

УДК 669.295

И. А. ПЕТРИК<sup>1</sup>, А. В. ОВЧИННИКОВ<sup>2</sup>, А. Г. СЕЛИВЕРСТОВ<sup>1</sup>, В. Г. ШЕВЧЕНКО<sup>2</sup><sup>1</sup> АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина<sup>2</sup> Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

## ПОВЫШЕНИЕ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ ГТД ИЗ ДВУХФАЗНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ8

*В работе рассмотрены вопросы, связанные со сваркой деталей ГТД из двухфазного титанового сплава ВТ8. Выполнены сравнительные исследования различных методов сварки, применяемых для титановых сплавов. Показано, что применение методов сварки плавлением для двухфазных титановых сплавов приводит к изменениям структуры и снижению свойств сварных соединений. Применение метода сварки трением, за счет минимальных изменений структуры, позволяет получить равнопрочные сварные соединения. Показано, что сварка трением выполняется в твердой фазе при температуре, не превышающей температуру полиморфного превращения, что позволяет сохранить тип структуры.*

**Ключевые слова:** титановые сплавы, сварные соединения, структура, механические свойства, сварка трением.

### Введение

Некоторые детали ГТД, например, барабаны компрессора, имеют сварную конструкцию. Для изготовления ответственных роторных деталей компрессора используют сложнелегированные двухфазные титановые сплавы ВТ8, ВТ9, ВТЗ-1 и др. Однако известно, что двухфазные титановые сплавы являются ограниченно свариваемыми. Влияние термического цикла распространенных методов сварки плавлением, таких как аргонодуговая (АДС) и электронно-лучевая сварка (ЭЛС), приводит к значительным структурным изменениям и снижению механических свойств сварных соединений. Для обеспечения надежной работы деталей на протяжении ресурса, требуется увеличение запаса прочности сварных соединений [1]. Как показывает мировой опыт, повышения механических свойств можно достичь за счет получения структуры в зоне сварки и зоне термического влияния (ЗТВ) с минимальной разницей по сравнению с основным металлом (ОМ). Для этого необходимо уменьшить продолжительность пребывания материала шва при температуре выше температуры полиморфного превращения, что можно достичь сваркой трением (СТ). Для обеспечения требуемых механических свойств ответственных деталей авиационных ГТД, которые изготавливают в различном структурном состоянии, актуальным направлением являются комплексные исследования, связанные с отработкой технологии различных видов сварки, с учетом закономерностей влияния структурного состояния сплавов на механические и служебные свойства сварных соединений [2].

### Методика проведения исследований

Исследования проводили на образцах из материала ВТ8. Сварку выполняли следующими методами: аргонодуговой (АДС), электронно-лучевой (ЭЛС) и сваркой трением (СТ).

В исследуемых образцах определяли химический состав, механические и жаропрочные свойства, а также изучали микроструктуру.

Химический состав определяли рентгеноспектральным и химическим методами, а структурных составляющих энергодисперсионным рентгеноспектральным методом. Металлографические исследования структур проводили с использованием оптического, растрового и просвечивающего электронных микроскопов.

Механические свойства определяли по стандартным методикам при статических и знакопеременных нагрузках, также определяли жаропрочность. Временное сопротивление разрыву определяли на установке INSTRON-8801. Жаропрочность определяли с помощью установки «УММ-20» при  $T=350^{\circ}\text{C}$ , на базе 100 часов.

### Анализ полученных результатов

Исследования выполняли на образцах толщиной 2 мм. Структурное состояние образцов соответствовало равноосному и бимодальному типам исходных структур, представленным на рис. 1. Определен исходный уровень механических свойств для основного металла с различными типами исходной структуры. Результаты представлены в табл. 1.

