

ствия ТПА при различной высоте орбиты. Анализ графиков показывает, что при мощности до 4—5 кВт зависимость высоты орбиты от геометрических размеров системы незначительна. Для более высоких орбит эта зависимость усиливается.

Необходимо отметить, что на высоте порядка 900—1000 км геометрические размеры системы «зеркало — приемник» принимают свои максимальные значения, после чего с удалением орбиты они уменьшаются. Проводить расчеты по этой методике для  $H > 10000$  км нецелесообразно, так как в этом случае необходимо учитывать нахождение аппарата в полутени планеты.

Знание оптимальных геометрических размеров системы «зеркало—приемник» крайне важно, прежде всего в связи с массогабаритными ограничениями, а также в связи с высокими значениями потерь через апертурное отверстие приемника.

1. Баум В. А., Апариси Р. Р., Тепляков Д. И. Об объективной оценке точности оптических систем солнечных установок // Теплоэнергетика.—1960.—Вып. 2.—С. 148—152.

2. Грилихес В. А., Матвеев В. М., Полужков В. П. Солнечные высокотемпературные источники тепла для космических аппаратов. — М.: Машиностроение, 1975.—248 с.
3. Кудрин О. И. Солнечные высокотемпературные космические электродвигательные установки. — М.: Машиностроение, 1987.—248 с.
4. Фаворский О. Н., Фишгойт В. В., Янтовский Е. И. Основы теории космических электродвигательных установок. — М.: Высш. шк., 1970.—485 с.

#### OPTIMIZATION OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF RECEIVER FOR BRAYTON CYCLE SPACE SOLAR POWER SYSTEM

L. I. Knysh, V. A. Gabrinets

Optimization of geometrical parameters of receiver for Brayton cycle Space Solar power system is considered. A thermal energy storage module with a phase-change material combines with a receiver of solar energy. Geometrical performance coefficient is considered as main value. Performance coefficient of device concentration and reception, radius of reflector and radius of aperture are determined in this paper too, if the parameters of cycle and the value of useful electric power is known.

УДК 621.791

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ КОЛЕЦ ТОРЦОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ ТУРБОНАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ

© А. В. Кулик

Дніпропетровський національний університет

Розглядається технологія дифузійного зварювання ущільнювальних кілець із пірографіту та сталі.

Как известно [1, 2], узел торцового уплотнения состоит из уплотнительного кольца, соединенного с обоймой и контркольца (рис. 1). Торцовые поверхности уплотнительного кольца и контркольца образуют плоскую пару трения. Зазор между ними определяет величину утечки газа или жидкости, находящихся в машине под давлением.

В разрабатываемом торцовом уплотнении уплотнительное кольцо (рис. 2), выполненное из пирографита ПГИ, необходимо качественно соединить с заготовкой ползуна (обоймы), выполненного из бронзового сплава, с применением промежуточной прокладки из хромоникелевой стали.

В зависимости от назначения и рабочих условий эксплуатации графит используют совместно с различными металлическими материалами, отличающимися по составам и физико-химическим свойствам. Поэтому в каждом конкретном случае при

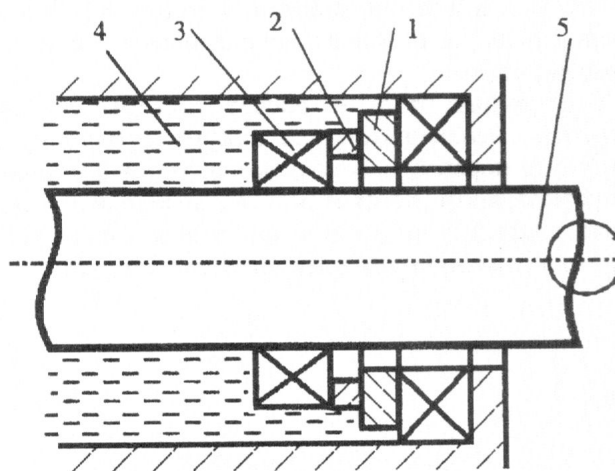


Рис. 1. Схема торцового уплотнения: 1 — контркольцо; 2 — уплотнительное кольцо; 3 — обойма; 4 — рабочая среда; 5 — вал

