

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПОРНОЙ СТРУКТУРЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СБОРКИ ДИВЕРТОРА (ЦСД) ИТЭР

С.М. Акимов*, А.В. Лапин, С.Н. Мазаев, И.В. Мазуль, Г.В. Маринин*,

А.Н. Маханьков, В.А. Миргородский

РФ, Санкт-Петербург, ОАО «НИИЭФА», e-mail: mazaev@sintez.niefa.spb.su

**РФ, Санкт-Петербург, ООО «Русские технологии», e-mail: rtechster@gmail.com*

Введение

Опорная структура Центральной Сборки Дивертора (ЦСД) состоит из стальной опорной конструкции (СОК) и контактирующими с плазмой куполом, внутренней отражающей мишенью (ВОМ) и наружной отражающей мишенью (НОМ). СОК ЦСД включает в себя коллектор купола, коллектор НОМ и коллектор ВОМ, соединенные между собой толстостенными трубами, тонкостенные трубки охлаждения, входные и выходные тройники. Тонкостенные трубки охлаждения соединяют контактирующие с плазмой 12 элементов купола, 10 элементов ВОМ и 12 элементов НОМ с соответствующими коллекторами.

Изготовление опорной структуры ЦСД кроме механической обработки включает в себя сварку СОК и лазерную сварку оснований из стали 316L(N)-IG) и биметаллических CuCrZr/316L(N)-IG (бронза/сталь) крышек элементов купола, НОМ и ВОМ.

Сварка СОК ЦСД включает в себя орбитальную сварку толстостенных труб с коллекторами купола, НОМ и ВОМ, лазерную сварку заглушек коллекторов купола, НОМ и ВОМ и орбитальную сварку коллектора ВОМ с входными и выходными тройниками.

Лазерная сварка.

Контактирующие с плазмой элементы купола, НОМ и ВОМ представляют собой коробчатые структуры, состоящие из оснований (сталь 316L(N)-IG) и биметаллических CuCrZr/316L(N)-IG (бронза/сталь) крышек. Для соединения оснований с крышками разработана технология лазерной сварки стыковых соединений со 100 % проплавлением, качеством швов соответствующим EN ISO 13919-1 Level B и минимальным брызгообразованием. Лазерная сварка выполнялась в технологической ячейке FlexLase оснащенной волоконным лазером ЛС-15 мощностью 15 кВт и роботом Motoman HP50 [1].

Коллекторы НОМ, ВОМ и купола имеют фрезерованные каналы охлаждения (Рис. 1), в которые по технологии изготовления СОК ЦСД лазером ввариваются заглушки до выполнения орбитальной сварки труб стальной опорной конструкции. Перед выполнением

лазерной сварки заглушек коллекторов, все режимы неоднократно проверялись на пластинах. После успешной проверки режимов выполнялась сборка под сварку и лазерная сварка заглушек на коллекторе (Рис. 2). Сварка заглушек проводилась в полном соответствии с технологической картой pWPS No. 1-4 из предварительного пакета данных по сварке ЦСД (preliminary Welding Data Package for Dome pWDP 3PWWK8 v2.3), разработанного в полном соответствии с требованиями международной организации ИТЭР и аттестованного международной организацией Бюро Веритас.



Рис. 1 Коллектор с фрезерованными каналами и заглушками

Технологические параметры сварки заглушек (из технологической карты pWPS No. 1-4):

Расстояние фокусирующей линзы 250 мм.

Режим прихватки:

- скорость при прихватке – 37 мм/мин,
- мощность лазерного излучения - 1,0 кВт,
- расход защитного газа – 60 л/мин,
- расход формирующего газа – 25 л/мин.

Режим сварки:

- скорость сварки – 37 мм/мин,
- мощность лазерного излучения – в соответствии с графиком (Рис. 3),
- расход защитного газа – 60 л/мин,
- расход формирующего газа – 25 л/мин.

Режим замыкания шва: замкнутые сварные швы выполнялись в соответствии с графиком (Рис. 3).



