материала. Если учесть, что погрешность измерения сдвиговой прочности находится в пределах 5%, то с определенной вероятностью можно говорить о практическом достижении в ТФС сдвиговой прочности на уровне основного материала. При этом следует отметить, что общий уровень прочности на сдвиг как основного материала, так и ТФС прибли-

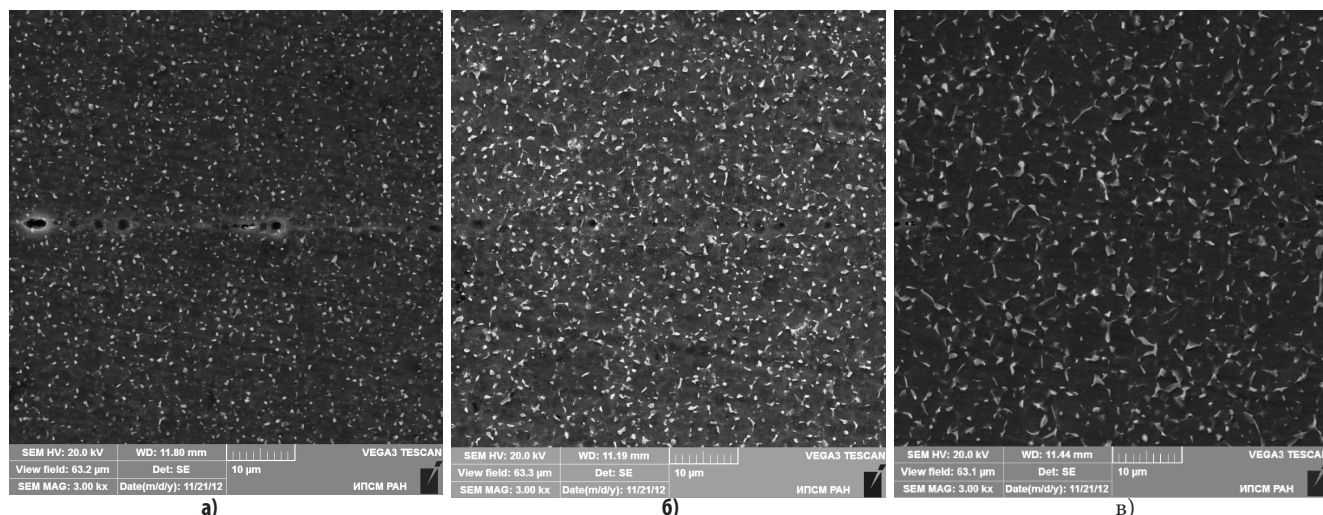


Рис. 2. Микроструктура зоны ТФС НК титанового сплава Ti-6Al-4V после сварки давлением при температурах: а) 650°C; б) 700°C; в) 750°C.

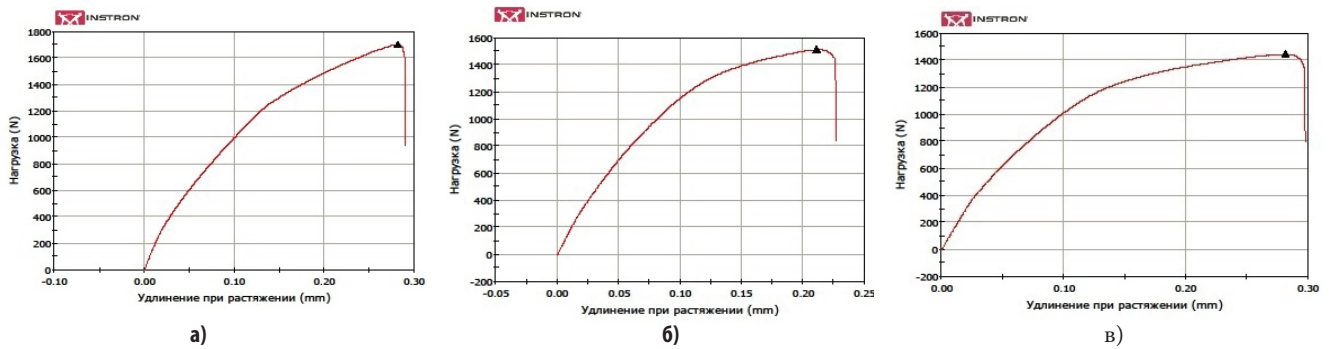


Рис. 3. Механические кривые, полученные по результатам испытаний на сдвиг образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V с НК структурой соединенных давлением при температурах: а) 650°C; б) 700°C; в) 750°C.

