



# О ТРЕБОВАНИЯХ К УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ, ВЫПОЛНЯЕМЫХ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКОЙ ОПЛАВЛЕНИЕМ

**В.И. КИРЬЯН, С.И. КУЧУК-ЯЦЕНКО, Б.И. КАЗЫМОВ**

ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Для обеспечения работоспособности соединений трубопроводов, выполняемых контактной стыковой сваркой оплавлением (КСО), наряду с условием прочности предъявляется требование к ударной вязкости *KCV*. Ее уровень установлен в соответствии с требованиями к соединениям, выполненным дуговыми способами сварки, для которых характерна возможность появления в них трещиноподобных дефектов. Отсутствие даже предпосылок к образованию трещин в соединениях, выполненных КСО, позволяет инициировать пересмотр требований к ударной вязкости. В качестве нормативного уровня предлагается величина *KCV*, которая надежно обеспечивается при оптимальном режиме выполнения КСО. Достаточность такого уровня *KCV* подтверждается надежной многолетней практикой эксплуатации трубопроводов различного назначения без разрушений, включая магистральные большого диаметра (до 1420 мм). Для данного значения *KCV* при рабочих окружных напряжениях в трубопроводе и осевых, равных их половине, рассчитаны критические размеры гипотетических сквозных продольной и окружной трещин. Их достаточные размеры убеждают в правомерности такого подхода. Библиогр. 20, рис. 3.

*Ключевые слова:* контактная стыковая сварка оплавлением, типичные дефекты КСО, ударная вязкость, требования, критические размеры гипотетических трещин

Главным условием работоспособности сварных соединений является обеспечение их прочности, что подтверждается результатами испытаний на растяжение стандартных гладких (без концентратора напряжений) образцов при достижении разрушающим напряжением  $\sigma_p$  временного сопротивления  $\sigma_v$ :

$$\sigma_p = \sigma_v. \quad (1)$$

Кроме условия (1), необходимо еще гарантировать определенный запас вязкости металла для предотвращения разрушений, связанных с возможным образованием в сварных соединениях дефектов и повреждений. Требуемая вязкость разрушения металла зависит от типа и размера дефекта, при этом принципиальное значение имеет острота концентратора. Если дефект близок к трещиноподобному, то тогда для исключения разрушений наиболее перспективно использовать критерии механики разрушения, которые отражают способность металла с трещиной пластически деформироваться без инициирования разрушения. Таким образом, механика разрушения позволяет обоснованно оценивать требуемый уровень вязкости разрушения, обеспечивающий работоспособность сварных соединений с трещиноподобными дефектами конкретного размера.

В настоящее время для установления требований к вязкости разрушения используют ударную вязкость *KCV*, определяемую на стандартных образцах с острым надрезом, радиус вершины кото-

рого равен 0,25 мм. Такая методика получила широкое практическое применение благодаря тому, что была установлена качественная связь между величиной *KCV* и характером разрушения судостроительной стали (иницирование трещины, ее развитие и остановка) [1].

Позже в бывшем СССР были введены требования к трубным сталям по показателям *KCV*, что привело к существенному сокращению разрушений трубопроводов, изготавливаемых из лучшей в то время низколегированной стали 17Г1С и ее модификаций [2]. При этом для обеспечения необходимого уровня ударной вязкости металла труб большого диаметра (> 620 мм) потребовался переход на новую технологию изготовления металла — контролируемую прокатку, которая получила значительное развитие за рубежом [3, 4]. И, наконец, с прогрессом механики разрушения [5, 6] ударная вязкость получила некоторое теоретическое обоснование в части формирования требований к стали и сварным соединениям по показателю *KCV* с целью предотвращения разрушений, связанных с трещиноподобными дефектами.