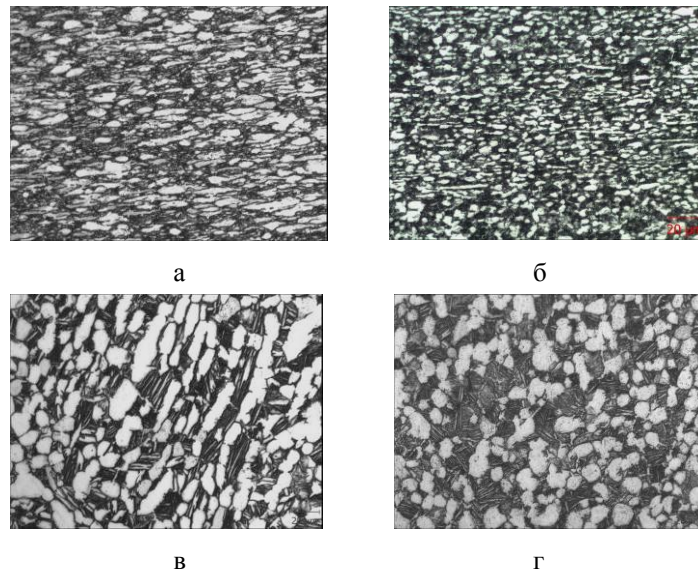


Рис. 1. Типичная микроструктура образцов:  
а, б – равноосного типа; в, г – бимодального типа

Таблица 1

Механические свойства основного металла сплава BT8

Структура	Механические свойства			
	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_{100}^{350}$ , МПа	$\sigma_{-1}$ , МПа
равноосная	1170	15	775	784,8
бимодальная	1070	12	785	-

Результаты испытаний сварных соединений приведены в табл. 2. При этом установлено, что прочность сварных соединений, выполненных сваркой плавлением значительно ниже, чем у основного металла. Прочность сварных соединений, выполненных

сваркой трением, находится на уровне основного металла. При этом наибольшая прочность получена для образцов с комбинацией исходных структур равноосного типа, независимо от метода сварки.

Таблица 2

Механические свойства сварных соединений

Комбинации структур образцов	Метод сварки	$\sigma_{св.}$ , МПа	$\delta_{св.}$ , %
Равноосная и равноосная	АДС	986,5	7,5
	ЭЛС	1080,2	8
	СТ	1162,0	8
Равноосная и бимодальная	АДС	938,4	6,8
	ЭЛС	1018,4	8,2
	СТ	1120,6	7,5
Бимодальная и бимодальная	АДС	930,0	8,5
	ЭЛС	1020,2	8,8
	СТ	1070,0	8,2

Анализ структур сварных соединений, приведенных на рис. 2-4 показал, что в сварных швах, выполненных методами сварки плавлением, независимо от комбинации исходных структур, происходит формирование нерегламентированной крупнозернистой пластинчатой структуры. При этом размер первичной  $\beta$ -фазы составлял ~170...320 мкм, а  $\alpha$ -пластин около

20...40 мкм. В сварных швах, выполненных методом сварки трением, независимо от комбинации исходных структур, происходит формирование структуры равноосного типа. Установлено, что при сварке трением размер структурных составляющих в сварном шве до 10 раз меньше чем при сварке плавлением и составляет 2...4 мкм.

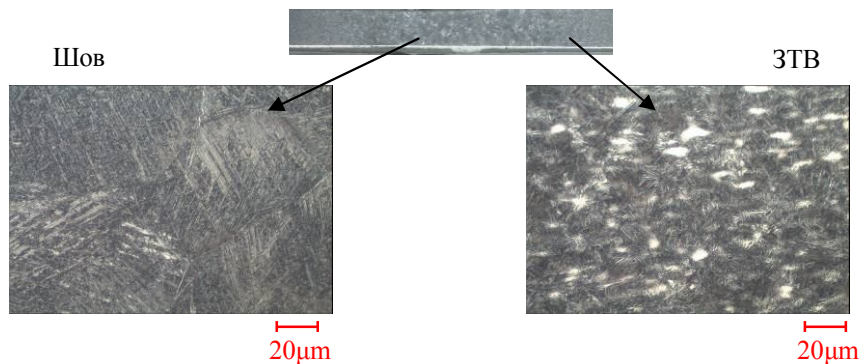


Рис. 2. Типичная микроструктура в различных зонах сварного соединения, выполненного АДС

