

ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ И ВОССТАНОВИТЕЛЬНОМ РЕМОНТЕ СПИРАЛЕЙ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС*

Н. М. МАХЛИН¹, В. Е. ВОДОЛАЗСКИЙ¹, В. Е. ПОПОВ¹, А. Е. КОРОТЫНСКИЙ², С. И. ЛАВРОВ³

¹ГП «НИЦ СКАЭ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины». 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: electro@paton.kiev.ua

²ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины». 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

³ОП «Атомэнергомаш» ГП «НАЭК «Энергоатом». 71503, г. Энергодар, Запорожской обл., а/я 306.

E-mail: lavrov@aem.zp.ua

Подогреватели высокого давления — принципиально необходимые звенья второго контура энергоблоков атомных электростанций с легководными реакторами типа ВВЭР. Они представляют собой одноплоскостные или двухплоскостные трубные спирали из углеродистой стали. В работе приведены результаты выбора и отработки технологии механизированной сварки для использования при изготовлении и восстановительном ремонте подогревателей высокого давления. Библиогр. 20, рис. 2.

Ключевые слова: подогреватели высокого давления, спирали подогревателей высокого давления, автоматическая сварка, плавящийся электрод, электродная проволока, смесь защитных газов, технологическое оборудование, поворотные стыки трубопроводов, сварочный вращатель

Наибольшее применение в мировой ядерной энергетике получили легководные реакторы на тепловых нейтронах (типа PWR и BWR), в которых в качестве теплоносителя, и замедлителя используется вода. На долю энергоблоков с такими реакторами приходится не менее 87 % энергоблоков атомных электростанций (АЭС) всего мира [1, 2].

Подогреватели высокого давления (ПВД), являющиеся важнейшими и ответственными составляющими второго контура реакторов с водой под давлением (PWR), предназначены для подогревания питательной воды до требуемой температуры с последующей ее подачей на теплообменник — парогенератор (ПГ). Образующийся в ПГ пар поступает в турбину, приводящую в действие электрогенераторы энергоблока АЭС [1–3].

К реакторам типа PWR относятся и корпусные водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР), эксплуатируемые на всех 15-ти энергоблоках четырех действующих АЭС Украины. Такие же реакторы предполагается использовать и в будущем при создании новых энергоблоков украинских АЭС.

Характерные особенности спиралей ПВД заключаются в наличии сварных соединений трубных элементов спиралей и их хвостовиков, а

также в параметрах среды (питательной воды), подаваемой при номинальном давлении 12,0 МПа в спираль, где питательная вода нагревается до температуры 235 °С, вследствие чего в процессе эксплуатации ПВД сварные соединения их спиралей подвергаются коррозионно-эрозионному износу. Поэтому проектирование, изготовление и восстановительный ремонт спиралей ПВД имеют свою специфику [3–5], определяющую технические требования к материалу, конструкции и сварным соединениям ПВД.

Внешний вид одного из наиболее распространенных вариантов спирали ПВД показан на рис. 1.

Конструктивно спираль ПВД состоит из трех трубных элементов, соединенных между собой двумя сварными стыковыми швами. Заготовками



Рис. 1. Общий вид спирали ПВД

*В работе принимали участие А. М. Жерносеков, В. Ю. Буряк, М. И. Скопюк, В. М. Пышный, В. Б. Кудряшев, А. В. Ковалюк.

для этих элементов служат длинномерные отрезки трубы с номинальным диаметром 32 мм и номинальной толщиной стенки 4,0 мм из углеродистой стали 20. Длина одного из прямых отрезков («центрального»), используемых в качестве заготовок для трубных элементов спирали ПВД, составляет 7000 мм, двух других прямых отрезков — 5980 и 5403 мм, соответственно. Все указанные отрезки со стороны своих торцов имеют V-образную разделку 1-24-1 (С-24-1), которая формируется с помощью предшествующей станочной обработки. После выполнения сварных соединений трубных элементов, их термообработки и неразрушающего контроля из полученной таким образом трубной плети с помощью специального приспособления формируют собственно спиральную конструкцию. К прямым входному и выходному участкам этой конструкции приваривают хвостовики и осуществляют неразрушающий контроль их сварных соединений, которые, как показал многолетний опыт, при эксплуатации ПВД наиболее подвержены коррозионно-эрозионным повреждениям. С учетом этого, при проведении восстановительного ремонта спиралей ПВД производят замену вышедших из строя хвостовиков из стали 20 на хвостовики из хромоникелевой стали аустенитного класса (преимущественно, стали 12Х18Н10Т).

