

## РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ СВАРКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ И РЕМОНТЕ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

П. Д. ЖЕМАНЮК, И. А. ПЕТРИК, С. Л. ЧИГИЛЕЙЧИК

АО «Мотор Сич». 69068, г. Запорожье, просп. Моторостроителей, 15. E-mail: motor@motorsich.com

Проанализированы применяемые способы получения неразъемного соединения тонкостенных трубопроводов авиационных газотурбинных двигателей. Отмечены особенности использования механизированных и автоматизированных технологий соединения. Выполнены экспериментальные работы по обработке технологии орбитальной сварки неповоротных стыков труб с толщиной стенки от 0,5 до 1 мм, обеспечивающей высокое качество соединений и производительность сварки. Разработанная технология орбитальной сварки труб на весу используется в серийном производстве в АО «Мотор Сич». Библиогр. 5, табл. 2, рис. 4.

*Ключевые слова:* авиадвигатели, труба, орбитальная сварка, пайка

Основной задачей при проектировании и производстве авиационного двигателя (АД) является обеспечение его ресурса. Ресурс АД определяется долговечностью его конструктивных элементов. На долю трубопроводов внешней обвязки АД (в связи с повреждениями в зоне сварных и паяных швов) приходится около 7 % отказов АД [1, 2].

Типичные повреждения трубопроводов внешней обвязки двигателя: усталостные трещины; изломы, забоины, вмятины; разрушения, связанные с дефектами сварных и паяных швов; коррозионные повреждения паяных конструкций.

Все эти дефекты условно можно разделить, как связанные с производством, эксплуатацией и конструкцией.

Основные способы сварки и пайки, ранее применяемые при изготовлении и ремонте трубопроводов АД (ручная аргодуговая сварка (АДС), индукционная и газовая пайка), имеют при этом ряд технологических трудностей, влияющих на стабильность процесса и качество швов:

газовая пайка — человеческий фактор, необходимость удаления остатков флюса и необходимость применения специального метода контроля;

АДС — человеческий фактор, сложность сварки встык труб малых толщин (0,5...1,0 мм), из-за сложной конфигурации большинства труб невозможность их вращения во время сварки (неповоротный стык), высокая трудоемкость процесса;

индукционная пайка — существенно ограничена область применения из-за невозможности пайки деталей сложной конфигурации в стальной оснастке.

Актуальность данной проблемы связана с получением при сварке трубопроводов внешней обвязки АД сварных и паяных швов с высокой прочностью и стабильным качеством.

Для решения проблем, связанных с повышением стабильности качества сварных и паяных соединений, на предприятии принято решение о механизации и автоматизации процессов получения неразъемных соединений.

Таким образом, перед технологами стояла проблема механизации процессов сварки и пайки и улучшения за счет этого качества продукции, получения соединений, более устойчивых к усталостным нагрузкам.

Из условий усталостной прочности наиболее приемлемыми являются паяные соединения и сварка встык [2].

Следует отметить, что механизация газовой пайки затруднительна, так как требует громоздкого и сложного в эксплуатации оборудования, специальной аппаратуры. Для механизации сварки неповоротных стыков труб в последнее время в мире широко применяется орбитальная сварка [3, 4]. Широкое распространение этого метода сварки труб связано с тем, что данный метод обеспечивает нужную глубину проплавления и форму провара, качественно формирует корень шва, поддерживает дугу в необходимом состоянии и обеспечивает одинаковые в любых направлениях условия сварки. Понятие «орбитальная сварка» обозначает выполнение кольцевых сварочных швов на закрепленной детали. При этом сварочная горелка движется вокруг трубы по определенной круговой орбите.

Известные в отечественной и мировой практике применение орбитальной сварки на момент создания проекта (2003 г.) — применение сварки стыковых соединений труб на весу с толщиной стенки от 1 мм [3–5].

