

# ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ СВАРКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЧЕХЛОВ НЕЙТРОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

<sup>1</sup>Н. М. МАХЛИН, <sup>1</sup>В. Е. ПОПОВ, <sup>1</sup>Н. С. ФЕДОРЕНКО, <sup>1</sup>А. В. БУРБА, <sup>2</sup>В. М. ПЫШНЫЙ,  
<sup>3</sup>В. А. ДЮКОВ, <sup>3</sup>В. Б. ГОНТАРЕВ

<sup>1</sup>ГП НИЦ СКАЭ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: techno@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>ГП НАЭК «Энергоатом». 01032, г. Киев, ул. Ветрова, 3. E-mail: l.kuzmenko@direkcy.atom.gov.ua

<sup>3</sup>ОП «Энергоэффективность» ГП НАЭК «Энергоатом».

01032, г. Киев, ул. Л. Толстого, 59. E-mail: ee@eff.atom.gov.ua

До настоящего времени в Украину каналы нейтронные измерительные поступали, в основном, из-за рубежа. Поэтому задача совершенствования эксплуатационных характеристик и освоения отечественного производства таких каналов весьма актуальна. Рассмотрено применение автоматической орбитальной сварки неплавящимся электродом для получения сварных соединений элементов чехлов каналов нейтронных измерительных, являющихся важнейшими элементами систем внутриреакторных измерений ядерных энергетических установок. Приведены результаты отработки технологии автоматической сварки ТИГ и оптимальные режимы выполнения этих соединений с применением отечественных модернизированных автоматов для орбитальной сварки АДЦ 627 УЗ.1 и АДЦ 625 УЗ.1, а также технические характеристики указанных автоматов. Описана методика сборки под сварку ТИГ элементов конструкции чехлов каналов нейтронных измерительных. Представлены данные испытаний сварных соединений неразрушающими методами контроля, механических испытаний, металлографических исследований, испытаний на стойкость против межкристаллитной коррозии. Показано, что применение разработанных технологий и оборудования позволит освоить отечественное производство каналов нейтронных измерительных. Библиогр. 10, табл. 3, рис. 3.

*Ключевые слова:* автоматическая орбитальная сварка, каналы нейтронные измерительные, ядерные реакторы, стыко-замковые соединения, неплавящийся электрод

Основным направлением развития современных ядерных энергетических установок (ЯЭУ) является интенсификация ядерных и тепловых процессов путем увеличения плотности потока нейтронов, температуры и давления теплоносителя [1–3]. Одновременно с этим ставятся задачи по увеличению ресурса работы ЯЭУ и обеспечению мер безопасности и безаварийности, что обуславливает возрастание и усложнение требований к функциональной надежности и долговечности систем измерения, управления, защиты и контроля проектируемых, строящихся и находящихся в эксплуатации ядерных реакторов.

Наибольшее применение в мировой ядерной энергетике получили легководные реакторы на тепловых нейтронах (типа PWR и BWR), в которых в качестве и теплоносителя, и замедлителя используется вода. В настоящее время на долю энергоблоков с такими реакторами приходится не менее 87 % энергоблоков атомных электростанций (АЭС) всего мира [1, 2]. К реакторам типа PWR относятся также и корпусные водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР), находящиеся в эксплуатации на всех 15-ти энергоблоках четырех действующих АЭС Украины. Такие же реакторы

предполагается использовать и в будущем при создании новых энергоблоков украинских АЭС.

Оперативный контроль реактивности и энерговыделения по высоте и радиусу активной зоны в реакторах ВВЭР осуществляется системами внутриреакторных измерений, важнейшими элементами которых являются каналы нейтронные измерительные (КНИ), погружаемые в активную зону реактора (точки погружения располагают по поперечному сечению). Например, для наиболее распространенного реактора ВВЭР-1000 предусмотрено использование от 58 до 64 КНИ.

КНИ представляет собой наполненный гелием длинномерный (12,14 м) цилиндрический полый чехол, внутри погружаемой части которого устанавливаются 7 нейтронных и от 1 до 3 (в некоторых модификациях КНИ) температурных детекторов.