Из приведенных примеров использования ударной вязкости на практике становится очевидным, что приемлемую оценку вязкости разрушения металла, пригодную для прогнозирования работоспособности сварных соединений, она дает при условии соответствующего обоснования (теоретического, экспериментального или практического опыта эксплуатации). Однако се-



годня ударная вязкость настолько вошла в практику, что ее стали использовать, не корректируя показатели  $KCV$  в зависимости от применяемой технологии сварки труб и типа возникающих дефектов. При этом используют значения  $KCV$ , установленные для электродуговых способов сварки, для которых высока вероятность образования трещиноподобных дефектов. Это относится и к высокопроизводительной автоматической контактной стыковой сварке оплавлением (КСО). В то же время, как уже отмечалось [7, 8], в соединениях, выполненных КСО, вследствие их формирования без расплавленного металла, вытесняемого из зоны сплавления при осадке, нет физических предпосылок образования трещиноподобных дефектов. Это подтверждают неразрушающие методы контроля сварных соединений (рентгеновский, ультразвуковой) [9, 10], позволяющие обнаруживать трещины с большой вероятностью, а также всесторонние исследования качества соединений, выполненных КСО, и надежная многолетняя практика эксплуатации большого числа различных трубопроводов, в том числе и большого диаметра (1420 мм) [11]. Это является очень важным и принципиальным моментом, который позволяет ставить вопрос о пересмотре требований к ударной вязкости соединений, выполненных КСО. Тем более, что сегодня используют требования для соединений, выполняемых дуговыми способами сварки, для которых трещины являются достаточ-

но вероятным дефектом. Эти требования без обоснования перенесены на соединения, выполненные КСО.

Типичными «дефектами» в зоне соединения (ЗС) при КСО на оптимальных режимах, которые устанавливали экспериментально по условиям обеспечения прочности соединений и отсутствия недопустимых дефектов (снижающих прочность более чем на 5%), являются участки площадью около 30 мм<sup>2</sup> с повышенным содержанием неметаллических включений, аналогичные по составу неметаллическим включениям подобных зон в металле труб, являющиеся по сути его наследием (рис. 1) [12]. Они так и классифицируются — локальная структурная неоднородность (ЛСН).

Цель настоящей работы — исследование влияния ЛСН в сварных соединениях труб на их механические свойства и выбор обоснованного принципа формирования требований к ударной вязкости соединений, выполненных КСО, которые не содержат трещин.

Оценку механических свойств сварных соединений проводили на большом количестве натуральных труб диаметром 920...1420 мм с толщиной стенки 15,7...27 мм класса прочности Х60-Х70, выполненных на оптимальных режимах в условиях промышленного производства при строительстве магистральных трубопроводов, а также на испытательном участке ИЭС им. Е.О. Патона. Для этого в лабораторных условиях сваривали секции и пластины из малоуглеродистых низколегированных трубных сталей современного производства толщиной до 27 мм различных классов прочности, включая Х80.

Механические испытания на разрыв и ударный изгиб, которым было подвергнуто более 60 стыков различных труб в состоянии после сварки, проводили на стандартных образцах сварных соединений в соответствии с требованиями API 1104, (США) [13] и СП 105-34-96 (РФ) [14].

Все образцы, испытанные на разрыв, разрушались по основному металлу (рис. 2). Показатели их прочности, несмотря на большую вероятность присутствия в ЗС отдельных образцов участков ЛСН, удовлетворяли условию прочности (1). Это было подтверждено и результатами испытаний крупномасштабных секторов протяженностью 300...500 мм вдоль сварного соединения, вырезанных из труб большого диаметра со специально полученными участками, подобными ЛСН, в ЗС площадью 10...70 мм<sup>2</sup> [15]. Испытание крупномасштабных секторов из труб с такими дефектами проводили как при комнатной температуре, так и при -60 °С.

Установлено, что результаты испытаний на прочность не зависят от структурной неоднород-

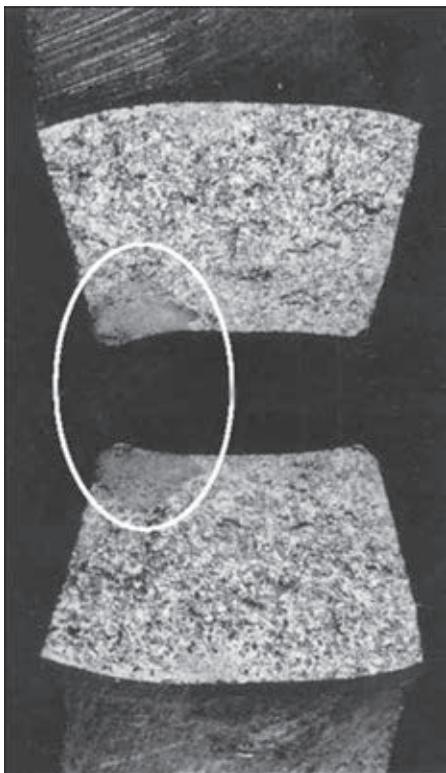


Рис. 1. Поверхность излома образца соединения, выполненного КСО, с ЛСН (отмечено овалом), испытанного на ударный изгиб

