

ХЛАДОСТОЙКОСТЬ И СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ СЛОИСТОМУ РАЗРУШЕНИЮ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ 06ГБ-390

В. Д. ПОЗНЯКОВ, д-р техн. наук, **А. Ю. БАРВИНКО**, **Ю. П. БАРВИНКО**, кандидаты техн. наук, **А. Г. СИНЕОК**, **А. Н. ЯШНИК**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты исследований сопротивляемости стали 06ГБ-390 слоисто-вязким и слоисто-хрупким разрушениям, а также оценки ударной вязкости (KCV_{40}) металла швов и ЗТВ стыковых соединений данной стали (после сварки и после их термической обработки). Сварку соединений выполняли в свободном и жесткозакрепленном состоянии. Показано, что сталь 06ГБ-390 не склонна к слоисто-вязким и слоисто-хрупким разрушениям, а ударная вязкость металла швов и ЗТВ стыковых соединений во всех случаях практически не изменяется.

Ключевые слова: дуговая сварка, низколегированные стали, резервуары для хранения нефти, металл ЗТВ, ударная вязкость, термообработка сварного соединения, сварка в жестком контуре, сварочные деформации, слоистое разрушение

В последние годы в странах СНГ и Европы интенсивно ведется строительство резервуаров вместимостью 50...75 тыс. м³ в связи с колебаниями на мировых рынках цены на нефть. В большинстве случаев такие резервуары имеют основную и защитную стенку, что исключает необходимость устройства обвалования вокруг каждой емкости. Как правило, для изготовления нижнего пояса стенки резервуаров используют листовой прокат толщиной 24...30 мм сталей с $\sigma_T \geq 345...440$ МПа. В нормативных документах [1, 2] для нижних поясов стенки резервуаров большой вместимости рекомендуется применение сталей 09Г2С, 15Г2АНb, 10Г2ФБ, 18Г2АВ и других с содержанием углерода 0,10...0,20 % и серы до 0,035...0,040 %. Многолетний опыт строительства и эксплуатации резервуаров различной вместимости с использованием указанных сталей показывает, что при соблюдении требований этих нормативных документов надежность и работоспособность металлоконструкций находится на высоком уровне.

Вместе с тем в Украине в последние годы при изготовлении строительных сварных металлоконструкций начали активно внедрять новые высокопрочные низколегированные стали марок 06ГБ (класс прочности 390) и 06Г2Б (класс прочности 440). Отличительной чертой этих сталей являются низкие (практически в 2 и 7 раз меньше чем в

нормах [1, 2]) концентрации углерода и серы (табл. 1), что должно обеспечить им невысокую склонность к образованию холодных трещин и в то же время высокую ударную вязкость при отрицательных температурах. Это подтверждают данные работы [3], которые свидетельствуют о том, что в состоянии закалка + отпуск стали 06ГБ и 06Г2Б при толщине проката 8...50 мм имеют однородную по сечению листа структуру (рис. 1), высокие механические свойства, хладостойкость (табл. 2) и отличаются хорошей свариваемостью [4]. По всем показателям данные стали перспективны и для изготовления резервуаров большой емкости.

Однако при выборе сталей для изготовления резервуаров необходимо учитывать особенности работы отдельных конструктивных элементов стенки и днища. Как известно, в отличие от вертикальных и горизонтальных швов стенки коль-

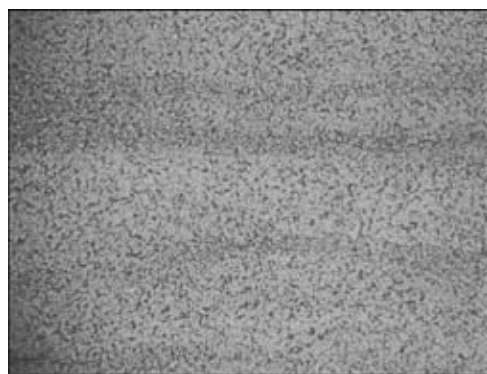


Рис. 1. Микроструктура ($\times 100$) листового проката стали 06ГБ толщиной 26 мм