Конструктивно чехол КНИ состоит из хвостовика 1, гермопрохода 3 и двух переходных вставок 2 и 4, образующих монтажную часть, а также из корпуса 5, трубы (или двух труб) 6, 7 и наконечника 8, относящихся к погружаемой части чехла (рис. 1). Эти элементы чехла КНИ имеют различные наружные и внутренние диаметры и

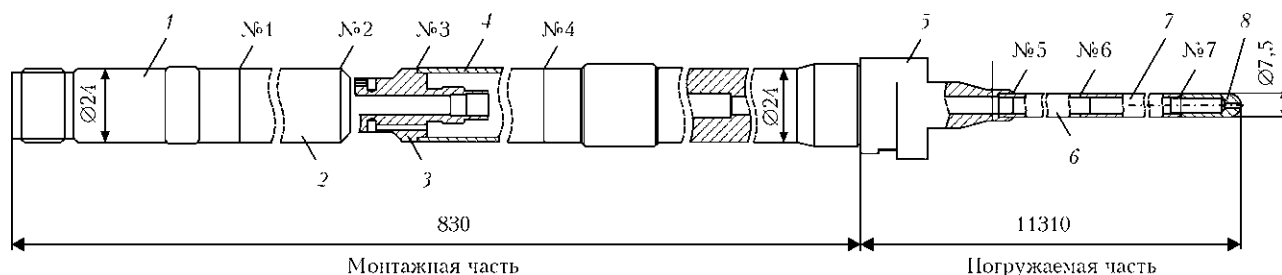


Рис. 1. Схема чехла КНИ: 1–8 — см. в тексте

объединяются в моноконструкцию чехла с помощью сварных соединений.

Характерной особенностью условий эксплуатации КНИ в реакторах ВВЭР-1000 является одновременное воздействие нейтронного облучения, а также высоких давления (15,7...17,7 МПа) и температуры (330...350 °С) внешней среды. Это предопределяет основные требования к конструкции чехла КНИ, его элементам и сварным соединениям: стойкость против коррозионного растрескивания под напряжением; вакуумная плотность сварных соединений и их механическая прочность (усилие на разрыв, согласно существующим требованиям, — не менее 4905 Н или 500 кгс); срок службы КНИ — не менее 4-х лет (эксплуатационный ресурс — не менее 40 тыс. ч). Перечисленные требования обуславливают использование в качестве конструкционного материала чехла КНИ и всех его элементов хромоникелевой стали аустенитного класса 08X18Н10Т.

До настоящего времени в Украину КНИ поступали, в основном, из-за рубежа, поэтому задача совершенствования их эксплуатационных характеристик (прежде всего показателей надежности) и освоения отечественного производства таких каналов весьма актуальна.

Одним из возможных путей решения этой задачи является промышленное применение разработанной в ГП «Научно-инженерный центр сварки и контроля в отрасли атомной энергетики Украины» (НИЦ СКАЭ) Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины совместно с Обособленным подразделением «Энергоэффективность» ГП НАЭК «Энергоатом» (ОП «Энергоэффективность») технологии выполнения сварных соединений чехлов КНИ способом автоматической орбитальной сварки неповоротных стыков неплавящимся электродом в инертных газах (сварки GTAW) и технологической оснастки для осуществления этих процессов.

Обработку технологии сварки GTAW соединений элементов чехла КНИ производили с использованием разработанных в НИЦ СКАЭ, серийно выпускаемых модернизированных автоматов АДЦ 627 УЗ.1 и АДЦ 625 УЗ.1 для орбитальной сварки неповоротных стыков трубопро-

водов [4], основные технические характеристики которых приведены в табл. 1.

Автоматы АДЦ 627 УЗ.1 и АДЦ 625 УЗ.1 для орбитальной сварки выполнены на общей аппаратной базе: специализированный многофункциональный сварочный источник питания ИЦ 616 УЗ.1 чопперного типа, система управления, состоящая из блока контроллера ИЦ 616.20.00.000 и пульта управления выносного (пульта оператора) ИЦ 616.30.00.000, а также коллектор АДЦ 625.07.00.000. Отличаются автоматы друг от друга только головками сварочными накидного типа АДЦ 627.03.00.000 и АДЦ 625.03.00.000 соответственно.

Конструкция автоматов АДЦ 627 УЗ.1 и АДЦ 625 УЗ.1 при виде работы «Наладка» позволяет проводить настроечные операции (регулировка вылета неплавящегося электрода и его пространственная ориентация) перед началом процесса сварки, осуществлять выбор способа управления («Ручное» или «Автоматическое»), предварительно задавать значения всех основных параметров режима и цикла сварки.

При виде работы «Сварка» автоматы АДЦ 627 УЗ.1 и АДЦ 625 УЗ.1 обеспечивают заданные параметры цикла сварки в непрерывном режиме, режиме шагоимпульсной сварки или сварки модулированным током.

