

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРЕОБРАЗУЕМОГО ОБЪЕМА КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Л.М. ЛОБАНОВ, В.С. ВОЛКОВ

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

Необходимость проведения представленных исследований обусловлена актуальной задачей оптимизации процесса изготовления сварных конструкций преобразуемого объема, предназначенных для длительной эксплуатации в экстремальных условиях космического пространства. Проведены сравнительные исследования упругопластических свойств, а также микроструктурный анализ и микромеханические исследования сварных соединений конструкций преобразуемого объема из фольговых материалов, полученных при различных комбинациях параметров импульсных режимов микроплазменной сварки. Показана возможность создания многосекционной конструкции преобразуемого объема, способной сохранять стабильность служебных характеристик в условиях действия факторов космического пространства при долгосрочной экспозиции. Определены и подтверждены экспериментальным путем оптимальные условия формирования неразъемных соединений тонких преобразуемых оболочек из стали аустенитного класса, сочетание физико-механических свойств и структурных особенностей которых максимально приближено к аналогичным свойствам основного металла. Результат представленной работы демонстрирует возможность изготовления конструкций преобразуемого объема с заданными свойствами сварных соединений, оптимизированной для длительной эксплуатации под действием неисследованного ранее сочетания эксплуатационных и внешних факторов. Проведены сравнительные исследования упругопластических свойств, а также микроструктурный анализ и микромеханические исследования сварных соединений конструкций преобразуемого объема из фольговых материалов, полученных при различных комбинациях параметров импульсных режимов микроплазменной сварки. Определены оптимальные условия формирования неразъемных соединений тонких преобразуемых оболочек из сталей аустенитного класса. Показана возможность создания многосекционной конструкции преобразуемого объема КПО, способной сохранять стабильность служебных характеристик при долгосрочной экспозиции в экстремальных условиях эксплуатации. Библиогр. 7, рис. 6.

Ключевые слова: конструкции преобразуемого объема, тонкие несущие оболочки, микроплазменная сварка

Разработанные в Институте электросварки им. Е.О. Патона конструкции преобразуемого объема (КПО) представляют собой несущие структуры на основе выпуклых замкнутых оболочек нулевой гауссовой кривизны, способные неоднократно и в широких пределах изменять один из своих габаритных размеров, сохраняя при этом пространственную жесткость, устойчивость и целостность материала поверхности. Подобные свойства несущих оболочек делают возможным их применение в космической отрасли, где доставка конструкции

на околоземную орбиту в компактном виде может стать решением проблемы оптимизации ее массогабаритных характеристик.

В качестве конструкционного материала оболочки используют металлы определенного диапазона упругопластических свойств, в частности, с отношением предела текучести σ_T к пределу прочности σ_B в диапазоне $\sigma_T/\sigma_B = 0,3 \dots 0,8$. Это алюминиевые сплавы, высоколегированные аустенитные стали, титан и др. Очевидно, что сварка является практически единственным методом построения

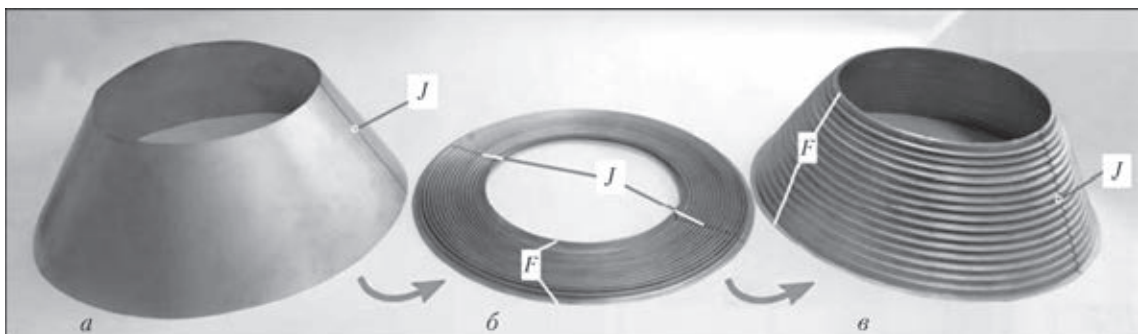


Рис. 1. Стадии изготовления преобразуемой конической оболочки КПО, иллюстрирующие характер технологического деформирования ее сварных соединений J (F — фланцевая отбортовка для последующей сварки оболочек в единую структуру)