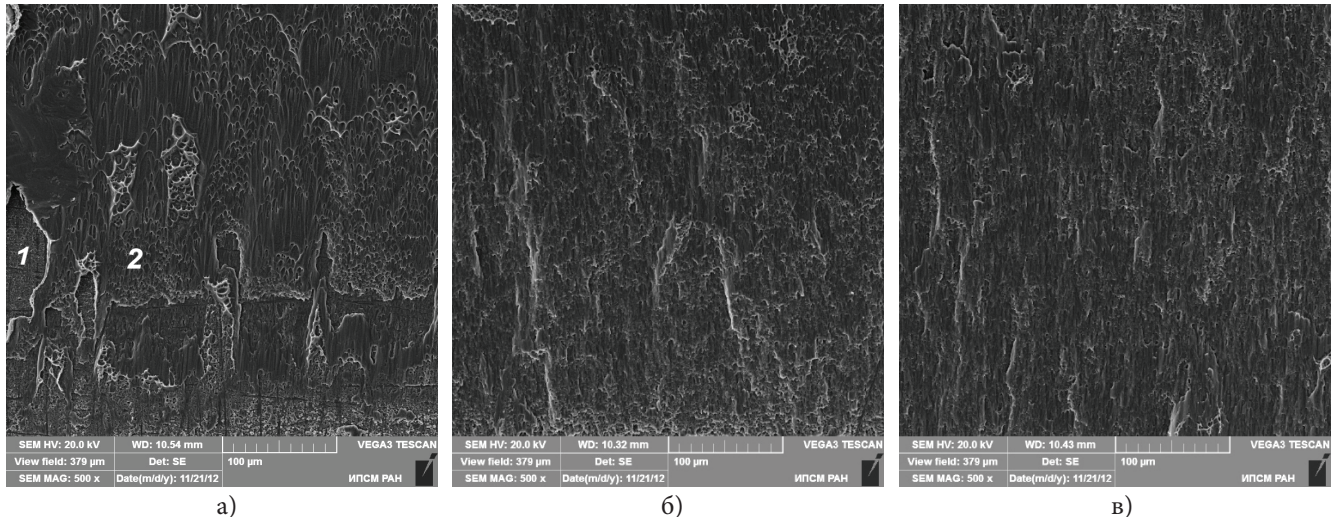


Рис. 4. Фрактограммы поверхности разрушения ТФС после испытаний на сдвиг титанового сплава Ti-6Al-4V с НК структурой при температурах: а) 650°C; б) 700°C; в) 750°C.

зительно на 13% снижается с повышением температуры процесса соединения от 650°C до 750°C, что очевидно связано с наблюдаемым при эксперименте интенсивным ростом зерен.

Фрактографические исследования поверхности ТФС разрушенных образцов после испытаний на сдвиг представлены на рис. 3. Характерной особенностью, присущей наблюдаемым участкам, является наличие зон вязкого 1 и хрупкого 2 излома. Детальные исследования позволили сделать вывод о том, что плоская поверхность, по виду напоминающая хрупкий излом, представляют не что иное, как деформационный рельеф ярко выраженного интервала вязко-хрупкого перехода ТФС (рис. 4 а).

Таблица.

Результаты механических испытаний на сдвиговую прочность из НК титанового сплава Ti-6Al-4V.

№	Т _{сварки} , °C	τ, МПа	Примечание
1	650	658,4	Основной материал
2		645,8	Сварка между НК + НК
3	700	591,8	Основной материал
4		576,9	Сварка между НК + НК
5	750	582,8	Основной материал
6		569,6	Сварка между НК + НК

С увеличением температуры сварки наблюдается смешанный характер разрушения: переход от межзеренного разрушения к вязкому статическому разрушению (рис. 4 б). И только с повышением температуры сварки до 750°C разрушаются бороздками по квазивязкому характеру с образованием вязких гребней и ступенек (рис. 4 в). Наличие пор в зоне ТФС титанового сплава Ti-6Al-4V не оказывает влияния на его прочностные свойства при испытаниях на сдвиг, которая сопоставима с прочностью листа НК структурой.

Таким образом, изучены прочностные свойства твердофазного соединения НК листов из титанового сплава Ti-6Al-4V в условиях низкотемпературной СП и экспериментально доказана технологическая возможность достижения сдвиговой прочности ТФС уровня близко-го к сдвиговой прочности основного материала.

Закключение

1. При сварке давлением наноструктурного титанового сплава Ti-6Al-4V в условиях низкотемпературной сверхпластичности чем ниже температура, тем выше сдвиговая прочность в интервале температур 650-750°C.

2. Результаты испытаний на сдвиг образцов из материала, полученного сваркой давлением листовых заготовок из титанового сплава Ti-6Al-4V, показали, что с увеличением протяженности пор, примерно до 0,3, прочность твердофазного соединения снижается незначительно. Однако для окончательного утверждения

высказанного предположения требуется проведение дополнительных исследований на усталость.

