

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

Государственное предприятие «КБ "Южное" им. М.К. Янгеля», Днепропетровск

## **РЕАЛИЗАЦИЯ ПЕРЕДОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СВАРКИ ВЗРЫВОМ ПРИ СОЗДАНИИ НОВЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ**



*Рассмотрены преимущества использования сварки взрывом при создании многослойных металлических материалов, изготовление которых другими методами затруднено. Показаны результаты использования многослойных композиционных металлических материалов, изготовленных сваркой взрывом в разработках ГП КБ «Южное» им. М.К. Янгеля.*

*Ключевые слова: сварка взрывом, композиционные металлические материалы.*

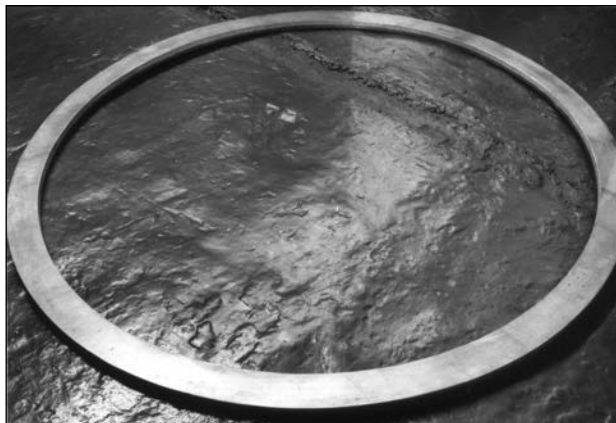
Государственное конструкторское бюро «Южное» имени М.К. Янгеля (г. Днепропетровск) на протяжении многих лет разрабатывает и осваивает ракетно-космические комплексы, в основе производства которых заложены передовые технологии. Значительные перспективы, как в ракетостроении, так и в других областях техники открывает использование принципиально новых композиционных материалов, обладающих целым рядом специальных и даже уникальных свойств [1, 5].

Одним из наиболее перспективных процессов соединения металлов в твердой фазе является сварка взрывом, позволяющая создавать композиционные металлические материалы.

Сварка металлов взрывом представляет собой сложный процесс. Подобно другим способам сварки давлением, механизм сварки взрывом определяется главным образом процессом совместной пластической деформации металлов в зоне соединения. Сварка взрывом имеет ряд специфических особенностей, являющихся следствием высокой интенсивности пластического течения и кратковременности дей-

ствия высоких давлений и температур в приконтактных слоях соударяющихся пластин. В частности, при оптимальных режимах сварки взрывом 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 ( $\tau \sim 10^{-6}$  с), в области соударения успевают произойти процессы, необходимые для образования новых атомных связей и прочного соединения металлов. Эти процессы можно регулировать путем изменения параметров соударения пластин и подбором соответствующих взрывчатых веществ.

Процесс сварки металлов в твердом состоянии и его результат, характеризуемый основным показателем — прочностью образовавшегося соединения, — зависят как от свойств самих металлов (прочность, пластичность, химический состав, состояние контактных поверхностей, структура и др.), так и от параметров процесса сварки (давление, температура, скорость детонации). В связи с этим очень актуальным и важным являются физические параметры сварки, ко-



**Рис. 1.** Биметаллическое кольцо (сталь-алюминиевый сплав) под переходный элемент для соединения двигателя с топливным баком РКТ

которые определяют протекание процессов, связанных с образованием неразъемного соединения и формированием микроструктуры слоев, прилегающих к зоне соединения, а также технологические параметры, которые обеспечивают достижение определенных значений физических параметров.

Все эти факторы учитываются при разработке технологий сварки различных сочетаний металлов взрывом. Разработанные в ГП КБ «Южное» технологии позволяют получать соединения любых разнородных металлов и сплавов, которые традиционными способами получить затруднительно или даже невозможно, обеспечивают высококачественное соединение слоев металлов, гарантируют требуемые характеристики. Новые технологии дают возможность достичь значительного технико-экономического эффекта и открывают новые области их промышленного применения [2, 4]. Примеры этих технологий приведены ниже.