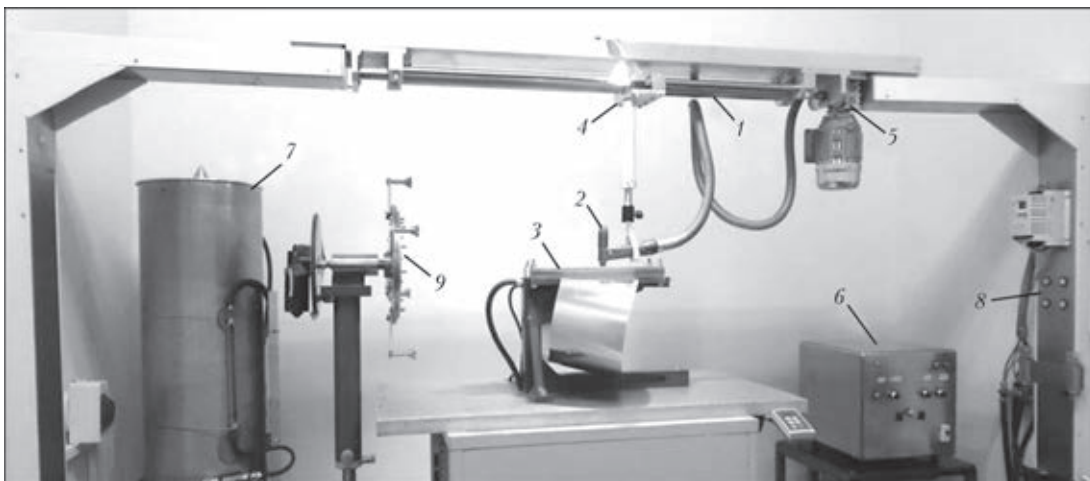


Рис. 2. Экспериментальный стенд для сварки заготовок преобразуемых оболочек из фольговых материалов: 1 — механизм перемещения; 2 — плазматрон; 3 — сборочно-сварочная оснастка с конической заготовкой оболочки КПО; 4 — каретка механизма перемещения; 5 — двигатель с редуктором; 6 — источник питания микроплазменной сварки; 7 — теплообменный модуль плазматрона; 8 — автоматическая система позиционного регулирования параметров сварочного процесса; 9 — приспособление для сварки кольцевых швов КПО

металлических вакуумплотных оболочечных конструкций. Одной из основных проблем при создании оболочек КПО является достижение сочетания высоких физико-механических характеристик при одновременной вакуумплотности сварных швов, которые подвергаются комплексу воздействий механических нагрузок и специфических агрессивных внешних факторов. Целью проведенных исследований являлось определение оптимальных условий формирования неразъемных соединений тонких преобразуемых стальных оболочек КПО, способных обеспечить служебные характеристики конструкции в экстремальных условиях эксплуатации.

На рис. 1 представлены стадии изготовления структурного элемента КПО конического типа, включающие сварку прямолинейных швов заготовки (рис. 1, а) и ее последующее преобразование в плоский гофрированный диск (рис. 1, б) с помощью разработанной в ИЭС технологии холодного объемного деформирования. В качестве материала использовали стальную ленту AISI 321 с толщиной $\delta = 0,15 \dots 0,17$ мм, наибольший диаметр оболочки 400 мм. Близость подобного преобразования к изометрическому позволяет вернуть диск к исходной конической форме (рис. 1, в), создав после герметизации контура избыточное давление в его внутренней полости. При этом малые остаточные пластические деформации в вершинах кольцевых ребер формируют гофры, значительно увеличивающие жесткость структурных конических элементов и несущую способность конструкции в целом.

Схема изометрического преобразования оболочки, описываемая семейством непрерывных отображений ее нейтральной поверхности, подразумевает изотропность конструкционного ма-

териала последней; следовательно, сварной шов должен иметь практически эквивалентные с основным металлом конструкции физико-механические свойства. Технология объемного деформирования разработки ИЭС подразумевает непрерывное движение формирующего органа (пуансона) по поверхности оболочки, к которой он прилагает формирующее усилие. Тем не менее, геометрия шва (усиление) не имеет решающего значения, так как пуансон при вращении оболочки контактирует с корнем шва и главная технологическая задача состоит в создании качественного сварного соединения с заданными характеристиками пластичности и прочности.

