



ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ЭШН КОМПОЗИЦИОННЫМ СТЕРЖНЕМ В МАЛОГАБАРИТНОМ СЕКЦИОННОМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

Г. Н. СОКОЛОВ, канд. техн. наук, И. В. ЗОРИН, С. Н. ЦУРИХИН, инженеры, В. И. ЛЫСАК, д-р техн. наук (Волгоград. гос. техн. ун-т, РФ)

Рассмотрены электрофизические и тепловые особенности электрошлаковой наплавки (ЭШН) с дополнительным полым графитовым электродом. Показано, что введение неплавящегося электрода в шлаковую ванну способствует образованию в ней высокотемпературной области, что позволяет равномерно расплавлять различные наплавочные материалы. Применение ЭШН обеспечивает возможность получения жаропрочного сплава на основе алюминид никеля.

Ключевые слова: электрошлаковая наплавка, секционный кристаллизатор, композиционный стержень, моделирование процесса ЭШН, полый графитовый электрод, распределение тока, тепловой баланс, алюминид никеля

Электрошлаковая наплавка (ЭШН) в секционном кристаллизаторе (СК) малогабаритных (диаметром до 50 мм) торцов деталей оборудования и инструмента позволяет при достаточной производительности наплавки различными материалами без подведения к нему тока получать высококачественный металл в результате эффективной металлургической обработки расплава перегретым шлаком и обеспечения его направленной кристаллизации. Особенно эффективна ЭШН в СК для упрочнения прошивного и других видов инструментов, работающих в условиях циклического температурно-силового воздействия (ЦТСВ) при температуре до 1100 °С [1]. Однако в таких сложных условиях использование многих современных никелевых и кобальтовых суперсплавов недостаточно эффективно [2].

Известны новые типы сплавов, получающиеся различными металлургическими способами, которые отличаются более высокими технологическими и эксплуатационными свойствами при рабочих температурах, например с матрицей на основе алюминидов титана и никеля. Такие сплавы в отдельных случаях нашли промышленное применение [3]. Известно [2], что жаропрочные композиционные сплавы на основе алюминид никеля Ni₃Al более технологичны и содержат, как правило, ряд легирующих элементов с различной температурой плавления: 660 (алюминий), 1453 (никель), 3410 (вольфрам), 3000 (тантал), 2610 °С (молибден). Чтобы получить наплавленный металл такого типа с высоким уровнем сварочно-технологических свойств, необходимы композиционные наплавочные материалы, состоящие из металлической оболочки и наполнителя, в котором туго- и легкоплавкие компоненты содержатся в виде металлических порошков и проволок. Это позволяет обеспечить стехиометрическое соотношение легирующих элементов в наплавленном металле. В качестве такого

материала может быть композиционный стержень, состоящий из никелевой оболочки и наполнителя. Но эффективность использования композиционного стержня в обычном процессе ЭШН низкая из-за неравномерного расплавления его компонентов в шлаке.

Процессы ЭШН в зависимости от схемы подвода тока к шлаку (плавящимся металлическим и неплавящимся графитовым электродом или токоподводящей секцией кристаллизатора) обуславливают наличие различного и неравномерного теплового состояния расплава шлаковой ванны. При ЭШН плавящимся электродом, в частности порошковой проволокой [4], максимальная (около 2300 °С) температура шлака наблюдается в небольшой локальной зоне (тепловом центре), прилегающей к электроду, где и происходит его плавление. В случае неплавящегося электрода присадочный материал трудно целенаправленно подавать в тепловой центр шлака. При ЭШН в СК тепловой центр находится в периферийном участке шлаковой ванны у стенок токоведущей секции кристаллизатора [5], остальная часть шлака нагревается до температуры 1900 °С [1], которая является достаточной для равномерного расплавления компонентов композиционного стержня.

С целью обеспечения качественного расплавления композиционного стержня исследовали возможность образования нового теплового центра в шлаковой ванне путем введения в нее дополнительного полого неплавящегося электрода.