Рис. 2 Коллектор купола с прихваченными (а) и заваренными заглушками (б)

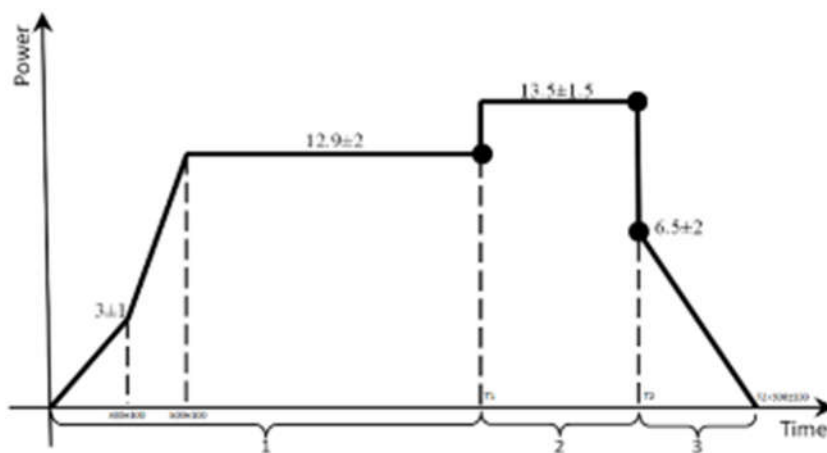


Рис. 3 График изменения мощности излучения для режимов перекрытия: 1 - начало сварки и основной режим на мощности излучения 12,9 кВт, скорость сварки 37 ± 6 mm/s; 2 - перекрытие на мощности излучения 13,5 кВт, скорость сварки 37 ± 6 mm/s, Размер 25 ± 10 mm; 3 – окончание, скорость сварки 70 ± 10 mm/s

Неразрушающий контроль сварки заглушек

После заварки заглушек с коллекторами был выполнен визуальный контроль и цветная дефектоскопия швов.

Визуальный контроль с внутренней стороны коллектора показал минимальное количество брызг на шве и в околошовной зоне. При визуальном контроле коллектора

купола на одной из 4-х заглушек были обнаружены 2 дефекта недопустимые с точки зрения требований уровня В стандарта EN ISO 13919-1 (Приложение 1).

Но дефект в виде неполного заполнения разделки кромок № 511 обнаруженный на лицевой поверхности шва коллектора купола № 4/192 не критичен, так как он залегает в зоне припуска на механическую обработку.

Дефект в виде превышения проплава коллектора купола № 504 обнаруженный в корневой части шва № 4/192 образовался за счет вторичного расплавления металла в перекрытии шва при переходе шва из зоны полного в зону неполного проплавления. И хотя данный дефект не удовлетворяет требованиям уровня В стандарта EN ISO 13919-1, но он не оказывает влияния на прочностные свойства шва и коллектора в целом, поэтому этот дефект можно рассматривать как проходной.

Результаты визуального контроля коллектора ВОМ продемонстрировали отсутствие дефектов недопустимых с точки зрения требований уровня В стандарта EN ISO 13919-1. Результаты цветной дефектоскопии швов коллекторов купола и ВОМ продемонстрировали отсутствие дефектов недопустимых с точки зрения требований уровня 1 стандарта EN ISO 23277, что отвечает требованиям уровня В стандарта EN ISO 13919-1.

По результатам контроля сварки были оформлены протоколы. В качестве примера приведены протоколы визуальный контроля и цветной дефектоскопия (Приложение 1, Приложение 2). После лазерной сварки заглушек и выполнения неразрушающего контроля на коллекторах, коллекторы были использованы для сварки СОК.