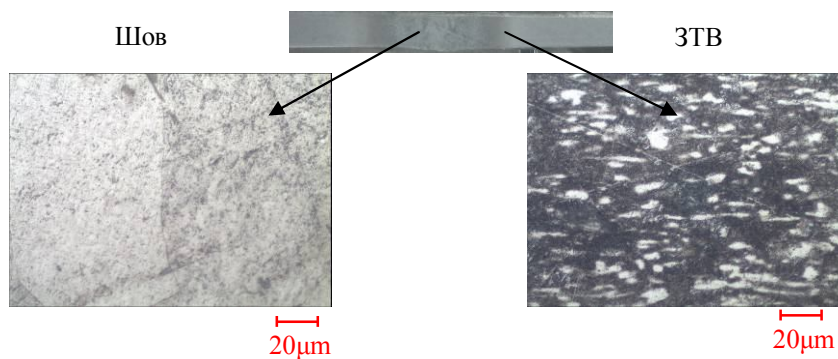


Рис. 3. Типичная микроструктура в различных зонах сварного соединения, выполненного ЭЛС

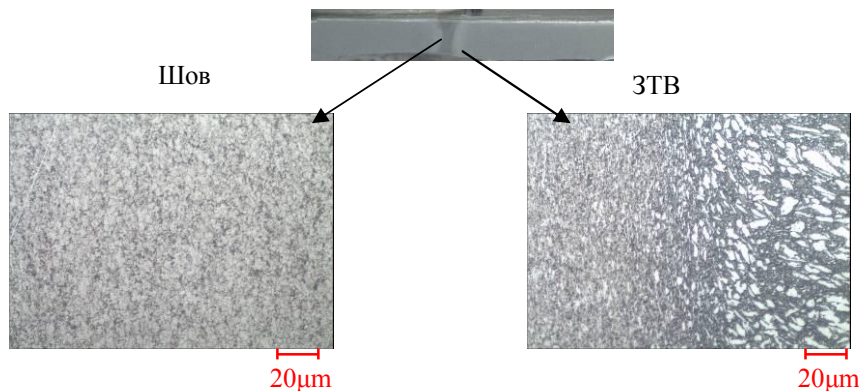


Рис. 4. Типичная микроструктура в различных зонах сварного соединения, выполненного СТ

Определение размеров зоны термического влияния проводили за счет измерения твердости и исследованиями структурных изменений на микрошлифах. Результаты замеров приведены на рис. 5. При этом установлены следующие размеры зон термического влияния: для АДС - 5...7 мм, для ЭЛС - 2...4 мм, для сварки трением не более 2 мм.

Для подтверждения отсутствия значительных изменений структуры при сварке трением выполнены исследования на растровом электронном микроскопе методом энергодисперсионного анализа. При этом выполнен анализ химического состава как в  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазах, так и в структурных составляющих  $\beta$ -фазы. Результаты приведены на рис. 6 и табл. 3,4.

