



УДК 620.178.74:669.295:62-419

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 В УСЛОВИЯХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

PRODUCTION OF HIGH-STRENGTH LAYERED COMPOSIT MATERIALS FROM TEMPERATURE SUPERPLASTICITY

Мухаметрахимов Миннаул Хидиятович

кандидат технических наук, научный сотрудник,
Институт проблем сверхпластичности металлов
msia@mail.ru

**Mukhametrakhimov
Minnaul Khidiyatovich**

Ph. D., Research Scientist,
Institute for Metals Superplasticity Problem
msia@mail.ru

Аннотация. Проведены эксперименты с использованием наноструктурных материалов в качестве упрочняющего элемента для изготовления трехслойных композитов с различными структурами (нанокристаллической – НК, микрокристаллической – МК и крупнозернистой – КЗ) из листового титанового сплава ВТ6 в условиях низкотемпературной сверхпластичности.

Установлено, что сохранение сочетания НК, МК и КЗ структур в слоях при пониженных температурах позволяет обеспечить в композитных материалах повышенные прочностные и пластические свойства и достигнуть высокого уровня конструкционной прочности. Анализ результатов механических испытаний слоистого композитного материала показал, что его механическое поведение существенно зависит от температуры сварки. С понижением температуры сварки давлением от 900 °С до 700 °С уровень прочности на сдвиг как основного материала, так и материала с ТФС, заметно, в среднем на 18 %, повышается.

Ключевые слова: низкотемпературная сверхпластичность, крупнозернистый, микрокристаллический и нанокристаллический титановый сплав, твердофазное соединение, слоистые композиты, прочность, пластичность, механические свойства, электронная микроскопия.

Annotation. Experiments have been carried out using nanostructured materials as a strengthening element to produce three-layer composites with different structures (nanocrystalline – NC, microcrystalline – MC and coarse-grained – GC) of the titanium alloy VT6 in the low temperature superplasticity conditions.

It is established that if the combination of the NC, MC, GC structures is retained in the lowered temperatures it allows for the composite materials to have higher strength and plasticity properties and to achieve a higher level of structural strength. The analysis of the results of the three-layer composite material mechanical tests has shown that mechanical behavior considerably depends on the welding temperature. As the pressure welding temperature is decreased from 900 °C to 700 °C the shear strength of both the base material and the SSB material is noticeably increased, on the average by 18 %.

Keywords: low temperature superplasticity, coarse-grained, microcrystalline and nanocrystalline titanium alloy, solidphase joining, multilayer composites, strength, plasticity, mechanical properties, electron microscopy.

Введение

Развитие современного машиностроения невозможно без использования передовых конструкционных материалов, имеющих более высокие эксплуатационные свойства по сравнению с существующими материалами. В этой связи большой интерес представляют титановые сплавы.

Повышенные прочностные свойства имеют титановые сплавы с нанокристаллической (НК) структурой по сравнению с микрокристаллической (МК) и крупнозернистой (КЗ) структурами [1].

Однако изготовление крупногабаритных полуфабрикатов с НК структурой представляет отдельную научную и технологическую проблему, кроме того, по достижении в сплаве такой структуры происходит повышение уровня прочности и снижение пластичности.

Одним из способов преодоления этих проблем является создание композитов, имеющих хорошую технологичную прочность и пластичность титановых сплавов.

В настоящее время разработчики авиатехники перестраивают всю материаловедческую концепцию строительства самолетов, активно привлекая и используя композиционные материалы на основе исключительно прочных титановых сплавов.

Сварка давлением конструкционных материалов по сравнению с обычной сваркой плавлением является прогрессивной технологией их соединения при создании различных тонкостенных и полых конструкций [2], поскольку она обеспечивает более высокое качество сварного соединения. При этом качество соединения существенно зависит от режимов сварки – температуры и давления.

Исследования, выполненные в последние годы в ИПСМ РАН, показали, что сварка давлением в условиях сверхпластичности существенно уменьшает время, необходимое для образования качественного твердофазного соединения, в сравнении с классической диффузионной сваркой [2]



Создавая различное по структуре сочетание слоев, можно управлять характером разрушения материала и тем самым повышать конструкционную прочность по сравнению с монолитным материалом [3, 4].

