

УДК 621.791.725;621.431.75; 669.018.44

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПАЯНОГО СОЕДИНЕНИЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ9 С ПИРОГРАФИТОВЫМ КОЛЬЦОМ В УЗЛАХ УПЛОТНЕНИЯ ТУРБОНАСОСНОГО АГРЕГАТА РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2016 И.А. Дяговцов, В.Г. Климов, А.С. Попов, А.В. Когтева, Е.Ю. Щедрин,
Д.А. Баранов

ПАО «Кузнецов», г. Самара

Статья поступила в редакцию 28.03.2016

Рассматривается процесс пайки пирографитового кольца к титановой втулке серебряным припоем, легированным титаном, в узлах уплотнения турбонасосного агрегата ракетного двигателя НК-33. Проводится анализ причин разрушения описываемых соединений и поиск путей повышения выхода годной продукции. С помощью металлографического анализа произведена оценка качества пайки. Произведена оценка пластичности спая посредством измерения микротвердости по ширине спая, а также отдельных фаз. Установлено, что в данном типе соединения при остывании после пайки возникают внутренние напряжения, частично снимаемые за счет пластичности паяного шва. Обнаружено существенное увеличение твердости спая, вероятно, за счет образования интерметаллидных соединений и карбидов на основе титана.

Ключевые слова: *пирографит, сплав ВТ9, серебряный припой, паяный шов, структура, микротвердость, интерметаллиды, карбиды*

Уникальные физико-химические свойства пиро-литического графита обусловили успешное применение его в качестве уплотняющего материала в турбо-насосных агрегатах ракетных двигателей, в данном случае в двигателе НК-33. Имея большую плотность, изотропный пирографит практически непроницаем для газов и жидкостей, обладает прекрасными анти-фрикционными свойствами, высокой коррозионной стойкостью, повышенной сопротивляемостью воздействию вибрационных нагрузок. В конструкциях машин графит обычно применяют в сочетании с металлами. Соединения выполняются посредством пайки, так как в отличие от сварки плавлением пайка может быть осуществлена при любых температурах, лежащих ниже температуры плавления основного металла. Одним из преимуществ пайки является возможность соединения в единое целое за один прием множества заготовок, составляющих изделие. Поэтому пайка, как ни один другой способ соединения, отвечает условиям массового производства. Она позволяет соединять разнородные металлы, а также металлы со стеклом, керамикой, графитом и другими неметаллическими материалами, что невозможно или весьма трудно осуществить сваркой. Поскольку при пайке не происходит расплавления кромок паяемых деталей, то при использовании этого способа соединения проще сохранить в процессе изготовления требуемую форму и размеры изделия [1].

На сегодняшний день существуют определенные трудности соединения графита с металлами методом пайки, связанные с существенными различиями их теплофизических и физико-механических характеристик: теплопроводности, модуля упругости, прочности и

особенно термического расширения. В результате этих ра-личий возникают существенные напряжения [2]. По результатам теоретических и экспериментальных исследований смачивания углеродных материалов расплавами металлов для пайки графита в работе Федорова В.Б. приведены составы наиболее адгезионно-активных припоев с присутствием металлов Ti, Cr, Nb, Ta и др [3]. Графит – материал с анизотропией свойств, удовлетворительно работающий на сжатие, в случае растяжения и изгиба он имеет низкую прочность. Можно заключить, что конструкция паяного узла обязана обеспечить работу пирографитового кольца именно на сжатие. Исходя из этого, целесообразна конструкция соединения, когда графитовое кольцо охватывается металлической облойкой и пайка осуществляется по цилиндрической поверхности [4, 5].

В рассматриваемом узле уплотнения пиро-графит соединяется с металлической деталью (ВТ9) посредством высокотемпературной пайки с серебряным припоем, легированным титаном. Этот процесс, осуществляемый в защитной атмосфере аргона, имеет существенные недостатки. При производстве графитовых уплотнителей на предприятии ПАО «Кузнецов» коэффициент брака при операции пайки способен достигать 80%. Например, при изготовлении узлов довольно частым явлением являлось разрушение пиро-графитового кольца во время охлаждения с температуры пайки. Разрушение происходило, как по паяному шву, так и по основному материалу – пирографиту, с образованием трещин в галтелях (рис. 1). Также нередко наблюдалось образование в пирографите микро-трещин, распространяющихся, как правило, в области границ светлой и темной фаз спая (рис. 2).