#### **БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

В технологии изготовления летательных аппаратов и ракетно-космической техники (РКТ) взрыв нашел практическое применение для штамповки и калибровки различных профилей и

заготовок [3]. Однако сварка взрывом, потенциальные возможности которой в этой области весьма перспективны, в данное время практически применяется мало. В связи с этим принципиально важной задачей является определение наиболее перспективных направлений развития сварки взрывом в технологии создания или проектирования летательных аппаратов и РКТ, в частности выбор оптимальных конструкций с целью практической реализации их с помощью сварки взрывом.

Конструкции летательных аппаратов и РКТ характеризуются двумя тенденциями: использованием материалов высокой удельной прочности и обеспечением максимальной надежности этих конструкций. С учетом этих тенденций должен производиться выбор конструкций, намечаемых к реализации сварки взрывом.

Широкое применение сварки взрывом нашла при изготовлении биметаллических переходников. При изготовлении новых конструкций РКТ существенный интерес представляют два типа трудносвариваемых композиций: нержавеющие стали — алюминиевые сплавы и жаропрочные хромоникелевые сплавы ниобия и молибдена, а также сплавы титана. Основная задача получения указанных композиций состоит в устранении появления интерметаллидов на границах сварки.

Биметаллические соединения, полученные сваркой взрывом, могут быть использованы в ответственных узлах конструкций при температурах эксплуатации, не вызывающих интенсивного роста интерметаллидов. Это в первую очередь относится к сталь-алюминиевым переходникам.

Наведем пример. При проектировании на предприятии нового ракетного комплекса были предложены технические решения, реализация которых стала возможной только при использовании многослойных композиционных материалов, полученных сваркой взрывом. Крупногабаритный биметаллический переходник диаметром до 1650 мм с вакуум-плотным соединением слоев *нержавеющая сталь 12Х18Н10Т — алюминиевый сплав АМгб* (рис. 1) позволил зна-

чительно снизить вес конструкции при обеспечении герметичности и надежности соединения двигателя с топливным баком.

Введение в конструкцию триметаллического магистрального трубопровода сочетанием слоев  $AMz6-AD1-AMz6$  (рис. 2) вместо ранее применявшейся системы двух труб — тоннельной и магистральной — повысило надежность разделения окислителя и топлива и привело к заметному снижению веса узла и значительному увеличению полезного объема топливного бака. Работоспособность этих деталей, полученных сваркой взрывом, подтверждена длительной эксплуатацией, а также успешными пусками ракетного комплекса «Днепр».

В некоторых конструкциях современной РКТ необходимо осуществлять неразъемное соединение (сварку) разнородных металлов, в том числе стали с титаном.

Для производства биметаллов с титаном применение обычного метода пакетной прокатки на воздухе встречает большие затруднения. При нагревании до  $300-400\text{ }^{\circ}\text{C}$  титан начинает окисляться, а при температуре свыше  $700-800\text{ }^{\circ}\text{C}$  интенсивность его окисления резко возрастает и образующиеся окисные пленки препятствуют схватыванию. Причем при более высоких температурах титан активно реагирует не только с кислородом, но и с азотом, водородом и др. газами, за исключением инертных (аргон, гелий). Это создает значительные трудности при получении биметаллов титан-сталь и для его производства требуются специальные способы. Поэтому для устранения этих недостатков была разработана технология соединения титана со сталью сваркой взрывом через промежуточные прослойки (рис. 3).

Применение биметаллических (б/м) переходников данного сочетания металлов может обеспечить, например, надежное герметичное соединение шарбаллона с трубопроводом в изделиях РКТ.