До настоящего времени при изготовлении и восстановительном ремонте спиралей ПВД даже в заводских условиях для выполнения сварных соединений этих спиралей в отечественной практике применяют исключительно способ ручной многопроходной аргодуговой сварки (WIG), основными недостатками которого являются низкая производительность сварки, невозможность поддержания стабильности качества сварных соединений из-за его зависимости от «человеческого» фактора, необходимость привлечения опытных высококвалифицированных сварщиков. Поэтому увеличение производительности сварки и обеспечение стабильности качества сварных соединений спиралей ПВД при их изготовлении и восстановительном ремонте на отечественных предприятиях путем применения автоматической либо механизированной дуговой сварки представляет собой актуальную задачу.

Для ее решения были экспериментально проверены возможности применения различных способов дуговой сварки, в том числе автоматической орбитальной сварки неплавящимся электродом в среде инертных газов (GTAW), ручной и автоматической орбитальной сварки неплавящимся электродом в среде инертных газов с активизирующими флюсами (ATIG и GTAW-A, соответственно) и механизированной (автоматической) сварки плавящимся электродом в среде защитных газов.

Согласно ПН АЭ и другим действующим в Украине нормативным документам, сварные соединения трубных элементов спиралей ПВД должны выполняться с полным проваром с предельным усилением $2,0 \pm 1,0$ мм и выпуклостью корневого сварного шва не более 1,5 мм или его вогнутостью, не превышающей 0,6 мм. При этом смещение кромок трубных элементов спиралей ПВД должны не превышать 0,4 мм, а сварные соединения этих трубных элементов могут быть отнесены к категории III (подкатегория IIIc) по ПН АЭ Г-7-010-89.

Сварные соединения трубных элементов их спиралей подлежат 100 %-му неразрушающему и выборочно-разрушающему контролю. Среди неразрушающих методов контроля предусматривается применение визуально-инструментального контроля (ВИК) и радиографического контроля (РГК) [6]. При выборочном разрушающем контроле сварных соединений трубных элементов спиралей ПВД осуществляют проверку химического состава металла сварного шва и определяют механические свойства сварных соединений, а также проводятся металлографические исследования.

При выполнении экспериментальных и технологических работ и исследований использовались образцы-имитаторы трубных элементов спиралей ПВД из стали 20 с номинальным внешним диаметром 32 мм и номинальной толщиной стенки 4,0 мм, кромки которых были механически обработаны в соответствии с требованиями ПН АЭ Г-7-009-89, ПН АЭ Г-7-010-89 и ОСТ 24.125.02-89.

В ИЭС им. Е. О. Патона совместно с НИЦ СКАЭ были проведены исследования по определению возможности использования способа GTAW методами автоопрессовки или последовательного проплавления, разработанными в Научно-исследовательском и конструкторском институте монтажных технологий (НИКИМТ) в 1970–1980 гг. [7, 8]. Экспериментально установлено [9], что достигнуть стабильного требуемого качества сварных соединений спиралей ПВД с помощью GTAW методами автоопрессовки или последовательного проплавления не представляется возможным из-за физических свойств материала трубы спирали ПВД и ее геометрических размеров. Даже при допустимом уменьшении толщины стенки труб до 3,6 мм проплавление стенки по всему ее периметру было во всех случаях неравномерным, а его глубина не превышала 0,8 номинальной толщины. Это объясняется тем, что, во-первых, углеродистые стали (к которым относится и сталь 20) по сравнению со сталями аустенитного класса имеют значительно более низкий коэффициент линейного расширения и суще-

ственно более высокую теплопроводность, а это не позволяет обеспечить достаточные сжимающие усилия для необходимых термопластических деформаций. Во-вторых, номинальная толщина стенки трубопровода спирали ПВД составляет 4,0 мм, а отношение толщины стенки S к номинальному внешнему диаметру трубопровода $D_{тр}$ составляет всего 0,125, т. е. близко к нижнему пределу применимости GTAW методами автоопрессовки или последовательного проплавления. Экспериментальным путем установлено, что совокупность этих факторов в сочетании с реальными условиями теплоотвода при сварке не позволяет в случае применения способа GTAW обеспечивать ни регламентированное нормативной и конструкторской документацией полное проплавление сварных соединений спиралей ПВД, ни стабильность качества формирования их сварных швов.

