



VI международный
промышленный форум
НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ
ИСПЫТАНИЯ ДИАГНОСТИКА



Особенности технологии контроля качества сварки трением с перемешиванием оболочек баков РН семейства «Ангара»

Ветеран КБ «Салют» ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, Главный технолог, начальник отделения перспективных технологий - Заместитель Главного инженера, кандидат технических наук **Половцев Валентин Андреевич**

Заместитель начальника отдела КБ «Салют» АО ГКНПЦ им. М.В. Хруничева
Травинкин Юрий Петрович

Заместитель главного сварщика ПО «Полет» АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева»
Оксенюк Алексей Сергеевич

Президент РОНКТД, Директор НИЦ технологий контроля качества РКТ Университета ИТМО
доктор технических наук профессор **Прохорович Владимир Евгеньевич**

Заместитель директора по НИОКР НТЦ «Эталон»,
кандидат технических наук **Быченко Владимир Анатольевич**

Сварка трением с перемешиванием (СТП) - процесс получения неразъемного соединения, с помощью нагрева трением и перемешивания материала в состоянии пластичности вращающимся инструментом [ISO 25239:2011 Friction stir welding. Aluminium].

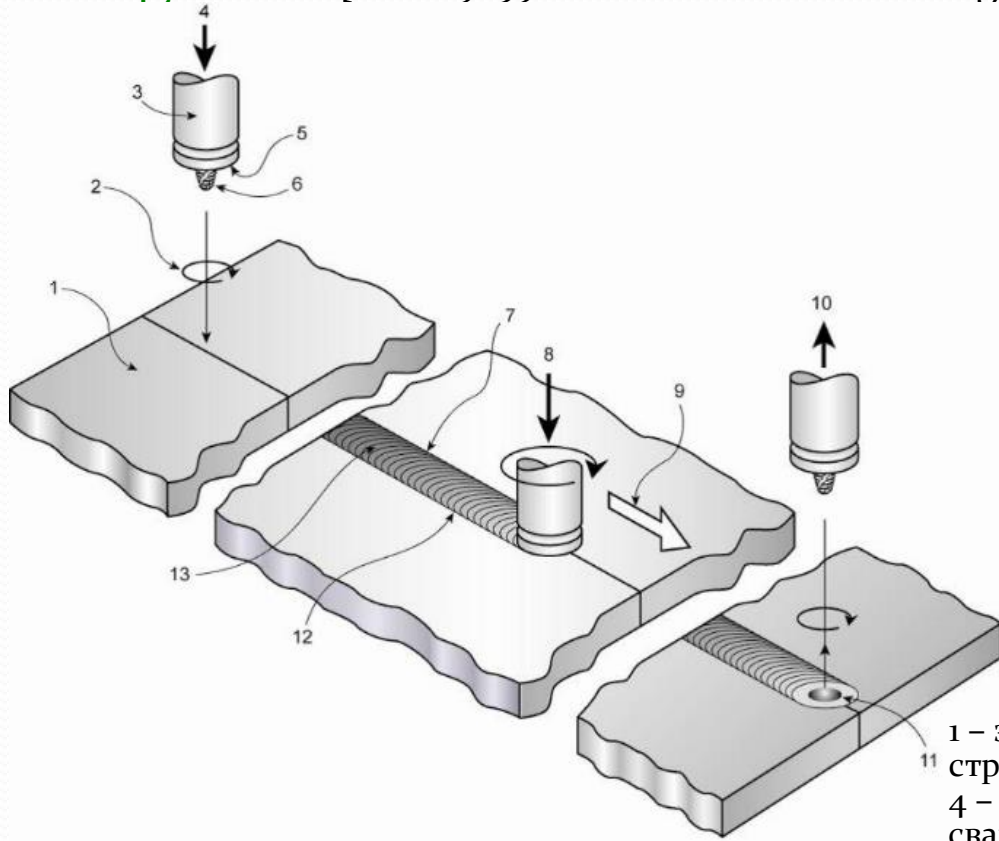


Схема сварки трением с перемешиванием

1 – заготовка, 2 – направление вращения инструмента (по часовой стрелке), 3 – сварочный инструмент, 4 – направление перемещения сварочного инструмента в начале сварки, 5 – опорный бурт сварочного инструмента, 6 – рабочий стержень сварочного инструмента, 7 – наступающая сторона сварного соединения, 8 – осевая сила, 9 – направление сварки, 10 – направление перемещения сварочного инструмента в конце сварки, 11 – выходное отверстие - кратер, 12 – отступающая сторона сварного соединения, 13 – сварной шов



Рабочие части однооставного инструмента, применяемого для сварки трением с перемешиванием типовых конструкций:

- а – традиционная конструкция инструмента;
- б – инструмент для получения глубоких швов;
- в – инструмент со специальной формой торца.

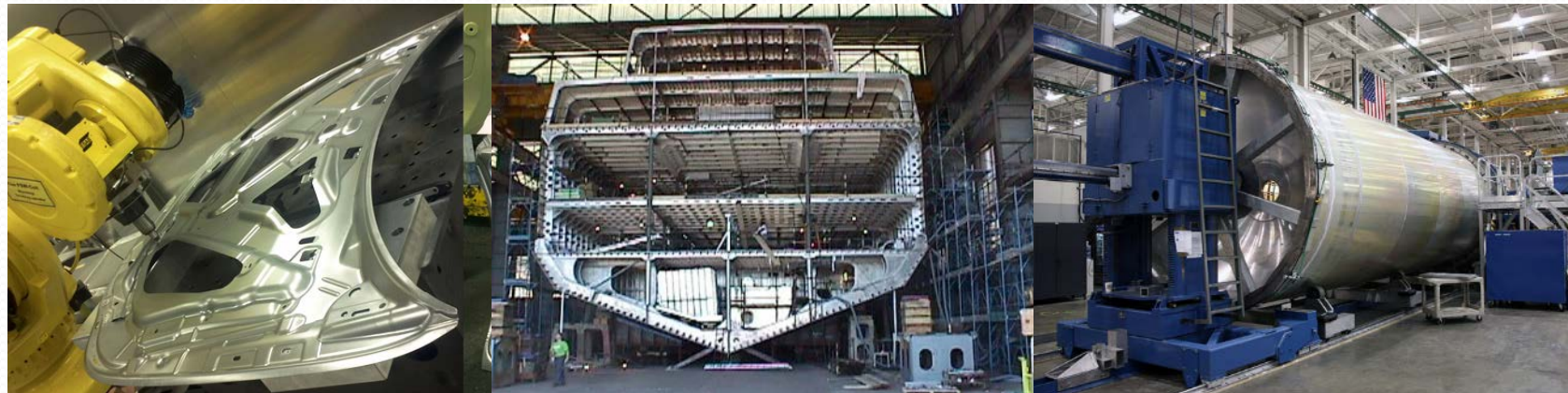


Сварка трением вращающимся инструментом была изобретена в СССР в 1965 г. Клименко Ю.В (приоритет от 09.11.65г. по авторскому свидетельству № 195846).