В работе [5] показана возможность использования подобных композитов и приведены результаты испытаний на усталость модели слоистой лопатки. Анализируя характер и механизм разрушения слоистой лопатки, можно отметить, что разрушение начинается под действием главных напряжений, развиваясь по нормали к ним. В частности, было отмечено, что при достижении менее прочного, но более пластичного слоя, в таком слоистом композите наблюдается резкий рост пластических деформаций, что оказывает тормозящее действие на развитие трещины, которая при этом меняет траекторию распространения. Это повторяется при последующем прохождении более прочных или пластичных слоев.

Применение такой конструкции («слоистой, как бронезилет») в перспективных двигателях большой двухконтурности позволяет создавать легкие и прочные колеса вентиляторов, в которых, например, ударная трещина, даже и возникнув в одном из слоев, не получит развития во всей лопатке, поскольку каждый из слоев реагирует на внешние воздействия совершенно самостоятельно. Однако проблема сдвиговой прочности титановых композитов остается открытой.

В представленной работе на основе экспериментальных результатов предложен новый методологический подход к выбору технологических параметров применения наноструктурных материалов в качестве упрочняющего элемента для изготовления трехслойных композитов с различными структурами (НК, МК и КЗ) из листового титанового сплава ВТ6 в условиях низкотемпературной сверхпластичности и оценка сдвиговой прочности композита в зоне твердофазного соединения (ТФС).

Материал и методика исследования

Материалом для исследования был выбран промышленный двухфазный титановый сплав ВТ6 стандартного химического состава по ГОСТ 19807-91. Исходные листовые заготовки сплава имели МК структуру со средним размером зерен 3–5 мкм. Титановый сплав с крупнозернистой КЗ структурой получен отжигом на воздухе при температуре 1000 °С в течение 60 минут и средний размер β-превращенных зерен составил более 300 мкм. Упрочняющий элемент получен изотермической прокаткой объемной заготовки, предварительно подвергнутой всесторонней ковке [6]. Упрочняющий элемент содержит структурные элементы с геометрическими размерами не более 0,2 мкм, и количество большеугловых разориентировок было не менее 50 %, что позволяло аттестовать материал как наноструктурированные.

Механические свойства основного материала с различными структурами приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты механических испытаний основного материала из титанового сплава ВТ6 на сдвиговую прочность при комнатной температуре

№	Материал ВТ6	τ , МПа	Примечание
1	НК	664	В исходных состояниях
2	МК	542	
3	КЗ	485	

Соединение листов с различными структурными состояниями, собранных в пакет, выполняли в штамповом блоке (рис. 1), включающем силовые плиты и крепежные элементы.



Рисунок 1 – Общий вид инструментальной оснастки для сварки давлением листовых заготовок титанового сплава ВТ6 посредством давления газа через гибкую мембрану



Полученную таким образом сборку стягивали силовыми элементами штампа, а затем устанавливали в вакуумную печь СНВЭ-1,3.1/16-ИЗ-УХЛЧ.1. Диффузионную сварку (сварку давлением) осуществляли при различных температурах, начиная от 700 до 900 °С в течение 120 мин. с приложением давления (давление 5 МПа и 4 МПа соответственно) из штуцера через гибкую мембрану на свариваемые образцы. Глубину вакуума в процессе эксперимента поддерживали не хуже $2,0 \times 10^{-3}$ Па. Качество ТФС оценивали по механическим испытаниям на сдвиг по методике, подробно представленной в [7], а также металлографически с помощью сканирующего электронного микроскопа «TESCAN MIRA3 LMU» по относительной объемной доле (протяженности) пор в поперечном сечении зоны соединения. Относительную протяженность пор (L_p) в зоне твердофазного соединения оценивали по формуле:

$$L_p = L_{pi} / L_o ,$$

где L_{pi} – суммарная протяженность пор в плоскости шлифа, L_o – длина исследуемого участка вдоль линии соединения в плоскости шлифа.

Для испытаний на сдвиг из двухслойных пакетов вырезали специальные образцы, эскиз которых приведен на рисунке 2. Согласно методике [7] при толщине листовых заготовок $s = 0,8$ мм ширину нахлеста в образцах (b) выбирали равной 0,5 мм. Испытания проводили при комнатной температуре на универсальном динамометре фирмы «Instron» модели 5982 со скоростью деформирования 1 мм/мин, при этом поверхность соединения была параллельна оси растяжения.

