

УДК 621.791.76.044.2

*Пахомов С. Н., Потапов А. М., Резниченко В. И., Мостипан С. Е.*

Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля».  
Украина, г. Днепр

**ИЗГОТОВЛЕНИЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
СТАЛЬ–АЛЮМИНИЙ МЕТОДОМ СВАРКИ ВЗРЫВА  
ДЛЯ РАКЕТОНОСИТЕЛЯ «ЦИКЛОН-4»**

*Рассмотрены исследования технологий изготовления с помощью сварки взрывом биметаллических переходных элементов типа 12Х18Н10Т-АМг6 из биметаллических плит больших толщин соответствующих металлов с учетом выбора оптимальных технологических параметров сварки взрывом для ракетносителя «Циклон-4».*

Ключевые слова: сварка взрывом; биметаллические переходные элементы.

**Актуальность и постановка проблемы**

В технологии изготовления летательных аппаратов и ракетно-космической техники (РКТ) взрыв нашел практическое применение для штамповки и калибровки различных профилей и заготовок. В тоже время, сварка взрывом (СВ), потенциальные возможности которой в этой области весьма перспективны, находится пока в стадии лабораторной и промышленной отработки.

Сварка взрывом имеет ряд специфических особенностей, являющихся следствием высокой интенсивности пластического течения и кратковременности действия высоких давлений и температур в приконтактных слоях соударяющихся пластин. В частности, при оптимальных режимах сварки взрыва, благодаря этому, не успевают развиваться в полной мере физико-химические процессы, обуславливающие образование промежуточных фаз. Это позволяет получать прочные соединения из разнородных металлов, сварка которых другими способами затруднена или вообще невозможна. Несмотря на мгновенное протекание сварки взрывом ( $\tau \sim 10^{-6}c$ ), в области соударения успевают произойти процессы, необходимые для образования новых атомных связей и прочного соединения металлов [1]. Эти процессы можно регулировать путем изменения параметров соударения пластин и подбором соответствующих взрывчатых веществ.

Процесс сварки металлов в твердом состоянии и его результат, характеризуются основным показателем – прочностью образовавшегося соединения, которая зависят как от свойств самих металлов (прочности, пластичности, химического состава, состояния контактных поверхностей, структуры и др.), так и от параметров процесса (давление, температура, скорости деформации, состава газовой среды) [2].

В связи с этим целесообразно различать физические параметры сварки, которые определяют протекание элементарных процессов, связанных с образованием неразъемного соединения и формированием микроструктуры прилегающих к зоне соединенных слоев, и технологические параметры, которые обеспечивают достижение определенных значений физических параметров.

Широкое применение СВ нашла при изготовлении биметаллических переходников. При изготовлении новых конструкций в РН «Циклон-4» существенный интерес представляет соединение нержавеющей стали–алюминиевый сплав. Основная задача получения указанной композиции состоит в устранении появления интерметаллидов на границах сварки.

Известно [1], что СВ нержавеющей стали и алюминиевых сплавов достигается путем применения между ними подслоя из технически чистого алюминия, однако и в этом случае высокая прочность соединения слоев достигается в узком интервале основных технологических параметров процесса СВ, к которым относятся: скорость детонации (D) взрывчатых веществ (ВВ), отношение массы ВВ и массы метаемого листа ( $r = m_0 + m$ ) и начального (перед сваркой) расстояния между свариваемыми листами ( $h_0$ ).

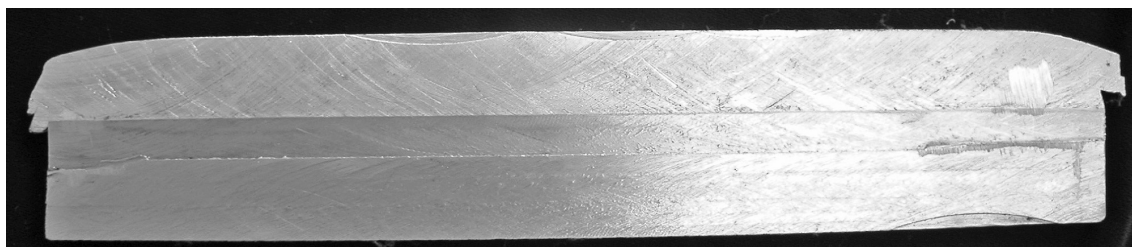
**Цель работы:** состоит в разработке технологии изготовления при помощи СВ трудносвариваемых стали-алюминиевых переходных элементов больших толщин соответствующих металлов с учетом оптимальных технологических режимов сварки взрывом.

