

Сверхпластичность и твердофазное соединение наноструктурированных материалов

Часть II. Физическая модель формирования твердофазного соединения в титановом сплаве в условиях низкотемпературной сверхпластичности

Лутфуллин Р.Я.

lutram@anrb.ru

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

Superplasticity and solid-phase bonding of nanostructured materials

Part II. Model of the solid-phase joint formation in titanium alloy under low-temperature superplasticity

R.Ya. Lutfullin

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

Представлен краткий хронологический обзор научных работ о влиянии эффекта сверхпластичности (СП) на свариваемость в твердом состоянии кристаллических материалов. Для наноструктурного титанового сплава ВТ6 представлена физическая модель формирования твердофазного соединения в условиях низкотемпературной СП. Обоснована перспектива практического использования наноструктурных материалов при разработке прорывных ресурсосберегающих технологий изготовления полых изделий сваркой давлением для авиационного машиностроения.

Ключевые слова: низкотемпературная сверхпластичность, наноструктура, твердофазное соединение, титановый сплав, полая лопатка

The manuscript presents a review of recent studies on the effect of superplasticity (SP) on solid-phase weldability of crystalline materials. A model of solid-phase joining for nanostructured titanium alloy VT6 under low temperature SP is considered. We justify the perspectives of application of nanostructured materials in the development of cutting-edge, resource-saving technologies for manufacturing hollow components for aviation and engine industries pressure welding.

Keywords: low temperature superplasticity, nanostructure, solid-phase joining, titanium alloy, hollow blade

Известно [1], что диффузионные процессы в титановых сплавах заметно активизируются, начиная с температуры 700 °С. Об этом также свидетельствуют и экспериментальные данные по интенсивному росту зерен при вакуумном отжиге наноструктурного сплава ВТ6 [2]. Однако, несмотря явные признаки высокой активности диффузии, ее роль в захлопывании микропор в зоне твердофазного соединения (ТФС), частности, при температуре 700°С крайне незначительна для наноструктурного сплава ВТ6. Доказательством такого утверждения послужили результаты экспериментальной работы [3], в которой сваркой давлением были изготовлены из наноструктурного сплава ВТ6 образцы с различной

пористостью в зоне твердофазного соединения (ТФС), проведен последующий вакуумный отжиг при температуре деформации и выполнена оценка механических свойств. Оказалось, что с увеличением степени деформации пористость в зоне ТФС образцов при комнатной температуре, соединенных при деформации $\epsilon=35\%$ и температуре 600°С, соответствовали свойствам основного материала, и поры в зоне ТФС отсутствовали. В образцах соединенных при температуре 650°С поры отсутствовали после деформации $\epsilon=25\%$. Время сверхпластической деформации при этом составляло 0,5 часа. При этом вакуумный отжиг образцов, содер-

жащих поры в зоне ТФС, при температурах в интервале 550–700°C в течение времени, превышающем время деформации не повлиял на изменение количества пор и их размеров. Как показал прицельный эксперимент по наблюдению за поведением пор, вакуумный отжиг при температуре 700°C в течение 5 часов, то есть на порядок больший времени деформации образцов, практически не изменил размер и количество исходных пор в зоне ТФС (рис.1).

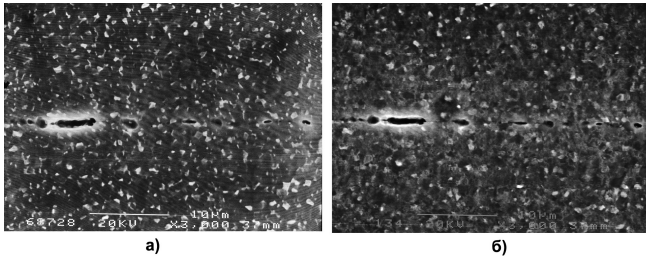


Рис. 1. Микроструктура зоны ТФС образцов из наноструктурного сплава ВТ6: а- исходное состояние; б- после вакуумного отжига при 700 °С в течение 5 часов

В результате проведения авторами [2-7] экспериментов с образцами наноструктурного сплава ВТ6 выявлена преимущественно деформационная природа формирования ТФС при сварке давлением в температурно-скоростных условиях проявления низкотемпературной сверхпластичности (СП). С учетом и на основе этих экспериментальных результатов были сформулированы основы для создания физической модели формирования ТФС в условиях низкотемпературной СП для сплава ВТ6 в температурном интервале 550-700°C.