При создании КПО космического назначения с целью снижения массы используют минимальные толщины конструкционных материалов оболочки, при которых может быть обеспечена необходимая прочность конструкции без потери ее функциональных качеств. При выборе способа сварки стыковых соединений из нержавеющей стали и титана с толщинами $\delta = 0,1 \dots 0,2$ мм предпочтение было отдано микроплазменной сварке. Она позволила значительно упростить подготовку торцов развертки конической заготовки под сварку, увеличив тем самым производительность изготовления КПО, и уменьшить тепловые деформации сварного шва при использовании предварительной отбортовки свариваемых кромок.

При сварке заготовок из нержавеющей стали с толщиной $0,15 \dots 0,17$ мм была применена отбортовка кромок на величину, равную двум толщинам материала. Кроме того, микроплазменная сварка позволила обеспечить практически полную повторяемость зафиксированного результата сварки, что можно объяснить менее жесткими, в сравнении с лазерной сваркой, требованиями к точности

механизма перемещения источника сварочного нагрева.

Для изготовления серии преобразуемых конических оболочек создан сварочный стенд (рис. 2), в котором проблемы обеспечения прецизионной сборки и сварки фольговых материалов решены на конструктивном уровне, с минимальным использованием унифицированных деталей и узлов высокой стоимости, реализуемых в современных системах аналогичного назначения [1]. В частности, сборка механизма перемещения с шариковинтовой передачей качения (ШВП) была проведена из отдельных комплектующих, объединенных в единый узел с точностью взаимной фиксации ± 10 мкм. При этом предусмотрены регулировки, позволяющие корректировать положение всей системы перемещения 1 с плазмотроном 2 относительно плоскости сборочно-сварочной оснастки 3 с точностью ± 25 мкм по каждой из трех координат. Плавающее крепление горелочного узла к каретке механизма перемещения 4 устраняет нежелательные вибрации плазмотрона при сварке, а сочетание характеристик двигателя, редуктора с полым валом 5 и частотного преобразователя позволило избежать отклонений скорости сварки в диапазоне 1...25 мм/с, связанных с кинематической погрешностью эвольвентной зубчатой передачи. В состав оборудования входит источник питания микроплазменной сварки 6 разработки ИЭС, обеспечивающий высокую стабильность характеристик при токах сварки 1 А и выше.

Оригинальные разработки института использованы также при проектировании узлов плазмотрона, системы его охлаждения и сборочно-сварочного приспособления, обеспечивающего бездеформационную сварку и эффективную защиту неразъемных соединений из металлов фольгового класса.

Определение диапазона погонных энергий, на которых при использовании микроплазменной сварки возможно устойчивое формирование качественных прямолинейных неразъемных соединений из металлической ленты фольгового класса, не представляет особых трудностей и описано в работах [2–4]. Вместе с тем соответствие указанному диапазону может достигаться при различных режимах сварки (на постоянном токе либо в импульсном режиме) и в различных комбинациях параметров импульсных режимов (рис. 3), определяющих различную степень неоднородности микроструктуры и распределения легирующих элементов в металле шва и околосшовной зоны, а также отклонений микротвердости в сечении шва. При прочих равных условиях оптимальность указанных характеристик, а также их сочетание с наилучшими упругопластическими и прочност-

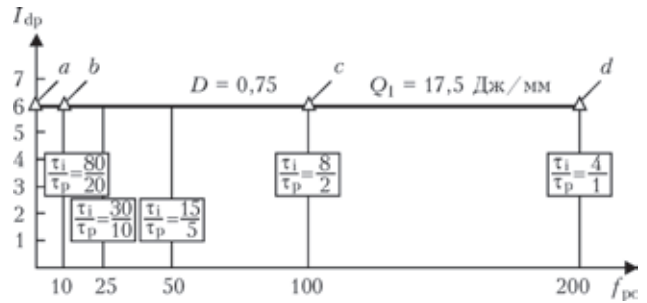


Рис. 3. Комбинации параметров импульсных режимов при микроплазменной сварке преобразуемой конической оболочки из стальной ленты марки AISI 321 толщиной 0,17 мм ($I_{др}$ — ток прямой полярности, А; $f_{рс}$ — частота импульсного тока, Гц; τ_i — длительность импульса тока, мс; τ_p — длительность паузы, мс; Q_l — погонная энергия сварки, Дж/мм; $D = \tau_i / (\tau_i + \tau_p)$ — коэффициент заполнения; a, b, c, d — базовые комбинации параметров)

ными свойствами неразъемных соединений являлась основным критерием выбора между различными группами параметров сварочного процесса.

