



УДК 620.178.74:669.295:62-419

## ПОЛУЧЕНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

### WELDED JOINTS OBTAINING OF DISSIMILAR TITANIUM ALLOYS UNDER THE LOW-TEMPERATURE SUPERPLASTICITY CONDITIONS

**Мухаметрахимов Миннаул Хидиятович**

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

**Аннотация.** Проведены экспериментальные исследования твердофазной свариваемости промышленных титановых сплавов VT6 с VT14 в температурном интервале проявления низкотемпературной сверхпластичности (СП).

Сварка разнородных титановых сплавов позволяет значительно снизить температуру сварки давлением за счет использования сплавов легированных молибденом (Mo).

Использование промежуточного листа VT14 с УМЗ структурой, легированного для стабилизации  $\beta$ -фазы Mo, позволяет локализовать деформацию в зоне соединения за счет существенной разницы между значениями напряжения течения материала прокладки и свариваемых листов. В результате соединения получается конструкционный слоистый материал типа «Сэндвич», в котором содержатся две зоны раздела металлов – между титановыми сплавами VT6 и VT14.

Как показали исследования, с приближением к зоне соединения со стороны титанового сплава VT6 в материале появляется небольшое содержание Mo и при достижении линии соединения количество Mo достигает до уровня основного состава сплава VT14.

Анализ результатов механических испытаний показал, что сварка давлением листовых заготовок в различных сочетаниях способствует достижению повышенных механических свойств и качества соединения.

Для сравнительного анализа в тех же условиях соединяли листовые заготовки из титанового сплава VT6 без промежуточного листа. Механические испытания на растяжения показали, что наблюдается небольшое расслоение по сварному соединению между титановыми листами VT6. И только с увеличением дополнительного сварочного давления и времени выдержки в условиях низкотемпературной сверхпластичности возможно получить качественное соединение.

Таким образом, можно сделать заключение, что получение качественного твердофазного соединения разнородных титановых сплавов определяется не только размером зерна промежуточного листа, но и химическим и фазовым составом в зоне сварных соединений.

**Ключевые слова:** титановые сплавы, твердофазное соединение, сварка давлением, низкотемпературная сверхпластичность, механические свойства, сдвиговая прочность, электронная микроскопия.

**Mukhametrakhimov Minnaul Khidiyatovich**  
PhD, Research Scientist,  
Institute for Metals Superplasticity Problem  
mail@mail.ru

**Annotation.** Experimental studies of VT6 with VT14 industrial titanium alloys solid-phase weldability are carried out in the temperature range of the low-temperature superplasticity (SP).

The VT14 with UFG structure sheet alloyed by Mo to stabilize the  $\beta$ -phase allows localizing deformation at the junction zone due to a significant difference between the values of the interlayer flow stress and welded sheets.

As a result, a structural laminate are obtained «Sandwich» type that contains two metal section areas between VT6 and VT14 titanium alloys. Studies have shown that in the titanium alloy VT6 near the junction zone there is a small Mo content. The number of Mo comes up to basic composition of VT14. Mechanical tests analysis results showed that the pressure welding (PW) sheet billets in different combinations contributes to the high level mechanical properties and joints quality. To comparative analysis the titanium VT6 sheet billet without intermediate sheet under the same conditions were joined. Mechanical tensile test showed that there is a small layering between titanium sheets in the failure zone. It was established that quality solid-phase joint can be obtained by increasing time and pressure. Thus, it can be concluded, that getting dissimilar titanium alloys high-quality solid-phase joint depends not only on the size of the intermediate sheet grains, but also on the material in the joint zone chemical and phase composition. Dissimilar titanium alloys PW can significantly reduce the temperature and time of PW under the low-temperature SP conditions.

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



## Введение

Титановые сплавы широко распространены в машиностроении, авиационной промышленности, судостроении и других областях науки и техники вследствие высокой удельной прочности и коррозионной стойкости в большинстве агрессивных сред. Одним из самых распространенных и эффективных видов соединения титановых сплавов, позволяющих создавать сложные конструкции различного назначения, является сварка.

Соединение металлов и сплавов разного состава является перспективным направлением получения многофункциональных конструкций, у которых определенные зоны работают при разных условиях эксплуатации. В сварных конструкциях используются самые разнообразные титановые сплавы, их сочетания и биметаллы, и чем больше факторов влияет на сварное соединение, тем сложнее добиться необходимых свойств по всему сечению сварного соединения.