Орбитальная сварка СОК

Орбитальная сварка СОК представляет собой многопроходную орбитальную аргонодуговую сварку труб из стали 316L диаметром 114,3 мм с толщиной стенки 8,56 мм и диаметром 141,3 мм с толщиной стенки 9,53 мм с коллектором купола из стали 316L(N)-IG и коллекторами НОМ и ВОМ из стали ХМ-19. Орбитальная сварка СОК является одной из сложнейших и основных операций по сварке СОК ЦСД. Сложность данной орбитальной сварки связана с большим количеством проходов и, как результат, большим объемом расплавленного металла, который при кристаллизации дает усадку и вызывает сильные сварочные напряжения и деформации, которые могут вызвать поводки настолько сильные, что они могут привести к трещинам в шве. Т.к. конструкция СОК представляет собой два параллельных треугольника (которые сами по себе являются жесткими конструкциями) жестко связанных между собой, то поводки вызванные сваркой могут привести к

разрушению или искажению геометрии СОК, что не позволит получить размеры, заданные по чертежам.

В связи с высокой сложностью выполнения сварки СОК, было принято решение максимально автоматизировать все процессы сварки, поэтому было использовано оборудование, которое позволяет максимально повысить качество и производительность сварки посредством замены ручной аргодуговой сварки на орбитальную автоматизированную сварку.

Для максимальной автоматизации процесса сварки труб $\varnothing 114,3$ и $\varnothing 141,3$ мм было использовано оборудование фирмы AMI (ArcMachines, Inc.), а именно: две головки орбитальной сварки Model 81 и два программируемых многофункциональных сварочных источника Model 415 (Рис. 4). Данное оборудование оснащено системой управления AVC/OSC, которое позволяет автоматически следить за длиной дуги и осуществлять поперечные колебания горелки поперёк стыка во время сварки, что позволяет надежно и качественно осуществлять процесс орбитальной сварки.

Для максимальной автоматизации процесса сварки входных и выходных тройников охлаждения ЦСД $\varnothing 60,3$ мм с толщиной стенки 2,77 мм был использован комплект оборудования фирмы Polysoude: головка орбитальной сварки MW65 с источником питания Р4 (Рис. 5 **Ошибка! Источник ссылки не найден.**). Преимуществом данного оборудования является компактные размеры сварочной головки, позволяющие выполнять орбитальную сварку тройников $\varnothing 60,3$ мм при их близком взаимном расположении.

Для уменьшения и контроля сварочных деформаций разработана оснастка для сборки и сварки СОК (Рис. 6), которая позволяет жестко фиксировать коллекторы перед сваркой, и дает возможность свободной усадки после сварки каждого прохода. Для центровки и сборки коллекторов с трубами были разработаны и изготовлены хомуты (Рис. 7 **Ошибка! Источник ссылки не найден.**).

Последовательность операций при орбитальной сварке. Вначале коллекторы СОК закреплялись на специальных платформах (Рис. 8) и устанавливались в оснастку для сборки и сварки СОК (Рис. 6), после чего оси труб центрировались хомутами, чтобы правильно расположить коллекторы по отношению друг к другу. Затем производилась прихватка параллельных труб между коллекторами купола и НОМ и коллекторами купола и ВОМ. После прихватки производилась сварка корневых швов двух параллельных труб с коллектором НОМ, причем сварка проводится одновременно двумя орбитальными головками с двумя источниками, затем производится сварка корней швов вторых концов этих труб с коллектором купола. Точно также производились первые корневые проходы для коллектора

ВОМ и коллектора купола. После совмещения осей патрубков коллекторов НОМ и ВОМ устанавливались и прихватывались параллельные трубы между коллекторами НОМ и ВОМ. После чего последовательность выполнения проходов орбитальной сварки определялась в зависимости от смещения коллекторов относительно оснастки. Положение коллекторов контролировалось измерительной системой на базе лазерного трекера API Radian 20 с точностью не хуже 10 мкм (Рис. 9). Таким образом, была получена геометрия СОК в соответствии с требованиями чертежа.

Заключение

В результате были разработаны: технология орбитальной сварки СОК ЦСД и технология лазерной сварки заглушек коллекторов купола, НОМ и ВОМ.