В 1991г. «сварка трением с перемешиванием» - **СТП** (Friction Stir Welding — FSW) была запатентована The Welding Institute in UK (TWI) (Великобритания) в Европе, США, Японии и Австралии.

Сам процесс образования неразъемного соединения заключается в установлении межатомных связей между соединяемыми частями за счет их нагревания, пластического деформирования и перемещения сварочным инструментом

Интенсивное изучение данного процесса, направленное на совершенствование технологии и оборудования, позволило внедрить данный способ за рубежом в производство высокотехнологичных изделий в таких отраслях как вагоно-, судо-, ракето- и авиастроение и многих других.



В настоящее время технологический процесс СТП совершенствуется The Welding Institute in UK (TWI), PTG (Великобритания), NASA, Lockheed-Martin Corp., Boeing, Wisconsin Center for Space Automation & Robotics, Oak Ridge National Laboratory MTS Systems Corporation, Thompson Friction Welding (США), Imhof Hartchrom GmbH и Klaus Raiser GmbH (Германия), Hidetoshi Fujii и исследовательским центром JWRI при Osaka University (Япония), Shanghai puda friction welder co., ltd. (Китай) и др.

Специализированное оборудование для СТП выпускается фирмами MTS Systems Corporation, Nova-tech engineering inc., Friction Stir Link, Inc. (США), Danish Stir Welding Technology (DanStir) (Дания), ESAB (Швеция), Osaka East Urban Area, Osaka Cast и Hitachi (Япония), TWI (Англия).



Инженерно-технологические школы по промышленному применению сварки трением с перемешиванием

1. Школа специалистов из г. Чебоксары, основанная машиностроительным предприятием ЗАО ЧП «Сеспель» и работающая в части неразрушающего контроля (НК) совместно с известными учеными кафедры технологии сварки и диагностики МГТУ им. Н.Э. Баумана.
2. Школа технологов АО РКК «Энергия» (г. Королев), работающая в части НК СТП совместно с Институтом физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук.
3. Школа технологов АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева» (г. Москва), работающая в части НК совместно с внедренческими структурами Университета ИТМО (г. Санкт-Петербург), а в части проблем «металлургии» сварки – с АО «Композит» (г. Королев), а позже и с ЦНИИ КМ «Прометей» (г. Санкт-Петербург).

Технические требования к сварным соединениям топливных баков РН семейства «Ангара»

Эскиз топливного бака с различными видами сварных швов

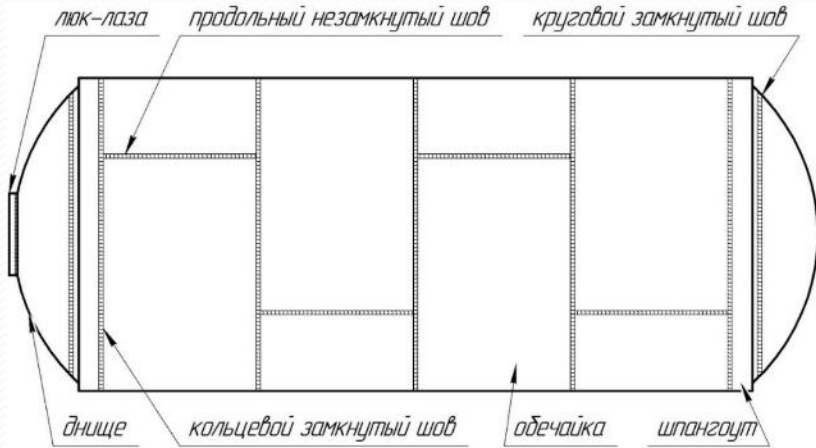
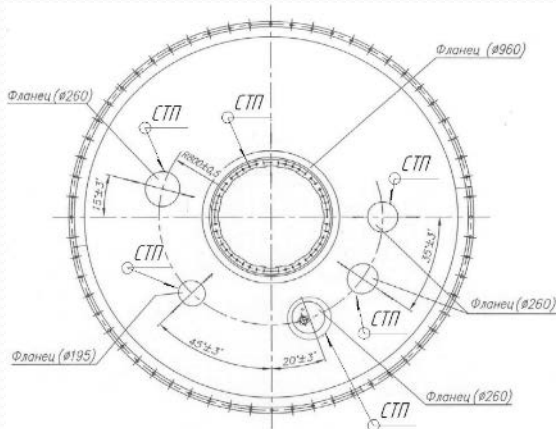


Схема сборки-сварки круговых швов фланцев на днище



Требования к сварным соединениям:

1. Размеры конструктивных параметров сварного соединения

Толщина свариваемых кромок (S), мм	Ширина сварного шва с лицевой стороны ($L_{св. ш.}$), мм	Глубина занижения сварного шва (ΔS), не более, мм	
		по всей длине	в зоне перекрытия на замкнутом шве
3,2	12...14	0,2	0,4
7,4	18...21	0,3	0,5

2. Внешние диаметры топливных баков - 2900 мм. Сферические днища топливных баков радиусом - 2265 мм.

3. Материалы топливных баков - сплавы системы Al-Mg:

- АМг6 (обшивки и шпангоуты днищ);
- АМг6НОП (баки «Г»);
- АМг6Н (баки «О»).

4. Технологический процесс сборки, сварки и НК должен быть реализован на специально разработанных установках:

- процесс сварки должен быть максимально автоматизирован;
- доля ручного труда должна быть не более 25%;
- сварочное оборудование должно быть снабжено фрезерной головкой для снятия припуска на торце свариваемых кромок, выравнивания толщин деталей в месте сварки и снятия грата после сварки;
- оборудование для сварки должно обеспечивать выполнение всех основных операций в полуавтоматическом режиме за один «установ».



Группы важнейших требований к оборудованию СТП оболочек баков ракет:

1. Все сварные швы топливных баков должны выполняться методом СТП:

- а) продольные - для сварки обечаек бака;
- б) круговые – для соединения штангоутов с заготовкой днищ, а также вварки всех фланцевых соединений в стенки днищ и обечаек;
- в) кольцевые – для соединения всех обечаек и двух днищ в общую конструкцию бака.