Таблица 1. Химический состав сталей 06ГБ и 06Г2Б, мас. %

Марка стали	t, мм	C	Mn	Si	V	Nb	S	P	C _{экв}
06ГБ	26	0,06	1,27	0,20	0,037	0,014	0,004	0,007	0,29
06ГБ	30	0,07	1,27	0,27	0,036	0,013	0,005	0,006	0,31
06Г2Б	30	0,07	1,42	0,20	0,057	0,038	0,007	0,008	0,34



Таблица 2. Механические свойства сталей 06ГБ (390) и 06Г2Б (440)

Марка стали	t , мм	σ_{T1} , МПа	σ_{B1} , МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCV_{-40} , Дж/см ²	σ_T/σ_B
06ГБ	26	393	498	32,0	80,6	265	0,79
06ГБ	30	391	477	34,4	79,7	364	0,82
06Г2Б	30	467	554	33,5	80,4	303	0,84

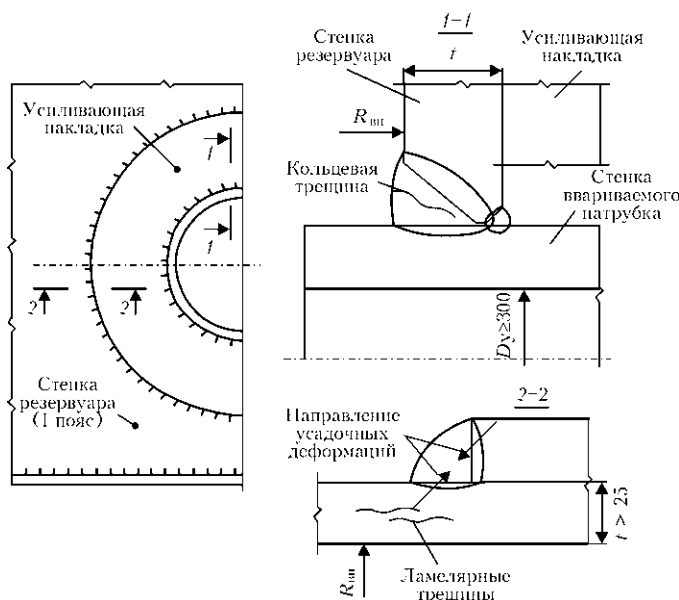


Рис. 2. Схема узла вваривания патрубка в нижний пояс стенки с указанием места возможного образования ламеллярных трещин

цевые односторонние швы, соединяющие патрубки со стенкой, выполняются и в условиях жесткого контура (рис. 2, сечение 1-1). При толщинах стенки $t \geq 25$ мм объем наплавленного металла достаточно большой и это вызывает значительную поперечную усадку и формирование высоких остаточных напряжений, что, вполне очевидно, может привести к образованию холодных трещин в металле шва. Кроме того, поскольку контроль кольцевых швов осуществляется визуально-оптическим способом или методом цветной дефектоскопии, это не исключает наличия в сварных соединениях острых концентраторов напряжений, что может привести к снижению их сопротивляемости хрупкому и вязкому разрушениям. О воз-

можности хрупкого разрушения при наличии высоких остаточных напряжений и низких температур свидетельствуют данные работы [5]. В работе [6] также указывается, что увеличение уровня остаточных напряжений и образование неоднородной структуры в сварном соединении приводит к снижению ударной вязкости на 20...25 %, причем, как следует из работ [7, 8], пластической деформации принадлежит решающая роль в возможном зарождении не только хрупкого, но и вязкого разрушения.

Несколько иное напряженное состояние в сварном соединении усиливающей накладки со стенкой (рис. 2, сечение 2-2) и в узле приварки утолщенного днища придонного люка к стенке (рис. 3). Здесь сварочные деформации действуют в направлении толщины стенки и днища, что инициирует образование в них ламеллярного растрескивания.

Проявление расслоения характерно для листового проката при $t \geq 20$ мм. Основным фактором, влияющим на образование слоистых разрушений, является наличие сульфидных или оксидных включений. Они в процессе прокатки листа вытягиваются и образуют строчечную или слоистую структуру [9, 10]. В работе [10] показано, что качество стали в Z направлении хорошо отражают стандартные характеристики пластичности ψ_Z и ударной вязкости KCV . Чтобы исключить появление расслоения в сварных конструкциях, авторы работы [11] рекомендуют понижать содержание серы в стали до $S \leq 0,01$ %, а в работе [9] стали с содержанием $S \leq 0,007$ % и $\psi_Z \geq 25$ % предлагается относить к высокоустойчивым, а при $S > 0,020$ % и $\psi_Z \leq 8$ % — к низкоустойчивым по отношению к образованию ламеллярных трещин.

