

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА СВАРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ НА КАЧЕСТВО ШВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ СВАРКЕ В ЗАЩИТНОМ ГАЗЕ

В. П. ЕЛАГИН

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Для сварки разнородных соединений широко используются высоколегированные сварочные материалы. Показано, что применение способа дуговой механизированной сварки в защитном газе разнородных аустенитных и перлитных сталей ограничено из-за образования в аустенитном многослойном шве дефектов, таких как несплавления и непровары, вызванных появлением тугоплавкой оксидной корки на поверхности наплавленного металла. Повысить качество шва возможно за счет обеспечения ее самоотделимости от поверхности металла в процессе охлаждения. Это достигается наличием в составе сварочной проволоки повышенного содержания таких элементов, как кремний, титан, цирконий и др., которые снижают в составе оксидной корки количество шпинелей на основе хрома, никеля, молибдена и др. и повышают количество хрупкой стеклообразной фазы. Библиогр. 15, табл. 3, рис. 1.

Ключевые слова: состав сварочной проволоки, дуговая механизированная сварка, защитный газ, разнородные стали, оксидная корка, самоотделимость корки

Характерной особенностью современных технологий сварки разнородных сталей является применение преимущественно ручной дуговой сварки высоконикелевыми материалами даже для соединения трубных элементов, таких как патрубки, сгибы, тройники и т. п., которые обычно выполняют механизированной сваркой. Высокое содержание никеля в составе сварочных материалов обусловлено необходимостью снижения толщины мартенситной прослойки и диффузии углерода в зоне сплавления аустенитного шва с перлитной сталью [1, 2]. Однако нестабильность формирования шва, характерная для ручной дуговой сварки, приводит к увеличению химической неоднородности и снижению влияния никеля на структурную неоднородность в зоне сплавления разнородных сталей и способствует образованию трещин в этой зоне. Одной из основных причин ограничения применения механизированной сварки разнородных сталей в защитном газе является образование в аустенитном многослойном шве дефектов, таких как несплавления и непровары, вследствие наличия тугоплавкой оксидной корки на поверхности наплавленного металла [3, 4]. Вместе с тем установлено, что при применении CO_2 в качестве защитного газа его смеси с кислородом или с азотом снижается химическая и структурная неоднородность [5, 6], а также повышается стойкость против образования пор в этой зоне [7, 8]. Этому способствует как повышение уровня аустенитности металла, так и улучшение жидкотекучести

металла в сварочной ванне и, в частности, в пристеночной зоне [9].

Известно успешное применение механизированной сварки разнородных сталей при использовании в качестве защитного углекислого газа или его смеси с азотом или воздухом [10]. Отсутствие дефектов в шве было получено за счет применения сварочной высоколегированной проволоки состава 08X20N9Г7Т, при сварке которой образующаяся оксидная корка самостоятельно отделяется в процессе охлаждения от поверхности наплавленного металла. Следовательно, при сварке в кислородсодержащем защитном газе возможно получение бездефектного аустенитного шва и в этом большое значение имеет выбор состава сварочной проволоки.

Целью данной работы является определение основных принципов выбора состава сварочной аустенитной проволоки для предотвращения образования дефектов в аустенитном шве при механизированной сварке разнородных сталей в защитном газе.

Работа выполнялась путем анализа химического состава известных высоколегированных сварочных проволок с разным содержанием никеля относительно вероятности самоотделения оксидной корки с поверхности наплавленного металла. Результаты проверялись путем выполнения швов механизированной сваркой в смеси CO_2 с 2 % азота с оценкой их качества. При этом определяли отделимость, химический состав и температуру стеклования оксидной корки, а также температуру кристаллизации металла шва методом высокотем-

Таблица 1. Марочный состав сварочных проволок, рекомендуемых для сварки разнородных сталей, мас. %