Таблица 1. Требования к подготовке кромок под орбитальную сварку

Тип сварочной головки	Толщина стенки $S$ , мм	$b$ , мм	$l_1$ , мм	$l_2$ , мм
Открытая	$\leq 1,0$	0...0,10	$\geq 100$	$\geq 5$
	1,0...1,5	0...0,15		
	1,5...3,0	0...0,20		
Закрытая	$\leq 1,0$	0...0,10	$\geq 19$	$\geq 19$
	1,0...1,5	0...0,15		
	1,5...3,0	0...0,20		

Примечание:  $b$  — зазор под сварку;  $l_1$  — длина необходимого прямолинейного участка;  $l_2$  — расстояние от сварочного стыка до арматуры.

Целью настоящей работы явилось рассмотрение особенностей технологии механизации процессов получения неразъемных соединений труб.

При этом необходимо было обосновать целесообразность замены газовой пайки и АДС на автоматическую АДС (ААДС) по критериям прочности и работоспособности; выработать основные принципы проектирования соединений орбитальной сварки при переходе с АДС и пайки, а также при ремонте; предложить основные технологические подходы при сварке труб встык сложной конфигурации, обеспечивающие получение сварных швов высокого качества на весу с толщиной стенок от 0,5 до 1 мм; внедрить новый техпроцесс в существующий производственный цикл изготовления трубопроводов.

Предполагалось, что будет обеспечено повышение производительности или сохранение ее на прежнем уровне; обеспечены требуемые условия сборки под орбитальную сварку за счет применения современных технологий торцовки, калибровки, спецоснастки для центровки и сборки; сформированы требования к выбору оборудования (основного и вспомогательного) на основе поставленных технологических задач.

Технология должна была обеспечить стабильное качество и высокую усталостную прочность сварных соединений; повышение ресурса работы трубопроводов; расширение областей применения автоматической орбитальной сварки при изготовлении и ремонте трубопроводов АД.

Эксперименты проводили на тонкостенных деталях (трубопроводы, ниппели, штуцеры), изготовленных из сталей 12X18H10T и 14X17H2. Сварку проводили на

комплексе специального оборудования, в состав которого входили: источники питания для сварки (фирм Fronius и Polysoude) с блоком программного управления и набором головок для сварки различных конструкций труб и типов соединений (фирма Polysoude). Для получения сварных швов с усилением применяются сварочные головки открытого типа (MU IV 38 и MU IV 115), а без усиления головки закрытого типа (MW40 и MW 65). Испытания усталостной прочности проводили согласно ОСТ 1.41972-80.

В результате проведенных экспериментов разработан и внедрен техпроцесс орбитальной сварки трубопроводов АД, основными этапами которого являются: подготовка кромок под сварку; сборка; сварка; контроль качества сварки.

Подготовка кромок и сборка под сварку осуществляется в соответствии с требованиями, представленными в табл. 1.

Для обеспечения необходимого зазора под сварку (см. табл. 1) использовали отрезные и торцевальные станки (фирм Georg Fisher и Protom), полностью исключая ручную подготовку кромок под сварку, после обработки, на которых перпендикулярность торца трубы не превышала 0,1 мм относительно оси трубы.

Сборка и последующая прихватка осуществлялась в специальных центраторах (рис. 1). Смещение кромок под сварку стыковых соединений должно быть не более  $0,1S$ . Контроль качества сварных швов, выполненных орбитальной сваркой, проводится внешним осмотром, аппаратным контролем режимов сварки и, в зависимости от ответственности и назначения трубопроводов, одним из разрушающих методов контроля:

для топливных трубопроводов — 100%-й рентгенконтроль, испытания на герметичность;

для масляных трубопроводов — 20%-й рентгенконтроль, испытания на герметичность;

для воздушных трубопроводов — рентгенконтроль одной детали от партии.

Аппаратный контроль заключается в сверке текущих режимов сварки, которые выводятся на принтер с режимами, занесенными в технологию.