Определение оптимальных параметров сварочного процесса и последующее изготовление тонкостенных элементов (секций) КПО проводили на специально спроектированной сборочно-сварочной оснастке, обеспечивающей жесткую фиксацию кромок конических заготовок из фольги на длине в несколько десятков сантиметров при отсутствии сварочных депланаций, эффективный отвод тепла от зоны шва и максимальную простоту сборочной операции (рис. 2, 3). Защита корня шва с его одновременным принудительно-конвективным охлаждением достигалась нагнетанием инертного газа через серию последовательных отверстий переменного сечения в защитном канале, сопряженным с коллектором. Глубина, сечение и конфигурация отверстий, а также чистота обработки их кромок позволяют достигнуть на всей протяженности корня шва практически ламинарного истечения с полным раскрытием струй и с равными скоростями потока для защитных газов различной плотности при их расходе в диапазоне 5...10 дм³/мин. При заданном значении тока $I_{др}$ и коэффициента заполнения D корректировка погонной энергии Q_l на разных частотах $f_{рс}$ обеспечивалась изменением объемных расходов плазмообразующего и защитного газов при их неизменном оптимальном соотношении, полученном для избранных параметров плазмотрона эмпирическим путем и равном приблизительно 0,32 при использовании аргона. Ограничение частоты импульсного тока значением $f_{рс} = 200$ Гц связано с необходимостью поиска оптимальных критериев качества соединений в диапазоне параметров источника, не вызывающих быстрого износа электрода и камеры плазмообразования плазмотрона и, как следствие, нарушения стационарного режима сварки.