Марка (тип легирования) проволоки, нормативный документ	С, не более	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	S	P
								не более	
Св-08Х20Н9Г7Т, ГОСТ 2246-70	0,10	0,5...1,0	5,0...8,0	18,5...22,0	8,0...10,0	-	0,6...0,9	0,018	0,035
ЭП 622 (Х25Н25М3Г2), ТУ 14-1-4968-91	0,08	≤0,40	1,2...2,0	23,5...26,5	23,5...26,5	2,5...4,0	-	0,015	0,020
ЭП 673 (Х25Н40М7Г2), ТУ 14-1-4968-91	0,08	≤0,40	1,2...2,0	23,5...26,5	38,5...41,5	6,6...8,0	-	0,015	0,020
ЭП 606 (Х25Н60М10Г2), ТУ 14-1-4968-91	0,10	≤0,40	1,0...2,0	23,5...26,5	58,5...61,5	9,0...11,0	-	0,01	0,015

Таблица 2. Химический состав оксидной корки на поверхности шва при сварке в смеси CO₂ с азотом, мас. %

Тип легирования проволоки	SiO ₂	MnO	Cr ₂ O ₃	MoO ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
Х25Н25М3Г2	5,35	15,49	41,93	2,3	34,37	-
Х20Н9Г7Т	12,5	29,69	12,35	-	13,63	23,52

пературного термического анализа при помощи установки ВДТА-8М.

Основополагающие принципы выбора химического состава сварочных проволок для сварки разнородных сталей сформулированы в работе [1]. Согласно им, для снижения структурной неоднородности в зоне сплавления с перлитной сталью, сварочная проволока должна обеспечить получение металла шва с аустенитной структурой, повышенным содержанием никеля и минимальным содержанием карбидообразующих элементов. Количество никеля в составе сварочной проволоки при этом рекомендуется определять в зависимости от максимальной температуры эксплуатации сварных соединений. Рекомендуемое соответствие состава сварочной проволоки температуре эксплуатации сварных соединений разнородных сталей [1] следующее: для легированной проволоки Х20Н9Г7Т допустимая температура эксплуатации 350 °С; для Х25Н25М3Г2 — 450; Х25Н40М6Г2 — 550; Х25Н60М10Г2 — 650. Количество карбидообразующих элементов — из условия обеспечения достаточной стойкости аустенитного шва образованию горячих трещин. При этом карбидообразующие элементы должны иметь сравнительно низкую активность по отношению к углероду, а их количество должно быть минимальным для снижения диффузии углерода и образования карбидов в зоне сплавления. В ряду активностей такими элементами являются хром, молибден, вольфрам, наличие и количество которых определяется содержанием в проволоке никеля — чем его больше, тем больше в составе проволоки этих элементов.

Количество хрома в составе высоконикелевых проволок ограничено 25 %, а молибдена 10 % (табл. 1) в связи с их высокой склонностью к образованию σ-фазы, охрупчивающей металл. Более низкое содержание хрома и отсутствие молибдена в проволоке типа Х20Н9Г7Т обусловлено ау-

стенично-ферритной структурой металла шва, что обеспечивает ему достаточную технологическую прочность.

При сварке высоконикелевыми проволоками в смеси CO₂ с азотом поверхность шва имеет высокую шероховатость, во впадинах которой находится большее количество оксидной корки. Она практически не отбивается, а может быть удалена только при помощи абразивного круга. Поверхность шва, выполненного проволокой типа Х20Н9Г7Т, более гладкая, а оксидная корка самостоятельно отделяется от нее в процессе охлаждения. При этом толщина ее находится в пределах 0,5...1,5 мм и имеет блестящую, характерную для стекла поверхность излома [11]. Химический состав оксидной корки и температура ее плавления зависят от состава сварочной проволоки (табл. 2, 3).

Анализ диаграмм состояния двойных систем, образуемых оксидами, приведенных в табл. 2, показывает, что в оксидной корке высоконикелевого шва могут образоваться фазы (FeMn)OCr₂O₃ и FeCr₂O₄MoO, которые имеют решетку шпинели, изоморфную с решеткой металла [12].