2. Все сварные швы должны выполняться за один установ, включая:

- а) высокоточное взаимное позиционирование установок и крупногабаритных заготовок деталей баков под сварку (с учётом «выноса» рабочего органа установки не менее чем на 3 метра по отношению к заготовке и с обеспечению жесткости не хуже 0.2 мм при передаче строго осевого усилия на заготовку от 500 до 3000 кг - для материалов и толщин баков РН «Ангара»);
- б) замер толщины кромок и зазоров между кромками и подложкой методами НК с односторонним доступом и точностью не хуже – 0,01 мм.;
- в) механическую обработку кромок соединяемых пространственных конструкций с точностью не хуже 0,05 мм (для обеспечения разнотолщинности кромок не хуже чем 0.1 мм и зазора между кромками не более, чем - 0.1 мм);
- г) собственно сварку методом СТП с обеспечением строгой стабильности всех параметров СТП, с том числе по требуемому усилию на шпинделе 5-ти координатной фрезерной установки (с возможностью плавного изменения в заданных пределах);
- д) неразрушающий контроль (НК) качества сварных швов с возможностью выявления всех возможных видов дефектов СТП, в том числе и микродефектов типа kissing bonds (экспериментально установлено, что для случая материала и толщин баков РКН «Ангара», - достаточно: с раскрытием не хуже, чем от 2 мкм и высотой от 100 мкм).

Технологическое сварочное и сборочное оборудование

Сварочное оборудование

Технические требования к сварочным установкам

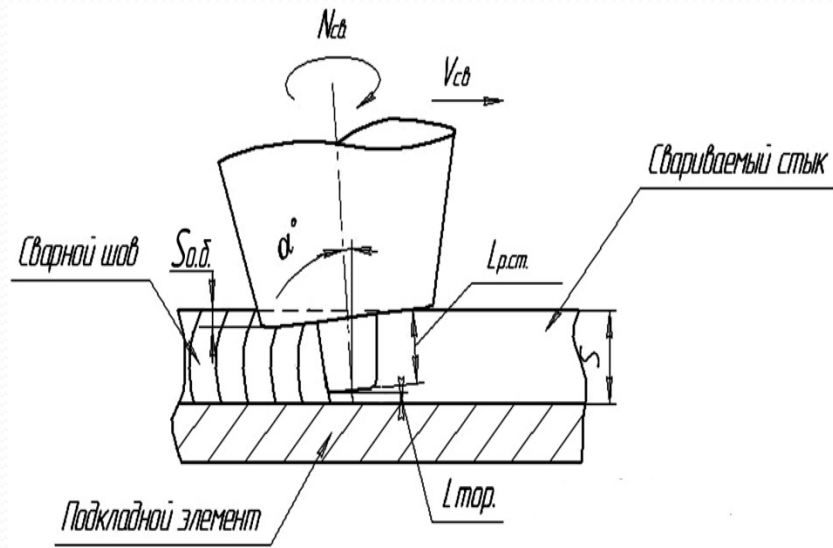
Параметр	Единица измерения	Значение
Линейную скорость сварки $V_{св}$	мм/мин	от 50 до 500;
Упругие деформации элементов сварочной головки от действующих нагрузок не более	мм	0,2;
Регулируемую частоту вращения инструмента	об/мин	от 500 до 2000
Перемещение рабочего стержня относительно опорного бурта	мм	15
Регулируемую скорость осевого перемещения инструмента	мм/мин	от 2,0 до 10,0
Регулируемую скорость осевого перемещения рабочего стержня относительно корпуса инструмента	мм/мин	от 2,0 до 10,0
Инерционность системы отслеживания положения инструмента и сварочного давления, не более	с	0,1
Бесступенчато регулируемое усилия на опорный бурт	кг	от 200 до 3000
Наклон сварочного инструмента вдоль линии сварочного стыка в плоскости «x-y» и «y-z»,	градусов	± 5
Точность позиционирования торца сварочного инструмента	мм	$\pm 0,1$
Время непрерывной работы	мин	90
Боковое смещение при сварке	мм	$< 0,5$

Сварочные установки KR-001 и KR-003 на базе пятикоординатных станков с ЧПУ



Сварочная установка
KR-002 на базе
специализированного
оборудования
портального типа

Схема и параметры сварочного процесса СП



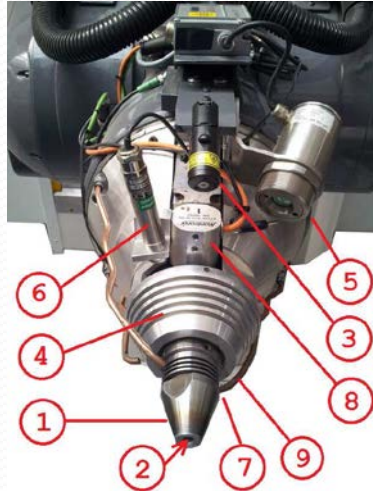
Режимы сварки

Основные параметры (режимы) сварочного процесса:

- скорость сварки (скорость перемещения сварочного инструмента вдоль свариваемых деталей), $V_{св}$;
- частота вращения сварочного инструмента, $N_{св}$;
- рабочее усилие на опорном бурте инструмента, $P_{о.б.}$;
- угол наклона инструмента к поверхности детали, α ;
- глубина внедрения бурта $S_{о.б.}$ прог или давления $P_{прог}$ при прогреве детали;
- заглабление опорного бурта $S_{о.б.}$ при сварке;
- время предварительного прогрева, $t_{прог.}$;
- скорость осевого перемещения инструмента при внедрении в деталь $V_{инст.внед.}$ и выводе из детали $V_{инст.вых.}$;
- скорость осевого перемещения рабочего стержня при внедрении в деталь $V_{р.ст.внед.}$ и при выходе из детали $V_{р.ст.вых.}$;
- вылет рабочего стержня относительно опорного бурта, $L_{р.ст.}$;
- зазор между рабочим стержнем и обратной поверхностью деталей, $L_{тор.}$.