Известно [10–14], что при TIG или GTAW способах сварки возможно путем использования активирующих флюсов увеличить в 2...3 раза глубину проплавления. Однако присущие способам сварки ATIG и GTAW-A недостатки, связанные с отсутствием средств механизированного нанесения слоя активирующего флюса, сложность контроля равномерности наносимого слоя, а также по возможности использования флюсов в виде аэрозолей, являются причиной того, что до настоящего времени ATIG и GTAW-A в отечественной атомной энергетике практически не применяются.

Одним из наиболее распространенных и востребованных технологических процессов при различных видах производства является механизированная сварка плавящимся электродом в среде активных газов (MAG) — преимущественно в среде CO_2 [15, 16].

Известно, что по сравнению с ручными способами дуговой сварки покрытыми или неплавящимся электродами процесс MAG отличается значительными преимуществами, но вместе с тем этому способу сварки присущ и ряд недостатков, среди которых для сварных соединений трубных элементов спиралей ПВД наибольшее отрицательное значение имеют относительно низкое качество поверхности сварного шва — неровности и грубая чешуйчатость и относительно низкая устойчивость процесса сварки при значительном количестве коротких замыканий дугового промежутка.

В результате проведенных в НИЦ СКАЭ экспериментов установлено, что при сварке поворотных соединений спиралей ПВД способ MAG обеспечивает высокую производительность процесса сварки и необходимую глубину проплавления, однако при этом надлежащее формирование сварного шва принципиально недостижимо, в силу чего имеются все основания считать, что для выполне-

ния сварных соединений спиралей ПВД способ MAG практически мало пригоден.

В то же время во всех промышленно развитых странах и в Украине широкое развитие получила механизированная сварка в смесях защитных газов на основе аргона [17–19], при которой к аргону, составляющему 80...95 % общего объема смеси, добавляют небольшое количество кислорода или другого окислительного газа (чаще всего CO_2), что существенно повышает устойчивость горения дуги, значительно улучшает качество формирования сварных швов и практически исключает область режимов сварки с короткими замыканиями дугового промежутка. При этом существуют области режимов сварки, характеризующиеся или капельным, или струйным (мелкокапельным) переносом электродного металла. По сравнению с MAG такой характер массопереноса обуславливает ряд технологических преимуществ. И хотя в этом случае в сравнении с MAG проплавающая способность дуги на 10...20 % снижается и для получения той же глубины проплавления необходимо увеличивать сварочный ток, при сварке плавящимся электродом в смесях защитных газов обеспечивается более качественное формирование сварного шва (гладкая поверхность с плавным переходом на основной металл); уменьшение не менее, чем в 3...4 раза, потерь электродного металла на разбрызгивание; снижение не менее, чем в 8...10 раз трудоемкости зачистки основного металла от брызг; создание благоприятных условий для использования импульсных процессов [18, 19]; возможность сварки постоянным током прямой полярности и при удлиненном вылете; более высокие показатели механических свойств металла шва.

Учитывая присущие способу сварки плавящимся электродом в смесях защитных газов преимущества, а также результаты выполненных в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины и НИЦ СКАЭ поисковых и экспериментально-технологических работ, следует отметить, что автоматическая дуговая сварка плавящимся электродом в смесях защитных газов является одним из наиболее эффективных и перспективных способов получения сварных соединений трубных элементов спиралей ПВД, при этом наиболее рациональным является использование поворотных стыков.

Для проведения экспериментально-технологических работ относительно выполнения поворотных сварных соединений трубных элементов ПВД с помощью MAG и сварки плавящимся электродом в смесях защитных газов в НИЦ СКАЭ был создан макет сварочной установки, в состав которой входят выпрямитель сварочный ВС-300Б, полуавтомат А-547 с экспериментальными образцами пуль-

та управления и горелки, рассчитанной на подачу электродной проволоки номинальным диаметром 1,0...1,2 мм, а также макет вращателя. Основные параметры макета вращателя приведены ниже.