Наличие в проволоке типа Х20Н9Г7Т титана, повышенного содержания кремния, а также марганца обеспечивает более активное взаимодействие с кислородом, чем хром и молибден. Это уменьшает количество оксидов Cr₂O₃ и MoO₃, что, в свою очередь, снижает температуру плавления ($T_{пл}$) и стеклования ($T_{стк}$) корки (табл. 3) до температуры более низкой, чем температура плавления и кристаллизации ($T_{кр}$) металла шва. Хоро-

Таблица 3. Температура агрегатного состояния металла шва и оксидной пленки

Тип легирования проволоки	Металл шва		Оксидная пленка	
	$T_{пл}$, °С	$T_{кр}$, °С	$T_{пл}$, °С	$T_{стк}$, °С
Х25Н25М3Г2	1470	1330	1811	1680
Х20Н9Г7Т	1460	1390	1300	960

шая отделимость оксидной корки с поверхности шва объясняется образованием в ее составе хрупкой стеклообразной силикатной фазы [13, 14], которая растрескивается при охлаждении шва. Улучшению ее отделимости способствует также наличие в составе сварочной проволоки циркония, образующего в оксидной корке оксиды циркония, имеющих более высокий коэффициент термического расширения, чем силикатная фаза, что способствует ее разрушению при охлаждении шва [15].

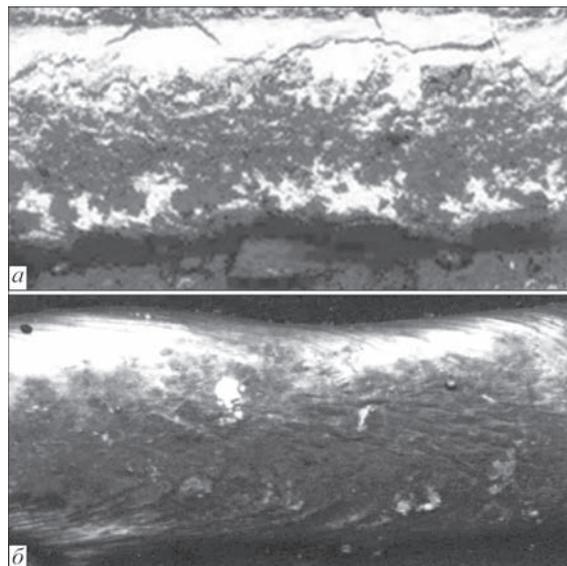
Более позднее затвердевание оксидной корки, чем металла шва, делает его поверхность гладкой, а более раннее затвердевание – шероховатой. В последнем случае, возможен, видимо, захват жидким металлом затвердевшей корки, что приводит к ухудшению ее отделимости.

Проверка результатов анализа была выполнена оценкой отделимости оксидной корки с поверхности наплавленного металла, выполненного стандартными сварочными проволоками (ГОСТ 2240-70), которые разработаны для сварки высоколегированных сталей.

Оценка отделимости оксидной корки от поверхности шва:

Св-06Х19Н9Т	Отделяется частично
Св-08Х20Н9Г7Т	Полная самоотделимость
Св-07Х18Н9ТЮ	Отделяется частично
Св-05Х20Н9ФБС	Отделяется частично
Св-08Х20Н9С2БТЮ	Отделяется полностью
Св-08Х19Н10Г2Б	Отделяется частично
Св-07Х25Н13	Не отделяется
Св-01Х19Н18Г9АМ4	Отделяется частично
Св-10Х16Н25АМ6	Не отделяется
Св-01Х23Н28МЗДЗТ	Не отделяется
Св-08Н60Г8М7Т	Отделяется частично
Св-ХН75МБТЮ	Отделяется частично

Как видно, лишь одна сварочная проволока Св-08Х20Н9Г7Т имеет химический состав, который обеспечивает полную самоотделимость оксидной корки при охлаждении (рис., а). Однако, следует отметить, что отделимость ее может ухудшиться при снижении количества в составе проволоки кремния, марганца и титана в пределах марочного состава (табл. 1). При содержании Si = 0,62 %, Mn = 5,8 %, Ti = 0,7 % в составе проволоки поверхность шва оказывается полностью покрытой черной коркой (рис., б), которая отбивается частично. Хорошая отделимость оксидной корки наблюдается при наличии кремния и титана в составе проволоки Св-08Х20Н9Г7Т большем, чем 0,7 % и соотношении его количества к количеству марганца большем, чем 0,125. Значительное ухудшение ее отделимости даже при выполнении этого соотношения наблюдается при уменьшении окислительной способности защитного газа, например, при использовании в качестве защитного газа смеси аргона с 0,5...4,0 %



Поверхность валиков, наплавленных в CO₂ проволокой Св-08Х20Н9Г7Т, имеющей соотношение Si/Mn: а — 0,142; б — 0,11

кислорода или с менее, чем 40 % CO₂. Причиной этого является снижение в составе оксидной корки хрупкой стеклообразной фазы и увеличения оксидов шпинелеобразующего элемента — хрома, а также уменьшение ее толщины меньше, чем 0,5 мм. Роль последнего фактора в этом, очевидно, обусловлена снижением уровня термических напряжений, способствующих ее растрескиванию.