В этой связи необходимо оценить стойкость листового проката сталей типа 06ГБ и 06Г2Б к образованию слоистых трещин, сопротивляемость сварных соединений к слоисто-хрупкому разрушению, а также проверить изменится ли их хладостойкость при сварке в жестком контуре. Исследования в этом направлении стало целью настоящей работы.

В качестве объекта исследований были выбраны сталь 06ГБ толщиной 20, 26 и 30 мм и стыковые соединения из стали толщиной 26 мм.

Сопротивляемость сталей слоистому разрушению оценивали в соответствии с ГОСТ 28870-90 по результатам испытания трех образцов, изготовленных из сварных соединений, которые выполнены ручной дуговой сваркой электродами ОК 53.70. Конструктивные элементы свариваемых заготовок и форма попе-

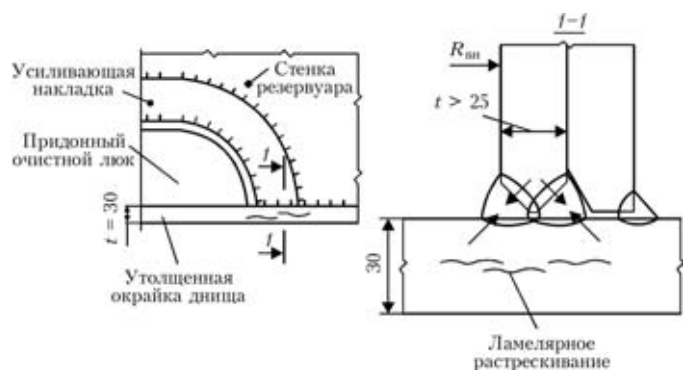


Рис. 3. Схема образования ламеллярных трещин в местах соединения стенки с утолщенной окрайкой придонного очистного люка

Таблица 3. Результаты испытаний образцов стали 06ГБ на растяжение в Z направлении

t , мм	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ , %
20	$\frac{428; 437; 444}{436}$	$\frac{510; 513; 510}{511}$	$\frac{45,1; 45,9; 44,4}{45,0}$	$\frac{81,1; 78,8; 81,2}{79,6}$
26	$\frac{388; 388; 385}{387,2}$	$\frac{506; 506; 500}{504}$	$\frac{46,6; 48,1; 48,9}{47,9}$	$\frac{81,2; 81,1; 81,2}{81,1}$
30	$\frac{380; 358; 373}{370}$	$\frac{489; 482; 484}{485}$	$\frac{35,3; 36,8; 37,6}{36,6}$	$\frac{71,6; 69,7; 67,9}{69,7}$

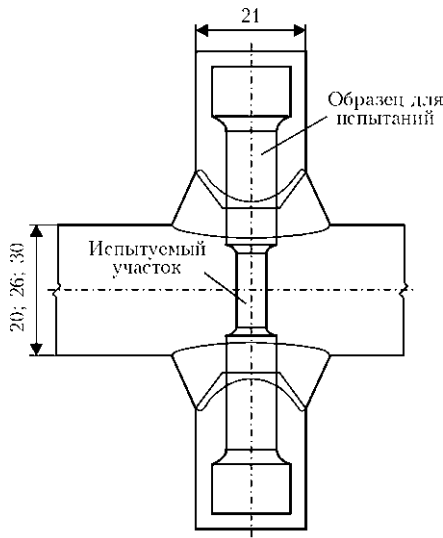


Рис. 4. Схема вырезки образцов из сварных соединений, выполненных в соответствии с ГОСТ 28870-90

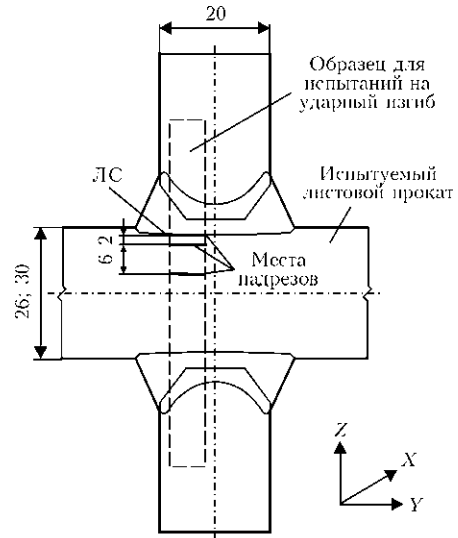


Рис. 5. Схема вырезки образцов из крестообразных сварных соединений с указанием мест нанесения надреза

