

П.Д. Жеманюк, к.т.н., технический директор, И.А. Петрик, к.т.н., главный сварщик,  
С.Л. Чигилейчик, вед. инженер бюро сварки (АО «Мотор Сич») г. Запорожье, Украина

# Опыт внедрения орбитальной сварки при изготовлении и ремонте тонкостенных трубопроводов

*Рассмотрены перспективы и практические аспекты применения орбитальной сварки для трубопроводов авиационных газотурбинных двигателей.*

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

*Розглянуті перспективи і практичні аспекти застосування орбітального зварювання для трубопроводів авіаційних газотурбінних двигунів.*

**Ключові слова:** авіадвигуни, труба, орбітальне зварювання, паяння.

*The prospects and practical aspects of the use of orbital welding for pipes of aircraft gas turbine engines.*

**Keywords:** aircraft engines , the pipeline, orbital welding, soldering.

## Введение и цель работы

Основной задачей при проектировании и производстве авиационного двигателя (АД) является обеспечение его ресурса. Ресурс АД устанавливается по ресурсу конструктивных элементов, разрушение или появление повреждений в котором может вывести объект из строя. На долю трубопроводов внешней обвязки АД (по причине качества сварных и паянных швов) приходится около 7% отказов АД [1,2].

Актуальность данной проблемы связана с получением при сварке и пайке трубопроводов внешней обвязки АД сварных и паянных швов с высокой прочностью и стабильным качеством. Основные способы сварки и пайки, применяемые для этой цели (ручная аргонно-дуговая 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 (0,5-1,0мм), из-за сложной конфигурации большинства труб невозможность их вращения во время сварки (неповоротный

стык) и высокая трудоемкость процесса;

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

Проблемы, связанные с повышением стабильности качества сварных и паянных соединений, могут быть решены путем механизации и автоматизации процесса. Для механизации сварки неповоротных стыков труб в последнее время в мире широко применяется орбитальная сварка. 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.

Следует отметить, что механизация газовой пайки затруднительна, так как требует громоздкого и сложного в эксплуатации оборудования, специальной аппаратуры. Кроме того, отсутствие системы контроля в процессе пайки сильно

увеличивает трудоемкость процесса и не обеспечивает стабильных результатов.

**Целью данной работы** являлось повышение стабильности качества сварных и паянных швов путем замены газовой пайки и АДС на орбитальную сварку трубопроводов (ААДС) при их изготовлении и ремонте для обеспечения эксплуатационной надежности АД.

В соответствии с целью были определены основные задачи данной работы:

- обеспечение стабильного качества и высокой усталостной прочности сварных соединений;

- расширение областей применения автоматической орбитальной сварки при изготовлении и ремонте трубопроводов АД.

## Методики проведения исследований, оборудование

Исследовали тонкостенные детали (трубопроводы, ниппели, штуцеры), изготовленные из сталей 12Х18Н10Т и 14Х17Н2. Сварка производилась 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 производились согласно ОСТ 1.41972-80.

#### Результаты исследований, их обсуждение

##### Усталостная прочность

Усталостная прочность является ключевым критерием в обеспечении надежной работы авиадвигателя. Поэтому основной задачей при внедрении орбитальной сварки ставили обеспечение высоких прочностных характеристик сварных соединений при действии циклических знакопеременных нагрузок, не уступающих по прочности соединениям, полученным газовой пайкой и ручной АДС. С этой целью были проведены опытные работы по определению предела выносливости трубопроводов различной конфигурации (рис. 1).

Результаты испытаний показали, что сварные соединения, полученные орбитальной сваркой, по усталостной прочности не уступают соединениям, полученным газовой пайкой и значительно превосходят АДС (табл. 1).

##### Обеспечение стабильности качества сварки

Стабильное качество при выполнении орбитальной сварки на АО «МОТОР СИЧ» было достигнуто путем комплексного подхода при решении вопросов на каждом технологическом этапе:

1. Подготовка кромок под сварку;

2. Сборка;

3. Сварка;

4. Контроль качества сварки.