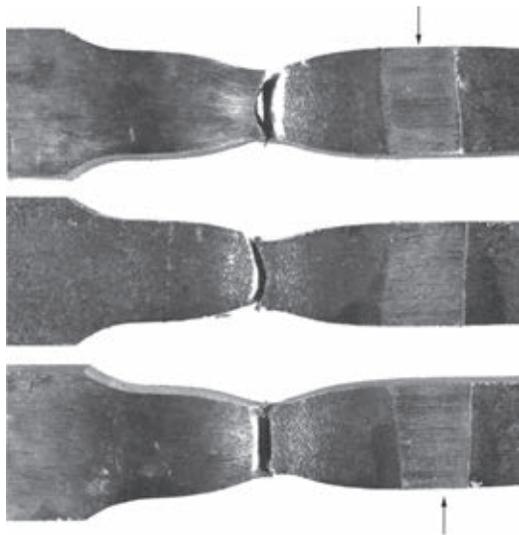


Рис. 2. Стандартные образцы, испытанные на растяжение. Все разрушения произошли по основному металлу. Стрелками показана ЗС

ности металла свариваемых труб, в результате которой в соединениях появляются участки ЛСН. Например, соединения труб с четко выраженной полосчатостью металла, не менее 5 баллов (по ГОСТ 5640–68), т. е. соединения с наибольшей вероятностью образования в ЗС участков ЛСН показали результаты, удовлетворяющие условию (1) так же, как и соединения труб, металл которых имел меньшую полосчатость (3–4 балла).

Отсутствие влияния ЛСН на прочность соединений, выполненных КСО, может быть обусловлено следующим. ЛСН не создает локальных критических напряжений, которые могли бы снизить разрушающие напряжения [16]. Кроме того, узкая ЗС при КСО пластична, имеет пониженную прочность по сравнению с окружающим металлом, однако она расположена между массивными участками термоупрочненного металла. При нагружении за счет контактного упрочнения механические свойства ЗС повышаются до уровня близлежащих участков, что способствует ограничению роста деформаций и проявления ЛСН. Следует также обратить внимание на то, что вероятность проявления участка ЛСН в сварном соединении зависит не только от свойств этого отдельного участка, но и от близлежащих [17]. Это может быть отражено двукратным интегралом от функции напряжений  $\sigma(x, y)$  двух переменных, распространенным на область  $S$  ЗС с ЛСН:

$$\iint_S \sigma(x, y) ds, \quad (2)$$

где  $ds$  — элемент площади;  $S$  — область интегрирования. Он представляет собой усредненное суммарное усилие  $F$  в ЗС по области интегрирования

$$F = \sum_{n=1}^N \sigma(x_i, y_i) ds_i. \quad (3)$$

Для удобства практического применения формулы (2) можно представить в декартовых координатах

$$\iint_S \sigma(x, y) dx dy, \quad (4)$$

где  $dx dy$  — элемент площади.

Зависимость (4) можно расписать в виде повторных интегралов:

$$\int_a^b dx \int_c^d \sigma(x, y) dy, \quad (5)$$

где  $a-b$  и  $c-d$  — границы интегрирования соответственно вдоль и поперек ЗС.

Приведенные данные и ранее выполненные исследования [8, 18] показывают, что предъявляемые сегодня требования к ударной вязкости соединений, полученных КСО, необоснованно завышены и нуждаются в корректировке. Поскольку в этих сварных соединениях отсутствуют трещины, то за основу требований к ним следует принять уровень ударной вязкости, который стабильно обеспечивается при КСО, выполняемой на оптимальном режиме. Среднее значение  $KCV$  соединений, выполненных КСО, которые не подвергаются термообработке, равно 20 Дж/см<sup>2</sup> при температуре испытаний +20 °С.