Условия протекания процесса ЭШН моделировали в водоохлаждаемых СК и цельном кристаллизаторе для случаев различного подвода тока к шлаку. Шлаковую ванну имитировал раствор электролита, вязкость которого (0,03 Па·с) примерно соответствовала вязкости перегретого шлака (флюс АНФ-6). Материалом для моделей СК и цельного кристаллизатора служили три медных кольца диаметром 50 мм и толщиной 2,5 мм, которые помещали в стеклянную полость цилиндрической формы (рис. 1). Кольцо токоведущей секции имело вертикальный разрез. Для имитации цельного кристаллизатора кольца соединяли между

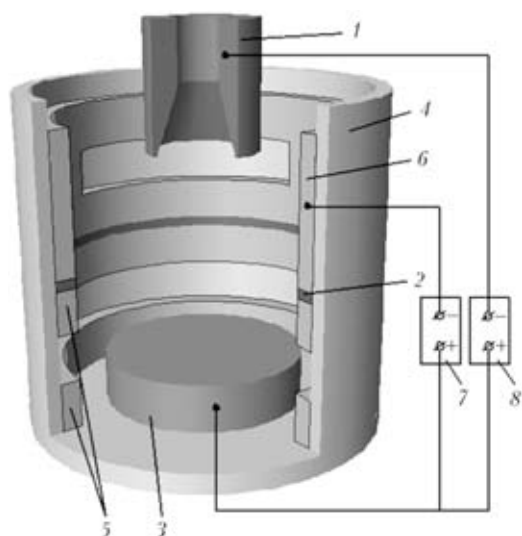


Рис. 1. Модель СК с дополнительным электродом: 1 — полый графитовый электрод; 2 — изолятор; 3 — изделие; 4 — стеклянная полость; 5 — формующая секция; 6 — токоподводящая секция; 7, 8 — источники питания постоянного тока

собой, а в модели СК их изолировали. В качестве изделия использовали медный цилиндр диаметром 20 мм и высотой 7 мм. Применяли графитовые электроды диаметрами 5, 12 и 15 мм со сплошным сечением и полые.

Во всех опытах на токоведущую секцию модельного кристаллизатора подавали напряжение 36 В от источника питания постоянного тока, а на дополнительный графитовый электрод — напряжение 28 В от независимого источника питания. После погружения графитового электрода в электрическую ванну (электролит) на различную глубину фиксировали визуальное движение на ее поверхности и в объеме. Для наблюдения характера движения электролита его подкрашивали графитовой крошкой. В связи со сложностью фиксации потоков электролита в модели в малом объеме ванны проследить его движение трудно, но возможно в начальный момент работы модели (в течение 8... 10 с). Для качественной оценки направления движения шлака с учетом данных работы [6] устанавливали направление вектора электромагнитной силы f_e .

Для изучения прогнозируемой высокотемпературной области в шлаке требуется оценить распределение тока в шлаковой ванне, которое влияет



Рис. 2. Вид рабочего торца полого графитового электрода

на характер течения шлака и определяет тепловую ситуацию в нем. Распределение линий тока в модельных схемах устанавливали на основе данных работ [5, 7], полученных для различных случаев подвода тока к кристаллизатору. Исследованные модельные схемы позволили определить возможность создания высокотемпературной области в шлаковой ванне СК за счет введения в нее дополнительного полого неплавящегося электрода. Опыты, проведенные в реальных условиях, показали, что в ходе ЭШН рабочий торец полого графитового электрода приобретает форму «обратного» конуса (рис. 2). При этом уменьшается площадь активной поверхности электрода, что позволяет получить ток повышенной плотности. Результаты исследований свидетельствовали о том, что при введении в СК дополнительного неплавящегося электрода существенно изменяется энергетическая обстановка в шлаковой ванне (рис. 3). Электрическое поле токоподводящей секции кристаллизатора вытесняет линии тока с неплавящегося электрода в подэлектродную область, где создается их высокая концентрация. Такое распределение тока увеличивает нагрев шлака в зоне погружения электрода, что образует температурный градиент в шлаковой ванне. Большая плотность линий тока на внутренней поверхности конического торца электрода обуславливает нагрев шлака в этой области до максимальной температуры, что способствует выравниванию скорости распада компонентов композиционного стержня.

