



УДК 669.017:539.4

**ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЗЕРНА НА РЕЖИМЫ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКИ
НАНОСТРУКТУРНЫХ ЛИСТОВ ИЗ СПЛАВА ВТ6****Е.А. Кудрявцев, Н.В. Лопатин, Г.А. Салищев, Э.В. Иванисенко,
С.В. Жеребцов, К.С. Сенкевич**Белгородский государственный университет,
ул. Победы 85, Белгород, 308015, Россия, e-mail: salishchev@bsu.edu.ru

Аннотация. Проведена диффузионная сварка наноструктурного сплава ВТ6 с размером зерна 150 и 300 нм. Исследованы механические свойства и микроструктура сплава в зоне сварного шва. Установлено влияние размера зерна на качество сварного соединения и величину напряжения среза при различных условиях сварки.

Ключевые слова: диффузионная сварка, титановые сплавы, наноструктура.

Диффузионная сварка широко используется для получения качественного соединения материалов [1-3]. Осуществление диффузионной сварки возможно с использованием двух технологических схем: в одной из них используют постоянную нагрузку по величине ниже предела текучести, т.е. в режиме близком к ползучести, а в другой при нагрузке больше предела текучести, достигаемой принудительным деформированием соединяемых объектов (сварки давлением). Во втором случае степени деформации при сварке составляют обычно десятки процентов, тогда как в первом не превышают единиц.

Таблица 1

Режимы сварки листов НС сплава ВТ6

| Номер образца | Температура сварки, °С | Удельное давление МПа | Время выдержки, ч |
|---------------|---------------------------|--------------------------|-------------------|
| 1 | 550 | 100 | 1 |
| 2 | 600 | 70 | 1 |
| 3 | 600 | 100 | 1 |
| 4 | 650 | 30 | 1 |

Наноструктурирование материалов позволяет резко снизить температуру диффузионной сварки [1-3]. В частности, применение наноструктурных (НС) титановых сплавов для осуществления диффузионной сварки давлением было рассмотрено в [1-3]. Авторы получили качественное соединение при сварке НС сплава ВТ6 при температуре 600°С. Развитие таких методов имеет большое значение для создания новых малозатратных технологий. С технологической точки зрения не всегда возможно осуществлять соединение в режиме сварки давлением; сварка в режиме ползучести может быть в ряде случаев предпочтительнее. Между тем исследования сварки НС сплавов в режиме ползучести практически отсутствуют. Один из вопросов, который возникает в связи с постановкой такой работы, связан с оценкой влияния исходной

микроструктуры НС сплава на качество соединения. В настоящей работе исследовалось влияние размера зерна на образование соединения и его прочность в условиях низкотемпературной диффузионной сварки на примере НС двухфазного титанового сплава ВТ6.

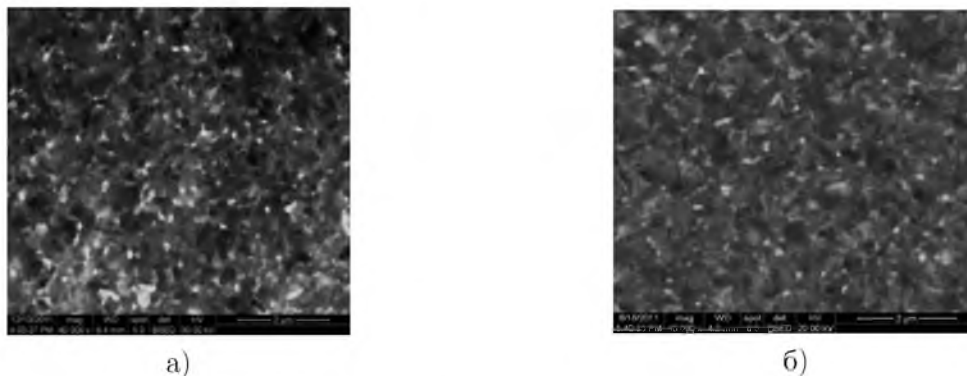


Рис. 1. Микроструктура НС сплава ВТ6 с различным исходным размером зерен: а) – 150 нм; б) – 300 нм. Светлые выделения принадлежат бета фазе.