речного сечения соединения и выполненных швов соответствовали требованиям, предъявляемым к соединениям типа Т8 по ГОСТ 5264-80. Начальный и конечный участки сварного соединения длиной не менее 30 мм удалялись. Из оставшейся части сварных соединений изготавливали (способом холодной механической обработки) образцы для испытаний в соответствии с ГОСТ 1497-84. Схема вырезки образцов показана на рис. 4. Испытание образцов проводили при температуре +20 °С. В процессе испытания определяли σ_T , σ_B , δ_5 и ψ_Z . Результаты испытаний представлены в табл. 3.

Сравнительная оценка механических свойств стали 06ГБ толщиной 26 и 30 мм вдоль (см. табл. 2) и по толщине проката свидетельствует, что данная сталь не имеет анизотропии свойств. По значению относительного сужения ψ_Z сталь может быть отнесена к высшей группе стойкости к слоистым разрушениям Z 35.

Стойкость сварных соединений стали 06ГБ толщиной 26 и 30 мм к слоисто-хрупким трещинам определяли по результатам испытаний на ударный изгиб образцов (тип IX по ГОСТ 9454-78), изготовленных из крестообразных сварных соединений, аналогичных тем, которые использовали для оценки склонности стали к слоистому разрушению. Из сварных соединений толщиной

30 мм образцы изготавливали только в состоянии после сварки, а из соединений толщиной 26 мм также и после их термической обработки (отпуск при температуре 620 °С в течение 2 ч). Схема вырезки образцов представлена на рис. 5. Надрез на образцах выполняли по линии сплавления (ЛС), по металлу ЗТВ на расстоянии 2 мм от ЛС и по основному металлу на расстоянии 8 мм от ЛС. Испытания образцов проводили при температуре -40 °С.

Результаты испытаний образцов на ударный изгиб (табл. 4) свидетельствуют о том, что отпуск существенного влияния на значения ударной вязкости как основного металла, так и участков ЛС и ЗТВ сварных соединений не оказывает. Хладостойкость металла ЗТВ сварных соединений стали 06ГБ находится на уровне основного металла ($KCV_{-40} \geq 220$ Дж/см²) и существенно превышает требования, приведенные в нормативных документах на сталь ($KV_{-40} \geq 98$ Дж, что соответствует $KCV_{-40} \geq 123$ Дж/см²) [12]. Во всех случаях наблюдалось снижение ударной вязкости по отношению к основному металлу на ЛС сварных соединений. В соединениях из стали толщиной 26 мм в состоянии после сварки KCV_{-40} находится в пределах 42...305 Дж/см² (среднее значение по результатам испытания семи образцов 130,8 Дж/см²), а после высокотемпературного от-



Таблица 4. Результаты испытаний на ударный изгиб образцов, изготовленных из сварных соединений стали 06ГБ в Z направлении

t, мм	Место надреза	KCV ₋₄₀ , Дж/см ²	
		после сварки	после термической обработки
26	ЛС	163; 253; 305; 98; 77; 42	87; 197; 101
	По металлу ЗТВ (ЛС+2 мм)	332; 294; 325; 345; 346; 347	348; 348; 347
	По основному металлу (ЛС+8 мм)	321; 333; 328	347; 345; 345
30	ЛС	181; 281; 240; 85	—
	По металлу ЗТВ (ЛС+2 мм)	334; 335; 326; 223	—

Таблица 5. Результаты испытаний на ударный изгиб образцов, изготовленных из стыковых соединений стали 06ГБ толщиной 26 мм

Условие сварки	Термообработка	KCV ₋₄₀ , Дж/см ²	
		ЛС	ось металла шва
В свободном состоянии	Нет	342; 371; 338 350	282; 246; 209 246
	Отпуск	339; 340; 341 340	290; 240; 220 250
В жесткозакрепленном состоянии	Нет	339; 342; 340 340	244; 251; 200 232
	Отпуск	248; 341; 343 311	246; 246; 172 221