Высокая плотность тока в нижней части стенки токоведущей секции и у поверхности электрода позволяет достичь здесь максимального значения объемной электромагнитной силы, направленной вниз и вызывающей вихревое движение электролита. Можно предположить, что модель движения электролита будет иметь вид двух потоков, нап-

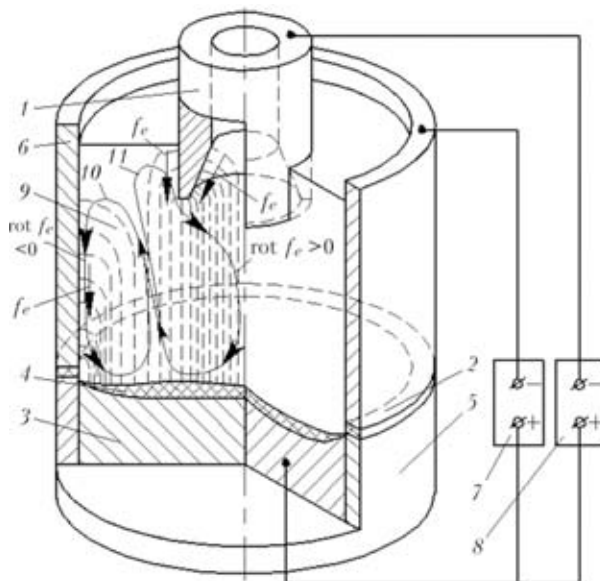


Рис. 3. Схема распределения тока и движения шлака в исследуемой (рис. 1) модели СК: 1, 2 и 5-8 — см. обозначения рис. 1; 3 — наплавленный металл; 4, 9 — соответственно металлическая и шлаковая ванны; 10, 11 — потоки шлака; штриховыми линиями показаны линии тока

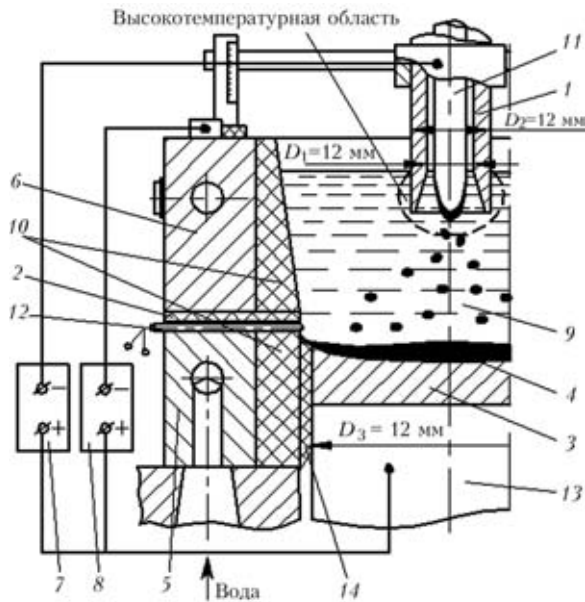


Рис. 4. Схема ЭШН в СК с полым графитовым электродом: 1–9 – см. обозначения рис. 3; 10 – графитовая вставка; 11 – композиционный стержень; 12 – термопара; 13 – изделие; 14 – шлаковый гарнисаж; D_1, D_2 – соответственно внутренний и наружный диаметры полого графитового электрода; D_3 – диаметр наплавляемого изделия

равленных навстречу друг другу (см. рис. 3). В малом объеме модели наблюдается сглаживающий эффект от вращения электролита в горизонтальной плоскости. Такое вращение является результатом воздействия магнитного потока на электролит вследствие изменения направления тока в разрезанной токоведущей секции. Ввиду этого реальная картина течения шлака может быть искажена и рассматривать его движение возможно только в мгновенном варианте. Поток электролита 10, удовлетворяющий условию $\text{rot } f_e > 0$, продвигаясь вдоль электрода и далее к металлической ванне, отдает часть тепла, нагревает ее и поднимается в центр шлаковой ванны. Здесь потоки 10 и 11 приобретают одинаковое направление, вследствие чего на их границе создается результирующий поток, который подхватывает и переносит металлические капли к стенкам кристаллизатора. Двигаясь вдоль пристенной области СК, охлажденный в его верхней части поток 11, для которого $\text{rot } f_e < 0$, нагревается в нижней части стенки токоведущей секции, передавая при этом тепло поверхности металлической ванны. Вследствие такого движения продолжительность пребывания металлических капель в шлаке увеличивается и возрастает время их обработки шлаком.