Отделимость оксидной корки также ухудшается при увеличении в составе проволоки содержания никеля, а также при наличии в нем алюминия, ниобия, ванадия, которые являются сильными шпинелеобразующими элементами.

Таким образом, при выборе химического состава аустенитных высоконикелевых проволок для механизированной сварки разнородных сталей в смеси защитного газа на основе CO₂ следует учитывать следующие факторы:

- соответствие количества никеля в составе сварочной проволоки температуре эксплуатации сварного соединения;
- в составе сварочной проволоки должно быть минимальное количество карбидообразующих элементов, таких как марганец, хром, молибден и др., достаточное для обеспечения высокой стойкости металла шва к образованию горячих трещин;
- для улучшения отделимости оксидной корки с поверхности шва в химическом составе сварочной проволоки должны быть в повышенном количестве элементы, такие как кремний, титан, цирконий, марганец и др., образующие в составе оксидной корки хрупкие фазы стеклообразной морфологии, а также имеющие более высокую активность взаимодействия с кислородом, чем хром, молибден и др. элементы, являющиеся шпинелеобразующими.

Выводы

1. Применение механизированной дуговой сварки разнородных сталей в защитном газе на основе CO_2 ограничено в связи с образованием на поверхности наплавленного высоконикелевого металла тугоплавкой оксидной корки и появлением в многослойном шве дефектов типа несплавления и зашлаковки.

2. Состав сварочной проволоки для механизированной дуговой сварки разнородных сталей в защитном газе на основе CO_2 кроме высокого содержания никеля и минимального количества карбидообразующих элементов, таких как хром, молибден, вольфрам и др., должен иметь повышенное содержание таких элементов как кремний, титан, марганец и др., образующих в составе оксидной корки фазу стеклообразной морфологии и снижающих температуру ее затвердевания.

3. Качество многослойного шва сварных соединений разнородных сталей при механизированной сварке в защитном газе на основе CO_2 обеспечивается при применении в качестве электродной сварочной проволоки марки Св-08Х20Н9Г7Т, в составе которой количество кремния и титана больше 0,7 %, а соотношение Si/Mn больше, чем 0,125.

Список литературы

1. Готальский Ю. Н. (1992) *Сварка перлитных сталей аустенитными материалами*. Ющенко К. А. (ред.). Киев, Наукова думка.
2. Sudha C., Thomas Paul V., Terrance A. L. E. et al. (2006) Microstructure and Microchemistry of Hard Zone in Dissimilar Weldments of Cr-Mo Steels. *Welding J.*, 4, 71-74.
3. Снисарь В. В., Липодаев В. Н., Елагин В. П. и др. (1990) Влияние параметров газовой защиты при сварке в аргоне аустенитной проволокой разнородных сталей на образование оксидной пленки на поверхности слоев многослойного шва. *Автоматическая сварка*, 12, 44-48.
4. Готальский Ю. Н., Стретович А. Д. (1971) О шлаковых включениях в многослойном шве при сварке в защитных газах аустенитной проволокой. *Там же*, 12, 39-43.
5. Елагин В. П., Снисарь В. В., Савицкий М. М. и др. (2001) Химическая и структурная неоднородности в зоне сплавления низкоуглеродистой стали с аустенитным швом при сварке в защитных газах. *Там же*, 4, 8-13.
6. Снисарь В. В., Липодаев В. Н., Елагин В. П. и др. (1991) Влияние легирования аустенитного шва азотом на развитие структурной неоднородности в зоне сплавления с перлитной сталью. *Там же*, 2, 10-14.
7. Елагин В. П., Снисарь В. В., Липодаев В. Н. (1993) Особенности дуговой сварки в азотосодержащих защитных газах аустенитными проволоками разнородных и перлитных сталей. *Там же*, 7, 12-16.
8. Писарев В. А., Жизняков С. Н. (2016) Влияние кислорода на процесс образования вызываемых азотом пор при дуговой сварке плавящимся электродом. *Там же*, 7, 51-55.
9. Потапьевский А. Г., Сараев Ю. А., Чинахов Д. А. (2012) *Сварка сталей в защитных газах плавящимся электродом. Техника и технология будущего*. Томск, Изд-во Томского политехнического университета.
10. Елагин В. П., Снисарь В. В., Липодаев В. Н., Артюшенко Б. Н. (1995) Механизированная сварка стали 15Х5М без подогрева и термообработки. *Автоматическая сварка*, 8, 19-23.