Подготовка кромок и сборка под сварку осуществляется в соответствии с требованиями табл. 2.

Для обеспечения необходимого зазора под сварку (табл. 2) использовали отрезные и торцевальные станки (фирм Georg Fisher и Protex), полностью исключающие ручную подготовку кромок под сварку, после обработки, на которых неперпендикулярность торца трубы не превышала 0,1 мм относительно оси трубы.

Сборка и последующая прихватка осуществлялась в специальных центраторах (рис. 2).

Контроль качества сварных швов, выполненных орбитальной

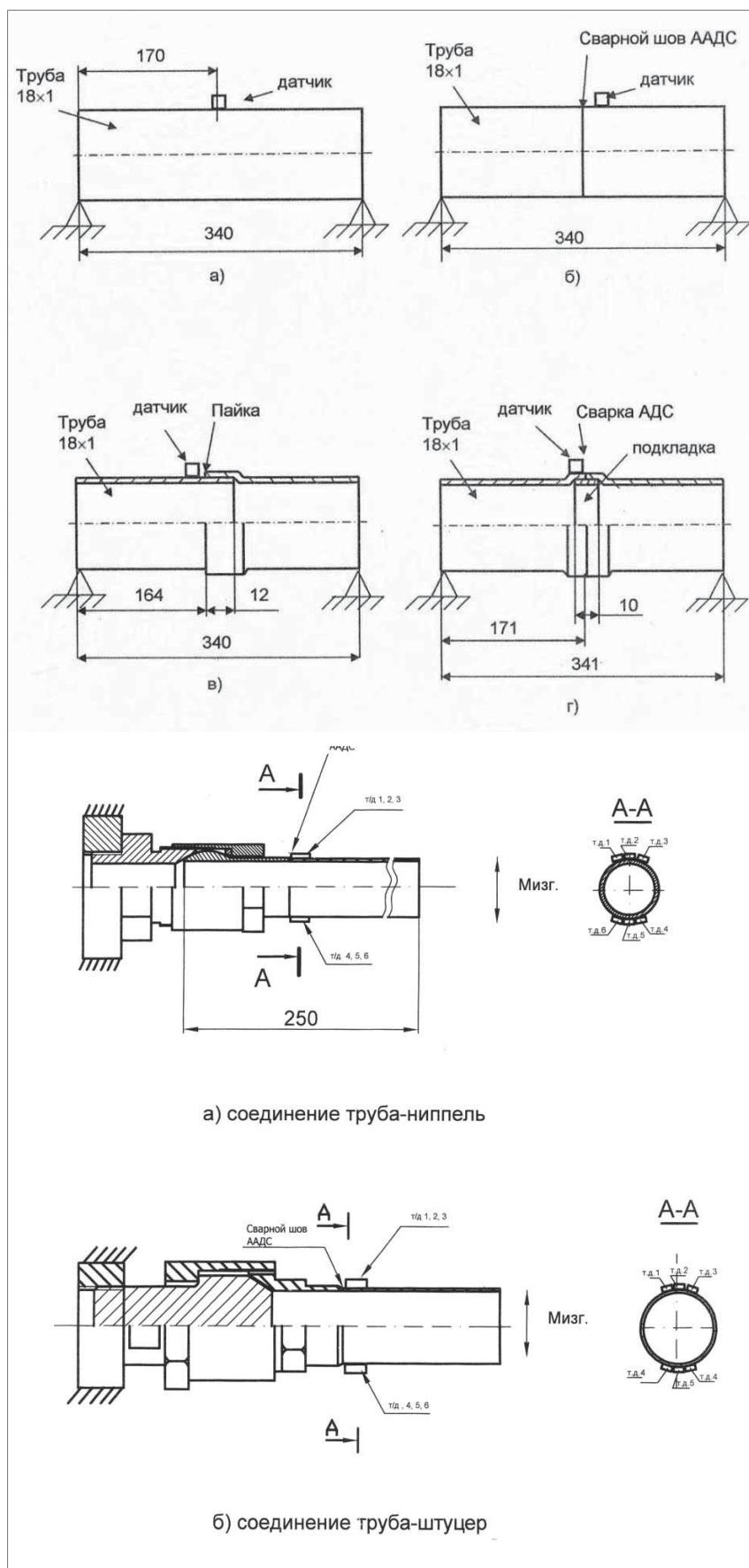


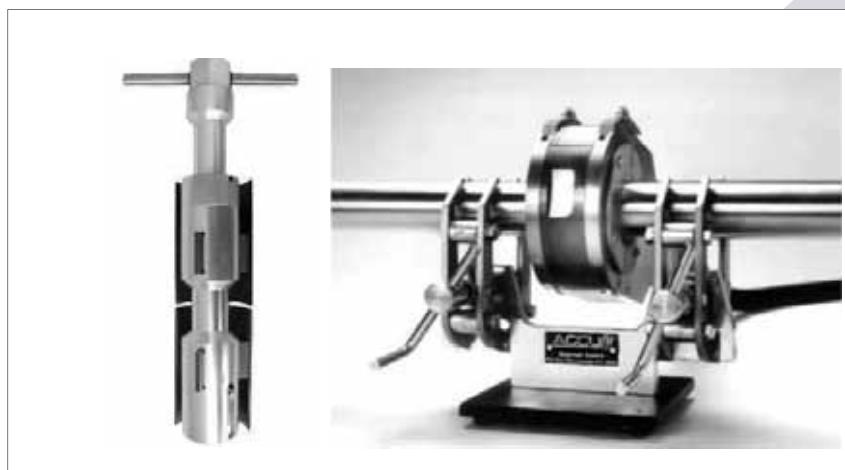
Рис. 1. Образцы для усталостных испытаний трубопроводов

**Таблица 1. Сравнительный анализ усталостной прочности сварных и паяных соединений стальных трубопроводов**

| Конструктивные характеристики узла            | Усталостная прочность $\sigma_1$ , кг/мм <sup>2</sup> |               |                           |
|---|---|---------------|---------------------------|
|   | Ручная АДС  | 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                        |

**Таблица 2. Требования к подготовке кромок под орбитальную сварку**

| Тип сварочной головки | Толщина стенки S,мм | b*, мм    | $l_1^*$ , мм | $l_2^*$ , мм |
|-----------------------|---------------------|-----------|--------------|--------------|
| Открытая              | до 1,0              | 0...0,1   |              |              |
|                       | от 1,0 до 1,5       | 0...0,15  | от 100       | от 5         |
|                       | от 1,5 до 3         | 0...0,2   |              |              |
| Закрытая              | до 1,0              | 0...0,1   |              |              |