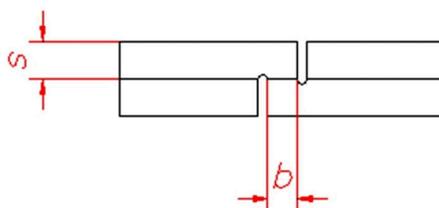


Рисунок 2 – Поперечное сечение образца для испытаний на сдвиговую прочность

Результаты и их обсуждение

Для исследований был изготовлен слоистый композитный материал двух типов: 1 – состоял из листовых заготовок ВТ6 с МК и НК структурой и 2 – состоял из листовых заготовок ВТ6 с КЗ и НК структурой.

На рисунке 3. показана схема получения слоистого композитного материала с различными структурами с применением упрочняющего элемента с НК структурой.



Рисунок 3 – Схема получения слоистого композитного материала с различными структурами с применением упрочняющего элемента с НК структурой

В результате твердофазного соединения получается слоистый композит первого типа, в котором содержатся две зоны раздела металлов – между титановым сплавом ВТ6 с МК и НК структурами (зона МК+НК), а также между НК и МК структурами (зона НК+МК) (рис. 4).

Второй тип слоистого композита также содержит две зоны раздела металлов – между титановым сплавом ВТ6 с КЗ и НК структурами (зона КЗ+НК), а также между НК и КЗ структурами (зона НК+КЗ) (рис. 5).

После сварки давлением в композитном материале наблюдается разнорзернистость, обусловленная большим различием размера зерен в соединяемых листовых заготовках и прослойке.

Для сравнительного анализа был изготовлен слоистый композит МК+НК+МК при температуре 900 °С (рис. 6).

С повышением температуры сварки до температуры 900 °С в течение 2 часов микроструктура прослойки укрупнилась до микрокристаллических размеров (рис. 6). Металлографические исследования показали, что средний размер зерен вырос в соединенных образцах в среднем от 1,2 мкм до 5,0 мкм при повышении температуры процесса ТФС от 700 до 900 °С соответственно. Относительная протяженность пор в зоне ТФС после сварки при температуре 700 °С составила 0,18 и с увеличением температуры сварки до 900 °С уменьшилась до 0,04 [8].

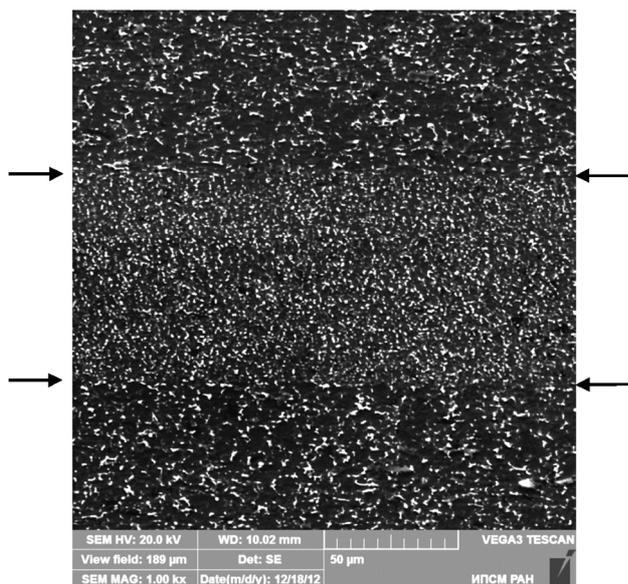


Рисунок 4 – Микроструктура зоны ТФС после сварки давлением при температуре 700 °С титанового сплава ВТ6 с МК структурой с применением упрочняющего элемента с НК структурой