11. Елагин В. П. (2014) Выбор защитного газа для механизированной дуговой сварки разнородных сталей. *Там же*, 6 7, 114-118.
12. Петрищев А. С., Григорьев С. М. (2012) Некоторые физико-химические закономерности углеродотермического восстановления тугоплавких элементов в системе (Mo, W, Cr, V, Nb)-O-C. *Процессы литья*, 5, 3-9.
13. Ворновицкий И. Н., Савельев В. Г., Сидлин З. А. (1997) Реализация силикатного распада в сварочных шлаках. *Сварочное производство*, 5, 11-12.
14. Kita-Shinagawa, Shinagawa-Ku. (2015) *Essential Factors in Gas Shielded Metal Arc Welding*. Kobe Steel, Ltd.
15. Готальский Ю. Н., Стретович А. Д. (1975) Способ улучшения отделимости шлаковой корки при газозащитной сварке аустенитной проволокой. *Сварочное производство*, 9, 22-23.

References

1. Gotalsky, Yu.N. (1992) *Welding of pearlitic steels by austenitic materials*. Ed. by K.A. Yushchenko. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
2. Sudha, C., Thomac Paul, V., Terrance, A.L. et al. (2006) Microstructure and microchemistry of hard zone in dissimilar weldments of Cr-Mo steels. *Welding J.*, 4, 71-74.
3. Snisar, V.V., Lipodaev, V.N., Elagin, V.P. et al. (1990) Influence of parameters of gas shielding in argon arc welding with austenitic wire of dissimilar steels on formation of oxide film on surface of layers of multilayer weld. *Avtomatich. Svarka*, 12, 44-48 [in Russian].
4. Gotalsky, Yu.N., Stretovich, A.D. (1971) About slag inclusions in multilayer weld during shielded-gas welding with austenitic wire. *Ibid.*, 12, 39-43.
5. Elagin, V.P., Snisar, V.V., Savitsky, M.M. et al. (2001) Chemical and structural inhomogeneity in the zone of fusion of low-carbon steel with austenitic weld during shielded-gas welding. *The Paton Welding J.*, 4, 7-12.
6. Snisar, V.V., Lipodaev, V.N., Elagin, V.P. et al. (1991) Influence of nitrogen alloying of austenitic weld on development of structural inhomogeneity in the zone of fusion with pearlitic steel. *Avtomatich. Svarka*, 2, 10-14 [in Russian].
7. Elagin, V.P., Snisar, V.V., Lipodaev, V.N. (1993) Peculiarities of nitrogen-containing shielded gases arc welding with austenitic wires of dissimilar and pearlitic steels. *Ibid.*, 7, 12-16.
8. Pisarev, V.A., Zhiznyakov, S.N. (2016) Oxygen influence on the process of nitrogen-induced pore formation in consumable electrode arc welding. *The Paton Welding J.*, 7, 47-50.
9. Potapievsky, A.G., Saraev, Yu.A., Chinakhov, D.A. (2012) *Consumable electrode shielded-gas welding of steels. In: Engineering and technology of future: Monography*. Tomsk, Izd-vo TPU [in Russian].
10. Elagin, V.P., Snisar, V.V., Lipodaev, V.N. et al. (1995) Mechanized welding of 15Kh5M steel without preheating and heat treatment. *Avtomatich. Svarka*, 8, 19-23 [in Russian].
11. Elagin, V.P. (2014) Selection of shielding gas for mechanized arc welding of dissimilar steels. *The Paton Welding J.*, 6-7, 110-114.
12. Petrishchev, A.S., Grigoriev, S.M. (2012) Some physical-chemical principles of carbon-thermal reduction of refractory elements in system (Mo, W, Cr, V, Nb)-O-C. *Protsessy Litya*, 5, 3-9 [in Russian].
13. Vornovitsky, I.N., Saveliev, V.G., Sidlin, Z.A. (1997) Realization of silicate decomposition in welding slags. *Svarochn. Proizvodstvo*, 5, 11-12 [in Russian].
14. (2015) *Essential factors in gas shielded metal arc welding. Kita-Shinagawa, Shinagawa-Ku*, Kobe steel, Ltd.
15. Gotalsky, Yu.N., Stretovich, A.D. (1975) Method of improvement of slag crust detachability in gas electric welding with austenitic wire. *Svarochn. Proizvodstvo*, 9, 22-23 [in Russian].