Разрушение пирографита и образование в нем трещин обычно объясняется возникшими при охлаждении узла с температуры пайки напряжениями, превысившими предел его прочности [4, 6-8]. Но это не объясняет недостаточную релаксацию напряжений за счет пластичного серебряного припоя. В силу этого выход годных узлов находился на низком уровне – 20%. В настоящее время требуется совершенствование технологии изготовления дорогостоящих узлов.

Дяговцов Игорь Анатольевич, инженер бюро пайки. E-mail: diagovtsov@yandex.ru

Климов Вадим Геннадьевич, начальник бюро сварки. E-mail: vadim3945@yandex.ru

Попов Александр Сергеевич, инженер бюро оборудования и новых технологических процессов. E-mail: popov1106@mail.ru

Когтева Александра Владимировна, инженер-лаборант лаборатории сварки и пайки. E-mail: koe7305@yandex.ru

Щедрин Евгений Юрьевич, главный сварщик. E-mail: ugs@kuznetsov-motors.ru

Баранов Дмитрий Александрович, инженер бюро сварки. E-mail: D.Baranov91@mail.ru

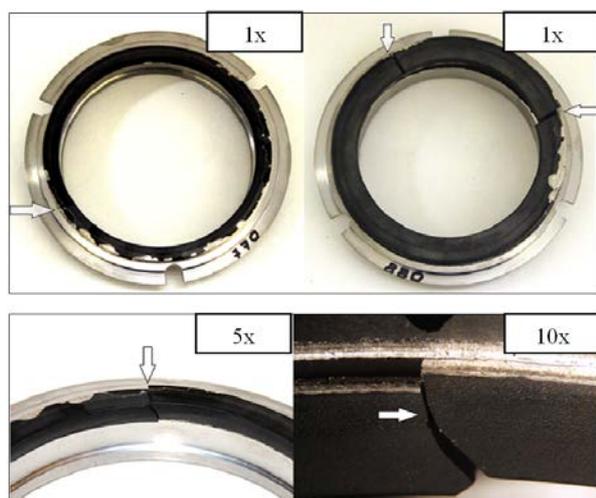


Рис. 1. Внешний вид паяных узлов с разрушившимся пирографитовым кольцом (стрелками обозначены трещины)

Применяемые материалы для производства узлов. Втулки изготавливаются из титанового сплава ВТ9. Состав и процентное содержание компонентов (элементов) представлены в табл. 1. Фольга серебряного припоя ПСрМО68-27-05 размерами 15x15 мм толщиной 0,1 мм. Состав и процентное содержание компонентов (элементов) представлены в табл. 2. Титановая фольга ВТ1-0 размерами 15x15 мм толщиной 0,1 мм растворяется в расплаве припоя,

Таблица 1. Титановый сплав ВТ9 (ОСТ 190000-70)

Ti	Mo	Al	Si	Zr	Fe	C	N	O	H
основа	2,8-3	5,8-7	0,2-0,35	0,8-2	не более				
					0,25	0,1	0,05	0,15	0,015

Таблица 2. Серебряный припой ПСрМО68-27-05 (ЦМТУ 07-41-68)

Ag	Cu	Sn	Pb	Fe	Bi
основа	26,5	4,5-5,5	не более		
			0,005	0,15	0,005

Таблица 3. Титановый сплав ВТ1-0 (ГОСТ 19807-91)

Ti	Fe	C	N	O	H
основа	не более				
	0,25	0,1	0,04	0,2	0,01

Методика исследований. Была произведена пайка 2-х узлов согласно действующей технологии. Внешний вид паяных узлов представлен на рис. 1. Паяные соединения исследовались на металлографическом микроскопе МИМ-8М, а измерения твердости проводились на микро-твердомере «EMCO-TEST PrufmaSchinen GmbH» (Австрия) DuraScan-10 на базе центральной за-водской лаборатории (ЦЗЛ) предприятия ПАО «Кузнецов».