Основные положения этой модели, приведены ниже:

- Соединяемый материал рассматривается как вязкое тело, способное к сверхпластичному течению, причем структурные изменения в зоне ТФС определяются развитием деформационных процессов в объеме материала [3].

- Деформация микронеровностей на соединяемой поверхности материала и деформация всего объема соединяемого материала рассматриваются как единый процесс сверхпластической деформации, что определяет отсутствие деформационного упрочнения в зоне формирования ТФС [8].

- Исходная поверхность соединяемых образцов покрыта оксидной пленкой толщиной ~20 нм, препятствующей образованию связей между поверхностными атомами соединяемого сплава [3].

- Развитие зернограничного проскальзывания (ЗГП) при сверхпластической деформации стимулирует диффузию по границам зерен, которая, обеспечивая «ювенилизацию» поверхности, ускоряет процесс формирования ТФС [8-10].

- Первоначальные очаги схватывания возникают на участках в области границ зерен и определяются развитием полос кооперированного ЗГП или обычного проскальзывания отдельных зерен [8,9,11].

- Развитие ЗГП приводит к ускоренному заживанию пор в зоне ТФС путем взаимного сдвига и разворота соседних зерен [12].

- Развитие ЗГП трансформирует плоскую границу раздела, приводя ее в соответствие с состоянием произвольных границ зерен, характерных для соединяемого сверхпластичного материала [11].

В отличие от традиционных представлений, в предлагаемой модели формирование ТФС не сводится лишь к локальному смятию микронеровностей и диффузионному массопереносу для схлопывания микропор в зоне соединения, а определяется развитием деформационных механизмов и их влиянием на образование соединения с учетом структурного состояния. Такой подход является новым и основан на установленных экспериментальных фактах влияния механизма сверхпластической деформации на механизм и кинетику формирования ТФС, а также на экспериментальных фактах сохранения пористости в зоне соединения при длительном вакуумном отжиге при температуре проявления низкотемпературной СП.

Таким образом, схема формирования ТФС сводится к трем этапам (рис. 2).

I. Образование физического контакта и замкнутых полостей при деформации.

II. Ювенилизация поверхности соединения и образования очагов схватывания.

III. Деформационное схлопывание пор и исчезновение плоской поверхности раздела.

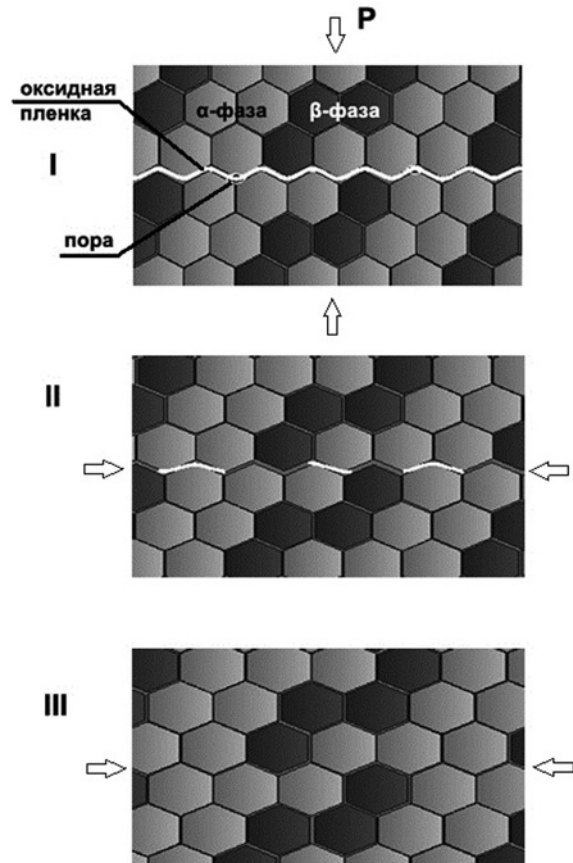


Рис. 2. Схема формирования ТФС наноструктурного сплава ВТ6 в условиях низкотемпературной СП