Экспериментальные наплавки проводили по схеме ЭШН, разработанной в результате моделирования (рис. 4). В качестве наплавочного материала использовали композиционный стержень диаметром 5 мм, состоящий из никелевой оболочки, в полость которой помещали порошки алюминия, циркония, бориды молибдена, графита и проволоки из технически чистых вольфрама, тантала, молибдена и Нп-Х20Н80Т. Введение проволок из тугоплавких компонентов исключает сепарацию легких и тяжелых металлических порошков в ших-

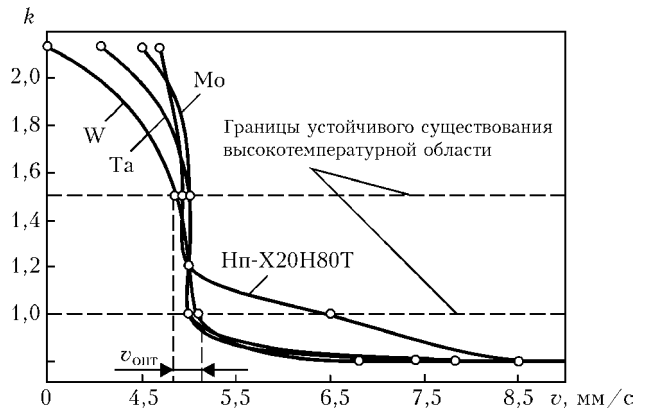


Рис. 5. Влияние соотношения токов на электродах k на скорость v расплавления композиционного стержня

те. Состав композиционного стержня рассчитывали исходя из химического состава известного сплава, содержащего никель и алюминий в стехиометрическом соотношении, обеспечивающем получение алюминиды никеля Ni_3Al . Другие легирующие элементы в сплаве брали в следующих соотношениях, мас. %: 2,5... 3,0 W; 0,5... 2,5 Ta; 2,5... 3,0 Mo; 0,5... 2,5 Zr; 4,4 Cr; 0,035 В. Графитовый порошок вводили с учетом количества углерода, переходящего в шлак в результате электрохимического растворения рабочей части графитового электрода. Масса наплавленного на заготовку из стали 40Х металла составляла 40 г. Скорость расплавления каждого проволоочного компонента композиционного стержня оценивали количеством металла, расплавляемого в единицу времени. Оптимальный режим ЭШН композиционного стержня соответствовал режиму, при котором разница в скорости расплавления его компонентов минимальна.

ЭШН вели на постоянном токе прямой полярности (источники питания ВДУ-504 и ВДУ-1000) с использованием флюса АНФ-6. В процессе наплавки ток с токоведущей секции СК $I_{СК}$ и ток с полого графитового электрода $I_э$ изменяли в пределах 140... 250 А, а напряжение на шлаке – в пределах 17... 23 В. Высоту шлаковой ванны поддерживали в диапазоне 25... 30 мм. Процесс осуществляли в среде аргона. Температуру шлака регистрировали с помощью вольфраморениевых термопар марки ВР 10/20 многоканальным потенциометром КСП-4. Твердость наплавленного металла при нормальной и высоких температурах определяли на приборе ТШ-2 твердосплавным шариком диаметром 5 мм при нагрузке 7,35 кН и выдержке в течение 10 с. Металлографические исследования полученного металла проводили известными методами.

В результате исследований установлено, что на равномерность плавления компонентов композиционного стержня и устойчивость процесса ЭШН в наибольшей степени влияет соотношение токов $I_{СК}/I_э = k$. При $k \leq 1,5$ температура шлака в приэлектродной области повышается до 3300 °С. При ЭШН происходит закипание шлака у поверхности электрода, что, однако, не нарушает стабильность процесса. Дальнейшее увеличение значений k приводит к интенсивному кипению шла-

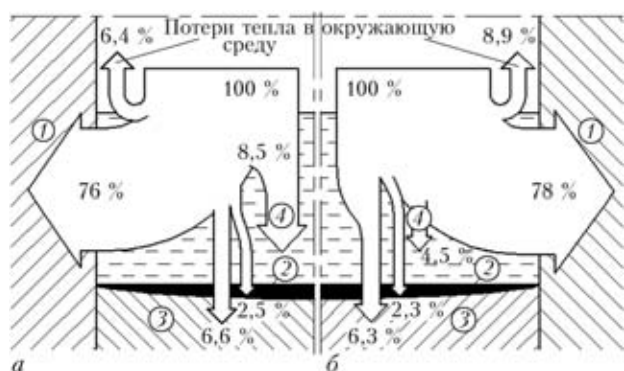


Рис. 6. Диаграмма теплового баланса процесса ЭШН в СК с дополнительным полым неплавящимся электродом (а) и по традиционной схеме (б): 1–4 – распределение тепловых потоков соответственно в кристаллизаторе, металлической ванне, заготовке, композиционным стержне