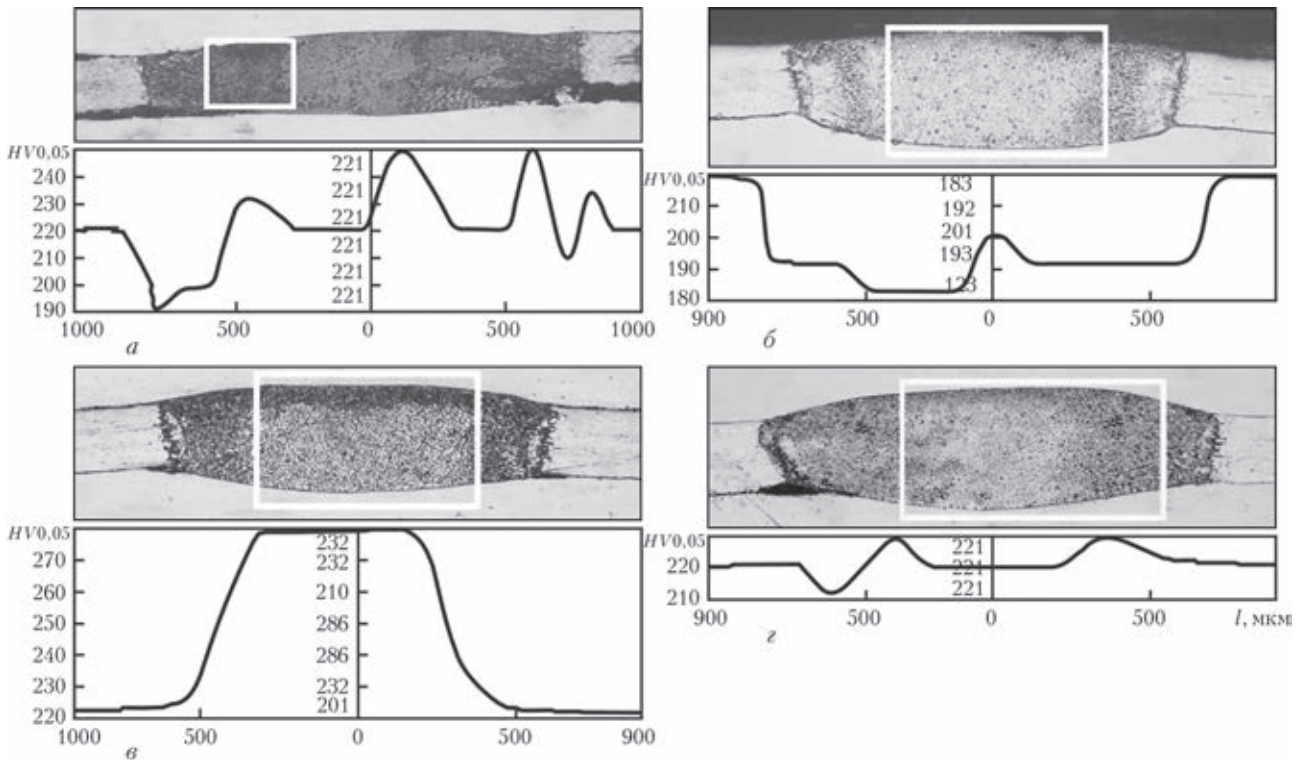


Рис. 4. Результаты металлографических исследований серии образцов сварных соединений фольги толщиной 0,17 мм из стали AISI 321, выполненных при равных значениях погонной энергии способом микроплазменной сварки на постоянном токе прямой полярности (а) и на импульсном токе частотой 10 (б), 100 (в) и 200 Гц (г) (на нулевой точке диаграмм (середина шва) отмечены значения микротвердости HV по вертикальной оси швов)

Результаты металлографических исследований характерных образцов из серии сварных соединений, полученных при соответствующих диаграмме рис. 3 комбинациях параметров, представлены на рис. 4. Определяли характер неоднородностей металла шва, околошовной зоны и основного металла оболочки при вариациях отношения τ_i/τ_p , соответствующих различной частоте импульсного тока, а также в случае сварки постоянным током прямой полярности при заданном значении погонной энергии во всех исследуемых комбинациях.

Металлографические исследования, проведенные на микроскопе «Neophot-32», иллюстрируют наибольшую структурную неоднородность серии образцов, выполненных на постоянном токе прямой полярности (рис. 4, а). Микроструктура шва по всему его сечению характеризуется неравно-

мерностью и несоосностью кристаллитов с разбросом их размеров по ширине у линии сплавления от 5 до 7,5 мкм и от 4...5 мкм в центре шва до 25 мкм у корня шва. Отклонения микротвердости шва и переходных зон, измеренной по Виккерсу на микротвердомере Лесо М-400, при сварке на постоянном токе также являются наибольшими — от 1920 до 2570 МПа при значении параметра 2210 МПа для основного металла оболочки (рис.4, а, снизу).

Микроструктура образцов, выполненных на импульсном токе с коэффициентом заполнения $D = 0,75$ при частоте 10 (рис. 4, б), 100 (рис. 4, в) и 200 Гц (рис. 4, г), характеризуется значительно более высокой однородностью и соосностью ячеек при одновременном уменьшении отклонений микротвердости по горизонтальной оси шва. В частности, в серии образцов (рис. 4, г, 200 Гц) отмечены наилучшие сочетания исследуемых параметров — размер равноосных ячеек соответствует диапазону 5...7 мкм во всем сечении шва, отклонение измеренной величины микротвердости в любом из направлений сечения не превышает 5 % ее значения для основного металла.

При сравнении представленных результатов с результатами испытаний серии аналогичных группам рис. 4, а–г образцов на статическое растяжение и испытаниям на изгиб, моделирующим реальные условия эксплуатации, отмечено приближение упругопластических свойств для ос-

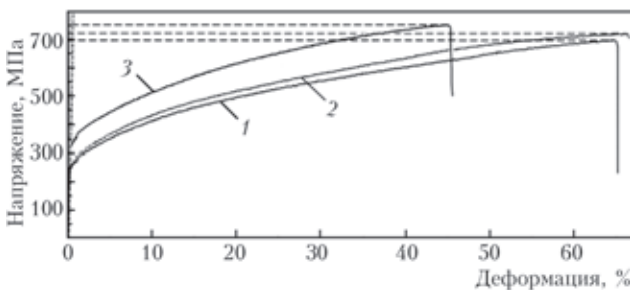


Рис. 5. Диаграммы растяжения образца фольги толщиной 0,17 мм из стали AISI 321 без сварного шва (1) и аналогичных образцов, выполненных на импульсном токе $f_{pc} = 200$ Гц (2) и на постоянном токе прямой полярности (3)

нового металла и сварных соединений при увеличении частоты импульсного тока. Так, для характерного образца ленты AISI 321 толщиной 0,17 мм со сварным швом, выполненном при импульсном токе $f_{pc} = 200$ Гц, временное сопротивление разрыву $\sigma_b = 724,5$ МПа, условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 256,5$ МПа (рис. 5, 2); для аналогичного образца без сварного шва $\sigma_b = 699,7$ МПа, $\sigma_{0,2} = 259,2$ МПа (рис. 5, 1). Разница приведенных характеристик не превышает погрешности измерения испытательной системы MTS® 318.25, использованной для получения экспериментальных данных. Характерная диаграмма растяжения для образцов, выполненных на постоянном токе прямой полярности, приведена на рис. 5, 3 ($\sigma_b = 753,4$ МПа и $\sigma_{0,2} = 289,3$ МПа).