Основной проблемой соединений титановых сплавов является сложность получения равных прочности и пластичности в основном металле и сварном шве. Сварка титановых сплавов разных марок позволяет значительно снизить температуру сварки давлением за счет использования легированных Мо сплавов. Однако при создании таких композиций образуются несколько различных по структуре и свойствам зон, что затрудняет выбор последующей термической обработки.

Значительный объем экспериментальных результатов позволил надежно установить, что ускоренное образование ТФС происходит при деформационном соединении в состоянии сверхпластичности по сравнению с традиционной диффузионной сваркой. В частности, в работах [1, 2] на примере двухфазных титановых сплавов BT14 и BT8, легированных для стабилизации  $\beta$ -фазы молибденом (Мо), показана возможность достижения качественного соединения путем «залечивания» дефектов ТФС (микродефектов – пор и макродефектов – несплошностей) в процессе развития основного механизма СП деформации – зернограницного проскальзывания (ЗГП). Для сплава BT14 было выявлено, что вакуумный отжиг при оптимальной температуре СП деформации и соответствующем ей времени не оказывает заметного влияния на изменение протяженности дефектов и изменение прочности соединения.

Таким образом, для двухфазных титановых сплавов, легированных Мо, было экспериментально установлено [1, 2], что образование ТФС определяется механизмами СП течения, и в первую очередь, ЗГП. Однако, принимая во внимание легирование титанового сплава различающимися по своим свойствам  $\beta$ -стабилизаторами, в частности молибденом и ванадием, характеризующихся разными диффузионными параметрами [3], вероятно, вклад диффузионных и деформационных процессов в образование твердофазного соединения на различных этапах его формирования может меняться.

Непосредственное соединение титановых сплавов в различных сочетаниях при низких температурах, полученные в твердом состоянии – сваркой давлением, позволяет избежать или снизить вероятность расслоения и получить работоспособное изделие. Задачу уменьшения размера зерна в зоне сварного шва самых различных композиций следует решать путем использования сплавов с ультрамелкозернистой (УМЗ) исходной структурой.

## Цель работы

Исследование твердофазной свариваемости промышленного титанового сплава BT6 с промежуточным листом из сплава BT14 с УМЗ структурой при пониженной температуре в температурном интервале проявления низкотемпературной СП.

## Материал и методика исследования

Материалом для исследования был выбран промышленный двухфазный титановый микрозернистый (МЗ) сплав BT6 со средним размером зерен 2,3 мкм и BT14 с более мелком размером зерен ~0,8 мкм стандартного химического состава по ГОСТ 19807-91. Химический состав приведен в таблице 1:

**Таблица 1** – Химический состав исследуемого сплава BT6 и BT14

Сплавы	Al	V	Mo	Fe	Si	O	C	N	H	Zr
BT6	6,5	5,1	–	0,3	0,1	0,2	0,1	0,05	0,015	0,3
BT14	3,5–6,3	0,9–1,9	2,5–3,8	0,3	0,15	0,15	0,1	0,05	0,015	0,3

Соединение листовых заготовок, собранных в пакет, выполняли в штамповом блоке, включающем силовые плиты и крепежные элементы [4], показаны на рисунке 1.



**Рисунок 1** – Общий вид инструментальной оснастки для сварки давлением титановых листовых заготовок посредством давления газа через гибкую мембрану

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 приложением газообразного аргона из штуцера через гибкую мембрану на свариваемые заготовки. Глубину вакуума в процессе эксперимента поддерживали не хуже  $P = 2,0 \times 10^{-3}$  Па. Качество твердофазного соединения (ТФС) оценивали по результатам механических испытаний на растяжение в соответствии с ГОСТ 6996-66 и на сдвиг по методике подробно представленной в [5], а также металлографических и фрактографических исследований 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 ТФС оценивали по формуле:

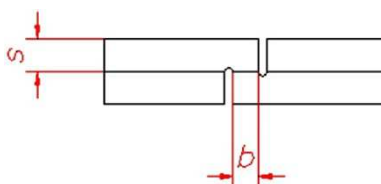
$$L_p = \frac{L_{pi}}{L_o},$$

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

Химический анализ проводили с помощью приставки для энергодисперсионного анализа Oxford Instruments X-act.