ковой ванны и ее выплескам, что негативно сказывается на прохождении процесса ЭШН. При $k \leq 1$ температура шлака в приэлектродной области уменьшается и сравнима с температурой шлаковой ванны в СК. Следовательно, в процессе наплавки соотношение k обуславливает устойчивое существование высокотемпературной области в зоне погружения электрода и должно составлять 1,0...1,5. Этот диапазон значений k справедлив для токов $I_{СК}$ и $I_э$, равных 140...250 А. Если значения токов превышают указанный интервал, то процесс ЭШН имеет неустойчивый характер. При соблюдении указанного значения соотношения k оптимальная скорость $v_{\text{онт}}$ расплавления композиционного стержня составляла 4,8...5,2 мм/с (рис. 5), что позволяет получать качественный наплавленный металл.

Для сравнения теплового режима работы СК по традиционной и исследуемой схемам рассчитывали тепловой баланс. При этом полагали, что тепловую ситуацию в шлаке определяет действие двух независимых источников его нагрева. Причем при расчете температуру шлака в зоне погружения графитового электрода и в остальном объеме шлаковой ванны принимали разной. Анализ полученных данных (рис. 6) показал, что при рассматриваемой схеме процесса ЭШН расход тепла на нагрев и плавление основного металла близок к такому же расходу при традиционной схеме и почти в 2 раза больше тепла поступает на нагрев и плавление композиционного стержня. Это происходит из-за высокого градиента температур в шлаке в зоне погружения электрода, в результате чего нагрев наплавочного материала ускоряется, что позволяет более эффективно расходовать теплоту шлаковой ванны. Значительные и одинаковые в обоих случаях потери тепла в кристаллизатор связаны с тем, что шлаковая ванна соприкасается с ним на 70 % своей поверхности.

С помощью металлографических исследований установлено, что наплавленный металл не содержит сварочных дефектов и имеет сложную гетерофазную структуру, основой которой служит твердый раствор на базе алюминиды никеля Ni_3Al . В структуре наплавленного металла присутствуют дисперсные частицы на основе твердого раствора

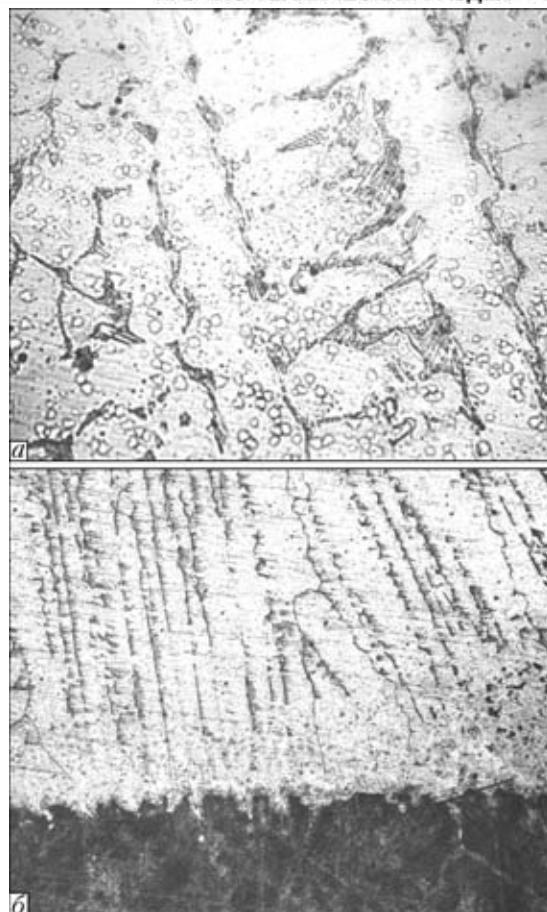


Рис. 7. Микроструктура наплавленного металла (а, $\times 400$) и зоны сплавления с основой (б, $\times 100$)

никеля γ -фазы, в которой содержится вторичная γ -фаза, представляющая собой Ni_3Al . По границам дендритов находятся эвтектические γ -фазы, карбиды и карбориды, в состав которых входит никель, алюминий и другие легирующие элементы. Суммарное содержание фаз на основе Ni_3Al составляет около 80 % (рис. 7, а). Композиционная структура наплавленного металла с направленным расположением дендритов обеспечивает необходимую термическую усталость и твердость ($HV 100...110$) при температуре до $1100^\circ C$, что позволяет использовать его в условиях ЦТСВ.