**Основная часть**

В настоящей работе рассмотрены результаты исследования технологий изготовления при помощи СВ б/м переходных элементов типа 12X18H10T–АМг6М из биметаллических плит больших толщин свариваемых металлов соответствующих сочетаний для РН «Циклон-4» (рис. 1).

Биметаллические плиты изготавливались с габаритными размерами 350×450 мм. Основным слоем служили листы из стали марки 12X18H10T толщиной 40 мм, промежуточный слой состоял из алюминия марки А5 (А6) толщиной 2 мм и плакирующий слой – из алюминиевого сплава АМг6М толщиной 25 мм. СВ этих заготовок осуществляли послойно.

Взрывчатые вещества мощный и сравнительно дешевый источник энергии при сварке металлов, весьма удобны для возбуждения ударных волн высокой интенсивности, а также получения высоких скоростей соударения тел. В качестве ВВ



**Рис. 1.** Поперечное сечение б/м заготовки 12X18H10T–АМг6

использовали смесь аммонита 6ЖВ с аммиачной селитрой ЖВК в различных соотношениях.

Интенсивное развитие технологических процессов на основе взрывной обработки металлов выдвигает ряд специфических требований к ВВ. Аммонит является достаточно мощным ВВ и поэтому в чистом виде для целей сварки применяется довольно редко. Для понижения детонационных характеристик этого ВВ на практике используют смеси аммонита с аммиачной селитрой в различном соотношении компонентов. Экспериментально-промышленная отработка сварки взрывом в ГП «КБ «Южное» показала, что наиболее перспективным ВВ является аммонит марки 6ЖВ в смеси с аммиачной селитрой ЖВК. Изменение состава смеси позволяет в широком диапазоне варьировать величиной скорости детонации.

В связи с этим возникла необходимость в исследовании особенностей влияния свойств аммиачной селитры и смесей на ее основе на стабильность скорости детонации.

В числе основных задач, стоящих перед разработчиками данной технологии стояла задача приготовления ВВ. При этом возникла необходимость тонкой регулировки метательной способности заряда. Опыт производства показал, что на метательные свойства заряда при прочих равных условиях могут оказывать влияние следующие факторы: плотность заряда, гранулометрический состав компонентов входящих в состав смеси, влажность ВВ, длительность хранения ВВ и др.

Специальные исследования позволили установить, что плотность различных участков заряда колеблется в значительных пределах, что обуславливает большой разброс режимов сварки, искривление линии контакта и фокусировку кумулятивных частиц. Для смесей аммонита марки 6ЖВ с селитрой марки ЖВК наблюдается возрастание скорости детонации с увеличением плотности от 0,75...0,8 до 1,0...1,1 г/см<sup>3</sup>, а значит за счет снижения разброса по плотности, можно добиваться повышенной стабильности скорости детонации (рис. 2).

Разработанный нами специальный технологический прием, основанный на уплотнении слоя заряда давлением 800...1000 г/см<sup>2</sup>, позволяет исключить отрицательные последствия этого фактора и стабилизировать параметры детонации по площади заряда.

Исследование зависимости скорости детонации от толщины слоя заряда проводилось для смесей аммонита 6ЖВ с аммиачной селитрой ЖВК, содержащих 33, 27, 14% аммонита при плотности зарядов 0,93±0,06 г/см<sup>3</sup>.

Для экспериментов использовалась аммиачная селитра, проходящая через сито с ячейкой 2,5 мм, то есть с размером зерен селитры ≤2,5 мм. Толщина зарядов менялась от 12 до 16 мм.