пуска изменяется от 87 до 197 Дж/см² (среднее значение по результатам испытания трех образцов 128 Дж/см²). Практически на 35 % ниже, чем в основном металле, значения ударной вязкости получены и при испытании образцов с надрезом по ЛС, изготовленных из сварных соединений стали толщиной 30 мм. Такое снижение можно объяснить нарушением однородности химического состава и структуры металла в данном участке сварного соединения. В то же время следует отметить, что даже в состоянии после сварки значения ударной вязкости стыковых соединений стали 06ГБ значительно превышают уровень требований, предъявляемых к металлопрокату, рекомендуемому для изготовления резервуаров большой вместимости [2].

Для экспериментальной проверки влияния на сопротивляемость образованию холодных трещин и ударную вязкость металла швов и ЗТВ сварных соединений стали 06ГБ жесткости их закрепления были выполнены специальные исследования. В соответствии с разработанной технологией с применением электродов ОК 53.70 диаметром 4 мм и предварительного подогрева до температуры

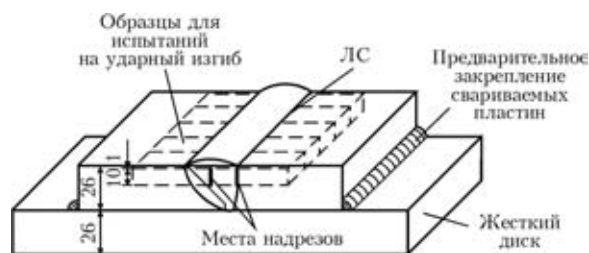


Рис. 6. Схема вырезки образцов из стыковых сварных соединений, выполненных в жестком контуре, с указанием мест нанесения надреза

70 °С было изготовлено четыре стыковых соединения (С8 по ГОСТ 5264–80) из пластин толщиной 26 мм. Два из них были сварены в свободном состоянии (соединения № 1 и 2), а еще два (соединения № 3 и 4) — в жесткозакрепленном (рис. 6). Как свидетельствуют данные работы [13], значение остаточных напряжений в металле ЗТВ таких соединений изменяется от 0,5 до 1,0 предела текучести основного металла.

После сварки соединения № 2 и 4 были подвергнуты высокотемпературному отпуску при температуре 620 °С в течение 2 ч. Затем из всех сварных соединений были изготовлены макрошлифы для контроля над наличием/отсутствием в сварных соединениях холодных трещин и образцы (тип IX по ГОСТ 9454–78) для испытания на ударный изгиб. Одни образцы имели надрез по ЛС, а другие — по металлу шва. Результаты испытаний образцов на ударный изгиб, проведенные при температуре –40 °С, приведены в табл. 5.

Как показал анализ макрошлифов, трещины во всех сварных соединениях отсутствуют, что свидетельствует о высокой сопротивляемости сварных соединений стали 06ГБ, выполненных по данной технологии, образованию холодных трещин. Независимо от жесткости закрепления ударная вязкость металла швов и участка перегрева металла ЗТВ указанных сварных соединений в несколько раз выше требований, предъявляемых к металлопрокату резервуаров для нефти и нефтепродуктов как в состоянии после сварки, так и после высокотемпературного отпуска [14]. Высокотемпературный отпуск существенного влияния на хладостойкость сварных соединений стали 06ГБ не оказывает.

Выводы

1. Листовой прокат стали 06ГБ толщиной 20, 26 и 30 мм имеет высокую стойкость к слоистому разрушению. По значению относительного сужения он может быть отнесен к высшей группе качества Z 35.

2. Значения KCV₋₄₀ основного металла и металла ЗТВ, полученные по результатам стандартных испытаний образцов, вырезанных из сварных соединений стали 06ГБ в поперечном по отношению к оси шва и в Z направлении, практи-

чески идентичны, что свидетельствует об их высокой сопротивляемости слоисто-хрупкому разрушению.

3. Сварные соединения стали 06ГБ, выполненные ручной дуговой сваркой электродами ОК 53.70 при подогреве до температуры 70 °С, отличаются высокой сопротивляемостью образованию холодных трещин.