Отмеченное выше уникальное сочетание технологических и внешних факторов при эксплуатации КПО не позволяет ограничиться стандартными методами контроля при оценке качества ее сварных соединений. Вакуум космического пространства, вызывающий в совокупности с воздействием радиации десорбцию элементов материала оболочки, может лишь условно считаться химически нейтральной внешней средой; при переходе светотеневых границ на поверхности конструкции возможно образование конденсата с включениями активных веществ, присутствующих в собственной внешней атмосфере базового для КПО космического аппарата. Недопустимые по этой причине проявления межкристаллитной коррозии, поры и микротрещины могут быть определены возможностями оптической микроскопии, а также проводимым на разных стадиях изготовления КПО капиллярным, вихретоковым анализом и гелиевой пробой. Тем не менее продолжительность действия указанных внешних факторов (до нескольких лет), циклические деформации от колебаний температур с диапазоном до 275 °С, а также собственно влияние высоких и низких температур требуют прогнозирования стабильности свойств сварных соединений путем их углубленного изучения на всех структурных уровнях. При оценке качества сварных соединений реализован комплексный методический подход к исследованиям сварных соединений на макро- и микроуровне, прошедший успешную апробацию в ИЭС им. Е.О. Патона.

Совместно с металлографическими исследованиями провели оценку распределения легирующих элементов в металле шва методом микрорентгеноспектрального анализа; использовали микроанализатор Camebax SX-50 (Cameca®) с диаметром зонда около 1 мкм при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе зонда 20 нА. Запись кривых распределения легирующих элементов проводили по высоте шва и по его нейтральной

поверхности. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что количество легирующих элементов (в мас. %) в металле шва и переходных зонах образцов рис. 4, б–г (импульсный ток) практически соответствует аналогичным параметрам основного металла.

Заключительной стадией оценки качества сварных соединений фольговых материалов являлись исследования их тонкой структуры, основанные на представлении об определяющем влиянии структурно-фазового состояния металла соединения на его физико-механические свойства [5–7]. При исследованиях дислокационных структур, дислокационной плотности и равномерности ее распределения, в том числе при изучении структурных условий, способствующих появлению локальных внутренних напряжений в металле шва, использовали метод просвечивающей микродифракционной электронной микроскопии (JEM-200CX, «JEOL»). Результаты исследований позволяют сделать вывод о снижении локализованных деформаций и структурных напряжений в образцах, выполненных при использовании импульсного тока с большей частотой. На основании экспериментально-расчетных оценок вклада структурных и фазовых образований околошовной зоны в показатели пластичности и прочности были откорректированы параметры технологического процесса сварки. Результаты работы позволяют сделать заключение о возможности сочетания критериев качества рассмотренных неразъемных соединений в диапазоне параметров сварочного процесса, соответствующих частотам импульсного тока сварки $f_{pc} = 100 \dots 200$ Гц.

Оптимальный алгоритм преобразования КПО конического типа соответствует пропорциям определяющих размеров, при которых в раскрытом положении отношение высоты конической секции к ее диаметру не превышает значения 0,5. Отсюда необходимость создания конструкции большей длины или объема требует объединения множества секций в единую структуру путем их сварки по сопрягающимся контурам. Решение задачи устойчивости многосекционной КПО космического назначения и расчетная оценка ее деформативности позволяют определить требования к конфигурации и жесткости сварных соединительных элементов конических секций, в особенности, элементов меньшего диаметра, испытывающих наибольшие удельные нагрузки. Функциональное назначение кольцевых сварных соединений не ограничивается поддержанием целостности, механической прочности и вакуумплотности многосекционной длиномерной конструкции; требуемые демпфирующие свойства последней могут быть обеспечены особенностями профиля кони-