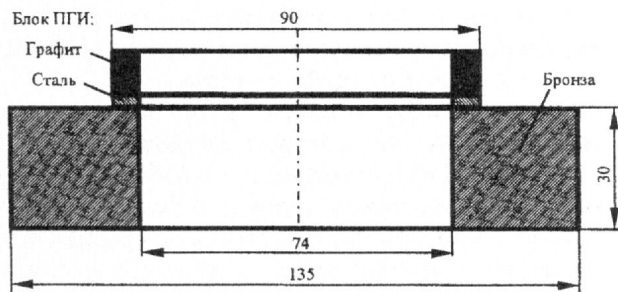


Рис. 2. Схема разрабатываемой заготовки уплотнительного кольца

решении поставленных задач требуется различный подход к выбору способа соединения, технологической подготовки материалов под сварку или пайку, к выбору промежуточных материалов и режимов сварки и пайки [3, 4].

Трудности соединения графитовых материалов с металлами связаны с существенным различием их теплофизических и физико-механических характеристик и особенно коэффициента термического расширения (КТР). Различия КТР, например, нержавеющих сталей, меди и ее сплавов (бронз) достигают 3-5 раз. В результате этих различий при соединении графитов с металлами методами сварки и пайки возникают значительные напряжения, в результате воздействия которых происходит разрушение графитовой детали в зоне соединения.

При разработке соединений графитовых и металлических деталей в конструкциях изделий появляются дополнительные трудности, обусловленные размерами и формой соединяемых деталей. При переходе от сварки образцов к конкретным деталям (с увеличением размеров) часто не удается получить качественное соединение графита с металлом по причине разрушения графитовой детали от значительных напряжений в зоне соединения. Поэтому при конструировании и изготовлении узла соединения необходимо принимать меры для снижения уровня напряжений.

Кроме того, на надежность соединения графита с металлами оказывает влияния и условия эксплуатации: длительность, высокая и низкая температура, резкая и многократная смена температурных условий, агрессивность среды и др. Поэтому технологический процесс соединения графитовых деталей с металлами часто бывает сложен, дорогостоящ, так как связан с применением различных способов соединения и технологических приемов, промежуточных элементов и операций, оснастки и приспособлений. Более простые способы соедине-

ния часто не обеспечивают достаточный выход годной продукции.

Произведенные эксперименты по разработке соединения кольца ПГИ с обоймой (рис. 2) методом диффузионной сварки показали невозможность получения такого соединения непосредственно, за один прием, так как на оптимальных режимах сварки для соединения графитового кольца с прокладкой происходит значительная пластическая деформация заготовки бронзового ползуна в зоне контакта. Требуемая температура сварки ПГИ + сталь близка к температуре плавления бронзы ( $T_{пл} = 1000^\circ\text{C}$ ), и с приложением сварочного давления бронза «плавает», что исключает возможность соединения контактных поверхностей. Предварительная сварка уплотнительного кольца ПГИ с прокладкой и последующая сварка с заготовкой ползуна не дала положительных результатов по тем же причинам. В связи с этим технологический процесс создания приведенной конструкции осуществляется в два этапа. На первом этапе отработывалась технология соединения кольца ПГИ с промежуточной прокладкой из хромоникелевой стали (блок ПГИ) с последующей его пайкой с заготовкой ползуна из бронзового сплава.

#### 1. ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКИ БЛОКА ПГИ

Для изготовления блока ПГИ согласно чертежу (рис. 2) использовались заготовки пирографита в виде колец  $\varnothing 90 \times 74$  толщиной 6—8 мм и стали в виде колец  $\varnothing 89.5 \times 74$  толщиной 2—4 мм. Стальные кольца изготавливались из поковки путем механической обработки.

На основании результатов проведенных исследований при отработке технологии диффузионной сварки колец ПГИ с хромоникелевыми стальными, учитывая, что последние являются промежуточной прокладкой для соединения с бронзовыми с сильно различными коэффициентами термического расширения, предусматривались следующие меры снижения напряжений в сварных соединениях:

- подбор материала промежуточной прокладки максимально приближающегося по своим КТР к графиту во всем интервале температур сварки и позволяющего создать переходную зону с переменным КТР;
- промежуточная прокладка должна быть пластичной с пределом упругости, близким или ниже, чем у пирографита;
- выбор оптимальной конструкции соединения,

- приводящей к снижению напряжений;
- создание неравномерного температурного поля при сварке, при котором графитовая деталь нагревается до более высокой температуры чем стальная деталь;
- максимально возможное снижение температуры сварки.