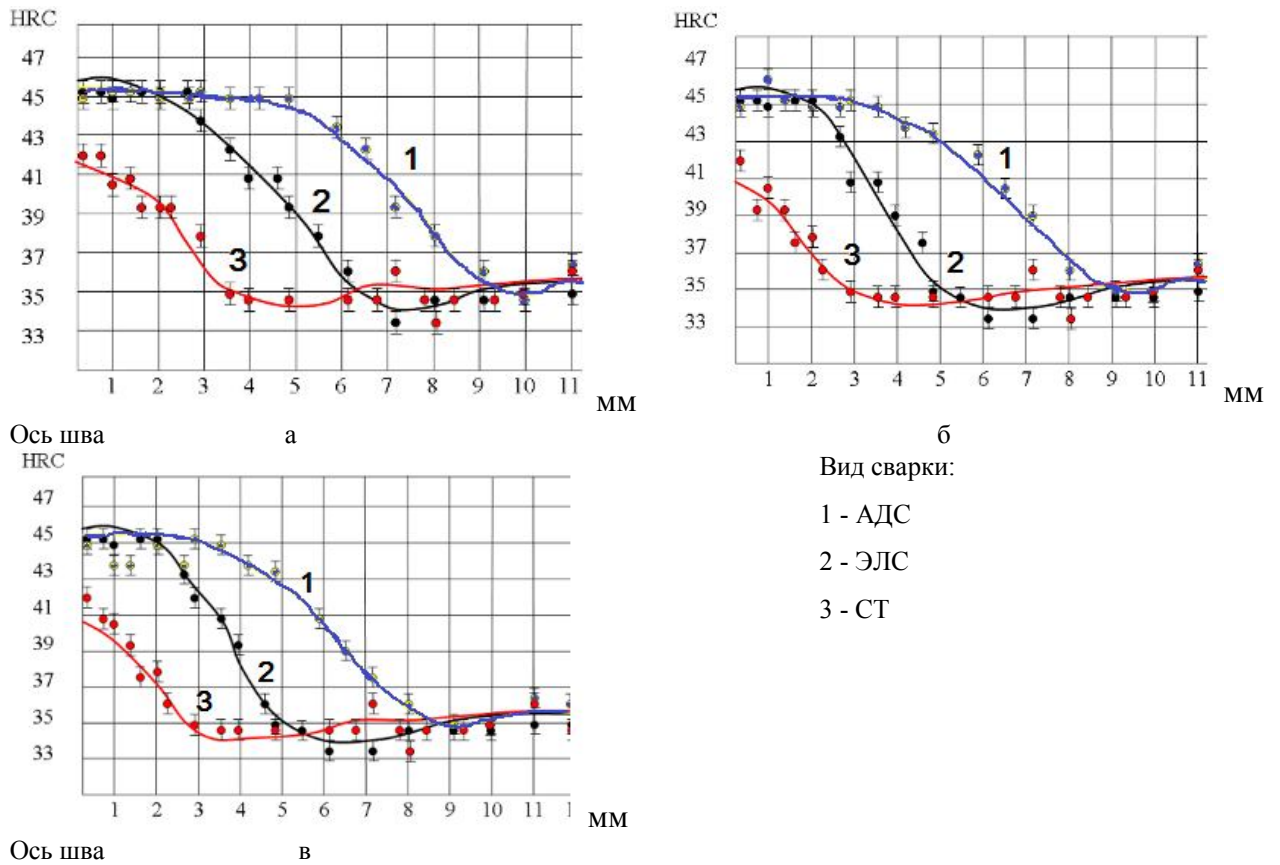


Рис. 5. Результаты замеров твердости в сварных соединениях с комбинациями структур: а - равноосная+равноосная; б - бимодальная+бимодальная; в - равноосная+бимодальная

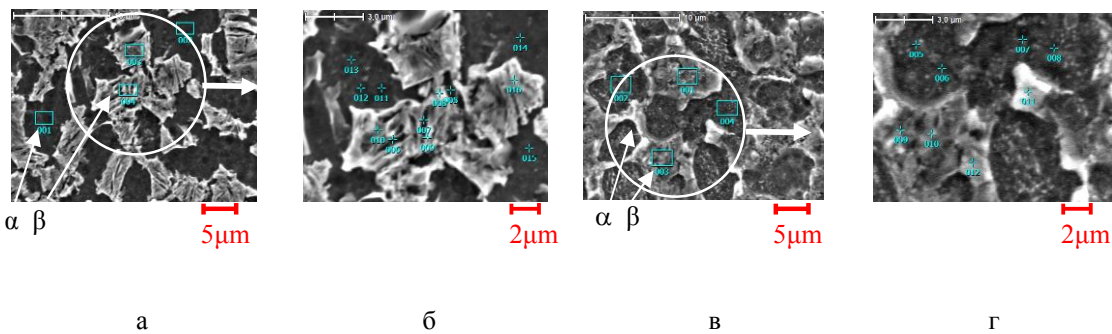


Рис. 6. Определение содержания легирующих элементов в различных зонах сварного соединения, выполненного СТ:  
 а, б – основной металл; в, г – сварной шов

Таблица 3

Содержание легирующих элементов в α- и β-фазах (см. рис. 5, а, б).