Для доказательства достаточности такого уровня  $KCV$  оценим критические размеры гипотетических трещин (продольной и окружной) в трубопроводе диаметром 1420×15,7 мм. Для этого используем установленную в работе [6] обобщенную корреляционную зависимость между ударной вязкостью  $KCV$  и критическим значением коэффициента интенсивности напряжений  $K_{Ic}$ . Эта зависимость, основанная на результатах испытаний большого количества сварных соединений и сталей различных классов с пределом текучести 200...1700 МПа, имеет вид

$$K_{Ic} = \sqrt{\frac{\pi E KCV}{20 \cdot 10^2 (1 - \nu^2)}}, \quad (6)$$

где  $E$  — модуль упругости, МПа;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $KCV$  — ударная вязкость, определяемая на стандартном образце с острым надрезом (Шарпи), Дж/см<sup>2</sup>.

Результаты вычислений  $K_{Ic}$  (формула (6)) по значениям  $KCV$  для трубных сталей и их сварных соединений приведены на рис. 3.

Формулу для определения критического размера гипотетической сквозной продольной трещины длиной  $2l$  в замкнутой цилиндрической оболочке в зависимости от вязкости разрушения металла  $K_{Ic}$ , окружного напряжения  $\sigma_\theta$ , определяемого внутренним давлением  $P$ , радиусом трубы  $R$  и толщиной ее стенки  $t$  ( $\sigma_\theta = PR/t$ ), можно записывать так [19]:

$$K_{Ic} = \sigma_\theta \sqrt{\pi l} f_{c.n}(\xi). \quad (7)$$

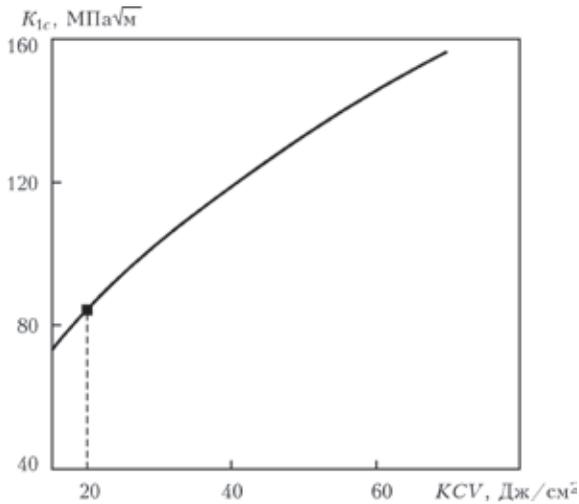


Рис. 3. Зависимость критического значения коэффициента интенсивности напряжений  $K_{1c}$  от ударной вязкости  $KCV$  ( $E = 210000$  МПа,  $\nu = 0,28$ )

Функция  $f_{c.n}(\xi)$  построена в виде ряда по степеням параметра  $\xi = l^2/Rt$  на основании численного решения упругой задачи для трубы со сквозной продольной трещиной согласно общей моментной теории и представлена по отдельным участкам с погрешностью не более 1 % в широком диапазоне изменения параметра  $\xi$  (0...2812,5). При  $0 < \xi \leq 4,5$

$$f_{c.n}(\xi) = 1,005672 + 0,646787\xi - 0,124547\xi^2 + 0,12521 \cdot 10^{-1}\xi^3,$$

а при  $4,5 \leq \xi \leq 55,125$

$$f_{c.n}(\xi) = 1,669865 + 0,208892\xi - 0,383589 \cdot 10^{-2}\xi^2 + 0,31666 \cdot 10^{-4}\xi^3.$$

Согласно формуле (7) критический размер гипотетической сквозной продольной трещины в трубопроводе диаметром 1420 мм с толщиной стенки 15,7 мм при окружном напряжении в стенке трубы, определяемым внутренним давлением,  $\sigma_\theta = 316$  МПа, что составляет  $0,7\sigma_T$ , и вязкости разрушения  $K_{1c} = 84,6$  МПа $\sqrt{м}$ , установленной в соответствии с  $KCV = 20$  Дж/см<sup>2</sup> (формула (6)) (рис. 3), равен 42,84 мм.