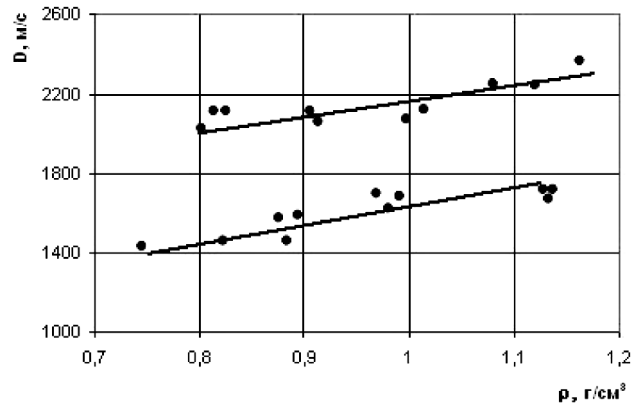


Рис. 2. Зависимость скорости детонации смесей от плотности заряда при толщине заряда ВВ 20 мм:  
1 – смесь АС-27; 2 – смесь АС-14

По полученным экспериментальным данным построены зависимости скорости детонации от толщины слоя зарядов для составов с различным содержанием селитры (рис. 3).

Из графиков видно, что для всех исследованных смесей толщина заряда, изменяющаяся в диапазоне от 12 до 16 мм, оказывает влияние на скорость детонации:

- для смеси АС14  $D = 1300 \pm 1800 \pm 200$  м/с;
- для смеси АС24  $D = 1700 \pm 2100 \pm 100$  м/с;
- для смеси АС33  $D = 2000 \pm 2200 \pm 100$  м/с.

При производстве биметаллических переходных элементов для РН «Циклон-4» выбор оптимальной технологической схемы сварки взрывом является одним из ключевых моментов, позволяющих получать на стадии промышленного производства многослойные металлические материалы с гарантируемыми характеристиками. При этом одним из способов достижения качественного соединения нержавеющей стали с алюминиевым сплавом является использование в качестве технологического подслоя технически чистого алюминия (А5, А6) при условии применения оптимальных параметров соударения.

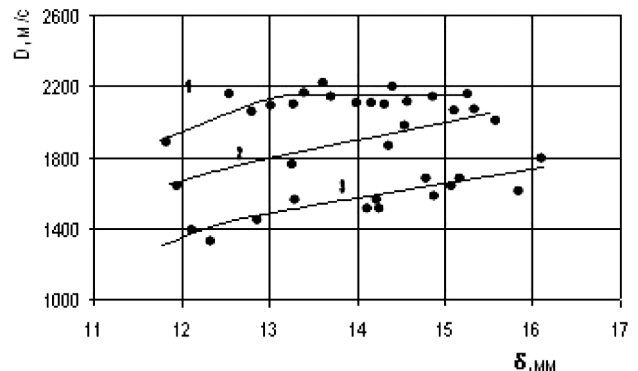


Рис. 3. Зависимость скорости детонации смесей от толщины заряда:  
1 – смесь АС-33; 2 – смесь АС-27; 3 – смесь АС-14

Основным препятствием получения качественных сварных соединений алюминия со сталью является химическое взаимодействие этих металлов, приводящее к необратимому образованию интерметаллических соединений по линии перехода. Конгломерат интерметаллических фаз сохраняется после термической обработки, и дальнейшее поведение сварного соединения определяется количеством, формой и характером расположения и свойствами интерметаллической прослойки. Прочность сварного соединения стали с алюминием тем выше, чем меньше толщина слоя интерметаллического соединения. При более жестком подходе к качеству соединения, интерметаллидный слой, который отличается повышенной хрупкостью и твердостью, может не удовлетворять предъявленным требованиям к конструкции, в частности при испытаниях на герметичность.

Проведенная экспериментальная отработка сварки взрывом на оптимальных режимах показала, что на границе соединения слоев стали и алюминия образуется промежуточный слой без типичных признаков интерметаллических соединений.

Процесс сварки взрывом наряду с технологической простотой содержит моменты, несоблюдение которых при переходе к выпуску больших партий заготовок, может привести к значительному увеличению процента брака. В первую очередь к ним относятся: строгое соблюдение начальных технологических параметров ( $D$  – скорости детонации ВВ,  $r$  – количества примененного ВВ, измеряемого в единицах массы метаемой пластины и  $h_0$  – начального зазора), состояние исходных заготовок (чистота поверхности) и способ запуска детонационной волны при сварке взрывом. Для получения прочного соединения сочетание сталь–алюминий необходимо удерживать величины (угол, образованный наклонным участком метаемой пластины и поверхностью неподвижной, скорость метания) в достаточно узком диапазоне.