Полученное соединение сталь-титан герметичное при испытаниях воздушно-гелиевой смесью давлением  $250\text{ кгс/см}^2$ .

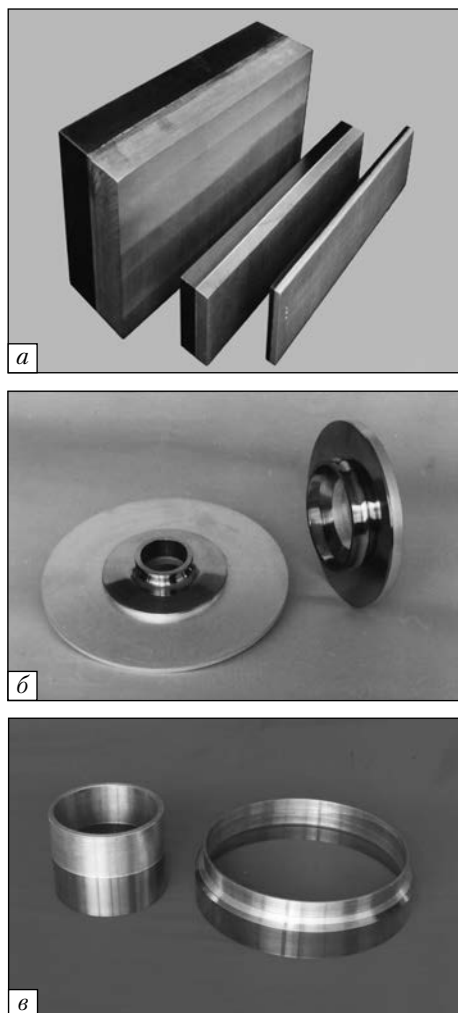


Рис. 2. Триметаллический магистральный трубопровод



Рис. 3. Биметаллический переходный элемент (нержавеющая сталь-титан) для изделий РКТ

Список металлов, соединяемых энергией взрыва, достаточно велик и постоянно расширяется. Детали различного назначения плоской и цилиндрической формы (пластины, трубы, кольца) (рис. 4, а и б), получаемые из многослойных металлических композиций, допускают последующую механическую обработку, штамповку (рис. 4, в), прессование, что позволяет изготавливать изделия сложной геометрии [3, 5]. При этом толщина металла плакирующего слоя может изменяться от 1 до 50 мм, а основного — от 2 до 100 мм. Технология поз-



**Рис. 4.** Композит сочетания металлов (сталь–алюминиевый сплав): *а* – биметаллические заготовки; *б* – плоские биметаллические переходные элементы; *в* – трубчатые биметаллические переходные элементы

воляет сваривать кольцевые детали диаметром от 20 до 1800 мм и трубные диаметром до 650 мм. Сваркой взрывом изготавливаются биметаллические и многослойные композиции следующих сочетаний: *алюминий–сталь, алюминий–медь, титан–сталь, медь–сталь, латунь–сталь, ниобий–сталь, алюминий–алюминиевый сплав, алюминиевый сплав–алюминий–сталь, титановый сплав–медь–ниобиевый сплав* и др.

Технические возможности и эффективность применения сварки взрывом реализуются на

предприятии в новых разработках как изделий ракетно-космической техники, так и промышленной продукции общего назначения. При этом сварка взрывом не требует дорогостоящего оборудования и осуществляется в специально подготовленных помещениях и взрывных камерах.

#### **БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ**

В промышленности, сельском хозяйстве и на транспорте (включая железнодорожный) постоянно решаются задачи повышения износостойкости трущихся узлов и, следовательно, повышения долговечности различных машин и механизмов. С учетом необходимости сокращения топливно-энергетических затрат изыскиваются возможности снижения потерь на трение. При современном развитии техники ужесточаются требования, предъявляемые к трущимся парам, и в то же время существенно осложняется их работа.