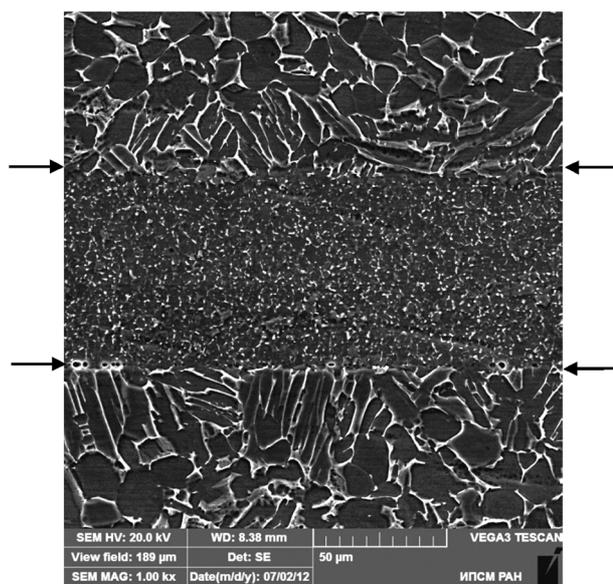


Рисунок 5 – Микроструктура зоны ТФС после сварки давлением при температуре 750 °С титанового сплава ВТ6 с КЗ структурой с применением упрочняющего элемента с НК структурой

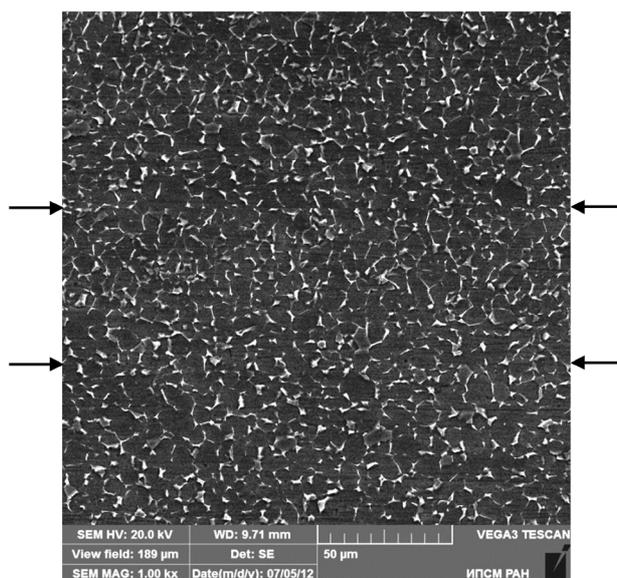


Рисунок 6 – Микроструктура зоны ТФС после сварки давлением при температуре 900 °С титанового сплава ВТ6 с МК структурой с применением упрочняющего элемента с НК структурой

Анализ результатов механических испытаний слоистого композитного материала показал, что его механическое поведение существенно зависит от температуры сварки. С понижением температуры сварки давлением от 900 °С до 700 °С уровень прочности на сдвиг как основного материала, так и материала с ТФС, заметно, в среднем на 18 %, повышается. По сравнению с основным НК материалом прочность композита составляет 95 % при 700 °С, 88 % при 750 °С и 78 % при температуре 900 °С. Сохранение сочетания НК, МК и КЗ структуры в слоях при пониженных температурах позволяет обеспечить в композитных материалах повышенные прочностные и пластические свойства и достигнуть высокого уровня конструкционной прочности [9].

Следует отметить, что прочность полученного слоистого композита обуславливается свойствами НК структуры. По сравнению с основным МК материалом прочность композита выше на 16 % при 700 °С, и на 7 % при 750 °С, и на 4 % при температуре 900 °С, т.е. при 700 и 750 °С НК прослойка повышает прочность композита по сравнению с основным материалом. По сравнению с основным КЗ материалом прочность композита выше на 25 % при температуре 700 °С, на 17 % при температуре 750 °С, т.е. НК прослойка повышает прочность композита по сравнению с основным материалом [10].



Результаты механических испытаний ТФС композитного материала из титанового сплава ВТ6 на сдвиговую прочность при комнатной температуре после сварки давлением при температурах (700–900 °С) приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты механических испытаний ТФС композитного материала из титанового сплава ВТ6 на сдвиговую прочность при комнатной температуре

№	Т _{сварки} , °С	Р, МПа	τ, МПа	Примечание
1	900	4	518	Сварка между МК+НК+МК
2	750	5	582	Сварка между МК+НК+МК
3			566	Сварка между КЗ+НК+КЗ
4	700	5	628	Сварка между МК+НК+МК
5			604	Сварка между КЗ+НК+КЗ

Получение слоистого композита с повышенными прочностными свойствами может быть достигнуто путем уменьшения температуры сварки давлением для сохранения НК структуры, но при этом необходимо увеличить давление.