№ точки	Содержание элементов, %							
	Al		Si		Ti		Mo	
	шов	осн.мет	шов	осн.мет	шов	осн.мет	шов	осн.мет
001	3,75	6,11	0,28	0,30	89,93	93,56	6,04	-
002	6,01	5,81	0,36	0,36	93,63	93,83	-	-
003	3,55	2,94	0,30	0,32	90,72	90,76	5,43	5,98
004	5,85	2,67	0,39	0,30	93,76	92,11	-	4,92

Анализ результатов исследований рентгеноструктурной, просвечивающей и рентгеноспектральной микроскопии позволил установить, что перераспределение легирующих элементов выполняется вследствие термомеханического влияния в процессе сварки трением при температуре начала  $\alpha$ - $\beta$  пре-

вращения, но ниже конца этого температурного интервала. В рамках  $\beta$ -зерен происходит перераспределение легирующих элементов и исчезает концентрационная неоднородность легирующих элементов между  $\alpha$  та  $\beta$  составляющими  $\beta$ -зерна, которая по Al составляла более 2-х раз и по Mo достигала 7 раз.

Таблица 4

Содержание основных легирующих элементов в составляющих  $\beta$ -зерен (см. рис 5, в, г)

№ точки	Содержание элементов, %							
	Al		Si		Ti		Mo	
	шов	осн.мет	шов	осн.мет	шов	осн.мет	шов	осн.мет
005	6,05	5,94	0,24	0,20	93,71	93,86	-	-
006	5,88	6,41	0,34	0,38	93,78	93,21	-	-
007	5,91	5,86	0,21	0,22	93,88	93,92	-	-
008	6,16	3,71	0,38	0,36	93,46	90,46	-	5,47
009	2,67	3,13	0,31	0,37	91,15	90,02	5,87	6,48
010	3,42	3,39	0,40	0,29	90,03	90,93	6,15	5,39
011	3,39	6,1	0,34	0,40	89,94	93,50	6,33	-
012	2,63	3,7	0,29	0,32	91,42	90,14	5,66	5,84

В рамках  $\beta$ -фазы формируется  $\alpha'$ -фаза, с параметрами  $a = 0,29223$  нм и  $c = 0,47447$  нм, при  $a = 0,29233$  нм и  $c = 0,47471$  нм – для кристаллической решетки первичного  $\beta$ -зерна. При этом между равноосными зернами  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз диффузия элементов практически отсутствует.

Структурные превращения повлияли на характер разрушения сварных соединений [3]. Показано, что при сварке трением разрушение имеет пластичный характер, а при сварке плавлением разрушение имело хрупкий характер. Поверхности разрушения представлены на рис. 7.