Рис. 4 Головка орбитальной сварки AMI Model 81 и программируемый многофункциональный сварочный источник Model 415



Рис. 5 Головка орбитальной сварки Polysoude MW65 и программируемый многофункциональный сварочный источник Polysoude P4

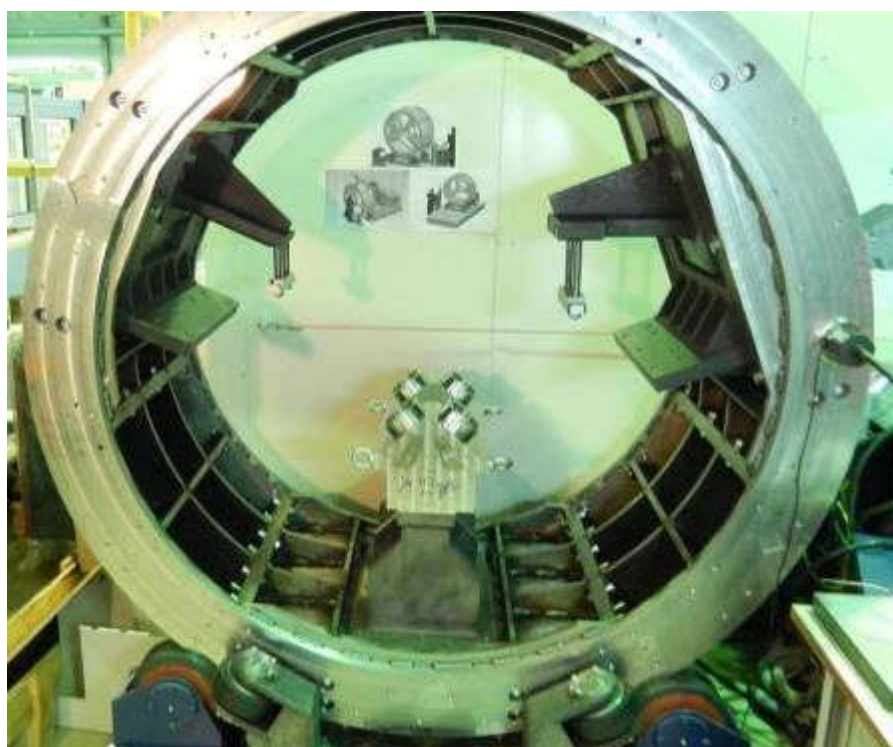


Рис. 6 Оснастка для сборки и сварки СОК

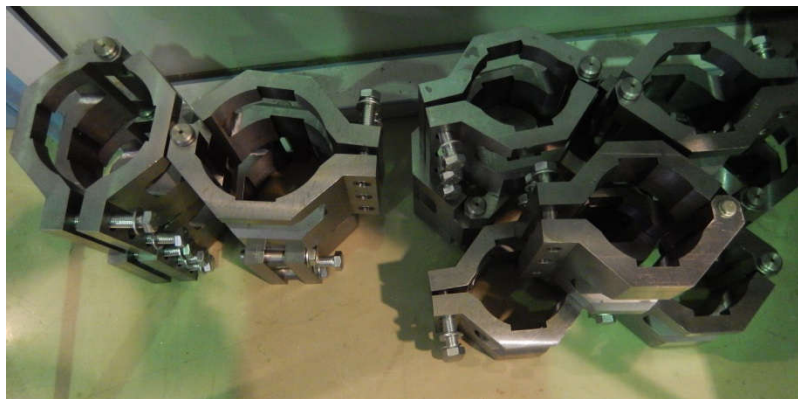


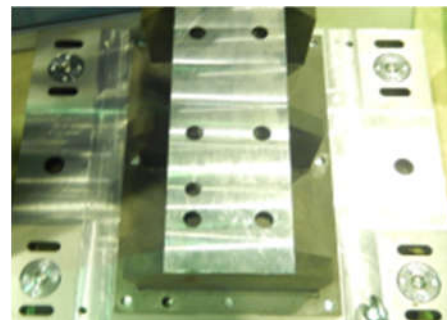
Рис. 7 Хомуты



Платформа НОМ



Платформа ВОМ



Платформа купола

Рис. 8 Платформы



Рис. 9 Лазерный трекер APIRadian 20




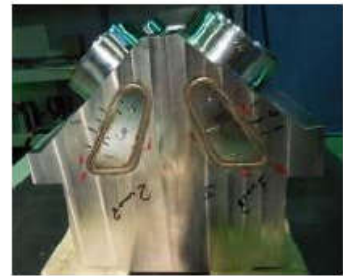









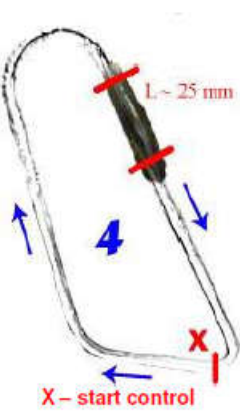




Рис. 10 Сборка макета СОК ЦСД



Литература

1. Mazaev S., Gurieva T., Lapin A., Makhankov A., Mirgorodsky V., Natochev S., Nomokonova O., Vlasov I., Ignatov A., Laser welding of plasma facing units for ITER divertor Dome manufacturing , IEEE/NPSS 24th Symposium on Fusion Engineering (SOFE), (2011) 1-5: *DOI: 10.1109/SOFE.2011.6052257*.






Протокол визуального контроля коллектора купола

		ОАО «НИИЭФА», НТЦ «Синтез» D.V. Efremov Scientific Research Institute of Electrophysical Apparatus			
		Протокол визуально – измерительного контроля / Visual testing Report			
Протокол № / Report N 128 VT		Дата / Date 27.11.2014		Страница __ из __ / Page 1 of pages 3	
Объект / Object	Mock up steel support structure of Dome	Деталь / Parts	Mock up umbrella manifold, weight – 210 kg		
Контракт / Commission Order	Technical Specification to PA 1.7.P2C.RF.01.0	Чертеж / Drawing	2A.240.040 СБ		
Область контроля Part to be tested	Маркировка Marking	Материал Material	Толщина, мм Thickness mm	Объем Extend	Способ сварки Welding process