В ГП «КБ "Южное"» разработана технология соединения алюминиево-оловянистых сплавов со стальной основой для больших размеров подшипников (рис. 5), которые невозможно изготовить другими традиционными способами (прокат, литье), вместо подшипников сочетания металлов баббит–бронза и свинцово-бронзовых.

Основной идеей при разработке технологии изготовления биметаллических подшипников скольжения является получение биметаллических заготовок *углеродистая сталь–алюминиево-оловянистый сплав* при помощи энергии взрыва, которые заменяют дорогостоящие материалы типа *баббит–бронза, свинец–бронза*, используемые в настоящее время.

По условиям работы подшипника в составе дизеля всякий антифрикционный (подшипниковый) сплав должен иметь гетерогенную структуру, состоящую из относительно мягкой основы с вкраплениями в нее зон из твердой составляющей. Включения твердой составляющей служат опорными точками для трущихся частей вала; наличие мягкой основы обеспечи-

вает устранение микронеровностей и хорошую прирабатываемость вала к подшипнику.

Работа проводилась на базе анализа данных предприятий, которые являются ведущими поставщиками Украинской железной дороги дизелями и запасными частями к ним: АО «Завод им. Малышева» (г. Харьков) — разработчик и изготовитель дизелей типа Д80, Д100 и Д49 к тепловозам; АО «Запорожский механический завод» (г. Запорожье) — единственный на Украине завод, изготавливающий запчасти к дизелям типа Д49.

Дизели мощного ряда Д80, унифицированные на 85–90 %, перекрывают потребности железнодорожного транспорта в силовых установках для грузовых и пассажирских тепловозов. Модификации мощностью 2000–3000 л.с. унифицированы по установочно-присоединительным размерам с эксплуатационными тепловозными дизелями 2Д100, 10Д100 и могут быть использованы для их замены после выработки ресурса на тепловозе.

По своим технико-экономическим показателям дизель-генераторы Д80 являются перспективными, высоко экономичными двигателями, соответствующими лучшим зарубежным образцам и значительно превосходящими отечественные.

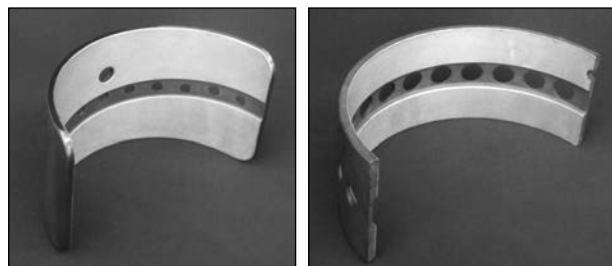
Используемые в ГП «КБ "Южное"» алюминиево-оловянистые сплавы (АО20-1) с содержанием олова 6–30 % для производства подшипников имеют большие преимущества: меньше других алюминиевых сплавов стирают шейку вала и по сравнению с другими подшипниковыми сплавами обладают повышенным пределом прочности, усталости при нагружении усилием 300 кгс/см<sup>2</sup>, дают возможность заменить дорогостоящие и трудно перерабатываемые баббит-бронзовые и свинцово-бронзовые сплавы, повысить износостойкость и увеличить срок эксплуатации дизеля.

**Техническая характеристика  
подшипника скольжения**

Композиция слоев	Углеродистая сталь — алюминий-оловянистый сплав
Толщина слоев	10–2,5 мм
Прочность сцепления	Не менее 6 кгс/мм <sup>2</sup>