Одна из особенностей модернизированных автоматов АДЦ 627 УЗ.1 и АДЦ 625 УЗ.1 заключается в том, что система управления этих автоматов позволяет выполнять проходы дуги, следующие за первым полнокруговым, предварительно плавно регулировать и задавать (программировать) значения  $(0,5...1,0)I_{св}$  и  $(1,0...2,0)v_{св}$ , где  $I_{св}$  — сварочный ток,  $v_{св}$  — скорость сварки, задаваемые для первого полнокругового прохода, что не только расширяет технологические возможности указанных автоматов, но и позволяет эффективно осуществлять процессы многопроходной сварки способом автоопрессовки или последовательного проплавления.

Пример циклограммы процесса сварки GTAW в непрерывном режиме при выполнении двух полнокруговых проходов дуги (использовали автомат АДЦ 625 УЗ.1) приведен на рис. 2.

Таблица 1. Основные технические характеристики автоматов АДЦ 625 УЗ.1 и АДЦ 627 УЗ.1

Параметр	АДЦ 627 УЗ.1	АДЦ 625 УЗ.1
Диаметр свариваемых труб, мм	7...24	18...42
Наименьшее межтрубное расстояние, мм	58	72
Пределы регулирования сварочного тока, А:		
нижнее значение, не более	8	
верхнее значение, не менее	260	
Пределы регулирования напряжения дуги, В	7...24	
Точность поддержания заданного значения сварочного тока при колебаниях напряжения питающей сети в пределах $\pm 15\%$ от номинального и возмущениях по длине дуги не более $\pm 2,5$ мм от заданного значения, %	$\pm 2,0$	
Точность поддержания заданного значения напряжения дуги, В	$\pm 0,20$	$\pm 0,15$
Пределы регулирования скорости вращения планшайбы головки сварочной (скорости сварки), об/мин (м/ч)	0,3...10,8 (0,42...15,2; 1,36...48,80)	0,5...10,0 (1,7...33,9; 4,0...79,0)
Количество полнокруговых проходов дуги	1...4	
Номинальный диаметр вольфрамового электрода (марки ВЛ, ВИ или ВТ), мм	1,6	2,0; 3,0
Наибольшее радиальное перемещение горелки, мм	15	16
Наибольшее перемещение горелки поперек стыка, мм	$\pm 1,0$	$\pm 5,0$
Пределы регулирования длительности, с:		
продувки газа	5...25	
плавного нарастания сварочного тока	1...5	
«прогрева» места сварки	1...5	
плавного спада сварочного тока	1...5	
Регулировка длины дуги	Механический копир	АРНД

Следующей особенностью модернизированных автоматов АДЦ 627 УЗ.1 и АДЦ 625 УЗ.1 является то, что при полнокруговых проходах дуги больше двух система управления позволяет автоматически реверсировать направление вращения планшайбы головки сварочной по завершении либо каждого прохода (кроме последнего), либо первых двух проходов.

Кроме этого, модернизированным автоматам АДЦ 627 УЗ.1 и АДЦ 625 УЗ.1 присуща еще одна особенность — способность с точностью не хуже  $\pm 2,5\%$  поддерживать в процессе сварки предварительно заданные значения параметров режима сварки, оказывающих наибольшее влияние на качество сварных соединений (сварочный ток, напряжение дуги, скорость сварки).

Отработку технологии сварки GTAW соединений элементов чехла КНИ выполняли с учетом опыта разработки подобных процессов и их промышленного применения при изготовлении поглощающих вставок контейнеров хранения отработанного ядерного топлива [5], а также ранее проведенных исследований в области физико-технологических основ сварки GTAW тонкостенных тел вращения [6, 7], в результате которых были определены основные факторы, влияющие на качество сварных соединений, установлены опре-