Появление различного рода дефектов при отработке опытной технологии получения заготовок

и является результатом отклонения от нормы одного или группы вышеперечисленных параметров.

Локальные изменения скорости детонации являются причиной появления различного рода дефектов: возрастание скорости до 2500 м/с и более приводит к образованию хрупкой фазы с микротвердостью до 8000 Н/м<sup>2</sup>, склонной к растрескиванию; снижение скорости ниже 1400 м/с приводит к затуханию детонационной волны, отсутствию схватывания металлов и даже «сбросу» взрывчатого вещества по наружному периметру заготовок.

Получение биметаллического соединения металлов с требуемыми свойствами возможно только при достижении прочного соединения слоев по всей поверхности контакта, сохраняющегося при всех последующих операциях обработки биметалла, а также при его эксплуатации.

При разработке технологии СВ заготовок нержавеющей сталь–алюминий для РН «Циклон-4» при выборе оптимальных технологических режимов учитывали основное влияние свойств смесей ВВ на скорость детонации, а следовательно и на качество сварки металлов взрывом.

Предварительно перед сваркой металлов взрывом были проведены замеры скорости прохождения детонационной волны по смесям с различным содержанием тротила, с целью определения оптимальных режимов сварки слоев металлов при помощи электронно-счетного частотомера, который обеспечивал прямой отсчет результатов измерения с точностью до 10<sup>8</sup> с (0,01 мкс).

Данные замеров скоростей прохождения детонационной волны приведены в таблице 1.

Как видно из данных, приведенных в таблице 1, на скорость детонации влияет увеличение высоты взрывчатых смесей.

При отработке технологии СВ алюминия со сталью определяли влияние основных технологических параметров ( $D$ ,  $r_0$  и  $h_0$ ) на прочность на отрыв ( $\sigma_{отр}$ ) соединения слоев 12X18Н10Т-А5–АМг6М, которую оценивали по методике [2]. Одновременно определяли качество соединения слоев в биметалле

Таблица 1

Скорости прохождения детонационной волны

№ п/п	Взрывчатая смесь (АС)	Высота ВВ, мм	Скорость детонационной волны, м/с	Примечание
1	АС 10	15	1457	смесь уплотняли
	АС 10	15	1454	
2	АС 12	15	1586	смесь уплотняли
	АС 12	20	1765	
3	АС 14	15	1918	смесь уплотняли
	АС 14	30	2208	



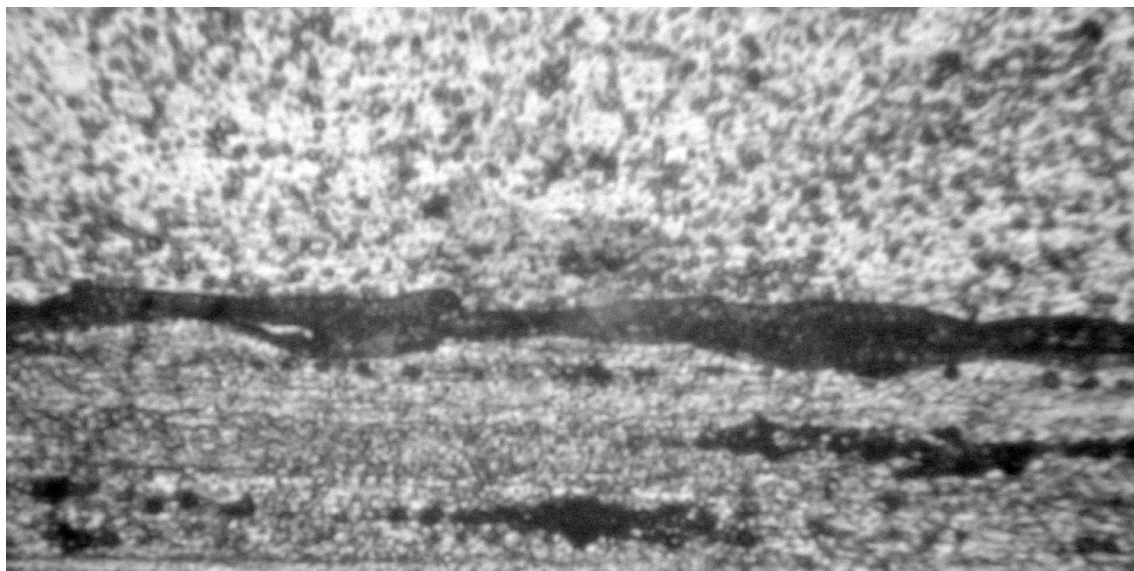


Рис. 4. Граница соединения 12X18H10T-A5

при помощи ультразвукового дефектоскопа марки УД-10УА.