|                       | от 1,0 до 1,5       | 0...0,15  | от 19        | от 19        |
|                       | от 1,5 до 3         | 0...0,2   |              |              |
| Открытая              | 0,5...3             | 0...0,1 S | от 100       | от 15        |
| Открытая              | 0,5...3             | 0...0,2   | от 100       | от 5         |



**Рис. 2. Центраторы для сборки труб:** а – тип 1; б – тип 2

сваркой, производится внешним осмотром, аппаратным контролем режимов сварки, и в зависимости от ответственности и назначения трубопроводов один из неразрушающих методов контроля:

- для топливных трубопроводов – 100 % рентгенконтроль, испытания на герметичность;
- для масляных трубопроводов – 20 % рентгенконтроль, испытания на герметичность;
- для воздушных трубопроводов – рентгенконтроль 1-ой детали от партии.

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

## Проблемы внедрения орбитальной сварки и пути их решения

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

- конфигурация деталей – расположение сварочного стыка непосредственно возле фланца или радиуса гиба трубы, при этом для крепления сварочных автоматов (головок) необходим прямолинейный участок ( $l_1, l_2$  табл. 2);

- малая толщина свариваемых кромок – от 0,5 мм.

Первая проблема решена за счет изготовления специальной оснастки, на которую крепилась сварочная головка (рис. 3, 4).

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 5А), скорость сварки, скорость подачи проволоки и напряжение дуги) и использованием специальных приспособлений для улучшения формирования обратной стороны шва (рис. 5).