Принципиальное отличие сварки давлением материалов в условиях СП состоит в том, что формирование ТФС, в сравнении с обычной диффузионной сваркой, определяется активным развитием деформации в объ-

еме всего материала, а не ограничивается локальным смятием микронеровностей на поверхности соединяемых образцов. Поэтому основная практическая задача получения качественного соединения при сварке сводится к организации локальной сверхпластической деформации в зоне ТФС. Это может быть осуществлено, по крайней мере, двумя способами. Расчетом и изготовлением соединяемых образцов заданной формы, обеспечивающей геометрическую локализацию деформации при сварке давлением именно в зоне соединения [13]. Другой способ предусматривает использование при сварке давлением прокладки из наноструктурного материала между соединяемыми заготовками (Рис.3) [3,14-19]. Достижение необходимой величины деформации в зоне соединения обеспечивается за счет того, что напряжение течения наноструктурного материала будет существенно ниже, чем для микроструктурного или крупнокристаллического материала при температурно-скоростных режимах сверхпластической деформации [20] (рис.4). При этом возможна сварка давлением также микроструктурных заготовок сплава ВТ6 при пониженных температурах с достижением высокого качества соединения.

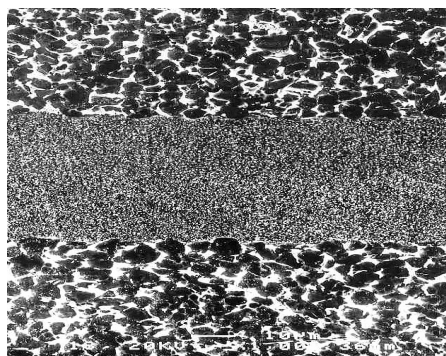


Рис. 3. Образцы микроструктурного сплава ВТ6, соединенные при температуре 600°C с использованием наноструктурной прокладки.

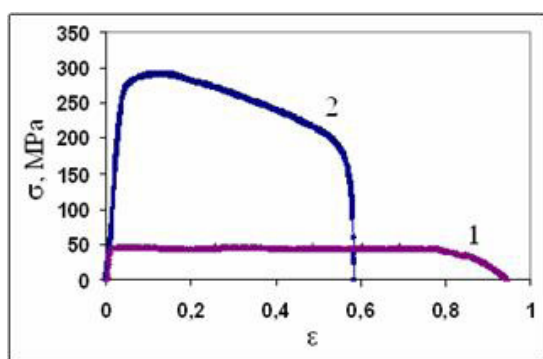


Рис. 4. Зависимость напряжения течения сплава ВТ6 от степени деформации для различных структурных состояний при 650°C (начальная скорость деформации $\sim 7,5 \times 10^{-4} \text{ c}^{-1}$). 1 – средний размер зерен 0,2 мкм; 2 – средний размер зерен 2 мкм

Представленные результаты исследований могут служить научной основой для разработки технологического метода изготовления при пониженной температуре широкохордной полый лопатки для современного авиационного двигателя [21-22]. На рис. 5 приведена фотография модели полый лопатки, изготовленной при 750°C из наноструктурного сплава ВТ6 [22].

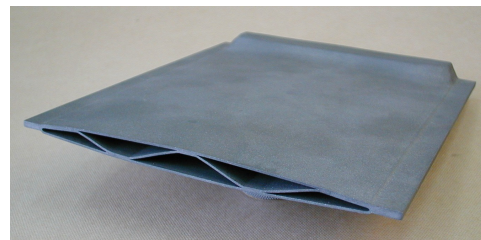


Рис. 5. Модель полый лопатки, изготовленная совмещением сверхпластической формовки и сварки давлением при 750°C, из наноструктурного сплава ВТ6 в условиях низкотемпературной СП.

Использование, в частности, наноструктурной прокладки может оказаться перспективным и для сварки давлением, например, труднообрабатываемых жаропрочных сплавов. Как показали предварительные эксперименты [15,17,19], возможно уже при 850°C соединить с высоким качеством наноструктурную листовую заготовку из суперсплава Inconel 718 с крупнозернистым полупластиком из того же суперсплава.

Заключение

Использование наноструктурных объемных материалов создает перспективу для практического применения в машиностроении, в первую очередь авиационном, ресурсосберегающих технологий сварки давлением с использованием эффекта низкотемпературной сверхпластичности.