Вывод: Таким образом, показана возможность применения НК материалов в качестве упрочняющего элемента для изготовления трехслойных композитов с различными структурами из листового титанового сплава ВТ6. Сохранение сочетания НК, МК и КЗ структуры в слоях при пониженных температурах позволяет обеспечить в композитных материалах повышенные прочностные и пластические свойства и достигнуть высокого уровня конструкционной прочности.

The present work was accomplished according to the state assignment of IMSP RAS.

Литература:

1. Соединение в твердом состоянии нанокристаллических титановых сплавов / Р.Я. Лутфуллин [и др.] // Перспективные материалы. – 2003. – № 4. – С. 21–25.
2. Средний размер зерен в титановом сплаве ВТ6 и выбор рациональной схемы интегрального процесса сверхпластической формовки сварки давлением / А.А. Круглов [и др.] // Перспективные материалы. – 2005. – № 6. – С. 79–85.
3. Райт Е.С., Левит А.П. В кн.: Композиционные материалы с металлической матрицей. Т. 4 / Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1978. – С. 49–110.
4. Соколовская Е.М., Гузей Л.С. Физикохимия композитных материалов. – М.: МГУ, 1978. – 255 с.
5. Петухов А.П. Свободная от недостатков предшественников // Двигатель. – 2005. – № 5 (41). – С. 14–15.
6. Kaibyshev O.A., Salishchev G.A., Galejev R.M., Lutfullin R.Ya. and Valiakhmetov O.R. Patent PCT/US97/18642, WO 9817836, 30.04.1998.
7. Казачков И.В., Бердин В.К. Методика оценки качества диффузионного соединения тонколистовых металлических материалов // Заводская лаборатория. – 1989. – Т. 55. – № 7. – С. 82–84.
8. Круглов А.А., Мухаметрахимов М.Х., Саркеева А.А. Влияние пор на механические свойства слоистого материала из титанового сплава ВТ6 // Письма о материалах. – 2013. – Т. 3. – Вып. 1. – С. 12–15.
9. Круглов А.А., Мухаметрахимов М.Х. Сварка давлением титанового сплава ВТ6 в условиях низкотемпературной сверхпластичности // Письма о материалах. – 2012. – Т. 2. – С. 161–165.
10. Низкотемпературная сверхпластичность и изготовление полых конструкций из титанового сплава ВТ6 / Р.Я. Лутфуллин [и др.] // Письма о материалах. – 2015. – Вып. 5. – Т. 2. – С. 185–188.

References:

1. Connection in a firm condition of nanocrystal titanic alloys / R.Ya. Lutfullin [etc.] // Perspective materials. – 2003. – № 4. – P. 21–25.
2. The average size of grains in titanic BT6 alloy and the choice of the rational scheme of integrated process of superplastic molding of welding by pressure / A.A. Kruglov [etc.] // Perspective materials. – 2005. – № 6. – P. 79–85.
3. Wright E.S., Levitte A.P. In prince: Composite materials with a metal matrix. T. 4 / Translation from English. – М.: Mechanical engineering, 1978. – P. 49–110.
4. Sokolovskaya E.M., Guzey L.S. Fizikokhimiya of composite materials. – М.: MSU, 1978. – 255 p.
5. Petukhov A.P. Free from shortcomings of predecessors // Engine. – 2005. – № 5 (41). – P. 14–15.
6. Kaibyshev O.A., Salishchev G.A., Galejev R.M., Lutfullin R.Ya. and Valiakhmetov O.R. Patent PCT/US97/18642, WO 9817836, 30.04.1998.
7. Kazachkov I.V., Berdin V.K. Metodik of assessment of quality of diffusive compound of thin-sheet metal materials // Factory laboratory. – 1989. – V. 55. – № 7. – P. 82–84.
8. Kruglov A.A., Mukhametrakhimov M.H., Sarkeev A.A. Influence of a time on mechanical properties of layered material from titanic BT6 alloy // Letter about materials. – 2013. – V. 3. – Issue 1. – P. 12–15.
9. Kruglov A.A., Mukhametrakhimov M.H. Welding by pressure of titanic BT6 alloy in the conditions of low-temperature superplasticity // Letter about materials. – 2012. – V. 2. – P. 161–165.
10. Low-temperature superplasticity and production of hollow designs from titanic BT6 alloy / R.Ya. Lutfullin [etc.] // Letters on materials. – 2015. – Issue 5. – V. 2. – P. 185–188.