При внешнем осмотре втулки с увеличением 4-16^x в материале графитового кольца обнаружено следующее:

- поперечная сквозная трещина;
- продольная сквозная трещина со стороны внутреннего диаметра втулки;
- на поверхности галтели спая обнаружены множественные микротрещины.

легируя его. Состав и процентное содержание компонентов (элементов) представлены в табл. 3.

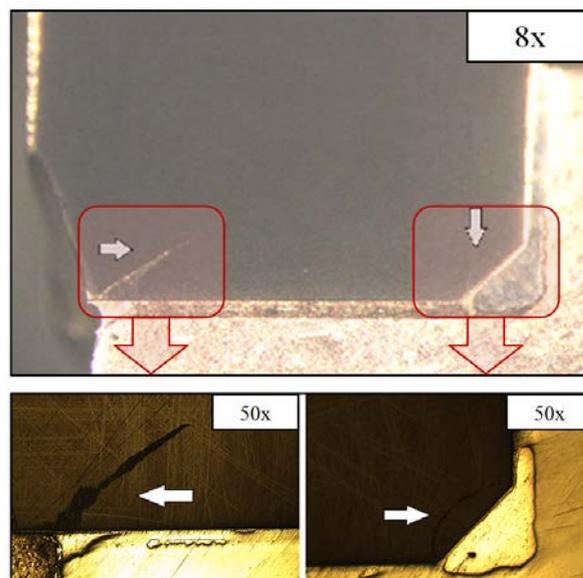
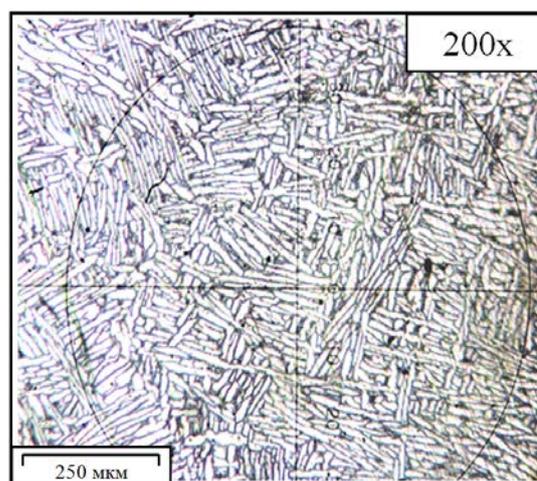


Рис. 2. Макроструктура соединения титановой (ВТ9) втулки и кольца пирографита (стрелками указаны микротрещины)

После вскрытия продольной сквозной трещины установлено, что разрушение произошло по основному материалу графитового кольца, распространяющемуся от галтели спая. Излом хрупкий, матовый, на поверхности излома следов припоя не обнаружено, что может свидетельствовать о возникновении трещин разрушения после кристаллизации спая в процессе охлаждения узла после пайки.



Макро- и микроисследование проводилось в поперечных сечениях паяных соединений. Макроструктура паяных соединений обеих втулок представлена на

рис. 2. В исследованных сечениях наблюдается неравномерное распределение фазовых составляющих обоих спаев – светлая фаза вытеснена в зоны галтелей. В материале графитового кольца обнаружены трещины (см. рис. 2), распространяющиеся около границы зон светлой фазы, расположенной в галтелях спаев. Толщина спаев со стороны бокового (вертикального) зазора между графитовым кольцом и втулкой составляет ориентировочно 0,2 мм. Микроструктура основного материала титановых (BT9) втулок представлена на

рис. 3. Структура всех исследованных втулок из титанового сплава BT9 была идентична, не наблюдалось никаких отклонения, которые могли бы отрицательно повлиять на процесс пайки. Микроструктура спаев представлена на рис. 4. На шлифах отчетливо наблюдается неравномерное распределение фаз по всей толщине паянного шва, осуществленного припоем ПСрМО68-27-05.