a



б

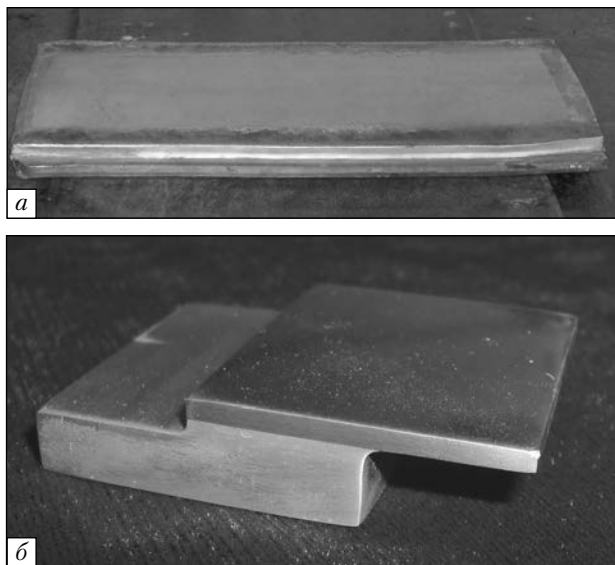
**Рис. 5.** Биметаллическая заготовка (сталь-алюминиево-оловянистый сплав) для изготовления подшипников скольжения (а) и подшипники скольжения (б)

Конструкторское бюро «Южное» и АО «Завод им. Малышева» с 1999 г. по настоящее время совместно изготавливают биметаллические вкладыши для дизелей тепловозов марки Д80, Д100.

**БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ЗАГОТОВКИ  
«МЕДЬ–АЛЮМИНИЙ»**

Современный уровень развития энергоемких отраслей производства, таких, как цветная и черная металлургии, энергетика и др., предъявляет повышенные требования к показателю затрачиваемой электроэнергии на выпуск единицы продукции. Одним из возможных путей снижения удельного расхода электроэнергии является уменьшение электрических потерь в токоведущих узлах силовых электротехнических устройств (электролизеров, сталеплавильных печей, коммутационных распределителей и др.).

Как правило, внутренние части и выводы электротехнических устройств изготавливаются из электротехнической меди, а силовые магистральные токоведущие элементы (кабели, шины, провода) выполняются из алюминиевых сплавов, что обусловлено их хорошей электропроводностью, относительно невысокой сто-



**Рис. 6.** Медно-алюминиевый композит: *а* – заготовка медь–алюминий; *б* – медно-алюминиевый переходный элемент

имостью по сравнению с медью и малым удельным весом.

Для соединения разнородных участков силовых цепей широко применяются переходные элементы, изготовленные различными технологическими способами. Из множества известных способов сварка взрывом благодаря быстротечности процесса позволяет получать высококачественные медно-алюминиевые переходные элементы различных типоразмеров и конфигураций. Применение сваренных взрывом медно-алюминиевых композитов (рис. 6) в качестве контакт-элементов высокоточного оборудования позволяет, *во-первых*, снизить потери электроэнергии при соединении разнородных участков токоподводящих узлов и, *во-вторых*, уменьшить материальные затраты за счет экономии дефицитных материалов при монтаже (замене) новой конструкции (узла, секции).

Разработанная технология изготовления биметаллических заготовок медно-алюминиевых элементов токоподводящих узлов для предприятий энергетики и электрометаллургии со следующими толщинами соединяемых

слоев: алюминий – 20 мм; медь – 20 мм внедрена на ОАО «Запорожский алюминиевый комбинат».

### РЕЖУЩИЕ ВСТАВКИ РЕЗЦОВ ГОРНЫХ МАШИН

Повышение эксплуатационной стойкости деталей машин, механизмов и инструментов неразрывно связано с увеличением физико-механических характеристик металла (износостойкость, ударная вязкость, предел прочности при изгибе), поскольку многие детали работают в условиях абразивного износа, резких температурных перепадов и ударных нагрузок. Комплексное решение вопросов увеличения долговечности изделий – актуальная и важная задача для машиностроительной, горной и строительной отраслей народного хозяйства. Повышение износостойкости деталей рабочих органов и инструмента в основном достигается за счет нанесения износостойких защитных покрытий, а также при армировании высокотвердыми вставками.