Face and root weld	UMM S2, 4 pcs. (№1/190; №2/191; №3/193; №4/192)	Steel 316L(N)-IG / 316L(N)-IG	11 mm	100%	Laser beam welding
Стадия контроля / Technology stage	After welding	Инструкция по проведению / Test instruction		EN ISO 17637 1A/228/320ПМ-2 / ID 9R7FMG	
Оценка качества / Acceptance Standard	EN ISO 13919-1, Level B	Классификация дефектов / Classification of imperfections		EN ISO 6520-1	
Оборудование / VT equipment	Measuring scale 300*13*0.5mm; Lens-Ø42mm, multiplicity 7x, Digital caliper 150*0/01mm; Digital dimension gage 12.5*0.01mm; Measuring graticule 0.1 mm; Lens- Ø20mm, multiplicity 10x, measuring graticule 0.1 mm; Videoscope Olympus IPLEX LX IV8420L1 (serial number: Y000738); optical adapter specifications: AT120D/NF-IV84; AT50D/50D-IV84; AT50S/50S-IV84; calibration block Olympus, Serial №: 08808; Videoscope Everest XLG3 XLG3000B (serial number: 1336K4210); optical adapter specifications: XLG3T6180FN				
Объект / Местоположение дефектов / Test object / Flaw location					
Face of the welds					
					
1. Appearance of the manifold		2. Covers №№1/190; 2/191		3. Covers №№3/193; 4/192	
					
4. Cover №1/190	5. Cover №2/191	6. Cover №3/193	7. Cover №4/192		

			
<p>8. Cover №1/190 spot of overlap_ <i>Incompletely filled groove</i></p>	<p>9. Cover №2/191 spot of overlap_ <i>Incompletely filled groove</i></p>	<p>10. Cover №3/193 spot of overlap_ <i>Incompletely filled groove</i></p>	<p>11. Cover №4/192 spot of overlap_ <i>Incompletely filled groove</i></p>
<p>Root of the welds</p>			
			