Сварочная головка

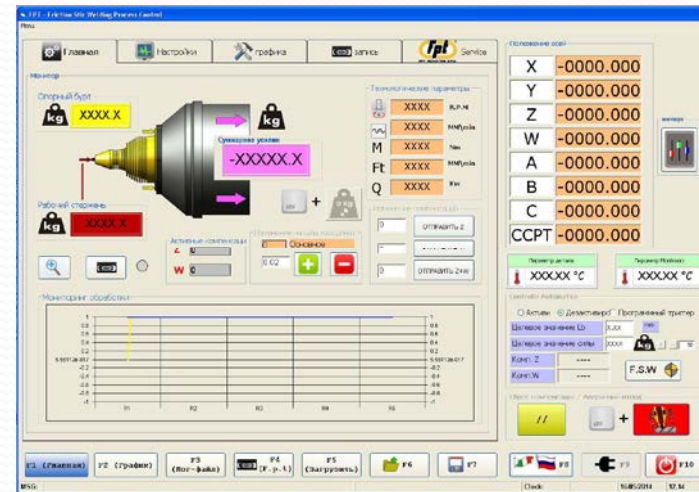
Общий вид сварочной головки



- 1 – опорный бурт,
- 2 – рабочий стержень,
- 3 – лазерный указатель,
- 4 – теплоотсеиватель,
- 5 – измеритель температуры в зоне, прилегающей к зоне сварки,
- 6 – измеритель температуры тензодатчика опорного бурта,
- 7 – камера для мониторинга фазы сварки,
- 8 – приемник датчика давления опорного бурта,
- 9 – трубки охлаждения.

Сварочная головка обеспечивает:

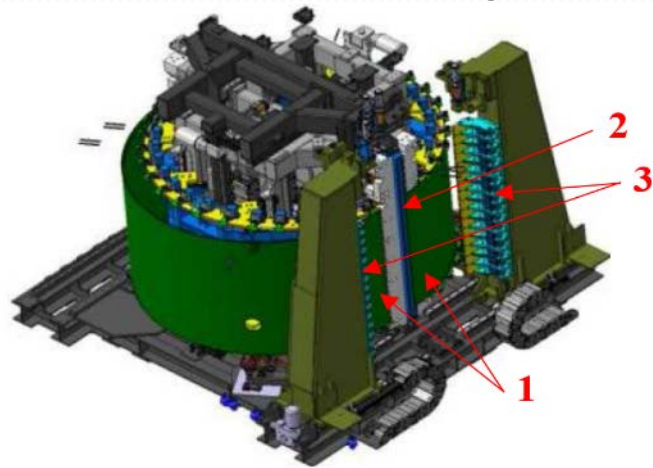
- сварку в автоматическом и ручном режимах;
- сварку линейных и замкнутых швов по отдельным программам;
- управление перемещением инструмента и рабочего стержня в ручном режиме;
- автоматическое поддержание и контроль заданных значений параметров сварки в течение всего цикла СТП;
- телевизионное наблюдение за процессом сварки;
- отображение рабочих параметров сварки на приборах индикации с контрольной записью информации на электронные носители, с привязкой по расстоянию от начала сварки;



- аварийное (одновременное) отключение всех потребителей;
- экстренное прекращение сварки по специальной программе и перевод систем в начальное, безопасное положение.