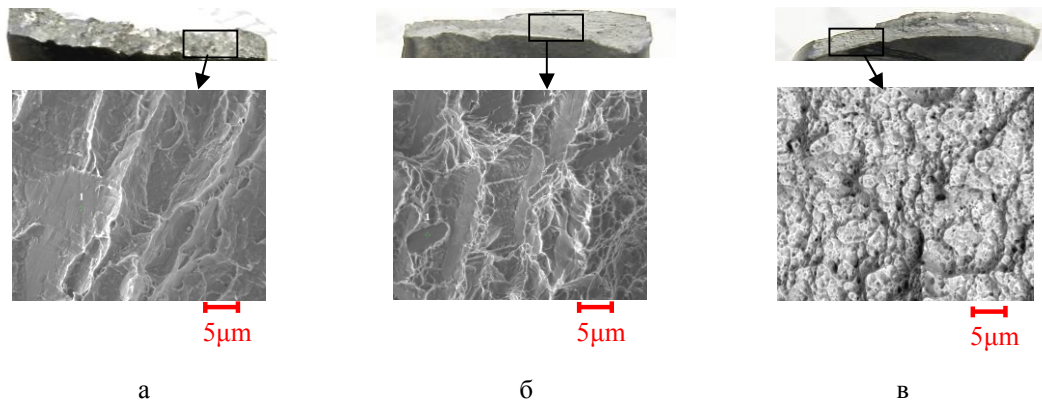


Рис. 7. Типичные поверхности разрушения сварных образцов: а – АДС; б – ЭЛС; в – СТ

Исследованиями жаропрочности сварных соединений установлено, что жаропрочность  $\sigma_{100}^{350}$  находилась в диапазоне 785...930 МПа. Однако для основного металла  $\sigma_{100}^{350} = 775$  МПа. Таким образом, уровень жаропрочности для всех методов сварки соответствовал основному металлу.

Исследованиями предела выносливости установлено, что наибольшее значение предела выносливости получено на образцах, выполненных методом СТ:  $\sigma_{-1} = 725,94$  МПа, наименьшее на образцах, выполненных методом АДС:  $\sigma_{-1} = 553,21$  МПа, для ЭЛС предел выносливости составлял:

$\sigma_{-1} = 578,35$  МПа. Это связано со структурными изменениями, которые возникают вследствие сварки. Так, изменение типа структуры и формирование нерегламентированной крупнозернистой пластинчатой структуры, а также наибольшей зоны термического влияния при АДС приводят к снижению  $\sigma_{-1}$  сварных соединений. Наоборот, незначительные структурные изменения с сохранением типа исходной структуры и наименьшими размерами зоны термического влияния при СТ приводят к сохранению  $\sigma_{-1}$  сварных соединений на уровне основного металла.

## Заклучение

1. Исследованиями механических свойств установлено возможность повышения механических свойств сварных соединений, так при сварке плавлением прочность сварных соединений не превышала 85% от прочности основного металла, а при сварке трением прочность сварных соединений составляла более 95% от прочности основного металла.

2. Исследованиями структур установлено, что при сварке плавлением в шве происходит образование нерегламентированной крупнозернистой пластинчатой структуры, а размер первичной  $\beta$ -фазы составляет 170...320 мкм. При сварке трением в шве формируется равноосный тип структуры, а размер составляющих до 10 раз меньше, чем при сварке плавлением и составляет 20...40 мкм.

3. Показано, что сварка трением происходит в твердой фазе в интервале температур  $\alpha$ - $\beta$  превращения, что позволяет сохранить тип структуры. При этом не меняется внутризеренная структура, а все изменения происходят в рамках первичного  $\beta$ -зерна.

4. На основании полученных результатов установлено, что применение сварки трением позволит уменьшить размеры и массу сварных соединений до 10%, а также расширить зоны ремонта до 30% по сравнению с ранее применявшимися методами.

## Литература

1. Влияние параметров режима сварки трением на структуру и механические свойства соединений титанового сплава VT3-1 [Текст] / А. Г. Селиверстов, Ю. М. Ткаченко, Р. А. Куликовский [и др.] // Автоматическая сварка. – 2013. – № 1. – С. 29 – 34.

2. Повышение работоспособности лопаток из титановых сплавов вентилятора авиадвигателя [Текст] / И. А. Петрик, А. В. Овчинников, Ю. Ф. Басов [и др.] // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 4. – С. 104 – 107.

3. Петрик, И. А. Повышение свойств сварных соединений роторных деталей из титановых сплавов [Текст] / И. А. Петрик, А. Г. Селиверстов, А. В. Овчинников // Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – № 8 (115). – С. 25 – 29.