Литература

1. R.Ya. Lutfullin, O.A. Kaibyshev, O.R. Valiakhmetov, M.Kh. Mukhametrakhimov, R.V. Saiullin, R.R. Mulyukov. *Journal of Advanced Materials*. **4**, 21 (2003). (in Russian) [Р.Я. Лутфуллин, О.А. Кайбышев, О.Р. Валиахметов, М.Х. Мухаметрахимов, Р.В. Сафиуллин, Р.Р. Мулюков. Соединение в твердом состоянии нанокристаллических титановых сплавов // Перспективные материалы. 2003. №4, с. 21-25.]
2. R.Ya. Lutfullin, A.A. Kruglov, R.V. Safiullin, M.K. Mukhametrakhimov, O.A. Rudenko. Processing properties of nano- and submicro-crystalline Ti-6Al-4V titanium alloy // *Materials Science and Engineering A*. **503**, 52-54 (2009).
3. Круглов А.А., Лутфуллин Р.Я. Перспективы применения наноструктурных титановых сплавов в машиностроении // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. **1**, 69-72 (2009).
4. P.N. Comley. Lowering the Heat-The Development of Reduced SPF Temperature Titanium Alloys for Aircraft Production. *Materials Science Forum Vols. 447-448*, Trans Tech Publications, 233-238 (2004).
5. O.A. Kaibyshev, G.A. Salishchev, R.M. Galeev, R.Ya. Lutfullin, O.R. Valiakhmetov, Валиахметов О.Р. Patent RU 2134308 (1999) [Кайбышев О.А., Салищев Г.А., Галеев Р.М., Лутфуллин Р.Я., Валиахметов О.Р. Способ обработки титановых сплавов // Патент РФ № 2134308, 1999.]
6. M.Kh. Mukhametrakhimov, R.Ya. Lutfullin. In: *Current Status of Theory and Practice of Superplasticity in Materials*. Ufa, Gilem. 118 (2000) (in Russian).
7. O.A. Kaibyshev, G.A. Salishchev, R.M. Galeev, R.Ya. Lutfullin, O.R. Valiakhmetov. Patent PCT/US97/18642. WO 9817836. (1998).
8. I.V. Kazachkov, V.K. Berdin. *Zavodskaya Laboratoria* **55** (7), 82 (1989) (in Russian) [И.В. Казачков, В.К. Бердин. Методика оценки качества диффузионного соединения тонколистовых металлических материалов Заводская лаборатория **55** (7), 1989 С. 82-84.
9. V.K. Berdin, R.Ya. Lutfullin, I.V. Kazachkov. Sample of tensile test of metallic joint. Author certificate a1619112. (Bulletin of investigation a1, 1991) (in Russian)
10. S.A. Saltukov. *Stereometric Metallography* (1976) (in Russian)
11. M.Kh. Mukhametrakhimov, R.Ya. Lutfullin. Effect of vacuum annealing on the structure and mechanical properties of the NC alloy VT6., *Deformation and Fracture of Materials*. **10**, 38 (2008) (in Russian)
12. A.A. Kruglov, R.Ya. Lutfullin, M.Kh. Mukhametrakhimov, O.A. Rudenko, R.V. Safiullin. *Journal of Advanced Materials*. **6**, 79 (2005) (in Russian) [Круглов А.А., Лутфуллин Р.Я., Мухаметрахимов М.Х., Руденко О.А., Сафиуллин Р.В. Средний размер зерен в титановом сплаве ВТ6 и выбор рациональной схемы интегрального процесса сверхпластической формовки / сварки давлением // Перспективные материалы. 2005. №6. С. 79-85]
13. R.Ya. Lutfullin, M.Kh. Mukhametrakhimov. Твердофазное соединение нанокристаллического титанового сплава при пониженных температурах. *Journal of Advanced Materials* **7**, 189 (2009) (in Russian).
14. M.Kh. Mukhametrakhimov. Solid State Joining in Nanostructured Titanium Alloy VT6 / *Rev. Adv. Mater. Sci.* **3**(25), 273-280, (2010).
15. R.Ya. Lutfullin and M.Kh. Mukhametrakhimov. Solid-phase joint formation in Ti-6Al-4V alloy under conditions of low temperature superplasticity. *Rev. Adv. Mater. Sci.* **2**(25), 142-147 (2010).
16. A.A. Kruglov, M.Kh. Mukhametrakhimov, Pressure welding of Ti-6Al-4V alloy under conditions of low temperature superplasticity. *Письма о материалах*, **2**, 167-165 (2012).
17. R. R. Mulyukov, R. V. Safiullin, A. A. Kruglov, R. Ya. Lutfullin, A. A. Inozemtsev, N. L. Koksharov, S. A. Kharin, M.A. Morozov. In: *Nanotechnology and Nanomaterials in Perm Region*. Perm, CNTI. 61 (2009). (in Russian).