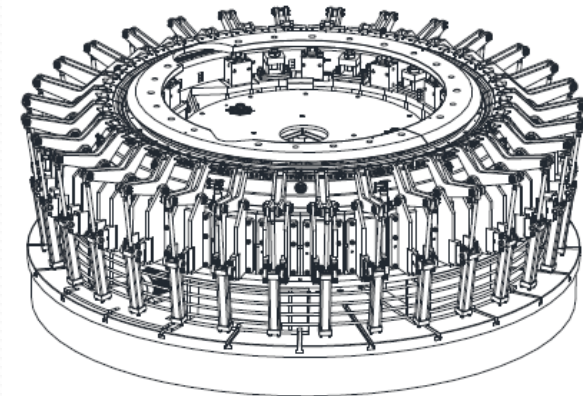
Сборочное оборудование

Общий вид сварочной оснастки установки KR-001

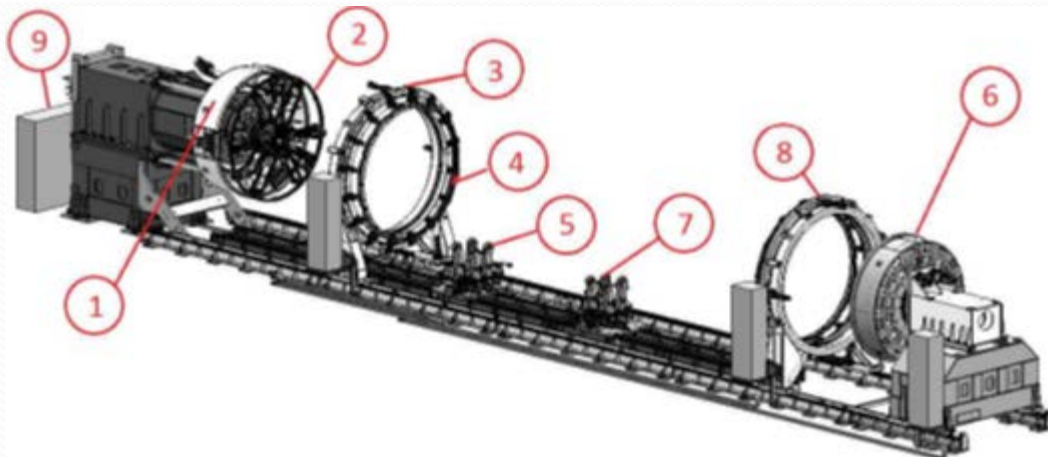


1 – заготовка; 2 – подложка; 3 – прижимы

Общий вид сварочной оснастки установки KR-002



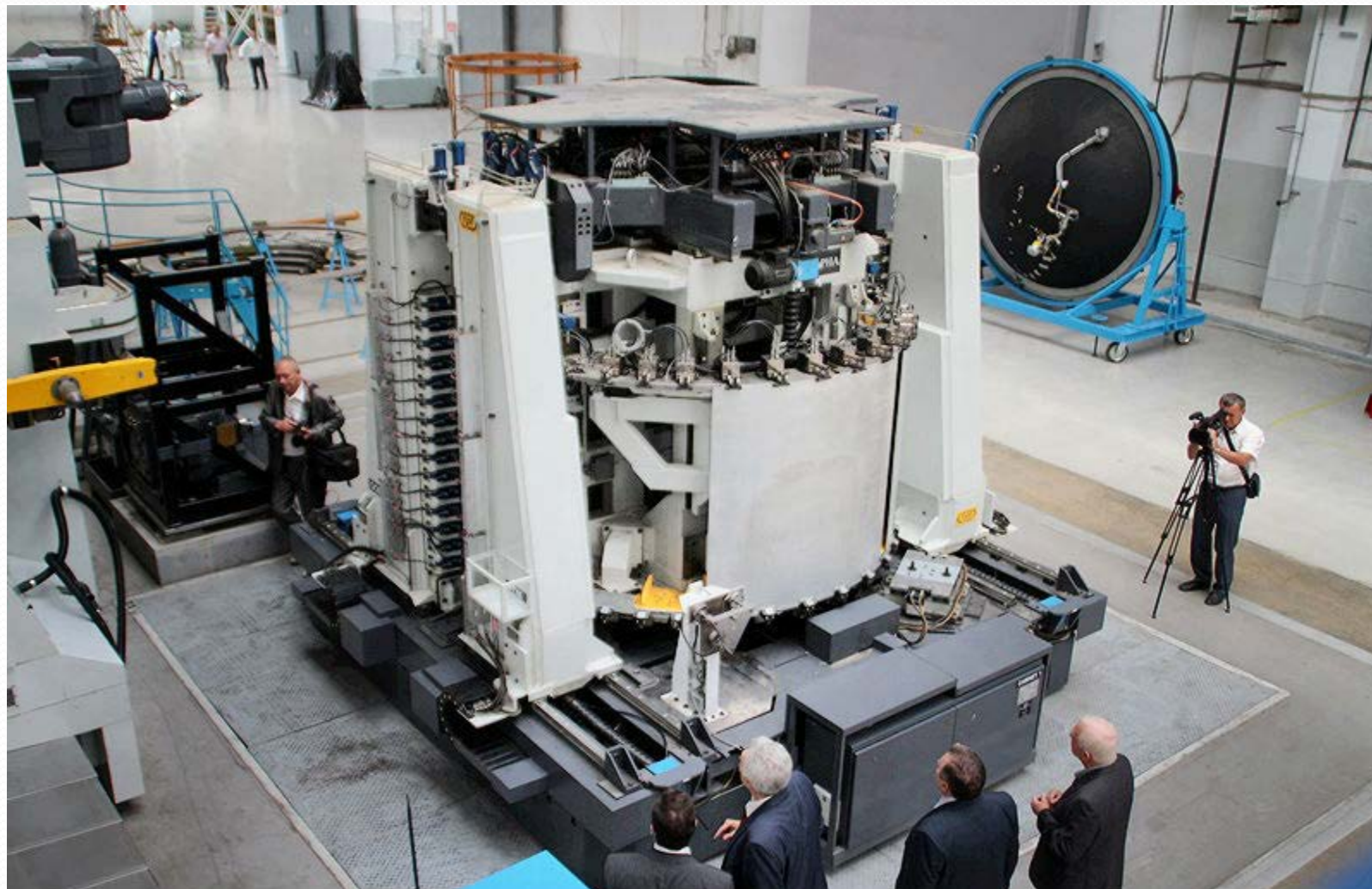
Общий вид оснастки установки KR-003



1 – корзина (шпиндель);
2 – кольцо расширения (подложка);
3 – правая опора;
4 – зажимы правой опоры;
5 – правый люнет;
6 – упорная бабка;
7 – левый люнет;
8 – левая опора;
9 – электрошкаф управления оборудованием;