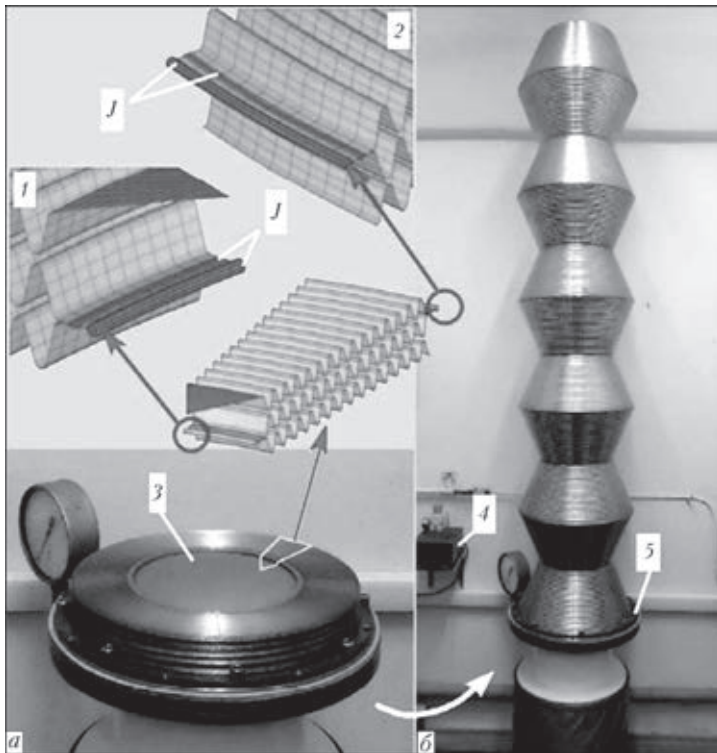


Рис. 6. Коническая КПО из одиннадцати оболочек в компактном (а) и раскрытом (б) положениях. Слева сверху — модели сегментов конструкции с внутренним (1) и наружным (2) кольцевыми сварными соединениями J (3 — замыкающий элемент; 4 — компактный компрессор с мановакуумметром; 5 — жесткий вакуумплотный контур стенда раскрытия)

ческих поверхностей КПО в сочетании с жесткостью кольцевых соединительных элементов. Сварка конических секций по периметрам оснований объединяет их смежные фланцевые отбортовки (рис. 1, F) в единый элемент жесткости — кольцевой шпангоут, эффективность которого зависит в большей степени от ширины кольца, а не от его суммарной толщины, а также от характера сварного соединения. В частности, в рассматриваемой КПО при сварке отбортовок меньшего диаметра с расчетной шириной 6 мм на разработанном ротационном приспособлении (рис. 2, 9) требуемый результат достигается применением комбинированного шва — прорезного с фиксацией оси плазмотрона по нормали к плоскости фланца, а затем торцевого, при ориентации оси плазмотрона по линии радиуса плоского гофрированного диска.

Многосекционная коническая КПО в компактном и раскрытом положении на испытательном стенде раскрытия представлена на рис. 6. Приведенные модели сегментов (1, 2) иллюстрируют схему выполнения сварных соединений, позволяющую связать периметры конических секций в жесткий кольцевой элемент конструкции. Вакуумплотное соединение торцевой конической секции с замыкающим элементом (донышком) (рис. 6, 3), имеющим толщину материала $\Delta = 6 \dots 8\delta$, где δ — толщина материала оболочки конструкции,

реализуется предварительной сваркой периметра секции с кольцом промежуточной толщины $\delta_1 = (\Delta + \delta)/2$. Кольцевые сварные соединения конической КПО, в отличие от прямолинейных швов конструкции, не подвергаются значительным технологическим и эксплуатационным деформациям и испытывают незначительные нагрузки от внутреннего избыточного давления раскрытия, не превышающего величины 50 кПа. Соединения могут быть выполнены микроплазменным способом в импульсном режиме при условии корректировки схемы подачи защитного газа для торцевых швов (рис. 6, J).

Наземный цикл испытаний конструкции ориентирован в первую очередь на изучение кинетики процесса раскрытия в заданном временном интервале и в условиях, с возможной достоверностью приближенных к условиям невесомости орбитального полета. Конструкция вакуумплотного контура (рис. 6, 5) позволит проводить тестовые раскрытия длинномерной КПО в различных пространственных положениях, осуществляя ее обезвешивание одновременно с моделированием регламентированных вибрационных воздействий и проведением модального анализа. Запланированные

вакуумные испытания с имитацией тепловых нагрузок в условиях космоса позволят оценить термооптические свойства поверхности КПО и граничные температуры, которые на ней достигаются, что позволит уточнить величины возникающих в оболочке напряжений и, при необходимости, откорректировать конфигурацию кольцевых соединительных элементов штатной конструкции. При этом герметичность (вакуумплотность) компактной многосекционной оболочки может эффективно подтверждаться современными средствами неразрушающего контроля.

Результат представленной работы демонстрирует возможность изготовления КПО с заданными свойствами сварных соединений, оптимизированной для длительной эксплуатации под действием неисследованного ранее сочетания факторов. По этой причине наибольший интерес представляет запланированная апробация конструкции в условиях орбитального полета, которые могут прогнозироваться, но не могут быть воспроизведены при наземных испытаниях.