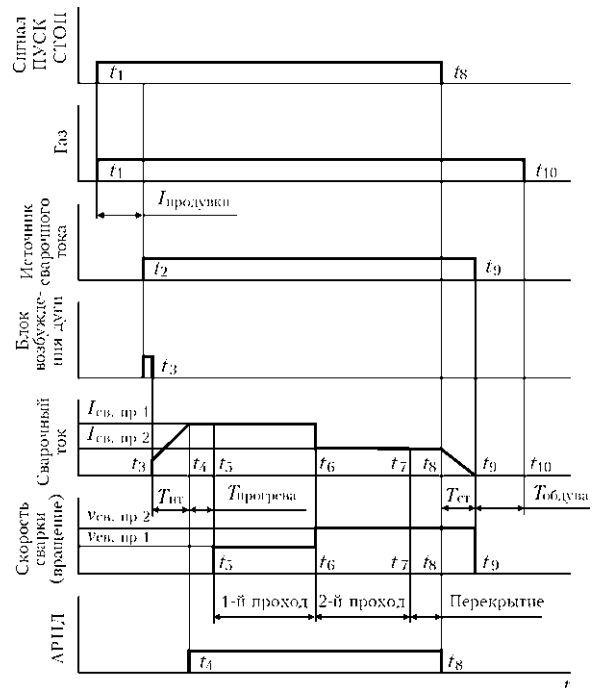


Рис. 2. Циклограмма процесса сварки GTAW:  $T_{продувки}$  — интервал времени «газ до сварки»;  $T_{нт}$  — длительность плавного нарастания сварочного тока;  $T_{прогр}$  — интервал времени «прогрев»;  $T_{ст}$  — длительность плавного спада сварочного тока («заварки кратера»);  $T_{обдува}$  — интервал времени «газ после сварки»



Таблица 2. Схемы сборки соединений элементов чехла КНИ под сварку GTAW

Соединение	Вид соединения
Хвостовик 1 – вставка 2 (шов № 1)	
Вставка 2 – гермопроход 3 (шов № 2)	
Гермопроход 3 – вставка 4 (шов № 3)	
Вставка 4 – корпус 5 (шов № 4)	
Корпус 5 – труба 6 (шов № 5)	
Труба 6 – труба 7 (шов № 6)	
Труба 7 – наконечник 8 (шов № 7)	

деляющие параметры процесса сварки GTAW стыков тонкостенных труб, предложены пути определения областей режимов сварки, обеспечивающих высокое качество сварных швов [8], рекомендованы наиболее рациональные типы сварных соединений. Анализ результатов и рекомендаций этих исследований, накопленного опыта применения сварки GTAW тонкостенных изделий, конструктивных особенностей чехла КНИ и

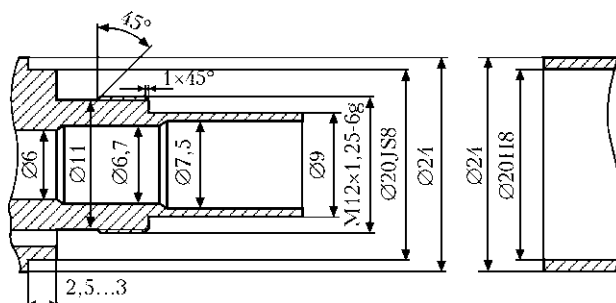


Рис. 3. Схема подготовки соединения элементов чехла КНИ (шов № 3) под сварку GTAW

его элементов, предъявляемых к ним требований позволил сделать вывод о том, что для изготовления чехла КНИ наиболее целесообразны соединения стыково-замкового типа. Исходя из этого, сварные соединения элементов чехла КНИ (см. рис. 1): хвостовика 1 со вставкой 2 (шов № 1), гермопрохода 3 со вставкой 2 (шов № 2) и вставкой 4 (шов № 3), вставки 4 с корпусом 5 (шов № 4), трубы 6 с трубой 7 (шов № 6) и трубы 7 с наконечником 8 (шов № 7) — обрабатывали как стыково-замковые, а соединение трубы 6 с корпусом 5 (шов № 5) — как нахлесточное соединение разнотолщинных деталей.

Области оптимальных значений параметров режимов сварки GTAW соединений чехла КНИ определяли путем выполнения нескольких серий опытных сварок на натурных образцах (макетах) элементов чехла КНИ. При подготовке к сварке все образцы подвергали обезжириванию, а сборку соединений под сварку производили согласно схемам, приведенным в табл. 2 и на рис. 3; при этом обеспечивалась плотная посадка (класс III, квалитет 8) сопрягаемых деталей.

Сварку соединений образцов элементов чехла КНИ выполняли с варьированием как основных параметров режима сварки (сварочного тока, напряжения и длины дуги, скорости сварки), так и параметров цикла сварки (интервалов времени «газ до сварки», «прогрев», «газ после сварки»; длительность плавного нарастания и спада сварочного тока), а также расхода инертного газа, в качестве которого применяли аргон, соответствующий ГОСТ 10157.