Усталостная прочность является основным критерием в обеспечении надежной работы трубопровода в составе АД. Поэтому основной аргументацией при внедрении орбитальной сварки для конструктора — обеспечение высоких прочностных характеристик сварных соединений при действии циклических знакопеременных нагрузок. С этой целью были проведены опытные работы по определению предела выносливости трубопроводов различной конфигурации. Проверка выполнялась в диапазоне диаметров от 10 до 80 мм по ОСТ 1.41972-80.

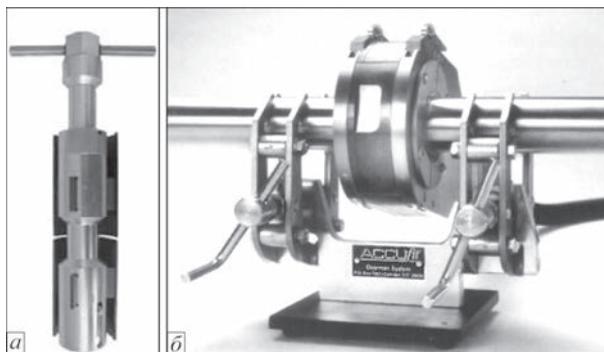


Рис. 1. Центраторы для сборки труб (а — тип 1; б — тип 2)

Таблица 2. Сравнительный анализ усталостной прочности сварных и паяных соединений стальных трубопроводов

Конструктивные характеристики узла	Усталостная прочность $\sigma_{-1}$ , МПа		
	Ручная АДС с подкладкой	Газовая пайка	Орбитальная сварка (ААДС)
Труба + труба 10×1 мм, 12Х18Н10Т	-	14	18
Труба + труба 14×0,5 мм, 12Х18Н10Т	-	16	16
Труба + труба 18×1 мм, 12Х18Н10Т	-	14	18
Труба + труба 18×0,5 мм, 12Х18Н10Т	-	14	14
Труба + труба 22×0,5 мм, 12Х18Н10Т	-	12	14
Труба + труба 25×0,5 мм, 12Х18Н10Т	-	10	12
Ниппель (12Х18Н10Т) + труба 18×1мм (12Х18Н10Т)	6	16	16
Ниппель (12Х18Н10Т) + труба 32×1мм (12Х18Н10Т)	4	-	10
Ниппель (12Х18Н10Т) + труба 40×1мм (12Х18Н10Т)	4	-	10
Ниппель (12Х18Н10Т) + труба 50×1мм (12Х18Н10Т)	4	-	10
Ниппель (12Х18Н10Т) + труба 80×1мм (12Х18Н10Т)	4	-	8
Штуцер (14Х17Н2) + труба 18×1мм (12Х18Н10Т)	6	16	16
Штуцер (14Х17Н2) + труба 32×1мм (12Х18Н10Т)	6	-	14
Штуцер (14Х17Н2) + труба 40×1мм (12Х18Н10Т)	4	-	12

Результаты испытаний показали, что сварные соединения, полученные орбитальной сваркой, по усталостной прочности не уступают соединениям, полученным газовой пайкой, и значительно превосходят выполненным АДС (табл. 2).

К основным проблемам, которые возникли при внедрении орбитальной сварки труб и деталей АД, можно отнести следующие:

первая — конфигурация деталей, расположение сварочного стыка непосредственно возле фланца или радиусагиба трубы, при этом для крепления сварочных автоматов (головок) необходим прямолинейный участок ( $l_1, l_2$ , см. табл. 2); вторая — малая толщина свариваемых кромок (от 0,5 мм).

Первая проблема решена за счет изготовления специальной оснастки, на которую крепилась сварочная головка (рис. 2, 3).

Вторая проблема решена за счет применения инверторных источников питания для сварки фирм Fronius и Polysoude с микропроцессорным, синергетическим управлением ключевых параметров сварки (ток сварки (от 5 А), скорость сварки, скорость подачи проволоки и напряжение дуги) и использованием специальных приспособлений для улучшения формирования обратной стороны шва (рис. 4).