Средний размер зерен  $d$  определяли методом секущих [6].

Для испытаний на сдвиг из двухслойных пакетов, сваренных между собой, вырезали специальные образцы, эскиз которых приведен на рисунке 2.



**Рисунок 2** – Поперечное сечение образца для испытаний на сдвиг

Образцы на сдвиг вырезались таким образом, что условная линия ТФС располагалась в средней части образца параллельно оси растяжения.

Согласно методике [5] при толщине листовых заготовок  $s = 1,5$  мм ширину нахлеста в образцах  $b$  выбирали равной 0,5 мм.

Испытания проводили на растяжение и на сдвиг при комнатной температуре на универсальном динамометре фирмы «Instron» модели 5982 по стандартной методике.

### Результаты и их обсуждение

Эксперименты по сварке давлением проводили по двум схемам:

В первом случае соединяли листовые заготовки из титанового сплава ВТ6 с промежуточным листом ВТ14 более мелком размером зерен  $\sim 0,8$  мкм. В результате соединения получается слоистый композит, в котором содержатся две зоны раздела металлов – между титановыми сплавами ВТ6 и ВТ14 (зона ВТ6 + ВТ14) и (зона ВТ14 + ВТ6).

Во втором случае для сравнительного анализа соединяли листовые заготовки из титанового сплава ВТ6 между собой без промежуточного листа.



На рисунке 3а представлена микроструктура сварных соединений титанового сплава ВТ6 через прокладку из УМЗ сплава ВТ14.

Как показали исследования (рис. 3б), с приближением к зоне соединения со стороны титанового сплава ВТ6 в материале появляется небольшое содержания Мо и при достижении линии соединения количество Мо достигает до уровня основного состава сплава ВТ14.

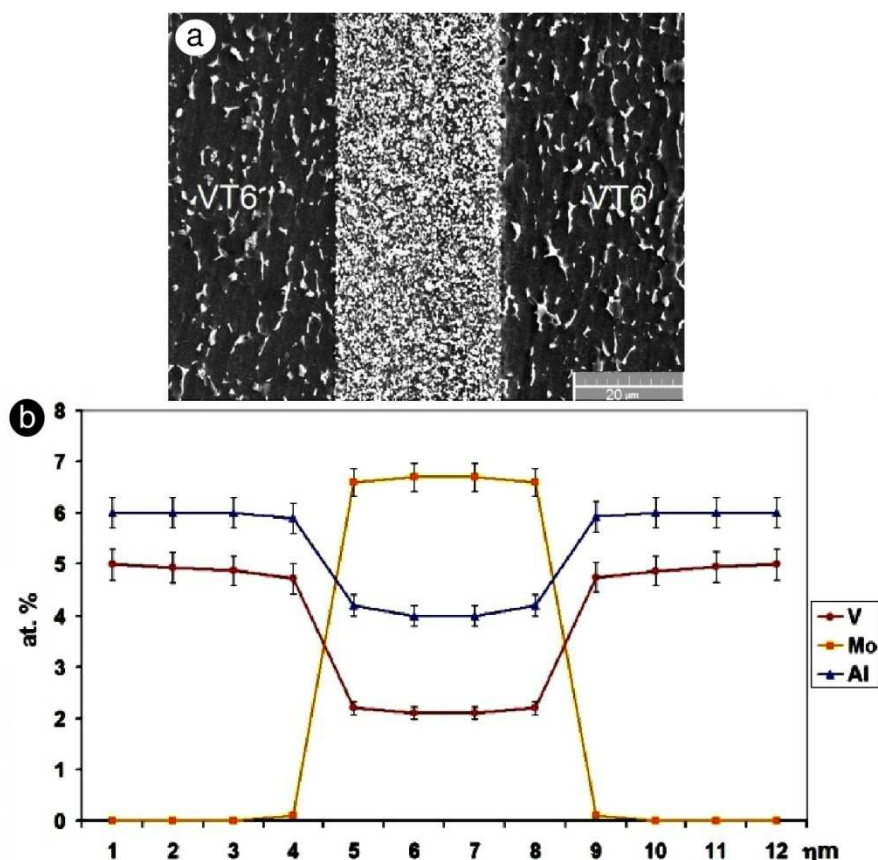


Рисунок 3 – Микроструктура в зоне ТФС – (а) и химический в области границы соединения – (b) после сварки давлением при температуре  $T = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$