4. Жесткость закрепления и высокотемпературный отпуск существенного влияния на хладостойкость металла швов и участка перегрева металла ЗТВ сварных соединений стали 06ГБ, выполненных электродами ОК 53.70, не оказывает. При температуре испытаний – 40 °С их ударная вязкость в несколько раз превышает требования, предъявляемые к металлопрокату сварных резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов. Полученные результаты испытаний позволяют заключить, что с накоплением достаточного опыта эксплуатации резервуаров с применением рассматриваемых сталей, могут быть пересмотрены требования относительно необходимости выполнения термообработки отдельных сварных соединений.

1. *API Standard 650*. Welded steel tanks for oil storage. — 9 ed. — Nov. 1998.
2. *ПБ 03-605-03*. Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. — М., 2003.

The paper presents the results of investigation of resistance of 06GB-390 steel to lamellar-tough and lamellar-brittle fractures, as well as assessment of impact toughness (KCV_{40}) of weld metal and HAZ of butt joints of this steel (as-welded and after their heat treatment). Joints were welded in an unrestrained and rigidly restrained state. It is shown that 06GB-390 steel is not prone to lamellar-tough and lamellar-brittle fractures, while impact toughness of the metal of weld and HAZ of butt joints does not change practically in any of the cases.

3. *Ковтуненко В. А., Герасименко А. М., Гоцуляк А. А.* Выбор стали для ответственных сварных конструкций // Автомат. сварка. — 2006. — № 11. — С. 32–37.
4. *Экономнолегированные высокопрочные стали для сварных конструкций* / Л. И. Миходуй, В. И. Кирьян, В. Д. Позняков и др. // Там же. — 2003. — № 5. — С. 36–40.
5. *Kennedy H. E.* Some causes of brittle failure in welded mild steel structures // *Welding J.* — 1945. — № 11. — P. 588. — 594 с.
6. *Maccosaire C.* Repair welding: how to set up a shop // *Ibid.* — 1991. — № 8. — P. 54–56.
7. *Степанов А. В.* Основы практической прочности кристаллов. — М.: Наука, 1974. — 132 с.
8. *Берштейн М. Л., Займовский В. А.* Структура и механические свойства металлов. — М.: Металлургия, 1970. — 427 с.
9. *Гривняк И.* Свариваемость сталей — современное состояние и прогноз развития // Научн. докл. на XI Заседании координационного центра стран-членов СЭВ. — Братислава, май 1982.
10. *Гиренко В. С., Бернацкий А. В.* Анизотропия свойств металлопроката и работоспособность сварных конструкций // Автомат. сварка. — 1985. — № 12. — С. 13–18.
11. *Newly published specifications for lamellar tearing in Japan.* (Intern. Inst. of Welding; Doc. IIWIX-1255–82).
12. *TU У 27.1-05416923-085:2006.* Прокат листовой, свариваемый из качественной стали классов прочности 355–590 для машиностроения. — Введ. 04.02.2007.
13. *Риск образования холодных трещин при сварке конструкционных высокопрочных сталей* / В. И. Махненко, В. Д. Позняков, Е. А. Великоиваненко и др. // Автомат. сварка. — 2009. — № 12. — С. 5–10.
14. *ГОСТ 31385–2008.* Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. — Введ. в 2009.

Поступила в редакцию 02.11.2011

Научно-техническая конференция СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕТАЛЛУРГИИ, ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ И НАПЛАВКИ СТАЛЕЙ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

*К 100-летию со дня рождения засл. деятеля науки и техники,
проф. Д. М. Рабкина и д-ра техн. наук, проф. И. И. Фрумина*

25-26 октября 2012

г. Киев ИЭС им. Е. О. Патона

Организаторы конференции

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
Общество сварщиков Украины

Тематика конференции

- исследование физико-металлургических процессов при сварке и наплавке
- современные технологические процессы сварки и наплавки
- новые высокоэффективные сварочные и наплавочные материалы
- развитие способов нанесения покрытий и модифицирования поверхностей
- изготовление и ремонт сварных конструкций с применением современных технологий

Желающие принять участие в конференции должны направлять в адрес Оргкомитета до 1 июня 2012 г. предложения по теме докладов и составу участников. Условия участия в работе конференции можно уточнить в оргкомитете.

Контакты: (044) 200 54 06; 200 63 57; 200 24 66; 200 82 77
E-mail: office@paton.kiev.ua; tzu@e-mail.ua