Качество подготовки контактных поверхностей графита и стали при сварке оказывает значительное влияние на прочность соединения. Для сварки контактные поверхности тщательно обрабатывались с обеспечением плоскопараллельности не менее 0.05 мм и дальнейшей очисткой и обезжириванием поверхности.

Сварка колец проводилась на установке для диффузионной сварки А306.8 с индукционным нагревом. Непосредственно перед сваркой детали обезжиривались бензином. Измерение температуры производилось платино-платинородиевой термопарой с регистрацией на приборе КСП4 и пирометром ОПИИР017. Деформация при сварке контролировалась индикатором.

Выбор схемы нагрева при сварке пирографит—сталь и регулирование температурных полей может значительно снизить напряжения в сварочном соединении. Известно, что при индукционном нагреве в ТВЧ зоны соединения имеет место неравномерность нагрева в радиальном направлении, что приводит к большим термическим напряжениям. С другой стороны, чем выше перепад температур по оси деталей в процессе сварки, тем ниже остаточные напряжения в шве.

Свариваемые детали и поверхности сварки нагревались в основном за счет теплопроводности от графита в осевом направлении по площади контакта. При этом обеспечивалась равномерность нагрева, снижение градиента температур в радиальном направлении, и следовательно, уменьшался источник возникновения больших термических напряжений при сварке и охлаждении соединяемых деталей.

Перепад температур по оси соединяемых деталей составлял 150—250 °С. Это позволило нагревать кольцо ПГИ (с меньшим КТР) до более высоких температур, снижая при этом среднюю температуру стальной детали, уменьшая ее нагрев и радиальное перемещение в процессе сварки и охлаждения, что приводит к снижению остаточных напряжений в шве.

Применение такого способа нагрева, когда стальная деталь нагревается за счет теплопроводности от более нагретой графитовой детали, позволяет:

- обеспечить равномерное температурное поле и отсутствие градиента температур в радиальном

направлении, тем самым исключить источник возникновения больших термических напряжений в соединении графит—сталь;

- создать градиент температур по оси свариваемых деталей, при котором стальная деталь (с большим КТР) нагревается на небольшую глубину от поверхности сварки, а масса нагретой детали уменьшается, снижается ее средняя температура. Следовательно, в процессе охлаждения она будет перемещаться и создавать меньшее внутреннее напряжение в соединении графит—сталь, так как при этом уменьшается разница КТР стали и графита на величину  $\Delta\alpha \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ .

Остывание соединенных деталей после сварки проводилось со скоростью 25—30 К/мин плавным снижением температуры с одновременным уменьшением сварочного давления.

Проведенные испытания на прочности сварных соединений подтвердили, что прочность сварного соединения находится на уровне прочности графита и составляет 30—32 МПа.

Таким образом, предложенные приемы позволяют снизить уровень остаточных напряжений в соединении графит—сталь и повысить его прочность.

Технологические приемы регулирования температурных полей для снижения уровня остаточных напряжений в предложенной конструкции позволили отработать режимы сварки и получить качественное сварное соединение графит ПГИ + сталь.

Сборку колец ПГИ + сталь под сварку производилась с центрированием по внутреннему диаметру ( $\varnothing 74 \text{ мм}$ ) на центровочном кольце. Стальным кольцом сборка устанавливалась в камеру установки на подставку из керамического материала — синтетического нитрида бора (СНБ), поверхность которого покрывалась порошком нитрида бора. Это исключало прихватку поверхности кольца к установочной поверхности в процессе сварки.

Для выбора оптимальной конструкции соединения с минимальными напряжениями были проанализированы и экспериментально проверены различные конструктивные варианты соединения. Так, например, если стальное кольцо будет иметь в зоне сварки размеры, не меньшие, чем у графитового, то в процессе сварки графитовое кольцо ПГИ вдавливается в более пластичную сталь (металл охватывает графит), и в процессе охлаждения на боковую поверхность графитового кольца воздействует металл прокладки. В «зажатом» кольце ПГИ возникают дополнительные напряжения, приводящие к разрушению графитового кольца вблизи зоны соединения (0.5—1 мм) в зависимости от высоты охвата.