СВ заготовок алюминия со сталью осуществляли на основании из стальной плиты толщиной 50 мм и слоя речного песка.

В данных опытах при сварке взрывом пластин технического чистого алюминия толщиной 2 мм с нержавеющей сталью применяли смеси ВВ, состоящей из аммонита 6ЖВ и селитры ЖВК толщиной 15–20 мм. Скорость детонации смесевых ВВ при изменении содержания тротила от 2,5 до 5% находится в пределах 1600–1800 м/с, то есть при такой толщине слоя смесевых ВВ скорость детонации изменяется незначительно,  $r_0$  в этом случае 2,4–3,2.

При начальном расстоянии, равном толщине пластины технического чистого алюминия – 2 мм, с указанными выше значениями  $D$ ,  $r_0$  прочность соединения на отрыв находится в пределах 105–130 Н/м<sup>2</sup>, т.е. практически не зависит от изменения  $D$  и  $r_0$ .

Установлено, что изменение начального расстояния перед СВ от 2 до 4 мм практически не влияет на прочность соединения пластин технического чистого алюминия с нержавеющей сталью.

Соединение материалов 12X18H10T-A5 представляет собой ровную линию (классический вид соединения) с небольшими участками интерметаллида (рис. 4). Интерметаллидная прослойка прерывиста, толщина ее колеблется от 5 до 40 мкм. Четко выражены границы зерен интерметаллидов. Видимых дефектов прослойки не обнаружено. Химический состав этой фазы будет при необходимости определен в последующих исследованиях, однако можно предложить, что он представляет собой механическую смесь химических элементов,

входящих в состав обоих соединяемых металлов [4], так как интерметаллиды имеют значительно более высокую микроструктуру, твердость – приблизительно 8000 Н/м<sup>2</sup>.

Доказано, что с уменьшением скорости детонации толщина промежуточной фазы соответственно уменьшается. На основании анализа микроструктуры зоны соединения металлов 12X18H10T-A5 определено, что предпочтительнее при сварке этих металлов применять смеси ВВ (со скоростью детонации смесей ВВ) с содержанием тротила около 2,5%.

Сварку взрывом заготовок АМг6М с биметаллической плитой 12X18H10T-A5 осуществляли при скорости детонации в пределах от 1850 до 2200 м/с. Установлено, что для сварки взрывом алюминиевых слоев между собой оптимальной является скорость детонации ВВ около 2200 м/с. В этом случае прочность соединения слоев определяется прочностью на отрыв по зоне 12X18H10T-A5.

В граничной зоне видны четкие регулярные волны при отношении длины волны к ее амплитуде, равной примерно двум; имеются небольшие включения промежуточной фазы (рис. 5).

При уменьшении скорости детонации до 1850 м/с в граничной зоне появляются поры и трещины, волны становятся более пологими, при этом уменьшается прочность соединения слоев А5 с АМг6.

Качество соединения слоев в б/м заготовках определяли ультразвуковым дефектоскопом марки УД-10УА (рис. 6), испытаниями заготовок на гиб (рис. 7) и отрыв (рис. 8), а также исследованиями сплошности соединения слоев на специальных образцах на микроскопе ММР-4.