С помощью приспособления во время сварки внутрь трубы подавался аргон, и за счет небольшого избыточного давления удерживалась сварочная ванна.

Орбитальная сварка внедрена при изготовлении более 50 типоразмеров стальных трубопроводов толщиной стенки от 0,5 мм и диаметрами от 6 до 90 мм; при ремонте стальных трубопро-

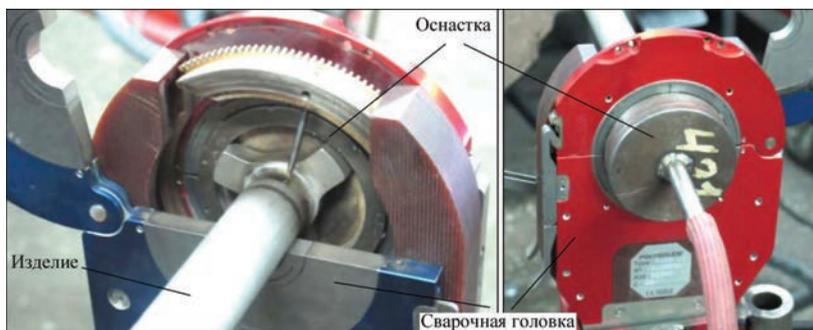


Рис. 2. Крепление сварочной головки закрытого типа на специальную оснастку



Рис. 3. Крепление сварочной головки открытого типа на специальную оснастку

водов толщиной стенки от 0,5мм и диаметрами от 10 до 90 мм. Практически полностью исключена при ремонте двигателя замена трубопроводов на новые (до этого менялись на новые 18...25 трубопроводов на 1 двигатель); при изготовлении более 100 типоразмеров силовых узлов вертолетов и двигателей из конструкционных сталей и титановых сплавов толщиной от 1 до 6 мм.

### Выводы

1. Стыковые соединения труб, выполненные орбитальной сваркой, по усталостной прочности не уступают традиционным паяным соединениям.

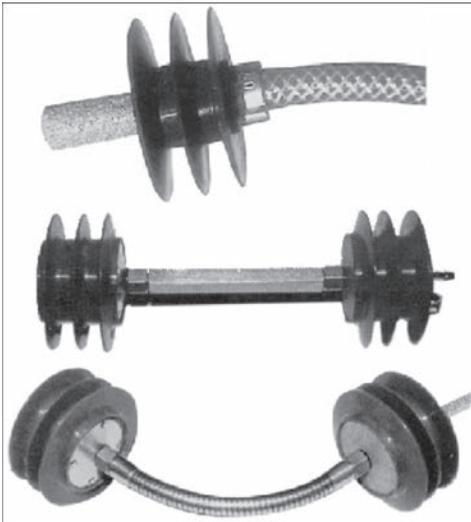


Рис. 4. Вспомогательные приспособления для формирования обратной стороны шва

Это позволяет их применять не только при проектировании новых конструкций, но и заменять существующие (паяные).

2. Предложены технологические подходы, подобрано оборудование и оснастка, что позволило при комплексном применении обеспечить сварку соединений труба-труба, труба-арматура (фланец, штуцер и ниппель) при любой конфигурации трубопроводов вне зависимости от расстояния сварочного стыка от фланца или радиусагиба трубы.

3. Определены технические требования к подготовке кромок и сборке под сварку, подобраны режимы, обеспечивающие получение сварных швов высокого качества на весу с толщиной стенок от 0,5 до 1 мм и диаметром от 6 до 90 мм.

4. В АО «Мотор Сич» внедрен в серийное производство сварочный участок изготовления и ремонта тонкостенных труб авиационной техники, уточнена конструкторская документация, разработаны технологические инструкции и техпроцессы.