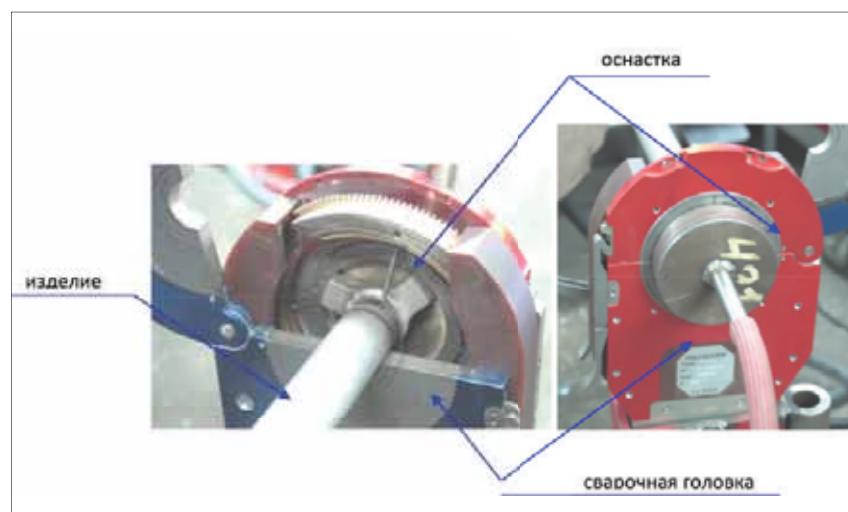
С помощью приспособления во время сварки вовнутрь трубы подавался аргон и за счет небольшого избыточного давления удерживалась сварочная ванна.

### Выводы

1. Стыковые соединения труб, выполненные орбитальной сваркой по усталостной прочности не уступают традиционным паяным соединениям. Это позволяет применять их 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 расположения сварочного стыка относительно фланца или радиуса гиба трубы.

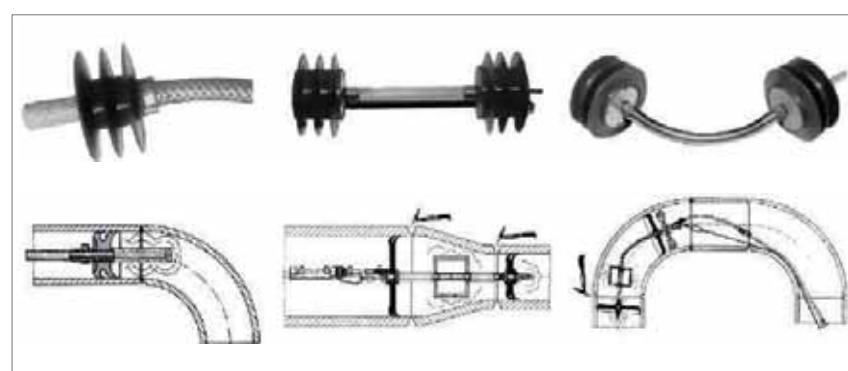
3. Определены технические требования к подготовке кромок и сборке под сварку, подобраны режимы, обеспечивающие получение сварных швов высокого качества на весу с толщиной стенок от 0,5 до 6 мм.



**Рис. 3. Крепление сварочной головки закрытого типа на специальную оснастку**



**Рис. 4. Крепление сварочной головки открытого типа на специальную оснастку**



**Рис. 5. Вспомогательные приспособления для формирования обратной стороны шва**

4. На АО «МОТОР СИЧ» внедрен в серийное производство сварочный участок изготовления и ремонта тонкостенных труб авиационной техники.

гуслаев, А.Я. Качан., Н.Е. Калинина и др.; под общ. ред. В.А. Богуслаева. – Запорожье.: изд. ОАО «Мотор Сич», 2009. – 383 с.

2. Богуслаев А.В. Технология производства авиационных двигателей / В.А. Богуслаев, А.Я. Качан, В.Ф. Мозговой и др.]. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2004. – 945 с.

### Список литературы:

1. Богуслаев В.А. Авиационно-космические материалы / В.А. Бого