ПП «КБ «Южное» изготовило опытную конструкцию стального компенсатора с б/м



Рис. 5. Граница соединения АМг6М-А5



Рис. 6. Ультразвуковой контроль биметаллических заготовок

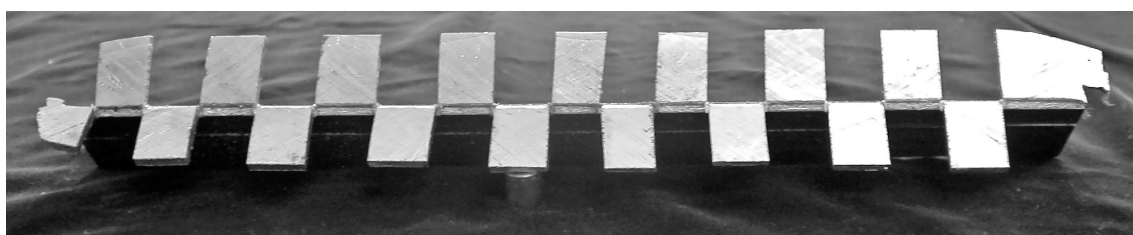


Рис. 7. Биметаллический образец на гиб



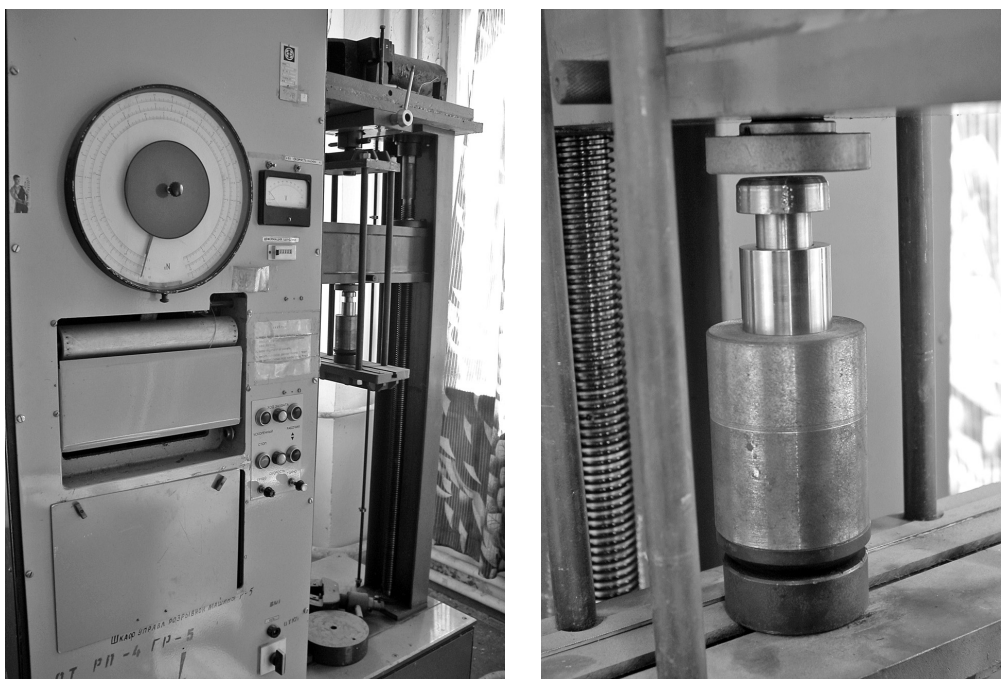


Рис. 8. Испытания биметаллического образца в разрывной машине Р-5

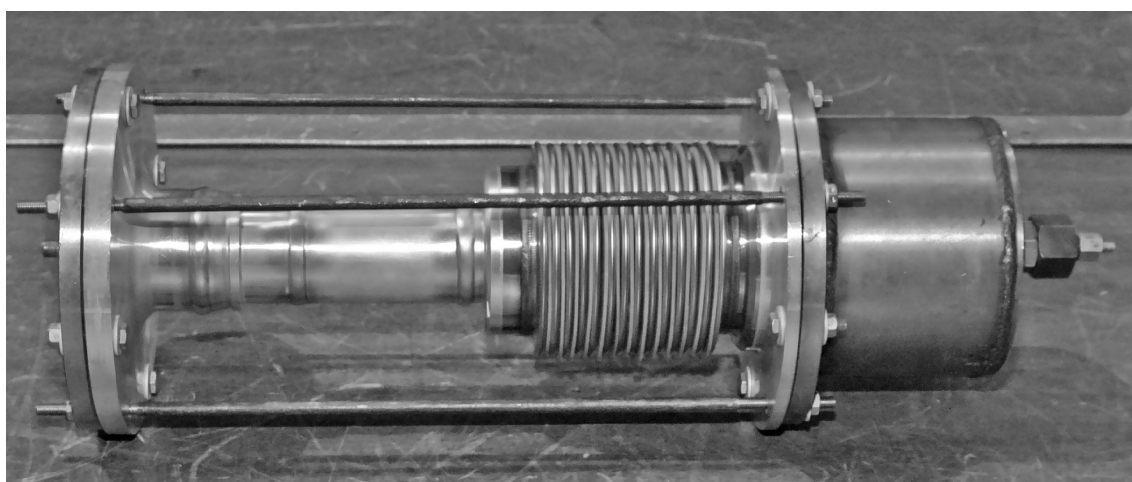


Рис. 9. Опытная конструкция стального компенсатора с биметаллическими переходниками