В подземных трубопроводах наряду с главным окружным напряжением  $\sigma_\theta$  возникают и осевые  $\sigma_z$ , которые не поддаются точному расчету. Они могут быть как растягивающими, так и сжимающими [2, 20]. В этом случае большое значение имеют температурные условия замыкания магистрального трубопровода (сварка последнего кольцевого стыка). Кроме того, существенное влияние на осевые напряжения  $\sigma_z$  оказывают свойства грунта, определяющие степень заземления трубопровода, а также наличие пригрузов, компенсаторов и аппаратов воздушного охлаждения. Поэтому для оценки критического размера гипотетической сквозной окружной трещины в кольцевом стыке, выполненном КСО, полагали  $\sigma_z = 0,5\sigma_\theta$ .

Предельное состояние трубопровода с такой трещиной выражается [19]

$$K_{1c} = \sigma_z \sqrt{\pi l} f_{c.o}(\xi). \quad (8)$$

Функцию  $f_{c.o}(\xi)$  численно определяли аналогично  $f_{c.n}(\xi)$  (7). Так, при  $0 < \xi \leq 7,71$

$$f_{c.o}(\xi) = 1,00171 + 1,63983 \cdot 10^{-1}\xi - 1,92196 \cdot 10^{-2}\xi^2 + 1,27015 \cdot 10^{-3}\xi^3,$$

а при  $7,71 \leq \xi < 25$

$$f_{c.o}(\xi) = 1,38491 + 4,33069 \cdot 10^{-2}\xi - 2,32074 \cdot 10^{-4}\xi^2 + 1,47502 \cdot 10^{-6}\xi^3.$$

Для тех же параметров трубопровода (диаметра, толщины стенки, коэффициента интенсивности напряжений), для которых рассчитывали критический размер продольной трещины при осевом напряжении  $\sigma_z = 158$  МПа, критический размер гипотетической сквозной окружной трещины в кольцевом стыке, выполненном КСО, составляет 155,1 мм.

Такие установленные критические размеры гипотетических сквозных продольной и окружной трещин объясняют наблюдаемую на протяжении многих лет надежную (без разрушений) эксплуатацию магистральных газопроводов, выполненных высокопроизводительной технологией КСО.

## Выводы

1. Для предотвращения разрушений, связанных с возможным образованием в сварных соединениях технологических дефектов, широкое распространение получали показатели ударной вязкости ( $KCV$ ), устанавливаемые на стандартных образцах с острым надрезом.

2. Приемлемую оценку вязкости разрушения, пригодную для прогнозирования работоспособности сварных соединений,  $KCV$  дает только при условии соответствующего обоснования (теоретического, экспериментального, практического опыта эксплуатации).

3. К соединениям, выполняемым КСО, при формировании которых не возникают даже физические предпосылки образования трещин (расплавленный металл вытесняется из зоны соединения при осадке), сегодня также предъявляется требование обеспечивать ударную вязкость на уровне сварных швов, выполненных дуговыми способами, для которых свойственна вероятность образования трещин.

4. Для соединений, выполненных КСО, в качестве нормативного значения  $KCV$  наиболее целесообразно использовать величину, которая надежно обеспечивается при оптимальном режиме сварки. В трубопроводах большого диаметра она



составляет 20 Дж/см<sup>2</sup> при температуре испытаний +20 °С.

5. Как показали расчеты, такой уровень ударной вязкости обеспечивает достаточные для «обнаружения» критические размеры гипотетических сквозных продольной и окружной трещин в трубопроводе диаметром 1420 мм при рабочем окружном напряжении  $\sigma_{\theta} = 0,7\sigma_T$  и осевом  $\sigma_z = 0,5\sigma_{\theta}$ . Длина продольной трещины составляет 42,84, а окружной — 155,1 мм.

6. Результаты расчета позволяют обоснованно изменить отношение к выбору значения KCV для соединений, выполненных KCO, что будет содействовать более широкому использованию передовой высокопроизводительной технологии.