Рис. 3. Микроструктура втулки из титанового сплава BT9

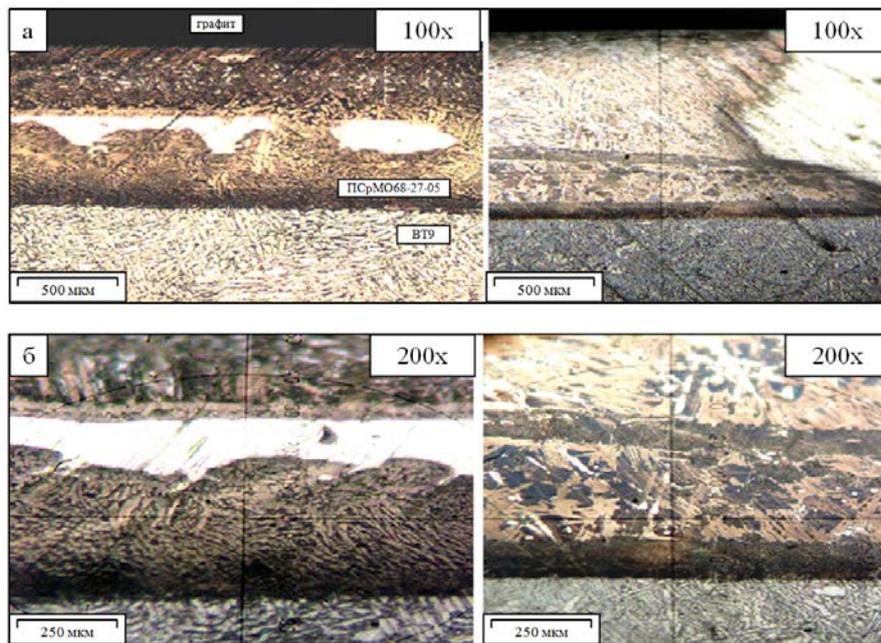


Рис. 4. Микроструктура спаев серебряного припоя ПСрМО68-27-05: а – увеличение x100; б – увеличение x200

Результаты измерения микротвердости. Для оценки пластичности спаев и отдельных его структур было проведено измерение микротвердости. Замер проводился в поперечных сечениях паяных соединений втулок в зоне светлой фазы (область предположительно богатая серебром), в зоне темной фазы спаев и в основном материале втулок. Результаты замера микротвердости HV выявленных зон приведены в табл. 4. В табл. 5 приведены замеры микротвердости по высоте с шагом 0,05 мм (см. рис. 5).

Таблица 4. Средние значения микротвердости материалов

Зона замера	Основной материал втулки (BT9)	Светлая фаза спаев	Темная фаза спаев
микротвердость, HV	363 - 424	81 - 107	354 - 788

После проведенных измерений выявлена различная твердость по ширине спаев, связанная с неравномерным распределением фазовых составляющих. Зоны с высокой микротвердостью возможно объяснить присутствием карбидов и интерметаллидов в паяном шве, образовавшихся, вероятно, в результате диффузии в материал припоя углерода и титана. При исследовании паяных соединений «пирографит + BT9» установлено:



Рис. 5. Распределение микротвердости по ширине паяного шва

- разрушение паяных соединений происходит по основному материалу графитовых колец;
- выявлено неравномерное распределение фазовых составляющих с образованием светлых и темных областей, отличающихся по твердости;
- твердость светлых зон значительно ниже твердости темных зон спаев, что вероятно обусловлено большим содержанием в них серебра;
- зарождение трещин при разрушения пирографита наблюдается по границе темной и светлой фазы спаев;
- толщина спаев составляет 0,20-0,23 мм.