Для определения областей оптимальных значений параметров режимов сварки GTAW соединений труб между собой (шов № 6), трубы и наконечника (шов № 7) и трубы с корпусом (шов № 5) опытные сварки выполняли с использованием головки сварочной АДЦ 627.03.00.000. При этом сварку шва № 6 осуществляли с ориентацией оси неплавящегося электрода по нормали к продольной оси стыка, сварку швов № 7 и 5 — с некоторым смещением (до 0,5 мм) от оси стыка и наклоном неплавящегося электрода под углом  $15^\circ$  (относительно нормали) в сторону большего

Таблица 3. Основные параметры режимов и циклов однопроходной сварки GTAW соединений элементов чехла КНИ

Параметр	Соединения элементов чехла КНИ						
	Хвостовик- вставка (шов № 1)	Вставка-гер- мопроход (шов № 2)	Гермопро- ход-вставка (шов № 3)	Вставка- корпус (шов № 4)	Корпус- труба (шов № 5)	Труба-труба (шов № 6)	Труба-нако- нечник (шов № 7)
Диаметр вольфрамового электрода, мм	2,0				1,6		
Сварочный ток, А	65...80				25...28	11...15	18...20
Напряжение дуги, В	9,0...10,5						
Длина дуги, мм	1,0±0,1						
Скорость сварки, м/ч (об/мин)	22,60...31,65 (5,66...7,00)				12,0...14,3 (8,5...10,0)	11,0...15,0 (7,8...10,6)	12,0...14,3 (8,5...10,0)
Длительность, с:							
продувки газа	5,0...10,0						
плавного нарастания сварочного тока	1,0±0,2						
«прогрева» места сварки	0,8±0,1				0,70±0,05	0,40±0,05	0,60±0,05
спада сварочного тока	4,0±0,5						
обдува газом	8,0...18,0						
Расход защитного газа, л/мин	6,0...7,0						
Примечание. Марка вольфрамового электрода: ВТ, ВИ, ВЛ по ГОСТ 23949–80 или WT, WR, WR-2D фирмы «Abicor Binzel».							

теплоотвода в соответствии с рекомендациями в [5, 7].

При опытных сварках образцов остальных соединений чехла КНИ использовали головку сварочную АДЦ 625.03.00.000 с ориентацией оси неплавящегося электрода по нормали к продольной оси стыка.

Качество полученных в результате опытных сварок соединений оценивали методами неразрушающего контроля (визуально-измерительным контролем и контролем герметичности), а также путем механических испытаний, металлографических исследований, испытаний на стойкость против межкристаллитной коррозии (МКК). Визуально-измерительный контроль выполняли согласно действующей в отрасли атомной энергетики нормативной документации [9] при помощи микроскопа, лупы, бинокулярного микроскопа (увеличение 8...10) и соответствующих калибров. Контроль герметичности осуществляли с помощью масс-спектрометра и гелиевого течеискателя ПТИ-10 методом вакуумной камеры в соответствии с требованиями и методикой, приведенными в [10]. Механические испытания проводили по ГОСТ 1497 на машине испытательного типа ZDM-10 для стыко-замкового соединения чехла КНИ с наименьшим поперечным сечением по основному металлу (шов № 6). В результате механических испытаний было установлено, что усилие на разрыв для этого соединения при глубине проплавления 40...50 % составляет не менее

4807 Н (490 кгс), а при глубине проплавления 90...100 % — не менее 11380 Н (1160 кгс). Металлографические исследования выполняли на макрошлифах (вырезанных из полученных опытными сварками соединений) с использованием металлографического микроскопа при увеличении 50...100. При этом определяли глубину проплавления, наличие в металле шва таких дефектов, как неметаллические включения, поры, свищи и несплавления, структуру металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ), размеры аустенитного зерна. Испытания на стойкость против МКК металла шва и ЗТВ проводили по методу АМУ (ГОСТ 6032).

Выполнение нескольких серий опытных сварок соединений элементов чехла КНИ, всесторонний контроль качества этих соединений и системный анализ полученных результатов позволили установить, что стабильно высокое качество сварных соединений элементов чехла КНИ достигается и при однопроходной сварке GTAW (значения основных параметров режимов и циклов сварки должны соответствовать приведенным в табл. 3). Также было установлено, что при выполнении сварки GTAW любого из указанных соединений необходимо обеспечивать поддув инертного газа (аргона) внутрь чехла. Был отработан и способ устранения таких видимых дефектов сварных швов, как частичные несплавления, одиночные поры, недопустимая неравномерность проплавления (вызванных, в основном, отступле-



ниями от требований к качеству подготовки и сборки деталей под сварку), заключающийся в осуществлении второго прохода дуги либо с более низким (по сравнению с первым проходом) значением сварочного тока, либо с более высокой скоростью сварки.