1. Николс Р.У., Коуэн А. Выбор материала и вопросы проектирования крупных стальных конструкций с учетом сопротивления материала хрупкому разрушению // Разрушение: В 7 т. / Под ред. Г. Либовица; пер. с англ. – Т.5: Расчет конструкций на хрупкую прочность. – М.: Машиностроение, 1977. – С. 210–258.
2. Анучкин М.П., Горицкий В.Н., Мирошниченко Б.И. Трубы для магистральных трубопроводов. – М.: Недра, 1986. – 230 с.
3. Полянский Р.П., Пастернак В.И. Трубы для нефтяной и газовой промышленности за рубежом. – М.: Недра, 1979. – 215 с.
4. Сталь для газопроводных труб и фитингов: Труды конф. / Пер. с англ. под ред. А.В. Рудченко. – М.: Металлургия, 1985. – 480 с.
5. ГОСТ 25.506–85. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – Введ. 01.01.86.
6. Гиренко В.С., Дядин В.П. Зависимость между ударной вязкостью и критериями механики разрушения  $\delta_{1c}$ ,  $K_{1c}$  конструкционных сталей и их сварных соединений // Автомат. сварка. – 1985. – № 9. – С. 13–20.

7. Кучук-Яценко С.И. Контактная стыковая сварка оплавлением. – Киев: Наук. думка, 1992. – 236 с.
8. К методологии контроля соответствия назначению сварных соединений, полученных контактной сваркой оплавлением / С.И. Кучук-Яценко, В.И. Кирьян, Б.И. Казымов, В.И. Хоменко // Автомат. сварка. – 2006. – № 10. – С. 3–9.
9. Шербинский В.Г., Алехин Н.П. Ультразвуковой контроль сварных соединений. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 495 с.
10. ГОСТ 7512–82. Контроль неразрушающий, сварные соединения, радиографический метод. – Введ. 01.01.98.
11. Кучук-Яценко С.И., Казымов Б.И., Радько В.П. Комплексный контроль соединений, выполненных автоматической стыковой сваркой оплавлением // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 1996. – № 4. – С. 46–50.
12. Образование «матовых пятен» в соединениях, выполненных контактной стыковой сваркой / С.И. Кучук-Яценко, Б.И. Казымов, В.Ф. Загадарчук и др. // Автомат. сварка. – 1984. – № 11. – С. 23–26.
13. API standard 1104. Welding of pipelines and related facilities ASME boiler and pressure vessel. – 19ed., 1999.
14. СП 105–34–96. Производство сварочных работ и контроль сварных соединений. – Введ. 01.10.96.
15. Влияние некоторых дефектов на прочность стыковых соединений, выполненных контактной сваркой / В.И. Труфяков, В.Г. Мазур, Г.В. Жемчужников и др. // Автомат. сварка. – 1987. – № 2. – С. 7–9.
16. Упругие напряжения вокруг неметаллических включений / В.М. Финкель, О.П. Елесина, В.А. Федоров и др. // Металловед. и терм. обработка металлов. – 1971. – № 7. – С. 55–61.
17. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. – М.: Машиностроение, 1974. – Ч.2. – 368 с.
18. Особенности испытаний на ударную вязкость сварных соединений труб, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением / С.И. Кучук-Яценко, В.И. Кирьян, Б.И. Казымов, В.И. Хоменко // Автомат. сварка. – 2006. – № 10. – С. 5–11.
19. Осадчук В.А. О критерии распространения продольных и поперечных трещин в замкнутых цилиндрических оболочках // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1980. – № 4. – С. 151–159.
20. Бородавкин П.П., Синюков А.М. Прочность магистральных трубопроводов. – М.: Недра, 1984. – 246 с.

Поступила в редакцию 13.11.2014

## 15-я Международная специализированная выставка «Сварка и резка»

7–10.04 2015

Беларусь, Минск,  
просп. 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 и информационное обеспечение сварки
- ▶ Система подготовки, переподготовки и аттестации сварщиков
- ▶ Сертификация сварочного оборудования.

Контакты: тел.: 226-90-83; факс: +375 17 226-98-58, 226-99-36; E-mail: e\_fedorova@solo.by