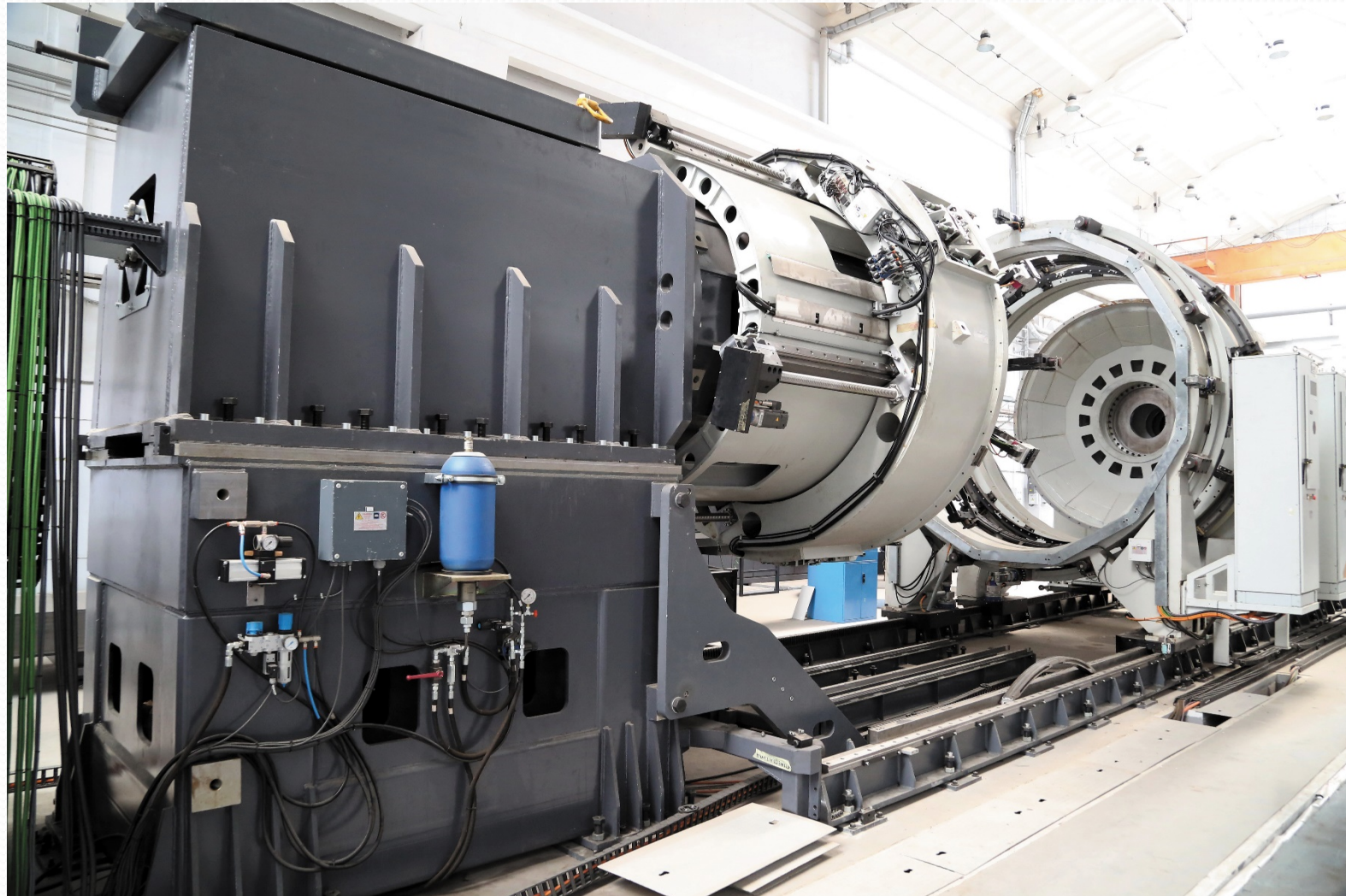
Сборочное оборудование

Общий вид сварочной оснастки установки KR-001

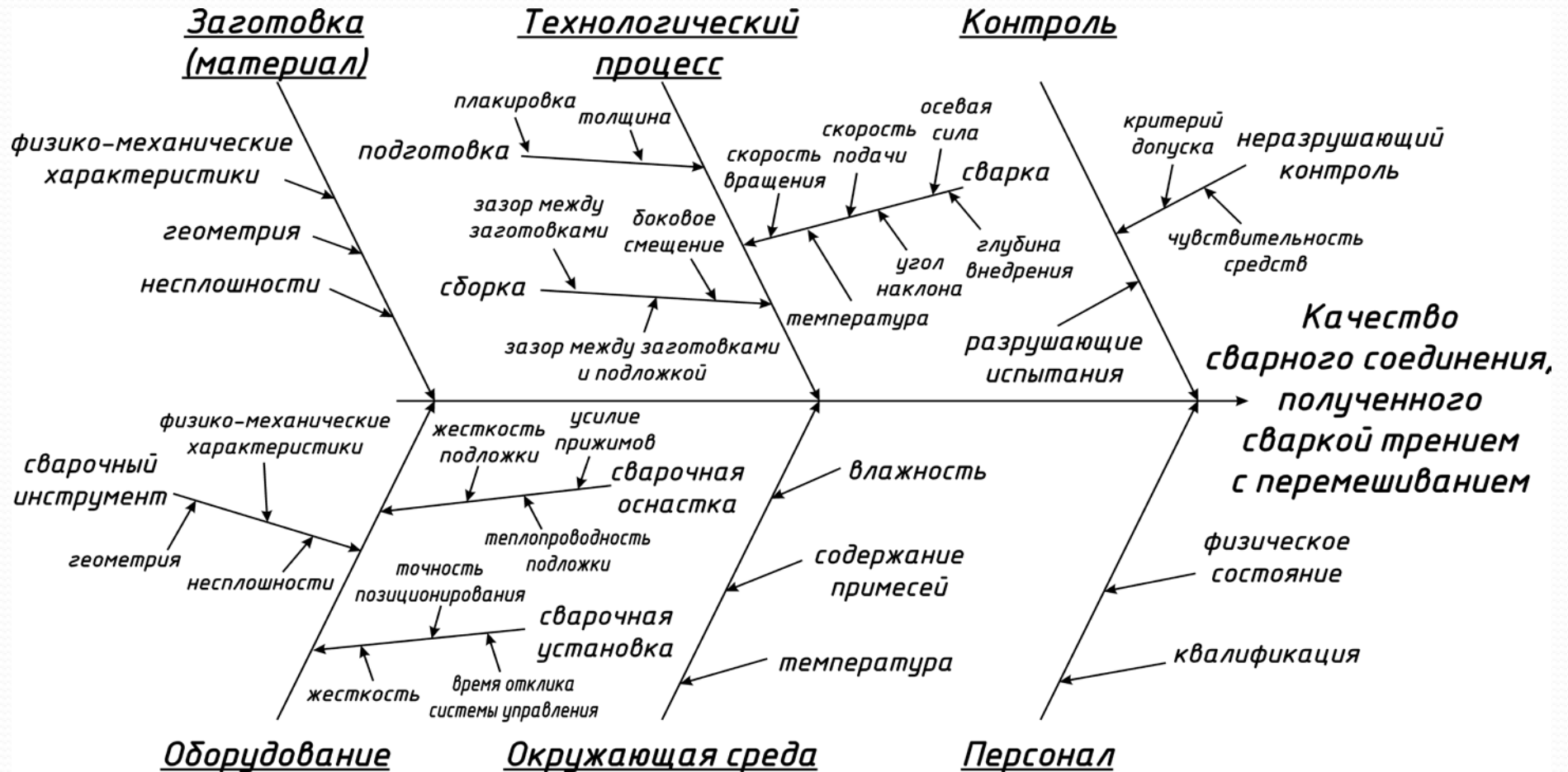


Сборочное оборудование

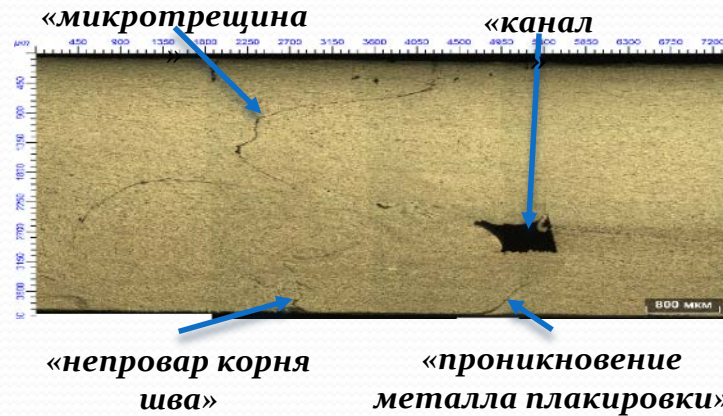
Общий вид сварочной оснастки установки KR-003