В зоне сплавления наплавленного металла дефекты отсутствуют, нет опасных кристаллизационных и диффузионных прослоек, влияющих на служебные свойства наплавленного изделия (рис. 7, б).

Выводы

1. При введении в шлаковую ванну малогабаритного СК дополнительного полого графитового электрода в зоне погружения его в шлак образуется высокотемпературная область, устойчивость которой обеспечивается соотношением токов токовой секции кристаллизатора и полого графитового электрода 1,0...1,5.

2. Разработанная схема ЭШН в СК с дополнительным полым графитовым электродом позволяет получить качественный жаропрочный наплавленный металл на основе Ni_3Al для его работы в условиях ЦТСВ при температурах до $1100^\circ C$.



1. Соколов Г. Н., Михеев А. Н., Павлов А. А. Электрошлаковая наплавка в секционном кристаллизаторе торцов опор трубопрошивного стана // Свароч. пр-во. — 2002. — № 6. — С. 31–34.
2. Малолегированные легкие жаропрочные высокотемпературные материалы на основе интерметаллида Ni_3Al // Е. Н. Каблов, В. П. Бунтушкин, К. Б. Поварова и др. // Металлы. — 1999. — № 1. — С. 58–65.
3. Скачков О. А. Перспективные жаростойкие и жаропрочные сплавы на основе интерметаллидов $NiAl$ и Ni_3Al // Сталь. — 2002. — № 2. — С. 74–77.
4. Самсонов И. Г., Королев Н. В., Бармин Л. Н. Температурный режим при электрошлаковой наплавке порошковой проволокой // Автомат. сварка. — 1981. — № 1. — С. 34–38.
5. Дудко Д. А., Компан Я. Ю., Щербинин Э. В. К вопросу о физической природе движения расплава при электрошлаковом процессе // Свароч. пр-во. — 1990. — № 6. — С. 38–39.
6. Исследование электрошлакового процесса с помощью кинофотосъемки через прозрачную среду / Г. З. Волошкевич, Д. А. Дудко, И. И. Суцук-Слюсаренко, И. И. Лычко // Там же. — 1971. — № 2. — С. 15–17.
7. Томиленко С. В., Кусков Ю. М. Энергетические особенности электрошлакового процесса в токоподводящем кристаллизаторе // Автомат. сварка. — 1999. — № 2. — С. 51–53.
8. Ксендзык Г. В. Особенности тепловой работы токоподводящего кристаллизатора при электрошлаковой наплавке зернистым присадочным материалом // Промышл. теплотехника. — 1982. — № 2. — С. 45–50.

Electrophysical and thermal peculiarities of electroslag surfacing (ESS) using an extra hollow graphite electrode are considered. It is shown that addition of a nonconsumable electrode to the slag pool leads to formation of a high-temperature region in it, which allows a uniform melting of different components of surfacing consumables. The use of ESS provides a heat-resistant deposited alloy based on nickel aluminide.

Поступила в редакцию 29.01.2004



МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА СВАРКА И РЕЗКА

29.03–01.04.2005

Выставочный павильон, просп. Машерова, 14
Минск, Республика Беларусь

Организаторы:

Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт сварки и защитных покрытий с опытным производством
Беларусского государственного научно-производственного концерна порошковой металлургии

Министерство промышленности Республики Беларусь

Национальная академия наук Беларуси

ЗАО «МИНСКЭКСПО»

Направления экспозиции:

- ✓ материалы для сварки, наплавки и пайки;
- ✓ оборудование для сварки, резки, наплавки, пайки и термообработки;
- ✓ источники питания;
- ✓ оборудование для орбитальной сварки и обработки труб;
- ✓ электронно-лучевая, лазерная, плазменная сварка и резка;
- ✓ автоматизированные комплексные системы и агрегаты для сварки и резки; программное обеспечение для управления технологическими процессами сварки и резки и для контроля качества сварных соединений;
- ✓ автоматизация сварочных производственных и технологических процессов, технологическая оснастка;
- ✓ современные технологические процессы для сварки, резки, пайки и термообработки;
- ✓ приборы для неразрушающего контроля сварных соединений;
- ✓ научное и информационное обеспечение сварки;
- ✓ система подготовки, переподготовки и аттестации сварщиков;
- ✓ охрана труда и экологическая безопасность в сварочном производстве.

Дополнительную информацию можно получить:

e-mail: e_fedorova@minskexpo.com.by; tatiana@telecom.by
тел. +375 17 2269858, 2269940; факс +375 17 2269858, 2269936