Анализ результатов механических испытаний на растяжения показал, что сварка давлением листовых заготовок в различных сочетаниях способствует достижению повышенных механических свойств и качества соединения (рис. 4а). Использование УМЗ прокладки позволяет локализовать деформацию в зоне соединения за счет существенной разницы между значениями напряжения течения материала прокладки и свариваемых заготовок. Таким образом, появляется возможность управления процессом формирования соединения при СД, регламентируя деформацию УМЗ прокладки. А при сварке давлением листовых заготовок из титанового сплава ВТ6 между собой без промежуточного листа наблюдается не большое расслоение по сварному соединению в зоне разрушения (рис. 4б). И только с увеличением дополнительного сварочного давления и времени выдержки в условиях низко-температурной сверхпластичности возможно получить качественное ТФС.

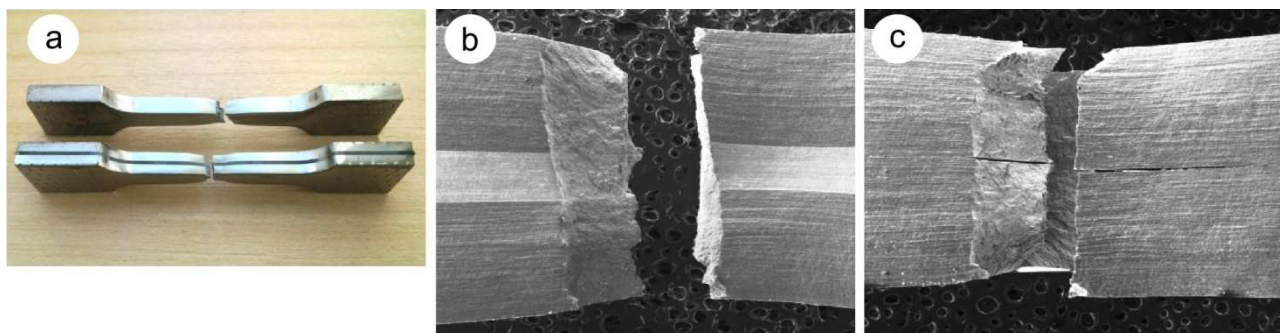


Рисунок 4 – Внешний вид поверхности разрушенного образца, соединенных между собой листов, после испытания на растяжение вдоль сварного соединения:  
а – общий вид; б – с промежуточным листом; с – сварка без промежуточного листа



По результатам фазового анализа титановых сплавов типа ВТ6 известно, что после нагрева и выдержки при температуре СП происходит заметное повышение количества объемно-центрированной кубической (ОЦК)  $\beta$ -фазы [7], которая обладает более высокой диффузионной проницаемостью, чем гексагональная плотноупакованная (ГПУ)  $\alpha$ -фаза, что и приводит к росту эффективного коэффициента диффузии сплава. Развитие ЗГП при СП деформации стимулирует диффузию по границам зерен и приводит к ускоренному залечиванию пор в зоне ТФС путем взаимного сдвига и разворота соседних зерен, которая, ускоряет процесс формирования ТФС. Кроме того, в двухфазном титановом сплаве ВТ6  $\beta$ -фаза играет заметную роль в деформационном «залечивание» пор. В процессе СП деформации  $\beta$ -фаза являясь более пластичной, чем  $\alpha$ -фаза, проникая в полость вытянутых пор, разделяет на более мелкие и/или полностью заполняет их с увеличением степени деформации [8].

С уменьшением размера зерна в сплаве увеличивается суммарная протяженность их границ, что эффективно обуславливает повышение доли ЗГП в процессе всей деформации [9].

Деформационные полосы способны перераспределяться в объеме материала, обеспечивая непрерывность течения при достаточном количестве зерен в поперечном сечении образца. Здесь одновременно действуют кооперированное ЗГП, деформация и вращение зерен, а также активно протекающие диффузионные процессы [10].

Результаты механических испытаний при комнатной температуре на растяжение и на сдвиг образцов, приведены в таблице 2.