Кроме этого, следует отметить, что наличие в конструкции чехла КНИ соединения «труба–труба» (шов № 6) необязательно. Его выполнение необходимо только при отсутствии поставок цельной трубы.

Для обеспечения возможности осуществления сварки GTAW соединений элементов чехла КНИ (при определении областей оптимальных значений параметров режимов и циклов сварки) в ОП «Энергоэффективность» разработан комплект технологической оснастки. Там же в условиях, приближенных к производственным, на полномасштабных макетах (экспериментальных образцах) чехлов КНИ проведено опробование разработанных в НИЦ СКАЭ процессов сварки GTAW соединений элементов чехла КНИ, которое показало, что при использовании разработанных технологий достигается стабильно высокое качество сварных соединений.

#### Выводы

1. Разработана технология однопроходной сварки GTAW соединений тонкостенных разнотолщинных тел вращения малых диаметров с применением автоматов АДЦ 627 УЗ.1 и АДЦ 625 УЗ.1 для орбитальной сварки неплавящимся электродом, обеспечивающая выполнение высококачественных стыко-замковых соединений элементов чехлов КНИ.

2. Промышленное применение разработанной технологии сварки GTAW и средств технологического оснащения позволит изготавливать КНИ и подобные им изделия на отечественных предприятиях в необходимых для атомной энергетики объемах.

1. *Камерон И.* Ядерные реакторы / Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 320 с.
2. *Широков С. В.* Физика ядерных реакторов: Навч. пос. — К.: Вища шк., 1993. — 288 с.
3. *Трофимов Н. А., Ланно В. В.* Измерение параметров теплофизических процессов в ядерной энергетике. — М.: Атомиздат, 1979. — 224 с.
4. Одно- и многопостовые системы для автоматической сварки неповоротных стыков трубопроводов атомных электростанций / Н. М. Махлин, А. Е. Коротынский, В. А. Богдановский и др. // Автомат. сварка. — 2011. — № 11. — С. 34–44.
5. Применение автоматической орбитальной сварки при изготовлении поглощающих вставок контейнеров хранения отработанного ядерного топлива / В. А. Богдановский, В. М. Гавва, Н. М. Махлин и др. // Там же. — № 12. — С. 41–45.
6. *Ищенко Ю. С.* Физико-технологические основы формирования швов в процессе дуговой сварки // Сварка в атомной промышленности и энергетике: Тр. НИКИМТ. — М.: ИздАТ, 2002. — Т.2. — С. 204–240.
7. *Букаров В. А.* Технология дуговой автоматической сварки в защитных газах // Там же. — Т.1. — С. 149–210.
8. *Полосков С. И., Букаров В. А., Ищенко Ю. С.* Влияние отклонений параметров режима аргодуговой сварки неповоротных стыков на качество сварных соединений // Сварка и смежные технологии: Сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф., Москва, сент. 2000. — М.: МЭИ, 2000. — С. 22–25.
9. *Унифицированная методика контроля основных материалов (полуфабрикатов) сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Визуальный и измерительный контроль ПН АЭ Г-7-016–89 / Госатомнадзор СССР.* — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 4 с.
10. *Унифицированная методика контроля основных материалов (полуфабрикатов) сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Контроль герметичности. Газовые и жидкостные методы ПН АЭ Г-7-019–89 / Госатомнадзор СССР.* — Там же. — 34 с.

Поступила в редакцию 27.03.2013

### НОВАЯ КНИГА

**Сидорец В. Н., Пентегов И. В. Детерминированный хаос в нелинейных цепях с электрической дугой.** — Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013. — 272 с.

Монография посвящена изложению результатов исследования фундаментальных свойств электрической дуги как нелинейного элемента электрических цепей. Описаны выявленные закономерности и механизмы возникновения детерминированного хаоса в этих цепях и сценарии его развития. Особое внимание уделено оригинальным математическим методам исследования нелинейных динамических систем. Все полученные результаты наглядны и достаточно подробно проиллюстрированы.

Рассчитана на широкий круг специалистов в областях теоретической электротехники и нелинейных динамических систем, может быть полезна ученым, аспирантам и студентам.