Существенным недостатком традиционных методов упрочнения является то, что повышение износостойкости изделий, как правило, сопровождается снижением прочности при изгибе и ударной вязкости. Кроме того, при упрочнении используют дефицитные и дорогостоящие элементы (вольфрам, молибден, кобальт и др.).

В настоящее время растет интерес к нетрадиционным технологиям упрочнения металла. Одной из перспективных технологий является взрывное микролегирование заготовок инструмента потоком порошковых частиц. Процесс основан на явлении «сверхглубокого проникновения», заключающемся в том, что при определенных условиях соударения потока микрочастиц порошка с металлической заготовкой наблюдается проникание частиц на глубину 10–20 мм. При сочетании обработки потоком порошка и термообработки в структуре быстрорежущей стали формируются карбидные волокна, направление которых совпадает с направлением введения частиц порошка. Такой материал, яв-

ляющий по своей сути композиционным, обладает повышенными механическими характеристиками и может быть использован для изготовления режущих вставок, предназначенных для армирования резцов горных машин (рис. 7). Технология прошла апробирование на калийных солях в г. Солегорск (Беларусь) и показала хорошие результаты.

### СОЕДИНЕНИЕ ТРУБ С ТРУБНЫМИ ДОСКАМИ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Теплообменные аппараты (ТА) широко используются в энергетическом, химическом машиностроении, судостроении. Безопасность в работе такого оборудования обеспечивается за счет надежности соединения труб с трубными досками.

К сожалению, средства, которые используются для крепления труб в трубных досках ТА, имеют ограничения как по материалам элементов, которые соединяются (труб и трубных досок), так и по их параметрам (геометрическим, физико-механическим и т.п.).

В связи с этим была разработана новая технология крепления труб в трубных досках [6] ТА с использованием совмещения импульсного метода развальцовки труб ударом твердого тела и сваривания взрывом через подвижные передающие среды. Благодаря оптимизации параметров на первой и последующих стадиях деформирования обеспечивается надежное соединение труб в трубных досках с заданно заданными свойствами.

Разработанные теоретические модели, учитывающие применение комбинированного метода обработки и характер взаимодействия деформируемой с большой скоростью трубы в трубной доске ТА, положены в основу новой технологии.

Перед изготовлением теплообменных аппаратов проводятся расчеты оптимального варианта для проведения работ по развальцовке в локальной зоне с помощью пиротехнического монтажного пистолета ПЦ-84 (или ударной колонки УК-6, УК-8), применяемого в строи-

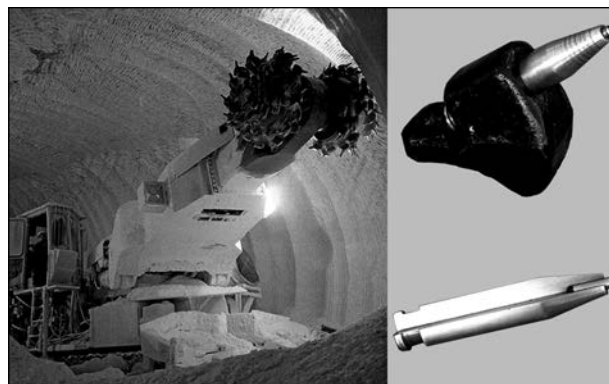


Рис. 7. Горнопроходческий комбайн. Резец, изготовленный по новой технологии

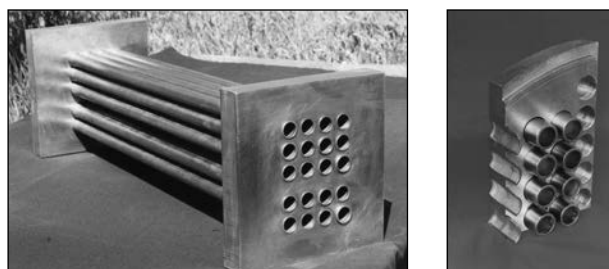


Рис. 8. Соединение труб с трубными досками теплообменных аппаратов

тельном деле для пробивки отверстий в железобетонных балках ударом твердого тела под применяемую трубу.