Выводы: из-за различия коэффициентов термического расширения графита и титана при охлаждении узлов с температуры пайки возникают остаточные напряжения. Графит, особенно при низких температурах, является хрупким и малопрочным материалом. Высокая средняя твердость паяного шва (выше твердости основного материала втулки – ВТ9) не позволяет снизить остаточные напряжения за счет пластической деформации спая и тем самым предупредить образование микротрещин и разрушение пирографитового кольца. Высокая твердость спая, вероятно, обусловлена высоким содержанием интерметаллидов и карбидов на основе титана, образовавшихся при растворении ленты ВТ1-0 припоем, а также диффузии из титановой втулки ВТ9 и пирографитового кольца. Для обеспечения пластичности шва необходимо уменьшение содержания титана в паяном шве до минимально возможного, при котором будет происходить смачивание пирографита, а также предупреждение образования твердых фаз, снижающих пластичность паяного шва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Калиниченко, Н.П.* Атлас дефектов паяных соединений: учебное пособие / *Н.П. Калиниченко, М.О. Викторова*; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ТМУ, 2012. 83 с.
2. *Петрунин, И.Е.* Металловедение пайки / *И.Е. Петрунин, И.Ю. Маркова, А.С. Екатова*. – М.: Металлургия, 1976. 264 с.
3. *Федоров, В.Б.* Углерод и его взаимодействие с металлами / *В.Б. Федоров, М.Х. Шоршоров, Д.К. Хакимова*. – М.: Металлургия, 1978. 208 с.
4. *Аникин, Л.Т.* Пайка и сварка графита / *Л.Т. Аникин и др.* – М.: Металлургия, 1978. 136 с.
5. *Аникин, Л.Т.* Исследование процесса пайки графитометаллических торцевых уплотнителей / *Л.Т. Аникин, Е.Ф. Анисеев, В.С. Дергунова* и др. // Адгезия расплавов и пайка материалов. 1976. № 4. С. 88–92.
6. *Аникин, Л.Т.* Пайка и сварка графита / *Л.Т. Аникин, В.С. Дергунова, Г.А. Кривецкий, Т.А. Кокина*. – М.: Металлургия, 1978. 136 с.
7. *Бондарев, В.В.* К вопросу пайки графита и некоторых других материалов // Сварочное производство. 1967. № 5. С. 17–19.
8. *Косенко, А.А.* Основы теории и технологии пайки: уч. пособ. для студентов специальности 7.050405 по направлению «Сварка» дневной, заочной и дистанционной формы обучения / *А.А. Косенко, В.Н. Алистратов, И.В. Захарова*. 2-е изд. – Мариуполь: ПГТУ, 2015. 280 с.

FEATURES OF FORMATION THE SOLDER JOINT OF TITANIC ALLOY BT9 WITH PYROGRAPHITE RING IN COMPACTING UNITS IN TURBO-PUMP AGGREGATE OF ROCKET ENGINE

© 2016 I.A. Dyagovtsov, V.G. Klimov, A.S. Popov, A.V. Kogteva, E.Yu. Shchedrin, D.A. Baranov

JSC “Kuznetsov”, Samara

Process of the soldering the pyrographite ring to the titanic plug in compacting units of the turbo-pump aggregate of rocket NK-33 engine by silver solder alloyed by titan is considered. The analysis of causes of destruction of the described compactings and search the ways of increase the exit of suitable production is carried out. By means of metalgraphic analysis the assessment of quality of the soldering is made. The plasticity assessment of seal by means of measurement the microhardness on width the seal, and also separate phases is made. It is established that in this type of compacting when cooling after the soldering there is internal tension which is partially removed due to plasticity of a solder seal. Essential increase in hardness of seal probably due to formation of intermetallic particles and carbides on the basis of titan is revealed.

Key words: *pyrographite, BT9 alloy, silver solder, solder seal, structure, microhardness, intermetallic compounds, carbides*

Igor Dyagovtsov, Engineer at the Soldering Bureau.

E-mail: dyagovtsov@yandex.ru

Vadim Klimov, Chief of the Welding Bureau. E-mail: vadim3945@yandex.ru

Alexander Popov, Engineer at the Equipment and New Technological Processes Bureau. E-mail: popov1106@mail.ru

Alexandra Kogteva, Engineer – Laboratory Assistant at the Welding and Soldering Laboratory.

E-mail: koe7305@yandex.ru

Evgeniy Shchedrin, Chief Welder. E-mail: ugs@kuznetsov-motors.ru

Dmitriy Baranov, Engineer at the Welding Bureau.

E-mail: D.Baranov91@mail.ru