### Список литературы

1. Богуслав В. А., Качан А. Я., Калинина Н. Е. и др. (2009) *Авиационно-космические материалы*. Богуслав В. А. (ред.), Запорожье, ОАО «Мотор Сич».
2. Богуслав В. А., Качан А. Я., Мозговой В. Ф. и др. (2004) *Технология производства авиационных двигателей*. Запорожье, ОАО «Мотор Сич».
3. Островский О. Е. (1992) Орбитальная сварка трубопроводов. *Сварочное производство*, **10**, 10–13.
4. Хаванов В. А. (1995) Оборудование для автоматизированной орбитальной сварки технологических трубопроводов. *Там же*, **6**, 22–24.
5. Полосков С. И. (2003) Анализ факторов, определяющих формирование сварочной ванны при орбитальной сварке неповоротных стыков труб (Обзор). *Там же*, **2**, 11–19.

### References

1. Boguslav V.A., Kachan A.Ya., Kalinina N.E. et al. (2009) *Aerospace materials*. Boguslav V.A. (ed.). Zaporozhye, JSC Motor Sich [in Russian].
2. Boguslav V.A., Kachan A.Ya., Mozgovej V.F. et al. (2004) *Technology of production of aircraft engines*. Zaporozhye, OJSC Motor Sich [in Russian].
3. Ostrovsky O.E. (1992) Orbital welding of pipelines. *Svarochn. Proizvodstvo*, **10**, 10-13 [in Russian].
4. Khavanov V.A. (1995) Equipment for automatic orbital welding of technological pipelines. *Ibid.*, **6**, 22-24 [in Russian].
5. Poloskov S.I. (2003) Analysis of factors determining weld pool formation in orbital position butt welding of pipes (Review). *Ibid.*, **2**, 11-19 [in Russian].

П. Д. Жеманюк, І. А. Петрик, С. Л. Чігілейчк

АТ «Мотор Січ». 69068, м. Запоріжжя,  
просп. Моторобудівників, 15.  
E-mail: motor@motorsich.com

### РЕЗУЛЬТАТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ОРБИТАЛЬНОГО ЗВАРЮВАННЯ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ І РЕМОНТІ ТОНКОСТІННИХ ТРУБОПРОВОДІВ

Проаналізовано способи отримання нероз'ємного з'єднання тонкостінних трубопроводів авіаційних газотурбінних двигунів. Відмічені особливості використання механізованих і автоматизованих технологій з'єднання. Виконано експериментальні роботи по обробці технології орбітального зварювання неповоротних стиків труб з товщиною стінки від 0,5 до 1 мм, що забезпечує високу якість з'єднань і продуктивність зварювання. Розроблена технологія орбітального зварювання труб без використання підкладки застосовується в серійному виробництві в АТ «Мотор Січ». Бібліогр. 5, табл. 2, рис. 4.

*Ключові слова:* авіадвигуни, труба, орбітальне зварювання, пайка

P.D. Zhemanyuk, I.A. Petryk, S.L. Chigileychik

11 Motostroiteley Av., 69068, Zaporozhye, JSC «Motor Sich».  
E-mail: motor@motorsich.com

### RESULTS OF IMPLEMENTATION OF ORBITAL WELDING IN MANUFACTURE AND REPAIR OF THIN-WALL PIPELINES

Applied methods were analyzed for producing a permanent joint of thin-wall pipelines of aircraft gas-turbine engines. The peculiarities of application of mechanized and automated joining technologies were noted. The experimental works were carried out for mastering a technology of orbital welding of position butt joints of pipes of up to 0.5-1 mm wall thickness, providing high quality of joint and welding productivity. The developed technology of orbital unsupported pipe welding is used in serial production in JSC «Motor Sich». 5 Ref. , 2 Tabl. , 4 Fig.

*Keywords:* aircraft engines, pipe, orbital welding, brazing

Поступила в редакцію 16.05.2017