Способы обеспечения качества соединений, выполненных СТП



Дефекты в сварном соединении



Микроструктура дефектного сварного шва,
выполненного СТП

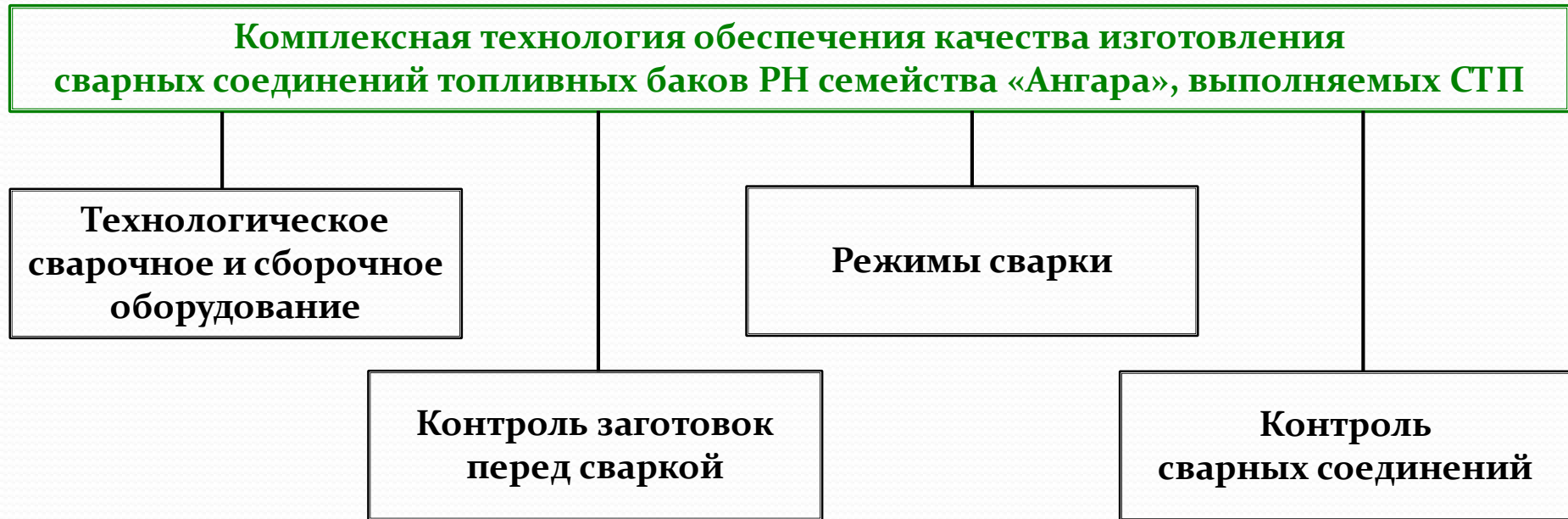
Технологические
факторы

Снижение прочности
сварного соединения

«Непровар корня шва» с цепочкой оксидных включений на месте линии стыка («kissing bonds»)



ОПИСАНИЕ ДЕФЕКТА	ГРАНИЦЫ ДОПУСКА
Отсутствие соединения между свариваемыми заготовками вследствие несоответствия длины рабочего стержня сварочного инструмента толщине заготовок или смещения оси инструмента от оси свариваемого стыка	<p>ОСТ 134-1051-2010: Не допускается, подлежит исправлению.</p> <p>ISO 25239: Не допускается</p> <p>AWS D17.3: Не допускается</p>



Контроль заготовок перед сваркой

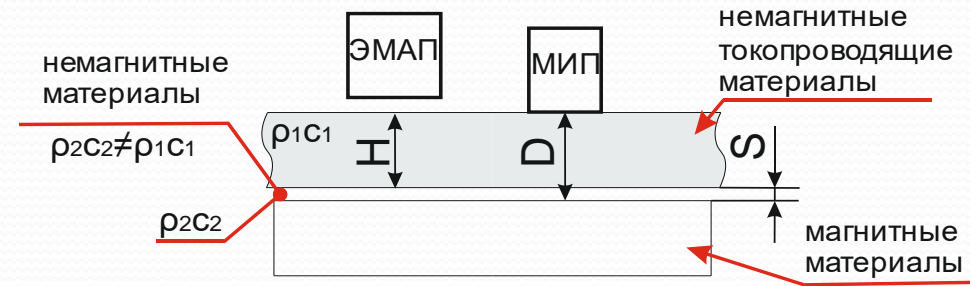
Требования к заготовкам:

- разнотолщинность стенок свариваемых заготовок должна быть не более 0,1 мм для продольных, круговых и кольцевых швов (обеспечивается механообработкой);
- отсутствие зазора между заготовками и подложкой;
- зазор в стыке свариваемых заготовок до 5 % от их толщины (обеспечивается обработкой торцов заготовок и сборкой заготовок под сварку);
- неперпендикулярность торцов свариваемых заготовок к наружному контуру деталей должна быть не более 5 % от толщины (обеспечивается обработкой торцов заготовок);
- отклонение оси сварочного инструмента от стыка в процессе ФС не более 0,5 мм (обеспечивается обработкой торцов заготовок и автоматической сборкой заготовок под сварку);
- смещение свариваемых заготовок недопустимо при сборке (обеспечивается автоматической сборкой под сварку);
- чистота обработки рабочих поверхностей технологических подкладок, соприкасающихся со свариваемыми деталями, на ширине не менее 20 мм от свариваемого стыка должна быть не хуже Rz 20.

Контроль заготовок включает:

- контроль толщины стенок свариваемых заготовок;
- контроль зазора между заготовками и подложкой.

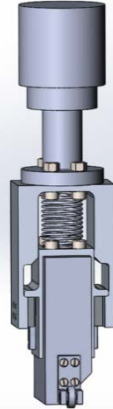
Схема измерений значений толщины заготовок и зазора между заготовками и подложкой



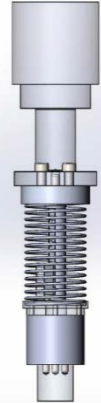
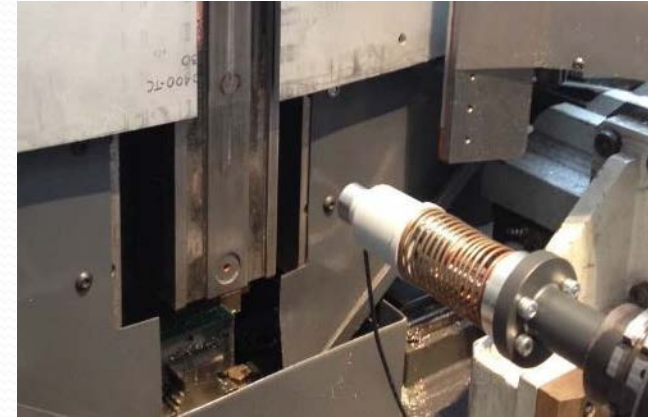
ρ – плотность материала; c – скорость распространения ультразвуковой волны; H – измеренное значение параметра «толщина стенок свариваемых заготовок», [мм]; D – измеренное значение параметра «расстояние от лицевой поверхности заготовок до подложки» («расстояние»), [мм]; S – значение параметра «зазор между заготовками и подложкой», [мм];
ЭМАП – электромагнитно-акустический преобразователь; МИП – магнитоиндукционный преобразователь.