Основные параметры макета вращателя

Номинальный диаметр трубных элементов спиралей ПВД, мм.....	32
Номинальная толщина стенки трубных элементов спиралей ПВД, мм.....	4,0
Пределы регулирования скорости вращения (скорости сварки) свариваемого изделия, об/мин, не менее	1,0...7,0
Номинальное напряжение однофазной сети питания частотой 50 Гц, В	220
Мощность блока питания (преобразователя АС – DC) реверсивного электропривода вращателя, Вт, не менее.....	200
Номинальное выходное напряжение постоянного тока реверсивного электропривода вращателя, В.....	24

Подготовленные к сварке согласно требованиям нормативных документов и КД образцы-имитаторы трубных элементов спиралей ПВД с V-подобной разделкой кромок из стали 20 подвергали механизированной сварке — МАG и сварке плавящимся электродом в смесях защитных газов. Предварительно методом TIG выполняли две-три прихватки для каждого шва в среде аргона на сварочном токе 80...100 А, для чего использовали опытный образец специализированного источника питания ИЦ 617 УЗ.1 для TIG. По результатам выполнения нескольких серий опытных сварок установлено:

– сварные соединения, которые выполнялись способом МАG с принудительными короткими замыканиями тонкой электродной проволоки, обеспечивали необходимую глубину провара, однако требовали тщательного подбора режима сварки и поддержания в процессе сварки параметров этого режима с точностью не хуже $\pm 5\%$, при этом в некоторых образцах – имитаторах трубных элементов спиралей ПВД наблюдались дефекты сварных швов, наиболее характерными из которых являются проседания шва, подрезы, отсутствие плавного перехода к основному металлу, грубая чешуйчатость облицовочной поверхности;

– сварные соединения, которые выполнялись способом сварки плавящимся электродом в смесях защитных газов, не только обеспечивали необходимую глубину провара, но и практически не имели недопустимых дефектов, причем в этом случае наблюдался благоприятный перенос электродного металла, при котором практически отсутствуют разбрызгивание и забрызгивание свариваемого изделия, а качество сварных соединений полностью соответствует требованиям ПНАЭ Г-7-009-89.

Также были определены и оптимизированы основные требования к технологическому оборудованию для механизированной сварки (способом сварки плавящимся электродом в смесях защитных газов) соединений трубных элементов спира-

лей ПВД. Значения основных оптимизированных параметров технологического оборудования для механизированной сварки плавящимся электродом в смеси защитных газов соединений трубных элементов спиралей ПВД приведены ниже.

Основные оптимизированные параметры технологического оборудования для механизированной сварки плавящимся электродом в смеси защитных газов соединений трубных элементов спиралей ПВД

Номинальный диаметр трубных элементов спиралей ПВД, мм.....	32
Номинальная толщина стенки трубных элементов спиралей ПВД, мм.....	4,0
Диапазон регулирования сварочного тока, А.....	110...130
Диапазон регулирования рабочего напряжения дуги, В.....	20...24
Номинальный диаметр плавящегося электрода (электродной проволоки) преимущественно марки Св-08ГС или Св-08Г2С), мм.....	1,0
Диапазон регулирования скорости вращения (скорости сварки) свариваемого изделия, об/мин	1...7
Диапазон регулирования скорости подачи плавящегося электрода (электродной проволоки преимущественно марки Св-08ГС или Св-08Г2С), м/ч	120...160
Смещение оси плавящегося электрода (электродной проволоки) относительно вертикали («зенита»), град. угловые	15...20
Смещение оси плавящегося электрода (электродной проволоки) относительно вертикали («зенита»), мм.....	10...15
Количество полнокольцевых проходов дуги при выполнении одного сварного соединения, не более.....	2
Длительность цикла сварки одного соединения, с, не более	5,0
Охлаждение горелки.....	Газовое

Экспериментально-технологическими исследованиями установлено, что кроме соответствия требованиям, технологическое оборудование для механизированной сварки трубных элементов спиралей ПВД должно обеспечивать в процессе сварки стабильность таких параметров, как сварочный ток, рабочее напряжение сварочной дуги, скорость вращения (скорость сварки) с точностью не хуже $\pm 4\%$, скорость подачи плавящегося электрода (электродной проволоки) с точностью не хуже $\pm 5\%$, длительность цикла сварки с точностью не хуже $\pm 10\%$, а также надежное зажатие и центрирование обоих подлежащих сварке между собой трубных элементов с целью осуществления их синхронного вращения и исключения необходимости применения предварительных прихваток.

Исходя из этого, НИЦ СКАЭ разработаны инновационные технические предложения по построению основных частей такого технологического оборудования. Одной из наиболее важных основных составных частей комплекса технологического оборудования для механизированной сварки трубных элементов спиралей ПВД является его горизонтальный вращатель.