<p>12. Cover №1/190_spot of overlap_ <i>Excessive penetration</i></p>	<p>13. Cover №2/191_spot of overlap_ <i>Excessive penetration</i></p>		
			
<p>14. Cover №3/193_spot of overlap_ <i>Excessive penetration</i></p>	<p>15. Cover №4/192_spot of overlap_ <i>Excessive penetration</i></p>		

Результаты контроля / Дефекты / Оценка качества _ Test result / Imperfections / Quality assessment				
Face of the welds				
Тип и обозначение / Type and designation as per EN ISO 6520-1	Расположение / /Coordinate position	Измерение мм /Measuring, range mm / Limit for imperfections for quality level B to EN ISO 13919	Допустимость Acceptability	
			Да / Yes	Нет / No
Не полностью заполненная разделка кромок / Incompletely filled groove / 511	Covers _ spot of overlap №1/190 (Fig. №№4,8) №2/191 (Fig. №№5,9) №3/193 (Fig. №№6,10) №4/192 (Fig. №№7,11)	№1/190 h_{max} 0.5 mm №2/191 h_{max} 0.3 mm №3/193 h_{max} 0.3 mm №4/192 h_{max} 1.2 mm / Limit $h \leq 0.5mm$	Covers №№ 1/190, 2/191,3/193 Yes	Cover № 4/192 No
Превышение выпуклости / Excess weld metal / 502	№1/190 (Fig. №№4) №2/191 (Fig. №№5) №3/193 (Fig. №№6) №4/192 (Fig. №№7)	№1/190, №2/191, №3/193, №4/192 $h_{max} < 1.5$ mm / Limit $h \leq 1.85mm$	Covers №№ 1/190, 2/191,3/193, 4/192 Yes	
Брызги металла / Spatter / 602	Covers №№ 1/190, 2/191, 3/19, 4/192 overalls e.g. Fig. №№ 4 - 10	$\varnothing < 0.3$ mm / Limit $\varnothing \leq 0.3mm$ Under to agreement	Yes	
Root of the welds				
Превышение проплава / Excessive penetration / 504	Covers _ spot of overlap №1/190 (Fig. № 12) №2/191 (Fig. № 13) №3/193 (Fig. № 14) №4/192 (Fig. № 15)	№1/190 $h_{max} < 1.85$ mm №2/191 $h_{max} < 1.85$ mm №3/193 $h_{max} < 1.85$ mm №4/192 $h_{max} > 1.85$ mm / Limit $h \leq 1.85mm$	Covers №№ 1/190, 2/191,3/193 Yes	Cover № 4/192 No
Брызги металла / Spatter / 602	Covers №№ 1/190, 2/191, 3/19, 4/192 overalls e.g. Fig. №№ 12 - 15	$\varnothing < 0.3$ mm / Limit $\varnothing \leq 0.3mm$ Under to agreement	Yes	
Оплавление поверхности противоположной кромки паза / Washing of base metal at the opposite edges of groove	Covers №№ 1/190, 2/191, 3/19, 4/192 Along the full length e.g. Fig. №№ 12 - 15	Under to agreement	?	?
ЗАКЛЮЧЕНИЕ _ CONCLUSION	<p>Макет коллектора купола: Сварные швы заглушек №№ 1/190, 2/191, 3/193 не имеют недопустимых дефектов, что отвечает требованиям к уровню В стандарта EN 13919-1. Сварной шов заглушки № 4/192 имеет недопустимые дефекты, что не отвечает требованиям к уровню В стандарта EN 13919-1. Внимание: Со стороны корня на всей протяженности шва имеет место оплавление поверхности противоположной кромки паза.</p> <p>Mock up umbrella manifold: The welds for covers №№ 1/190, 2/191, 3/193 unallowable imperfections in according of level B acceptance Standard EN ISO 13919-1 were not detected. Face and root of the welds for cover № 4/192 are unallowable imperfections - Incompletely filled groove with reference N 511 and excessive penetration with reference N 504 - what fall short of level B in according to Acceptance Standard EN ISO 13919-1. Attention: On the root of welds covers №№ 1 - 4 detected washing of base metal at the opposite edges of groove.</p>			
Дефектоскопист / NDT inspector	Квалификация / Qualification (EN ISO 9712)		Подпись/ Signature	Дата/ Date
Panteleev Mikhail	Qualification Level 2 Certificate N 02 / 11526-2012 – 2015			27.11.2014
Lab head  Guryeva T.M.	Qualification Level 2, Certificate N 02 / 9823-2013 - 16			