В. П. Єлагін
ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

V.P. Elagin

E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03680, Kiev, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ВПЛИВ СКЛАДУ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ДРОТУ
НА ЯКІСТЬ ШВІВ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ
РІЗНОРІДНИХ СТАЛЕЙ ПРИ МЕХАНІЗОВАНОМУ
ЗВАРЮВАННІ В ЗАХИСНОМУ ГАЗІ

INFLUENCE OF WELDING WIRE COMPOSITION ON
WELD QUALITY IN WELDED JOINTS OF DISSIMILAR
STEELS IN SHIELDING GAS MECHANIZED WELDING

Показано, що застосування способу дугового механізованого зварювання в захисному газі різномірних аустенітних і перлітних сталей обмежено через утворення в аустенітному багатшаровому шві дефектів, таких як несплавлення і непровари, викликаних виникненням тугоплавкої оксидної кірки на поверхні наплавленого металу. Підвищити якість багатшарового шва можливо за рахунок забезпечення самовіддільності оксидної кірки від поверхні шва в процесі охолодження. Це досягається наявністю в складі зварювального дроту підвищеного вмісту таких елементів, як кремній, титан, цирконій та ін., які знижують в складі оксидної кірки кількість шпинелей на основі хрому, нікелю, молібдену та ін. і підвищують кількість крихкої склоподібної фази. Бібліогр. 15, табл. 3, рис. 1.

For welding of dissimilar joints, high-alloy welding materials are widely used. It is shown that the use of arc mechanized welding method in shielding gas of dissimilar austenitic and pearlitic steels is limited due to formation of defects in the austenitic multilayered weld, such as lacks of fusion and lacks of penetration caused by appearance of a refractory oxide crust on the deposited metal surface. It is possible to increase the weld quality by providing its self-separation from the metal surface in the process of cooling. This is achieved by presence of a high content of such elements as silicon, titanium, zirconium, etc. in the welding wire, which reduce the amount of spinels based on chromium, nickel, molybdenum and others in the composition of oxide crust and increase the amount of brittle glassy phase. 15 Ref., 3 Tabl., 1 Fig.

Ключові слова: склад зварювального дроту, дугове механізоване зварювання, захисний газ, різномірні сталі, оксидна кірка, самовіддільність кірки

Ключові слова: welding wire composition, mechanized arc welding, shielding gas, dissimilar steels, oxide crust, self-separation of crust

Поступила в редакцію 18.09.2017



18-я международная специализированная выставка

Беларусь, Минск, проспект Победителей, 20/2
Организатор: ЗАО «МинскЭкспо»

Направления экспозиций:

- ◆ материалы для сварки, наплавки и пайки
- ◆ оборудование и технологии сварки, резки, наплавки, пайки и термообработки
- ◆ источники питания и системы управления сварочным оборудованием
- ◆ оборудование для орбитальной сварки и обработки труб
- ◆ электронно-лучевая, лазерная, плазменная сварка и резка
- ◆ автоматизированные комплексные системы и агрегаты для сварки и резки
- ◆ автоматизация сварочных производственных и технологических процессов, программное обеспечение
- ◆ приборы для неразрушающего контроля сварных соединений
- ◆ научное информационное обеспечение сварки
- ◆ система подготовки, переподготовки и аттестации сварщиков
- ◆ охрана труда и экологическая безопасность в сварочном производстве
- ◆ сертификация сварочного оборудования