Согласно разработанным в ИЭС им. Е. О. Патона совместно с НИЦ СКАЭ техническим предложениям, сварочная часть комплекса технологического оборудования для механизированной сварки трубных элементов спиралей ПВД должна по меньшей мере содержать блок управления циклом сварки (БУЦС), сварочный источник питания (СИП), преимущественно инверторного типа, с жесткими или плогопадающими внешними вольт-амперными характеристиками (ВАХ), горелку для MIG/MAG с газовым охлаждением и блок пуска-защитной аппаратуры (БПЗА).

БУЦС предназначен для управления процессом сварки, циклограмма которого приведена на рис. 2. БУЦС обеспечивает два способа управления работой составных частей и исполнительных механизмов технологического оборудования для механизированной сварки трубных элементов спиралей ПВД — «вручную» и «автоматическое» при двух видах функционирования этого оборудования — «наладка» и «сварка», а также плавное регулирование и предварительное задание (установление) значений скорости подачи электродной проволоки, длительности интервалов времени «газ до сварки», процесса собственно сварки (до момента поступления переднего фронта сигнала (импульса) «стоп», «газ после сварки» и автоматическую стабилизацию этих значений в процессе наладки или сварки.

В результате экспериментально-технологических исследований определено, что для осуществления выполнения качественных многопроходных сварных соединений трубных элементов спиралей ПВД способом сварки плавящимся электродом в смесях защитных газов на основе аргона оптимальная область режимов сварки должна иметь следующие значения параметров: сварочный ток 110...130 А; рабочее напряжение дуги 21...23 В; скорость сварки 1...6 об/мин, а в качестве плавящегося электрода должна использоваться электродная проволока (преимущественно марки Св-08ГС или Св-08Г2С) с номинальным диаметром 1,0 мм, причем скорость ее подачи должна быть в пределах 120...160 м/ч.

Также было установлено, что среди множества СИП инверторного типа, предлагаемых отечественным рынком, для удовлетворения приведенных выше требований наиболее целесообразным является применение распространенного в Украине СИП инверторного типа MIG/MAG/TIG/MMA 303 разработки и производства фирмы «Tesla Weld», содержащий в однокорпусном исполнении СИП и устройство для автоматической подачи электродной проволоки MIG 303 со стандартным четырехроликовым механизмом подачи. Основные технические характеристики и ВАХ

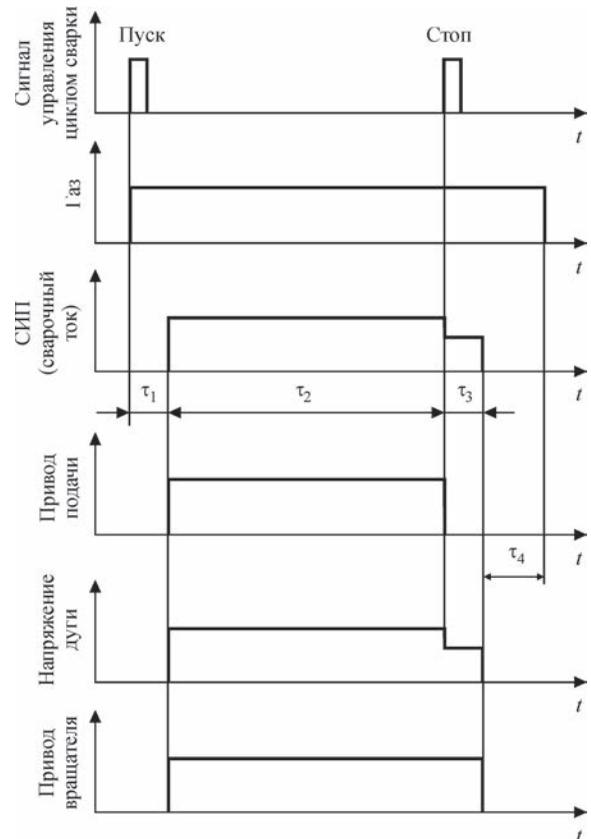


Рис. 2. Циклограмма процесса сварки трубных элементов спиралей ПВД: τ_1 — интервал времени «газ до сварки»; τ_2 — интервал времени, в течение которого происходит собственно сварка без перерыва между первым и вторым проходами дуги; τ_3 — интервал времени, в течение которого происходит «крастяжка» сварочной дуги до момента ее полного обрыва и заварки «кратера»; τ_4 — интервал времени «газ после сварки»