## References

1. Seliverstov, A. G., Tkachenko, Ju. M., Kulikovskij, R. A., Braginec, V. I., Zjajor, I. V. Vlijanie parametrov rezhima svarki treniem na strukturu i mehanicheskie svojstva soedinenij titanovogo splava VT3-1 [The effect of mode parameters of friction welding on structure and mechanical properties of joints of titanium alloy VT3-1]. *Avtomaticheskaja svarka*, 2013, no. 1, pp. 29-34.

2. Petrik, I. A., Ovchinnikov, A. V., Basov, J. F., Shevchenko, V. G., Rjagin, S. L., Seliverstov, A. G. Povyshenie rabotosposobnosti lopatok iz titanovyh splavov ventiljatora aviadvigatelja [Improving the performance of blades made of titanium alloys of aircraft engine fan]. *Vestnik dvigatelestroenija*, 2006, no. 4, pp. 104-107.

3. Petrik, I. A., Seliverstov, A. G., Ovchinnikov, A. V. Povyshenie svojstv svarnyh soedinenij rotornyh detalej iz titanovyh splavov [The improvement of properties of welded joints of rotor parts made of titanium alloys]. *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*, 2014, no. 8 (115), pp. 25-29.

Поступила в редакцию 18.04.2016, рассмотрена на редколлегии 14.06.2016

## ПІДВИЩЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ДЕТАЛЕЙ ГТД З ДВОФАЗНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВУ VT8

**І. А. Петрик, О. В. Овчинніков, О. Г. Селіверстов, В. Г. Шевченко**

В роботі розглянуто питання, які пов'язано зі зварюванням деталей ГТД з двофазного титанового сплаву VT8. Виконано порівняльні дослідження різних методів зварювання, котрі використовуються для деталей з титанових сплавів. Показано, що використання методів зварювання плавленням для двофазних титанових сплавів призводить до структурних змін та зниження властивостей зварних з'єднань. Встановлено, що використання методу зварювання тертям дозволяє отримати зварні з'єднання рівномірні основному металу. Показано, що зварювання тертям виконується в твердій фазі при температурі, не вищій за температуру поліморфного перетворення, що дозволяє зберегти вихідний тип структури та рівень властивостей основного металу.

**Ключові слова:** титанові сплави, зварні з'єднання, структура, механічні властивості, зварювання тертям.

**PROPERTIES INCREASING OF WELDED JOINTS OF BT8 TITANIUM PARTS  
FOR GAS-TURBINE ENGINES**

*I. A. Petrik, A. V. Ovchinnikov, A. G. Seliverstov, V. G. Shevchenko*

This thesis work has studied the welding of the gas-turbine engine parts of the BT8 two-phase titanium alloy. Comparative investigations of various welding procedures on titanium alloy parts were performed. It was demonstrated that use of fusion welding for two-phase alloys results in changing structure and decreasing welded joint properties. It was determined that strength balance of welded joints and base metal can be created due to friction welding. It was exhibited that friction welding is performed in solid phase at temperature which is not above the polymorphic transformation temperature, it renders possible to maintain original structure type and base metal properties level.

**Key words:** titanium alloys, welded joints, structure, mechanical properties, friction welding.

**Петрик Игорь Андреевич** – канд. техн. наук, главный сварщик АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com,

**Овчинников Александр Владимирович** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Оборудование и технология сварочного производства», Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

**Селиверстов Александр Георгиевич** – начальник бюро сварки АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com

**Шевченко Владимир Григорьевич** – канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Механика», Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

**Petrik Igor Andreevich** - Candidate of Technical Science, Chief Welding Engineer, JSC “Motor Sich”, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

**Ovchinnikov Aleksandr Vladimirovich** – Doctor of Technical Science, Professor, Head of Dept. of Equipment and Technology of Welding Production, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporozhye, Ukraine.

**Seliverstov Aleksandr Georgievich** – Chief of Welding Bureau, JSC “Motor Sich”, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

**Shevchenko Vladimir Grigorevich** - Candidate of Technical Science, Head of Dept. of Mechanics, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporozhye, Ukraine.