В связи с этим наружный диаметр кольца ПГИ изготавливали на 0.51 мм больше, чем стального. Центрирующее кольцо уменьшало деформацию стального кольца по внутреннему диаметру, и пластическая деформация происходила в направлении наружного диаметра. Регулирование параметров сварки и контроль величины деформации позволяли получить после сварки одинаковые наружные диаметры колец из ПГИ и стального и, таким образом, благодаря пластическим свойствам материала прокладки, снизить опасные напряжения в соединении сталь—графит.

Выбор температуры сварки осуществлялся в диапазоне 900—1000 °С. При температурах 900, 950, 1000 °С, сварочном давлении  $P_{св} = (1—1.5) \cdot 10^7$  Па и времени сварки 20 и 60 мин были получены сварные соединения, исследованы особенности микроструктуры переходных слоев и определена протяженность этих слоев в прокладке из стали. Данные микрорентгеноспектрального анализа и спектрального исследования позволили уточнить фазовый состав переходного слоя и распределение углерода в нем.

На основании проведенных исследований был определен оптимальный режим сварки для получения сварного соединения ПГИ с хромоникелевой сталью:

$$T_{св} = 950 — 970 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$P_{св} = (1.0 — 1.3) \cdot 10^7 \text{ Па};$$

$$\tau_{св} = 15 — 20 \text{ мин};$$

$$\text{Вакуум} = 133.33 \cdot 10^{-4} \text{ Па}.$$

Охлаждение деталей после сварки производилось в вакууме под давлением со скоростью 20—25 К/мин плавным снижением температуры для протекания релаксационных процессов.

По отработанной технологии сварена партия заготовок уплотнений для последующего соединения их с заготовками ползунов.

После сварки блок ПГИ подвергался механической обработке согласно чертежу. Механическая обработка блока ПГИ производилась при закреплении в специальных приспособлениях на режимах:

число оборотов шпинделя  $n = 200—250$  об./мин;

подача  $s = 0.05—0.7$  мм/об.;

глубина резания  $t = 0.1—0.5$  мм;

направление подачи при обработке — с графита на металл.

При обработке на более жестких режимах или изменении направления подачи при точении приводит к сколам и выкрошиванию графита. Обработка производилась резцом с пластинкой из твердого сплава с радиусом при вершине 1—1.5 мм.

## 2. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПАЙКИ БЛОКА ПГИ С ЗАГОТОВКОЙ ПОЛЗУНА

В качестве заготовок ползуна использовались кольца алюминиевой бронзы с размерами 135×74×30 мм, изготовленные из поковки. Сборка под пайку производилась установкой стальной детали блока ПГИ в посадочное место на кольцо.

Задача разработки технологии пайки ферритной стали с алюминиевыми бронзами особенно сильно усложняется тем, что приходится решать вопросы пайки не просто разнородных металлов, а сталеграфитового блока ПГИ с бронзой, имеющей КТР в 2-3 раза больше, чем составляющие сваренных стали и ПГИ, причем больший КТР имеет деталь большей массы. Это будет вызывать большие термические напряжения в процессе нагрева и охлаждения при пайке и разрушение пирогрфита как менее прочного и хрупкого элемента.

Хромистые стали плохо смачиваются серебряными припоями в вакууме или аргоне. Для улучшения смачивания и затекания в зазор пайку хромистых сталей рекомендуется производить припоем ПСр70 по предварительно нанесенному слою меди или гальванического никеля. При этом не снижается коррозионная стойкость паяных соединений, не образуются хрупкие интерметаллические фазы, что ослабляли бы паяное соединение и приводили бы к хрупкому разрушению шва при работе изделия в условиях низких температур.

Алюминиевые бронзы во избежание окисления и образования хрупких интерметаллидов в шве рекомендуется паять серебряными припоями через покрытия никеля, применяя быстрые методы нагрева. Введение в припой никеля повышает пластичность и прочность соединений, что, вероятно, обусловлено образованием интерметаллида алюминий-никель, который предотвращает образование окислов алюминия.

Отработка режимов пайки хромоникелевой стали и далее сталеграфитового блока ПГИ с бронзой, выбор и оценка качества пайки через покрытия проводилась на образцах. Поверхность пайки образцов покрывалась слоем меди или гальваническим никелем толщиной 10—12 мкм. Пайка производилась в вакуумной печи припоем ПСр70 при температуре 820—850 °С и выдержке 5 мин.