этого СИП пригодны для реализации указанных технических требований за исключением длительностей интервалов времени «газ до сварки» и «газ после сварки». Кроме того, в соответствии с алгоритмом работы этого СИП естественное обгорание электродной проволоки при завершении цикла сварки и автоматическое выключение сварочного тока, прекращение подачи электродной проволоки и выключение отсекающего газа (газового клапана) происходят почти одновременно. Для устранения отмеченных недостатков СИП типа MIG/MAG/TIG/MMA 303 (свойственных и другим предлагаемым рынком Украины его аналогам) в НИЦ СКАЭ и были выполнены разработка БУЦС и доработка системы управления этого СИП.

Изготовление и испытания макетов узлов БУЦС и доработка системы управления СИП типа MIG/MAG/TIG/MMA 303 позволили установить, что в таком варианте этот доработанный СИП при сохранении всех присущих ему технических характеристик способен обеспечить выполнение изображенного на рис. 2 цикла сварки, при этом диапазон регулирования длительности интервала времени «газ до сварки» составляет, по крайней

мере, от 1,0 до 10,0 с, а диапазон регулирования длительности интервала времени «газ после сварки» — не менее, чем от 10,0 до 30,0 с.

С целью упрощения подсоединения составляющих технологического оборудования для механизированной (автоматической) сварки трубных элементов спиралей ПВД к сети питания, предоставления возможности осуществления режима «аварийный стоп» по команде оператора или автоматически с практически мгновенным и полным обесточиванием этих всех без исключения составляющих и введения их дополнительной автоматической защиты от длительной перегрузки по току потребления и от устойчивого короткого замыкания в НИЦ СКАЭ разработан и спроектирован БПЗА.

Выводы

1. Механизированная дуговая сварка в смеси газов является наиболее эффективным и целесообразным способом многопроходной сварки — плавящимся электродом для применения при изготовлении и восстановительном ремонте ПВД.

2. Определены и оптимизированы основные требования к технологическому оборудованию для механизированной сварки стыков трубных элементов спиралей ПВД, а также область основных оптимизированных параметров режима сварки плавящимся электродом в смеси защитных газов (электродной проволокой сплошного сечения преимущественно марки Св-08ГС или Св-08Г2С с номинальным диаметром 1,0 мм). При этом установлено, что для получения качественных сварных соединений трубных элементов спиралей ПВД достаточно двух сварочных проходов.

3. Разработаны технические предложения по созданию комплекса технологического оборудования для механизированной (автоматической) сварки поворотных стыков трубных элементов спиралей ПВД.

Список литературы

1. Єфімов О. В., Пилипенко М. М., Потаніна Т. В. та ін. (2017) *Реактори і парогенератори енергоблоків АЕС: схеми, процеси, матеріали, конструкції, моделі*. Єфімова О. В. (ред.). Харків, ТОВ «В справі».
2. Buongiorno J. (2010) *PWR Description*. Massachusetts Institute of Technology.
3. Воронин Л. М. (1980) *Особенности проектирования и сооружения АЭС*. Москва, Атомиздат.
4. (2003) П-45-3 *Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды для объектов использования атомной энергии*. Утверждены Постановлением Госатомнадзора России № 3 и Госгортехнадзора России № 100 от 19.06.2003. Москва, НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России.
5. Марушкин В. М., Иващенко С. С., Вакуленко Б. Ф. (1985) *Подогреватели высокого давления турбоустановок ТЭС и АЭС*. Москва, Энергоатомиздат.
6. Троицкий В. А. (2006) *Краткое пособие по контролю качества сварных соединений*. Киев, Феникс.