Применение указанной технологии повышает надежность и безопасность аппаратов при возрастании параметров в теплообменных аппаратах (давления, температуры, скорости жидкостей в трубах и т.п.). Выработанные рекомендации по свойствам материалов соединяемых труб и досок позволяют принимать прогрессивные решения на этапе проектирования новых теплообменных аппаратов с позиций системного подхода.

Себестоимость изготовления теплообменных аппаратов благодаря применению новой технологии может быть снижена на 10–15 %. Технология соединения труб с трубными досками ТА по комбинированной технологии (рис. 8) была опробована при производстве ТА для завода «Химволокно» (г. Сокаль Львовской области).

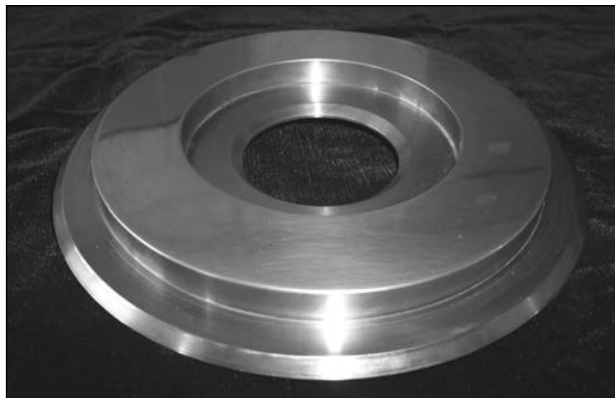


Рис. 9. Биметаллическая мишень для микроэлектроники

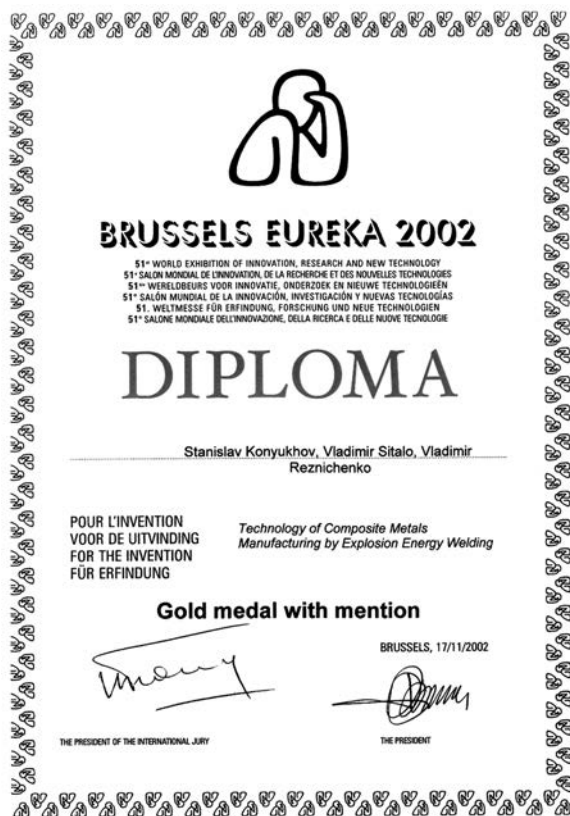


Рис. 10. Диплом за разработанные технологии по сварке взрывом на 51-ой международной выставке изобретений, исследований и промышленных инноваций Eureka-2002

## БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МИШЕНИ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Мишень (распыляемый электрод) используется для получения тонких пленок в радиоэлектронной промышленности, а также в установках, применяемых для напыления износостойких и других покрытий. Биметаллическая мишень (рис. 9) состоит из тугоплавкой основы (тантал, молибден, ванадий, титан и др.) и охлаждающей медной подложки. Мишень позволяет улучшить качество напыляемых пленок, экономить дефицитные дорогостоящие металлы, интенсифицировать процесс изготовления микросхем. Технология применялась для изготовления мишеней медь–нихром 80Н20Х для Запорожского предприятия «Гамма».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ГП «КБ "Южное"» освоен выпуск биметаллических и многослойных металлических композиций различных сочетаний металлов при помощи сварки взрывом. Разработанные и внедренные технологии обеспечивают соединение многих разнородных металлов и сплавов, которые традиционными способами получить затруднительно или даже невозможно, обеспечивают высококачественное (вакуум-плотное) соединение слоев металлов, гарантируют требуемые конструкционные характеристики. Получаемые на основе этих композиций детали различного целевого назначения плоской и цилиндрической формы (пластины, трубы, кольца) допускают последующую механическую обработку, штамповку, прессование, что позволяет получать из них многослойные детали сложной геометрии.

Многослойные композиции и детали на их основе, полученные сваркой взрывом, сочетают высокую прочность, коррозионную и эрозионную стойкость, открывают широкие возможности для совершенствования технологических процессов и повышения качества продукции, экономии дорогостоящих материалов.

Образцы композиционных металлических материалов, изготовленные методом сварки



взрывом, неоднократно выставлялись на различных международных выставках.

На 51-ой Международной выставке изобретений, исследований и промышленных инноваций Eureka-2002 (г. Брюссель) разработанные в ГП КБ «Южное» прогрессивные технологии получения биметаллических и износостойких металлических композитов с использованием сварки энергией взрыва были награждены «Золотой медалью с отличием» (рис. 10).

*Государственное предприятие «Конструкторское бюро "Южное"», имея достаточный опыт в области исследований и разработки многослойных металлических композиций, предлагает заинтересованным организациям услуги по созданию качественно новых материалов с требуемыми характеристиками, а также изготовление деталей из них.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дерibas А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. Изд. 2. — Новосибирск: Наука, 1980. — 221 с.
2. Кудинов В.М., Коротеев А.Я. Сварка взрывом в металлургии. — М.: Металлургия, 1978. — 165 с.
3. Пухтовников Р.В., Завьялова В.И. Штамповка листового металла взрывом. — М.: Машиностроение, 1964. — 175 с.
4. Плакирование стали взрывом / Под редакцией А.С. Гельмана. — М.: Машиностроение, 1978. — 190 с.
5. Райнхарт Дж.С., Пирсон Дж. Взрывная обработка металлов. — М.: Мир, 1966. — 390 с.
6. Ситало В.Г., Пахомов С.Н., Резниченко В.И. Применение комбинированной технологии при создании теплообменных аппаратов. — К.: НТЖ «Технологические системы», № 4/2005. — С. 5—9.

*С.М. Пахомов, А.М. Потопов,  
В.І. Резніченко, С.Є. Мостіпан*

#### РЕАЛІЗАЦІЯ ПЕРЕДОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЗВАРЮВАННЯ ВИБУХОМ ПРИ СТВОРЕННІ НОВИХ МЕТАЛЕВИХ КОМПОЗИЦІЙ

Розглянуті переваги використання зварювання вибухом при створенні багат шарових металевих матеріалів, виготовлення яких іншими методами утруднено. Показані результати використання багат шарових композиційних металевих матеріалів, виготовлених зварюванням вибухом у розробках ДП КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля.

*Ключові слова:* зварювання вибухом, композиційні металеві матеріали.

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

#### IMPLEMENTATION OF ADVANCED EXPLOSION WELDING TECHNOLOGY FOR MAKING NEW METAL COMPOSITES

The advantages of explosion welding application for creation of multi-layer metal materials, which production is impossible by other methods, are considered. The results concerning application of multi-layer composite metal materials manufactured by explosion welding in M.K. Yangel SE DO Yuzhnoye developments are showed.

*Key words:* explosion welding, composite metallic material.

Стаття надійшла до редакції 04.07.11