Внешний осмотр образцов, паяных через покрытие никеля, показал наличие удовлетворительно сформированных галтелей по всему периметру шва. Микроисследованием поперечных сечений образцов установлено, что паяные швы сформировались без дефектов.

В образцах, паяных через слой меди, галтели

сформированы неудовлетворительно.

На основании проведенного анализа в качестве барьерного покрытия для пайки стали и бронзы припоем ПСр70 выбрано покрытие гальваническим никелем толщиной 10 — мкм, позволяющее формировать более качественные паяные швы.

В результате металлографических исследований было также установлено, что в процессе нанесения покрытия на сталеграфитовый блок реактивы не оказывают влияния на структуру и свойства ПГИ и сварной шов.

Для изготовления заготовки уплотнительного кольца (рис. 2) выбран способ капиллярной пайки блока ПГИ (2, 3) с заготовкой ползуна (1).

Пайка при наличии капиллярных зазоров является одним из наиболее распространенных способов пайки. Качество соединения при пайке зависит от правильного выбора припоя, состояния поверхности, рационального конструирования паяных соединений, технологии заполнения зазора и др. Величина зазоров при пайке колеблется в широких пределах (0.05—0.8 мм) и зависит от паяемого материала и припоя.

Способ нагрева при пайке также влияет на характер и величину развивающихся в узле соединения термических напряжений. В связи с этим отработка технологии пайки производилась на промышленной вакуумной электропечи сопротивления ОКБ-8085 и в вакуумной камере установки А306.08 с индукционным нагревом.

Высокопроизводительный индукционный нагрев позволяет осуществлять разогрев изделий со скоростью от 50 до 250 К/мин. Кроме того, при индукционном нагреве легче осуществлять локальный нагрев и охлаждение для регулирования теплового потока, и можно достигнуть необходимого разогрева только контактных поверхностей пайки и припоя. Это существенно уменьшает тепловое расширение массивного бронзового кольца с большим КТР и приводит к снижению термических напряжений.

При создании паяных узлов одним из главных вопросов является выбор оптимальной конструкции соединения. При конструировании узла пайки особое внимание уделялось выбору величины зазора между блоками ПГИ и бронзовым кольцом в месте

посадки, а также глубине посадки. Величина зазора составляла 0.15—0.4 мм на радиус и глубина посадки 0.5—2 мм.

После подготовки конструкции узла на поверхности пайки блока ПГИ и обоймой наносился слой гальванического никеля толщиной 10—15 мкм. Затем производилось обезжиривание деталей, сборка, установка припоя, и узлы поступали на пайку. Пайка производилась припоев ПСр70 (диаметром 1—1.2 мм) на режиме:

температура пайки — 820—825 °С;

время выдержки — 5 мин;

вакуум —  $133.33 \cdot 10^{-4}$  Па;

время выхода на режим — 70—80 мин.

Охлаждения узла после пайки производилось вместе с печью до полного остывания.

Металлографические исследования образцов, вырезанных из спаянных узлов в трех равноудаленных друг от друга продольных сечениях показали, что вертикальные швы сформировались без дефектов, горизонтальные швы сформированы в минимальном зазоре на длине 1.7—3 мм (от вертикального шва). Толщина паяного шва — 0.005—0.01 мм. Далее наблюдалось диффузионное сращивание никелевых покрытий.

Внешний вид блоков ПГИ и заготовки узлов трения показаны на рис. V и VI (вклейка).

1. Голубев А. В. Торцовые уплотнения вращающихся валов. — М.: Машиностроение, 1974.—212 с.
2. Майер Э. Торцовые уплотнения. — М.: Машиностроение, 1978.—288 с.
3. Приходько В. Е., Кулик А. В. Анализ физико-химических процессов соединения графита с металлами при участии жидкой фазы // Космічна наука і технологія. Додаток.— 2001.—7, № 1.—С. 153—156.
4. Приходько В. Е., Кулик А. В. Современное представление о природе образования соединения графита с металлами в твердой фазе // Вісник Дніпропетровського університету.— 2000.—4.—С. 116—122.

#### TECHNOLOGY DEVELOPMENT OF PACKING RINGS PRODUCTION TO BUTT-END PACKING OF TURBOPUMP UNITS

A. V. Kulyk

A technology of the diffusion welding for the packing rings from pyrographite and steel is analyzed.