Выводы

1. Определены и подтверждены экспериментальным путем оптимальные условия формирования неразъемных соединений преобразуемых оболочек из

фольги марки AISI 321, сочетание физико-механических свойств и структурных особенностей которых максимально приближено к аналогичным свойствам основного металла и должно обеспечить рабочие характеристики конструкции в экстремальных условиях эксплуатации.

2. Создан комплекс технологического оборудования, обеспечивающий в условиях опытного производства бездефектную микроплазменную сварку вакуумплотных неразъемных соединений из фольговых материалов.

3. Описаны подходы к созданию многосекционной КПО, способные гарантировать работоспособность конструкций данного класса при долговременной экспозиции в экстремальных эксплуатационных условиях.

1. *Mikrofügetechnik GmbH*. Automation + Application Technology. Available at: <http://media.mig-o-mat.com/>
2. *Микроплазменная сварка* / Б.Е. Патон, В.С. Гвоздецкий, Д.А. Дудко и др. – Киев: Наук. думка, 1979. – 248 с.
3. *Microjoining and nanojoining* / Ed. Y.(Norman) Zhou. – Cambridge: Woodhead publ., 2008. – 832 p.
4. *Лобанов Л.М., Волков В.С.* Разработка технологии изготовления двухстенчатой сварной конструкции преобразуемого объема // Автомат. сварка. – 2012. – № 10. – С. 37–42.
5. *Welding and Surfacing Reviews* / Ed. B.Paton, L. Lobanov. – Pt 1. Welded Structures. – Taylor & Francis, 1997. – 300 p.
6. *Evans G.M., Bailey N.* Metallurgy of basic weld metal. – Cambridge: Woodhead publ., 1997. – 432 p.
7. *Investigation of the structural and chemical heterogeneity in welding of different groups of metallic materials* / Ye.V.Nikitina, V.A.Frolov, V.V. Stepanov et al. // Welding International. – 2014. – 28, № 10. – P. 793–798.

Поступила в редакцию 18.11.2014

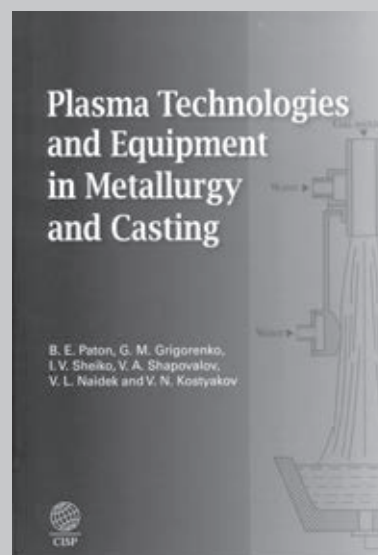
НОВАЯ КНИГА

PLASMA TECHNOLOGIES and EQUIPMENT in METALLURGY and CASTING. B.E. PATON, G.M. GRIGORENKO, I.V. SHEIKO, V.A. SHAPOVALOV, V.L. NAIDEK, V.N. KOSTYAKOV. – Cambridge Intern. Sci. Publ. Lmd., 2015. – 612 p.

Книга представляет собой авторизированный перевод на английский язык монографии «Плазменные технологии и оборудование в металлургии и литейном производстве» / Б.Е. Патон, Г.М. Григоренко, И.В. Шейко, В.А. Шаповалов, В.Л. Найдек, В.Н. Костяков.

В ней приведены научные и прикладные аспекты применения плазменных источников нагрева (плазмотронов) в металлургическом и литейном производстве. Рассмотрены основные типы плазмотронов, используемые для плавки металлов и обработки металлических расплавов в лабораторных и промышленных условиях. Показано промышленное применение плазменных источников нагрева, на базе которых разработаны новые металлургические процессы и технологии. Описаны конструкции плавильных печей на керамическом поду и переплавных печей с формированием слитка в охлаждаемом кристаллизаторе, установок для рафинирующего переплава поверхностного слоя слитков, выращивания монокристаллов тугоплавких металлов и др. Приведены результаты сравнения качества металлов и сплавов, выплавленных с применением различных технологий.

Для научных и инженерно-технических работников металлургических предприятий и литейного производства, а также для преподавателей, аспирантов и студентов высшей школы соответствующих специальностей.



Заказы на книгу просьба направлять в редакцию журнала «Автоматическая сварка».