Материалом исследования были листы из НС сплава ВТ6 со средним размером зерна 150 и 300 нм (Рис. 1). Листы были разрезаны на прямоугольные образцы размером $6 \times 5 \times 2$ мм. Сварка с использованием машины для диффузионной сварки СДВУ-40 проводилась в вакуумной атмосфере. Давление в вакуумной камере составляло $10^{-2} \div 10^{-3}$ Па. Образцы нагревались ИК излучением до температуры сварки в интервале $550 \div 750^\circ\text{C}$. Контактные поверхности были предварительно механически отшлифованы на шкурке с понижением зернистости от 100 до 1000 и отполированы на коллоидной суспензии. Промывка образцов проводилась в ацетоне. Сварку осуществляли либо по всей поверхности для исследований микроструктуры, либо с перекрытием 5 мм, для определения прочности сварного соединения. Непосредственно перед сваркой проводили химическое полирование соединяемых поверхностей в растворе 10мл HF, 10мл HNO_3 , 30 мл молочной кислоты. Режимы сварки представлены в табл. 1.

Микроструктуру образцов изучали в сканирующем электронном микроскопе Quanta-600 с использованием детектора обратнорассеянных электронов. Оценка прочности сварного соединения на срез проводилась на испытательной машине Instron-LS300.

Основой для выбора температурного режима сварки являлись результаты исследования сверхпластичности НС сплава ВТ6, представленные в работе [3]. На основании этих данных были выбраны температуры и удельные давления при создании нагрузки на образцы (табл. 1). Время выдержки под нагрузкой было выбрано исходя из экономической целесообразности процесса диффузионной сварки. Обычно используют времена сварки для титановых сплавов в интервале 1-2 часов [1].

На рис. 1 представлены микроструктуры НС сплава ВТ6 с исходным размером зерен 150 нм и 300 нм. Плотность дислокаций в первом состоянии составляла $3,8 \times 10^{-14} \text{ м}^{-2}$, а во втором - $9,0 \times 10^{-14} \text{ м}^{-2}$. Также отличалась объемная доля бета фазы: в первом состоянии ее величина была 11%, а во втором - 15%.

После сварки образца с размером зерна 150 нм при 550°C на шлифе видна линия сварки, что может свидетельствовать о недостаточно качественном соединении. В тоже время образцы этого состояния сваренные при 600°C и 650°C показали наличие качественного шва. На рис. 2а дана микроструктура сварного шва после сварки образцов сплава ВТ6 с размером зерен 150 нм

при 600°C , давлении 70 МПа и времени выдержки 1 час. Видно, что отсутствуют какие-либо дефекты в области сварного шва. Подобная микроструктура была получена и при 650°C .

Сварка образцов с размером зерна 300 нм при 600°C , давлении 70 МПа и времени выдержки 1 час не привела к получению качественного шва. Достаточно отчетливо виден шов и поры в нем (показаны стрелкой на рис. 2б). Между тем повышение давления до 100 МПа вело к получению качественной структуры. Поры отсутствовали в микроструктуре, но в отдельных участках было обнаружено изменение контраста по сварному шву, что свидетельствовало о неполном достижении равновесия в структуре при сварке. Качественная микроструктура формировалась при 650°C и существенно меньшем давлении 30 МПа.