7. Букаров В. А. (2002) Технология дуговой автоматической сварки в защитных газах. *Сварка в атомной промышленности и энергетике*. Тр. НИКИМТ. Т. 1, сс. 149–210.
8. Ищенко Ю. С. (2002) Физико-технологические основы формирования швов в процессе дуговой сварки. *Там же*. Т. 2, сс. 204–240.
9. Коротынский А. Е., Махлин Н. М., Богдановский В. А. и др. (2011) Одно- и многопостовые системы для автоматической сварки неповоротных стыков трубопроводов атомных электростанций. *Автоматическая сварка*, **11**, 34–44.
10. Савицкий М. М., Кушниренко Б. М., Олейник О. И. (1999) Особенности сварки сталей вольфрамовым электродом с активизирующими флюсами (АТИГ-процесс). *Там же*, **2**, 20–28.
11. Байич Д. Р., Савицкий М. М., Мельничук Г. М., Лупан А. Ф. (2002) Сварка АТИГ конструкционных сталей, применяемых в энергетическом оборудовании. *Там же*, **9**, 35–38.
12. Байич Д. Р., Мельничук Г. М., Лупан А. Ф., Савицкий М. М. (2002) Техника и режимы аргонодуговой сварки сталей с активизирующими флюсами. *Там же*, **10**, 34–37.
13. Gordon J. R. (1995) Perspectives on welding research and development in the USA. *Weld. Review Intern.*, **9**, 95–108.
14. Станкевич И. Я., Дмитриев В. И., Корида В. Л. и др. (1982) Применение активизирующего флюса при автоматической сварке трубопроводов. *Энергетическое строительство*, **10**, 19–20.
15. Потапьевский А. Г. (1974) *Сварка в защитных газах плавящимся электродом*. Москва, Машиностроение.
16. Кононенко В. Я. (2007) *Сварка в среде защитных газов плавящимся и неплавящимся электродом*. Киев, ТОВ «Ника – Принт».
17. Свечинский В. Г., Римский С. Т., Галинич В. И. (1994) Сварка сталей в защитных газовых смесях на основе аргона в промышленности Украины. *Автоматическая сварка*, **4**, 41–44.
18. Римский С. Т., Свечинский В. Г., Шейко П. П. и др. (1993) Импульснодуговая сварка низколегированных сталей плавящимся электродом в смеси аргона с углекислым газом. *Там же*, **2**, 38–41.
19. Aichele G. (1990) Use of the pulsed technique – active gas metal – arc welding. *Schweissen und Schneiden*, **4**, E62–E63.
20. (2017) Лобанов Л. М., Водолазский В. С., Махлин Н. М., Коротынский О. С., Жерносек А. М., Попов В. С., Скопюк М. І. *Горизонтальный обертач для дугового зварювання деталей трубних конструкцій*. Україна, Заявка а2017 11752.

References

1. Efimov, O.V., Pylypenko, M.M., Potanina, T.V. et al. (2017) *Reactors and steam generators of power generating units of NPP: schemes, processes, materials, structures, models*. Ed. by O.V. Efimov. Kharkiv, TOV «V spravi» [in Ukrainian].
2. Buongiorno, J. (2010) *PWR Description*. Massachusetts Institute of Technology.
3. Voronin, L.M. (1980) *Peculiarities of design and construction of NPP*. Moscow, Atomizdat [in Russian].
4. (2003) P-45-3: *Regulations of arrangement and safe operation of steam and hot water line for facilities of nuclear power consumption*. Moscow, NTTs YaRB Gosatomnadzor Rossii [in Russian].
5. Marushkin, V.M., Ivashchenko, S.S., Vakulenko, B.F. (1985) *High-pressure heaters of TPP and NPP turbo installations*. Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
6. Troitsky, V.A. (2006) *Concise manual on quality control of welded joints*. Kiev, Feniks.
7. Bukarov, V.A. (2002) Technology of automatic arc shielded-gas welding. In: *Welding in nuclear industry and engineering*: Transact. NIKIMT, Vol. 1, 149-210 [in Russian].
8. Ishchenko, Yu.S. (2002) Physical-technological fundamentals of weld formation in arc welding process. *Ibid.*, Vol. 2, 204-240 [in Russian].