Протокол цветной дефектоскопия коллектора купола

		ОАО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», НТЦ «Синтез» D.V. Efremov Scientific Research Institute of Electrophysical Apparatus				
		Протокол проникающего контроля / Penetrant Test Report				
Протокол № 102 цветная Report N 102/PT/12-2014		Дата / Date 03/12/2014 Заявка № / Order N 81/28.11.2014		Страница ___1___ из ___1___ Page ___Pag^s___		
Деталь / Parts		Mock up umbrella manifold, weight – 210 kg		Объект /Object Mock up steel support structure of Dome		
Контракт / Commission Order		Technical Specification to PA 1.7.P2C.RF.01.0		Чертеж / Drawing 2A.240.040 СБ		
Область контроля Part to be tested		Кол-во, Маркировка Q-ty, marking	Материал Material	Поверхность Surface	Термообработка Heat treatment	
Welds of covers		UMM S2, 4 pcs. № №190,191,192,193	316(N)-IG/316(N)-IG	Face, 100%	After welding	
Инструкция по проведению Test instruction		EN ISO 3452-1 1A.228.320 ПМ-3 / ID 9QW6P4		Документ по оценке качества Acceptance Standard EN ISO13919-1 Level B EN ISO 23277 Level 1		
Набор дефектоскопических материалов / Обозначение / Testing products / Designation						
DUBL-CHEK II-цветная DP51/DR60/D100						
Пенетрант /сертификат Penetrant / Batch		Очиститель/сертификат Remover / Batch		Проявитель/сертификат Developer / Batch		
DP51 / 5411/3 06.2016 SHERWIN / NDT Europa		DR60 / 15409/1 /02.2015 SHERWIN / BABB CO		D100 / 5511/12 /05.2015 SHERWIN/ BABB CO		
Процесс / Procedure						
Время пенетранта / Penetrant time		Время проявки / Development time		Дата контроля / Date		
20 минут		20 минут		03/12/2014		
Объект/Схема контроля / Рисунок индикаций / Test object / Scheme/ Indications						
UMM S2 Covers №190, №191			UMM S2 Covers №192, №193			
						
Результаты контроля / Оценка качества / Test result / Quality assessment						
Маркировка Marking	Индикаторный след / Indication of discontinuities			Допустимость Acceptability		Обозначение Designation
	протяженный linear	округлый round	интенсивность width or intensity	Да Yes	Нет No	
№190, №191, №192, №193	No	No		Yes		
ЗАКЛЮЧЕНИЕ – CONCLUSION	Макет коллектора купола (черт. 2A.240.040СБ): наружная поверхность сварных швов заглушек №№ 190, 191, 193, 192 не имеют недопустимых индикаторных следов для приемки по уровню 1 стандарта EN ISO 23277, что отвечает требованиям к уровню качества В стандарта EN ISO 13919-1.					
	Mock up umbrella manifold (UMM S2_ drawing 2A.240.040СБ): The welds for covers №№ 190, 191, 193, 192 unallowable indications in according of level 1 acceptance Standard EN ISO 23277 were not detected. Face of the welds for covers №№ 190, 191, 193, 192 correspond to the EN ISO 13919-1 for level B.					
Дефектоскопист_ NDT inspector		Квалификация_ Qualification (EN ISO 9712)		Подпись_ Signature		Дата_ Date
O.Lysenko		Level 2, Certificate N 23549-2014				03.12.2014
Lab. head: 		Guryeva T. Qualification Level 2, Certificate N 02 / 9823-2013 –2016				