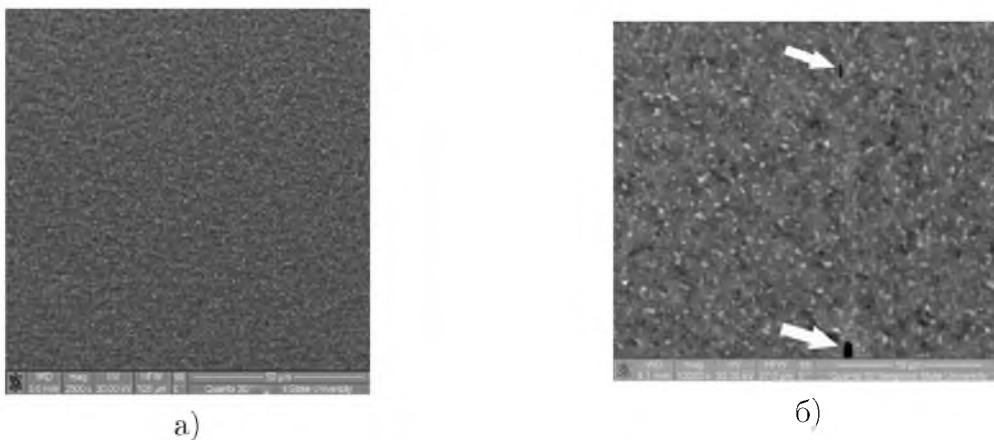


Рис. 2. Микроструктура сварного шва после сварки образцов сплава ВТ6 с размером зерен 150 нм (а) и 300 нм (б) при 600°C , давлении 70 МПа и времени выдержки 1 час.

Исследование диффузионного соединения на срез показало наличие сильной зависимости напряжения среза от температуры сварки (табл. 2). Наименьшее значение, всего лишь 69 МПа, было получено после сварки образцов с размером зерна 150 нм при 550°C . Повышение температуры сварки резко увеличивало напряжение среза. Например, сварка этого же состояния при давлении 70 МПа дает почти на порядок большее значение (559 МПа). Близкое последнему значение было при испытании образца, сваренного при 650°C . Исходный размер зерен существенно влияет на свариваемость. Напряжение среза образца с размером зерен 300 нм, сваренного при 600°C и 70 МПа, равнялось 250 МПа. Увеличение давления до 100 МПа заметно увеличивало напряжение среза. Подобный же рост напряжения среза в образцах в этом состоянии был зафиксирован при увеличении температуры сварки до 650°C .

Таким образом, повышение дисперсности структуры НС сплава ВТ6 существенно влияет, как на качество сварного шва, так и на механические свойства сваренных образцов. Чем меньше размер зерен, тем более качественная структура сварного шва формируется. В сплаве с большим размером зерна требуются более высокие давления, для осуществления сварки образцов.

Работа была поддержана грантом П №725 Министерства Науки и Образования Российской Федерации.



Таблица 2

Режимы сварки листов НС сплава ВТ6

| Размер зерна, нм | Температура, °С | Давление, МПа | Время выдержки, ч | Напряжение среза, МПа |
|---------------------|--------------------|------------------|-------------------|--------------------------|
| 150 | 550 | 100 | 1 | 69 |
| | 600 | 70 | 1 | 559 |
| | 600 | 100 | 1 | 526 |
| 300 | 600 | 70 | 1 | 250 |
| | 600 | 100 | 1 | 454 |
| | 650 | 30 | 1 | 496 |

Литература

1. Диффузионная сварка материалов / Справ. год ред. Н.Ф. Казакова / М.: Машиностроение, 1981. – 271 с.
2. Лутфуллин Р.Я. Сверхпластичность и твердофазное соединение наноструктурированных материалов. Ч.I Влияние размера зерна на твердофазную свариваемость сверхпластичных сплавов / Письма о материалах. – 2011. – 1. – С.88-91.
3. Кудрявцев Е.А., Жеребцов С.В., Салищев Г.А. Низкотемпературная сверхпластичность двухфазных титановых сплавов и технология изготовления изделий / Научные ведомости БелГУ, Серия «Математика. Физика». – 2011. – №23 (119) вып. 25.

GRAIN SIZE EFFECT ON SOLID STATE JOINING DURING DIFFUSION BONDING OF NANOSTRUCTURED SHEETS OF ALLOY Ti-6Al-4V

E.A. Kudrjavitsev, N.V. Lopatin, G.A. Salishchev, E.V. Ivanisenko, S.V. Zherebtsov, K.S. Senkevich

Belgorod State University,
Pobedy St., 85, Belgorod, 308015, Russia, e-mail: salishchev@bsu.edu.ru

Abstract. Diffusion bonding of nanostructured Ti-6Al-4V alloy with the grain size of 150 and 300 nm has been performed. Mechanical properties and microstructure of the alloy in the weld zone were investigated. The grain size effect and diffusion bonding conditions on the quality and shear stress of joint have shown.

Key words: diffusion bonding, nanostructured sheets, titanium alloys.