**Таблица 2** – Результаты механических испытаний на растяжение и на сдвиг

№	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_t$ , МПа	$\delta$ , %	$\tau_{ср}$	Примечание
1	989	1007	17,2	528	Сварка без промежуточного листа
2	1008	1025	19,4	649	Сварка с промежуточным листом

Из таблицы 2 видно, что использование промежуточного листа из ВТ14 приводит к увеличению прочности  $\sigma_t$  и  $\tau_{ср}$ , при этом наблюдается небольшое повышение пластичности.

Как мы видим из экспериментальных данных, использование сплава ВТ14 в УМЗ исходном состоянии приводит к твердофазному соединению материалов при более низкой температуре в условиях низкотемпературной СП.

Таким образом, получение качественного твердофазного соединения различных титановых сплавов определяется не только размером зерна промежуточного листа, но и

## Вывод

Экспериментально показана возможность получения равнопрочного ТФС листов из промышленного титанового сплава ВТ6 при относительно низкой температуре ( $T = 700$  °С) благодаря использованию промежуточного листа из ВТ14 с более мелким размером зерен  $\sim 0,8$ .

## Литература:

1. Кайбышев О.А., Лутфуллин Р.Я., Бердин В.К. Механизм формирования твердофазного соединения в состоянии сверхпластичности // ДАН. – 1991. – Т. 319. – № 3. – С. 615.
2. Лутфуллин Р.Я. Сверхпластичность и свариваемость титанового сплава ВТ8 в твердом состоянии / Р.Я. Лутфуллин [и др.] // Металлы. – 2002. – № 2. – С. 102.
3. Цвиккер У. Титан и его сплавы. – М. : Metallurgia, 1979. – 512 с.
4. Казачков И.В., Бердин В.К. Заводская лаборатория. – 1989. – № 55 (7). – С. 82–84.
5. Бердин В.К., Лутфуллин Р.Я., Казачков И.В. – 1991. – Бюл. изобр. № 1.
6. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. – М. : Metallurgia, 1976. – 271 с.
7. Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов. – М. : Metallurgia, 1984. – 264 с.
8. Lutfullin R.Ya., Mukhametrakhimov M.Kh.. Твердофазное соединение нанокристаллического титанового сплава при пониженных температурах // Journal of Advanced Materials. – 2009. – № 7. – 189 с.
9. Kaibyshev O.A., Valiev R.Z. Grain Boundaries and Properties of Metals. – М. : Metallurgia, 1987. – P. 212.
10. Астанин В.В. Масштабный фактор и сверхпластичность сплава Al-6%Cu-0,4%Zr // ФММ. – 1995. – Т. 79. – Вып. 3. – С. 166–172.

## References:

1. Kaibyshev O.A., Lutfullin R.Ya., Berdin V.K. Mechanism of the solid-phase compound formation in the state of superplasticity // DAN. – 1991. – Т. 319. – № 3. – P. 615.
2. Lutfullin R.Ya. Superplasticity and weldability of the titanium alloy VT8 in a solid state / R.Ya. Lutfullin [et al.] // Metals. – 2002. – № 2. – P. 102.
3. Zviker U. Titan and his alloys. – М. : Metallurgy, 1979. – 512 p.



4. Kazachkov I.V., Berdin V.K. Factory laboratory. – 1989. – № 55 (7). – P. 82–84.
5. Berdin V.K., Lutfullin R.Y., Kazachkov I.V. – 1991. – Inventory № 1.
6. Saltykov S.A. Stereometric metallography. – M. : Metallurgy, 1976. – 271 p.
7. Kaybyshev O.A. Superplasticity of industrial alloys. – M. : Metallurgy, 1984. – 264 p.
8. Lutfullin R.Ya., Mukhametrakhimov M.Kh. Solid-phase compound of nanocrystalline titanium alloy at low temperatures // Journal of Advanced Materials. – 2009. – № 7. – 189 p.
9. Kaibyshev O.A., Valiev R.Z. Grain Boundaries and Properties of Metals. – M. : Metallurgia, 1987. – P. 212.
10. Astanin V.V. Scale factor and superplasticity of Al-6%Cu-0,4%Zr // FMM. – 1995. – Т. 79. – Issue. 3. – P. 166–172.