сталь–алюминиевым фланцем и шпангоутом (рис. 9). Опытная конструкция (ОК) прошла автономные испытания на прочность сжатым воздухом давлением 8 кгс/см<sup>2</sup> и герметичность давлением 3,2 кгс/см<sup>2</sup> при этом суммарная утечка не превышала  $1 \cdot 10^{-3}$  л·мкм/с по общему потоку смеси газов.

### Выводы

В результате проведенных работ можно сделать следующие выводы:

Разработана принципиальная схема СВ для композиций нержавеющая сталь–алюминиевый сплав АМгб больших толщин, а также определены конкретные величины кинематических и техноло-

гических параметров (оптимальные технологические режимы сварки взрывом).

Проведен комплекс металлографических исследований и механических испытаний биметалла, особое внимание было уделено соединениям нержавеющей сталь – технически чистый алюминий. Установлено, что прочность соединения слоев в переходных элементах определяется пределом текучести подслоя технически чистого алюминия, качеством граничного слоя в зоне нержавеющая сталь – алюминиевый сплав.

Проведены испытания на герметичность зоны соединения металлов в переходных элементах, изготовленных из б/м заготовок, в том числе в составе опытных конструкций.

В настоящее время б/м переходные элементы сталь – сплав АМг6 для ракетносителя «Циклон-4» прошли наземные испытания и подготовлены для применения в летных испытаниях.

Разработанная технология показала принципиальную возможность использования данных б/м в качестве переходных элементов в новых изделиях РКТ.

### Литература

[1] А. А. Дерибас. Физика упрочнения и сварки взрывом. 2 изд./ доп. и перераб.– Новосибирск: 1980.– 224 с.

[2] В. М. Кудинов. Сварка взрывом в металлургии/ А. Я. Коротеев.– М.: 1978.– 166 с. (серия «новые процессы сварки давлением»).

[3] В. Г. Петушков. Применение взрыва в сварочной технике./ Под редакцией академика Б. Е. Патона., 2005.– 754 с.

[4] В. В. Трутнев. Сравнительная оценка качества соединения алюминия с титаном, сталью и никелем методом взрыва/ А. Ф. Якушин, А. А. Дунаев. Сварочное производство, 1973.– № 7.

*Pakhomov S. N., Potapov A. M., Reznichenko V. I., Mostipan S. E.*

Yuzhnoye State-owned Design Office named after M. K. Yangel. Ukraine, Dnepr

### PRODUCTION OF BIMETALLIC TRANSITION ELEMENTS STEEL – ALUMINUM BY EXPLOSION WELDING FOR CYCLONE-4 LAUNCH VEHICLE

*Researches of manufacturing techniques by means of welding by explosion of bimetallic transitive elements of type 12X18H10T-AMz-6 from bimetallic plates of the big thickness for corresponding metals taking into account a choice of optimum technological parameters of welding by explosion for rocket Cyclone-4 are considered.*

Keywords: explosion welding; bimetallic transition elements.

### References

[1] A. A. Deribas. Physics hardening and explosion welding. 2nd ed. / Ext. and rev.– Novosibirsk, 1980.– 224 p.

[2] V. M. Kudinov. Explosion welding metallurgy / A. Y. Koroteev.– М.: 1978.– 166 p. (A series of “new pressure welding processes”).

[3] V. G. Petushki. Applications explosion in welding technology. / Edited by academician B. E. Paton, 2005.– 754.

[4] V. V. Truneev. Comparative evaluation of the quality of the aluminum compound to titanium, steel, and nickel by the explosion / A. F. Jakushin, A. A. Dunayev. Welding production, 1973.– № 7.