Автор искренне признателен всем сотрудникам ИПСМ РАН, в первую очередь, коллегам по лаборатории 10 «Сверхпластическая обработка перспективных материалов», чьи научные и практические результаты были использованы в представленном обзоре.

Литература

1. U. Zwicker. Titan und Titanlegierungen. Berlin-Heidelberg-New York, Springer-Verlag (1974) (in German).
2. A.A. Kruglov, R.Ya. Lutfullin, M.Kh. Mukhametrakhimov, O.A. Rudenko, R.V. Safullin. Journal of Advanced Materials **6**, 79 (2005) (in Russian).
3. R.Ya. Lutfullin, M.Kh. Mukhametrakhimov. Journal of Advanced Materials **7**, 189 (2009) (in Russian).
4. R.Ya. Lutfullin, O.A. Kaibyshev, R.V. Safullin, O.R. Valiakhmetov, M.Kh. Mukhametrakhimov. Acta Metallurgica Sinica (English Letters) **13**, 561 (2000).
5. R.Ya. Lutfullin, O.R. Valiakhmetov, R.M. Galeev, M.Kh. Mukhametrakhimov. Metals **2**, 102 (2000) (in Russian).
6. R.Ya. Lutfullin, M.Kh. Mukhametrakhimov. Metal Science and Heat Treatment **48**, 54 (2006).
7. M.Kh. Mukhametrakhimov, R.Ya. Lutfullin. In: Current Status of Theory and Practice of Superplasticity in Materials. Ufa, Gilem (2000) P. 118 (in Russian).
8. A.P. Zhilyaev and A.I. Pshenichnyuk. Superplasticity and Grain Boundaries in Ultrafine-Grained Materials. Cambridge, CISP (2010) 312 p.

9. O.D. Sherby, J. Wadsworth. *Materials Sciences and Technology* **1**, 11 (1985).
10. O.A. Kaibyshev, S.N. Faizova and A.F. Hairullina. *Acta Mater.* **48**, 2093 (2000).
11. O.A. Kaibyshev, R.V. Safiullin, R.Ya. Lutfullin and V.V. Astanin. *J. Mater. Eng. Perform.* **8**, 205 (1999).
12. O.A. Kaibyshev, R.Ya. Lutfullin, V.K. Berdin. *Acta Metall. Mater.* **42**, 2609 (1994).
13. A.K. Galimov, M.Kh. Mukhametrakhimov, R.Ya. Lutfullin, A.G. Turganov. *Machine-Building Technology* **2**, 61 (2005) (in Russian).
14. O.A. Kaibyshev, G.A. Salishcev, R.M. Galeev, R.Ya. Lutfullin, O.R. Valiakhmetov. *Russian Patent* 2134308 (1999) (in Russian).
15. V.A. Valitov, R.Ya. Lutfullin, et al. *Solid State Joint Formation in Nickel Base INCONEL 718 Alloy under Superplastic Strain*. In: *Metals Science Physical Problems of Advanced Materials*. Ufa, Nauka-Servic (2002) P. 240 (in Russian).
16. M.Kh. Mukhametrakhimov, R.Ya. Lutfullin. In: *XVII Petersburg's Readings on Strength Problems. Proceedings*. St. Petersburg (2007) (in Russian).
17. V.A. Valitov, R.Ya. Lutfullin, et al. *Journal of Advanced Materials* **6**, 78 (2004) (in Russian).
18. L.D. Hefti. *Materials Science Forum* **87**, 551 (2007), *Trans Tech Publication*. Switzerland.
19. V.A. Valitov, R.Ya. Lutfullin, et al. *Material Science* **4**, 21 (2009) (in Russian).
20. R.Ya. Lutfullin. *Letters on Materials* **1**, 59 (2011) (in Russian) [Р.Я. Лутфуллин. *Письма о материалах* **1**, 59 (2011).].
21. 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 (2009) p.61 (in Russian).
22. O. R. Valiakhmetov, R. M. Galeev, V. A. Ivan'ko, R. M. Imayev, A. A. Inozemtsev, N. L. Koksharov, A. A. Kruglov, R. Ya. Lutfullin, R. R. Mulyukov, A. A. Nazarov, R. V. Safiullin, and S. A. Kharin. *Nanotechnologies in Russia* **5**, 108 (2010).