9. Makhlin, N.M., Korotynsky, A.E., Bogdanovsky, V.A. et al. (2011) Single- and multioperator systems for automatic welding of position butt joints of nuclear power plant piping. *The Paton Welding J.*, **11**, 28-36.
10. Savitsky, M.M., Kushnirenko, B.M., Olejnik, O.I. (1999) Peculiarities of tungsten electrode welding of steels with activating fluxes (ATIG-process). *Avtomatich. Svarka*, **1**, 20-28 [in Russian].
11. Bajic, D.R., Savitsky, M.M., Melnichuk, G.M. et al. (2002) A-TIG welding of structural steels for power engineering applications. *The Paton Welding J.*, **9**, 30-34.
12. Bajic, D.R., Melnichuk, G.M., Lupan, A.F. et al. (2002) Procedure and parameters of A-TIG welding of structural steels. *Ibid.*, **10**, 31-34.
13. Gordon, J.R. (1995) Perspectives on welding research and development in the USA. *Weld. Review Intern.*, **9**, 95-108.
14. Stankevich, I.Ya., Dmitriev, V.I., Korida, V.L. et al. (1982) Application of activating flux in automatic welding of pipelines. *Energeticheskoe Stroitelstvo*, **10**, 19-20 [in Russian].
15. Potapievsky, A.G. (1974) *Consumable electrode shielded-gas welding*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
16. Kononenko, V.Ya. (2007) *Consumable and nonconsumable electrode shielded-gas welding*. Kiev, TOV Nika-Print [in Russian].
17. Svetsinsky, V.G., Rimsky, S.T., Galinich, V.I. (1994) Welding of steels in shielding gas mixtures on argon base in industry of Ukraine. *Avtomatich. Svarka*, **4**, 41-44 [in Russian].
18. Rimsky, S.T., Svetsinsky, V.G., Shejko, P.P. et al. (1993) Consumable electrode pulsed arc welding in mixture of argon with carbon-dioxide gas. *Ibid.*, **2**, 38-41 [in Russian].
19. Aichele, G. (1990) Use of the pulsed technique – active gas metal – arc welding. *Schweissen und Schneiden*, **4**, E62-E63.
20. Lobanov, L.M., Vodolazsky, V.E., Makhlin, N.M., Korotynsky, O.E. et al. (2017) *Horizontal manipulator for arc welding of tubular structure parts*. Ukraine, Appl. A2017 11752 [in Ukrainian].

Н. М. Махлін¹, В. Є. Водолазський¹, В. Є. Попов¹,
О. Є. Коротинський², С. І. Лавров³

¹ДП «НДЦ ЗКАЕ ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України».

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: electro@paton.kiev.ua

²ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

³ДВ «Атоменергомаш» ДП «НАЕК «Енергоатом».

71503, м. Енергодар, Запорізької обл., а/с 306.

E-mail: lavrov@aem.zp.ua

ВИБІР ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ПРИ
ВИГОТОВЛЕННІ І ВІДНОВНОМУ РЕМОНТІ СПІРАЛЕЙ

ПІДГРІВАЧІВ ВИСОКОГО ТИСКУ ЕНЕРГОБЛОКІВ АЕС

Підігрівачі високого тиску — принципово необхідні ланки другого контуру енергоблоків атомних електростанцій з легководними реакторами типу ВВЕР. Вони являють собою одноплосинні або двохплосинні трубні спіралі з вуглецевої сталі. У роботі наведено результати вибору і відпрацювання технології механізованого зварювання для використання при виготовленні та відновному ремонті підігрівачів високого тиску. Бібліогр. 20, рис. 2.

Ключові слова: підігрівачі високого тиску, спіралі підігрівачів високого тиску, автоматичне зварювання, плавкий електрод, електродний дріт, суміш захисних газів, технологічне обладнання, поворотні стики трубопроводів, зварювальний обертач

N.M. Makhlin, V.E. Vodolazsky, A.E. Popov,
A.E. Korotynsky, S.I. Lavrov

¹SE «Scientific and engineering center of welding and control in the field of nuclear energy of Ukraine of E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: electro@paton.kiev.ua

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

³SE «Atomenergomash» of the SE NNEGC «Energoatom».

71503, Energodar, Zaporozhye region, PO Box 306.

E-mail: lavrov@aem.zp.ua

SELECTION OF WELDING TECHNOLOGY IN MANUFACTURE AND RESTORATION REPAIR OF SPIRALS OF HIGH-PRESSURE HEATERS OF POWER UNITS OF NPP

The high-pressure heaters are the fundamentally necessary links of the second circuit power units of nuclear power plants with light water VVER-type reactors. They represent one-plane or two-plane piped spirals of carbon steel. The paper presents the results of selection and mastering the mechanized welding technology for applying high-pressure heaters in the manufacture and renovation repair. 20 Ref., 2 Fig.

Keywords: high-pressure heaters, spirals of high-pressure heaters, automatic welding, consumable electrode, electrode wire, mixture of shielding gases, technological equipment, rotary joints of pipelines, welding rotator

Поступила в редакцію 10.01.2018



Международная инженерная ярмарка

1–5 октября 2018 г.

Брно, Чехия



В рамках ярмарки из пяти выставок будет проведена
24-я Международная выставка сварочных технологий.

Основная тема ярмарки — Индустрия 4.0
(автоматизация, роботизация, цифровые технологии).