Контроль заготовок перед сваркой

Общий вид измерительной головки с ЭМАГ



Общий вид измерительной головки с МИП



Контроль сварных соединений

Ультразвуковая головка для проведения контроля на установке KR001



Ультразвуковая головка для проведения контроля на установке KR002



Ультразвуковая головка для проведения контроля на установке KR003

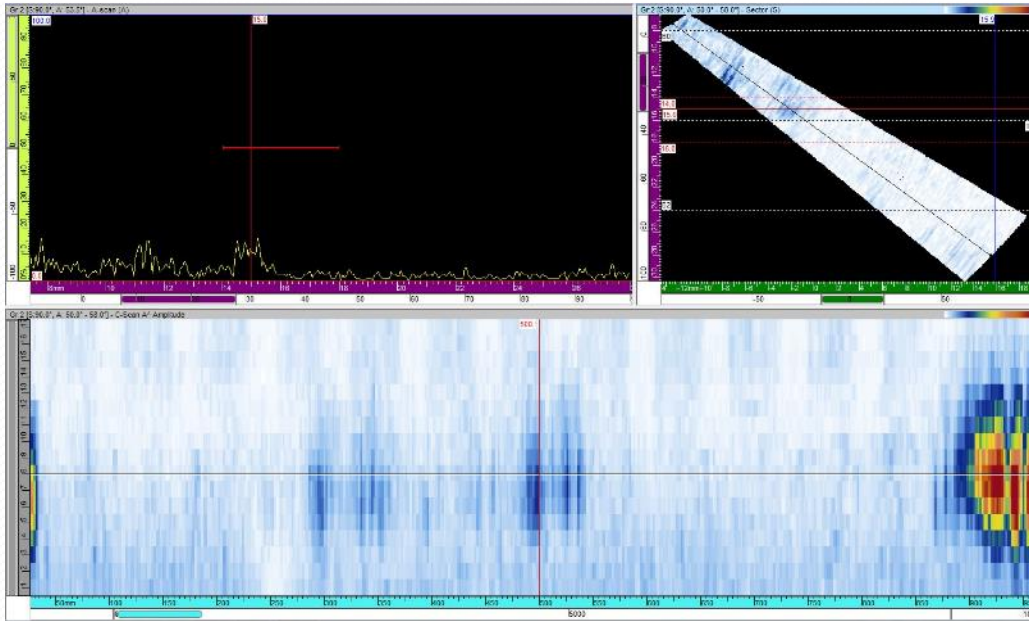


Для реализации автоматизированного УЗК допускается применение дефектоскопа Olympus «Omniscan MX2» в комплекте с 32-элементной и 16-элементной фазированными решетками.

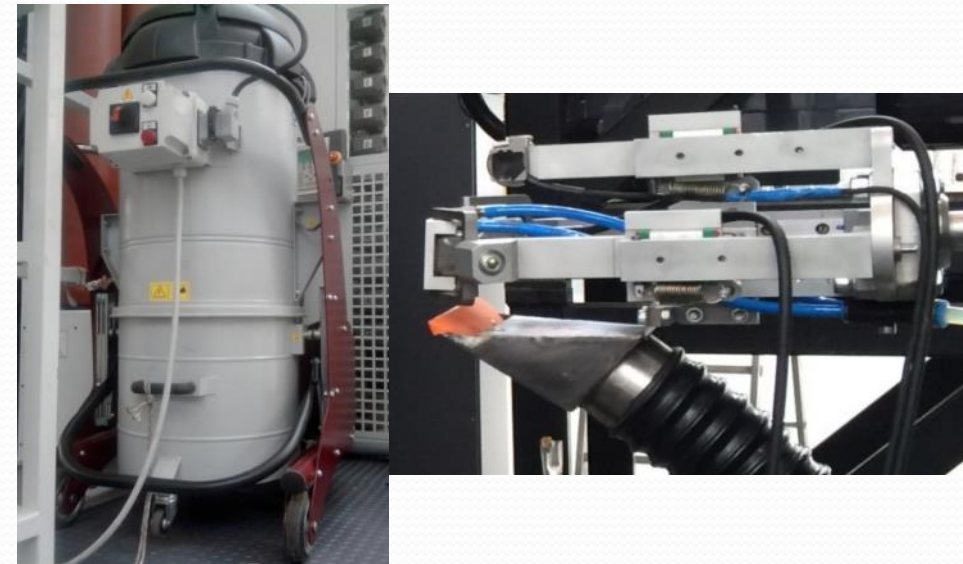
Для повышения достоверности, снижения времени и соответственно стоимости контроля разработана схема, при которой элементы датчика (фазированной решетки) разбиваются на 3 группы:

- элементы, сфокусированные в коревую область сварного соединения;
- элементы, сфокусированные в центральную и поверхностную зоны сварного соединения;
- элементы вводящие и принимающие УЗВ по нормали к поверхности объекта контроля (для контроля качества акустического контакта).

Вид экрана дефектоскопа



Общий вид системы сбора контактной жидкости



1. Ультразвуковые средства предназначены для выполнения автоматизированного контроля с сохранением файла данных сканирования (дефектограммы) с координатной привязкой по протяженности сварного соединения и автоматическим определением дефектов.
2. Ультразвуковые головки оснащены системой сбора контактной жидкости.
3. Система контроля сварных соединений для трех установок СТП также включает в себя средства арбитражного НК:
 - а) лазерно-ультразвукового контроля;
 - б) вихретокового контроля.



Перспективы дальнейшего использования

Перспективы дальнейшего развития СТП:

- совершенствование технологии сварки методом СТП в направлении повышения качества сварочного и сборочного оборудования (стендов, инструмента, оснастки, др.) и процессов самой сварки.

Перспективы дальнейшего развития НК качества сварных соединений:

- повышение достоверности и чувствительности контроля дефектности сварных соединений, а также повышение оперативности и надежности выявления всего спектра возможных дефектов (металлические включения и др.) при расширении номенклатуры свариваемых материалов изделий;
- роботизация процесса контроля и расширение комплексности НК качества сварных швов;
- создание многофункциональных быстродействующих комплексов НК с функцией адекватного представления результатов контроля с использованием современных алгоритмов преобразования и обработки информации.

Возможные направления дальнейшего развития технологии СТП элементов ракетно-космической и авиационной техники:

- повышение точности и быстродействия измерений технологических параметров;
- трансфер технологии сварки методом СТП баков РН на другие на другие ракетно-строительные предприятия отрасли;
- разработка технологии сварки методом СТП в интересах авиационной промышленности с целью уменьшения веса и обеспечения конкурентоспособности её изделий.