

М 8 4221

Моковский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана

На правах рукописи

Лукашев Анатолий Владимирович

РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА И ОБОРУДОВАНИЯ ОДНОСТОРОННЕЙ
ШОЕНОЙ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ ТОНКОСТЕННЫХ КОРПУСОВ
ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИВОРОВ

06.03.06 - Технология и машины сварочного производства

Лукашев

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1993

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана

Научный руководитель - к. т. н., доцент АТАМАНОВ В. Н.

Официальные оппоненты: д. т. н., профессор ЧАКАЛЕВ А. А.
к. т. н., доцент ИСАЕВ А. П.

Ведущее предприятие - НПО "ИСТОК"

Защита состоится "13" мая 1993г. на заседании специализированного Совета К 053.15.03 в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отанв на автореферат в 1 экз., заверенный печатью, просим внести в библиотеку МГТУ

им. Н.

библиотеке МГТУ

М 87221

В. И. ГИРШ

Под
Зак

00 экз.
Баумана

Актуальность. Широкое применение полупроводниковых фотоприемников в системах автоматического регулирования и управления технологическими процессами, в системах астронавигации летательных аппаратов, а также в военной технике, в химическом и медицинском приборостроении обусловили значительный объем их производства, который в настоящее время превышает десятки миллионов штук в год. Производство полупроводниковых фотоприемников основано на теории, связывающей электрические характеристики приборов с их конструкцией, свойствами применяемых материалов и технологией изготовления. Установлено, что технология изготовления и герметизация корпусов фотоприемников является не менее сложной проблемой, чем создание полупроводниковых структур. При этом, повышение качества и эксплуатационной надежности фотоприемников неразрывно связано с разработкой эффективных способов их сборки и герметизации. Поэтому техника выполнения этих работ должна непрерывно совершенствоваться и всегда отвечать требованиям радиоэлектронной промышленности.

Особое место в производстве полупроводниковых фотоприемников занимает шовная контактная сварка, с помощью которой осуществляется герметизация практически 80% всех выпускаемых приборов. Многолетняя производственная практика показывает, что основными недостатками принятой технологии сварки являются низкая стабильность качества герметизации и высокая трудоемкость. Низкая стабильность обусловлена разбросом геометрических размеров деталей корпуса, состоянием никелевого покрытия, наличием скользящих контактов в сварочном контуре, а также низкой стойкостью токоподводящих роликов и оправок. Высокая трудоемкость вызвана необходимостью частой смены роликов и оправок, наличием ручных трудно автоматизируемых операций, связанных с установкой и фиксацией корпусов на оправках, а также их снятием после сварки. Отрицательное влияние нестабильности величин сопротивлений скользящих контактов и низкой стойкости внутренних токоподводящих оправок возрастает с уменьшением диаметра

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1087221

Лукашев А.В. Разработка пр

герметизируемых корпусов. При этом в рамках двустороннего токоподвода повышение стойкости оправок затруднительно вследствие малых внутренних размеров свариваемых деталей. В связи с этим работы в области совершенствования процесса шовной контактной сварки и оборудования для герметизации корпусов фотоприемников являются актуальными.

Цель работы. Целью настоящей работы являлось повышение качества и снижение трудоемкости процесса герметизации тонкостенных цилиндрических корпусов фотоприемников методом шовной контактной сварки без внутренних оправок.

Методы исследования. Работа выполнена в сочетании теоретических и экспериментальных методов исследования. Анализ распределения значений плотности тока в зоне сварки при использовании односторонней схемы токоподвода выполнен расчетным методом, основанным на решении дифференциального уравнения электрического поля. В работе применялись программный модуль автоматизированной системы "Поиск", предназначенный для исследования электрических полей в разнородных металлах при контактной сварке и пайке. Основными методами экспериментальных исследований являлись визуальный контроль, испытания на герметичность, осциллографирование и измерение электрических параметров. Для проведения экспериментальных исследований разработано специализированное сварочное и измерительное оборудование. При получении и обработке экспериментальных данных использовались методы математической статистики и теории планирования экстремальных экспериментов.

Научная новизна. Научная новизна состоит в раскрытии закономерностей формирования электрических и температурных полей при односторонней шовной контактной сварке тонкостенных цилиндрических деталей из материалов, склонных к потере вакуумной плотности в результате вторичной рекристаллизации.

Установлено, что:

1. При поддержании постоянным падения напряжения между электродами максимальные значения плотности тока имеют место по границам контактов электрод-деталь со стороны зазора и практически не зависят от протяженности зоны контактирования вдоль образующей цилиндрических деталей.

2. Конфигурация и динамика изменения электрических и температурных полей в процессе формирования каждой отдельной точки шва определяется взаимным пространственным расположением рабочей поверхности электродов и образующей цилиндрических деталей. При этом:

- в случае, когда рабочая поверхность электродов располагается параллельно образующей цилиндрических деталей, положение границы контакта электрод-деталь со стороны зазора, определяющее положение зоны с максимальными значениями плотности тока, большую часть времени формирования каждой отдельной точки шва остается практически неизменным, что вызывает перегрев металла в зазоре между электродами и приводит к изменению формы изделия, а также к потере герметичности тонкостенных корпусов в результате вторичной рекристаллизации;
- в случае, когда рабочая поверхность электродов располагается под углом к образующей цилиндрических деталей, под действием сварочных усилий происходит направленное перемещение границы контакта электрод-деталь, а, соответственно, и зоны с максимальными значениями плотности тока, в результате которого холодные участки рабочей поверхности вступают в контакт с зонами интенсивного тепловыделения в процессе формирования каждой отдельной точки шва, что при определенном сочетании длительности нагрева с величиной угла позволяет ограничить значения температур в зазоре ниже значений температурного интервала вторичной рекристаллизации.

Практическая ценность. Разработан промышленный образец полуавтоматической установки и технологический процесс, позволяющие осуществлять шовную контактную сварку тонкостенных цилиндрических корпусов фотоприемников без внутренних оправок и скользящих контактов в сварочном контуре, что обеспечивает повышение качества герметизации, а также резкое увеличение производительности и снижение трудоемкости.

Экономическая эффективность. Внедрение разработанного процесса и оборудования на Московском заводе "Сапфир" позволило повысить средний выход годных фотоприемников с 96% до 98,7% при одновременном увеличении производительности в 5 раз.

Апробация работы. Основное содержание работы доложено на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов; содержит 152 стр., 12 таблиц, 48 иллюстраций. В списке используемой литературы приведено 72 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1 посвящена анализу состояния вопроса и постановке задач исследования. В главе рассмотрены конструктивные особенности цилиндрических корпусов фотоприемников и приведен обзор современных методов герметизации сваркой. Имеющиеся литературные данные свидетельствуют, что выбор метода герметизации неразрывно связан с конструктивным оформлением корпусов. Наиболее часто для герметизации полупроводниковых приборов используется шовная контактная сварка, которая в большей степени отвечает ряду специфических требований, предъявляемых производством. Основными из этих требований являются обеспечение уровня герметичности не менее $1,32 \cdot 10^{-9}$ м³ Па/с при минимальном термомеханическом воздействии на элементы конструкции, такие как оптические окна, стеклоспаи, полупроводниковые структуры. В связи с этим герметизация преобладающего количества фотоприемников, выпускаемых в цилиндрических корпусах, осуществляется традиционной двухсторонней шовой контактной сваркой посредством роликов и токоподводящих оправок.

Многолетняя производственная практика показывает, что основными недостатками принятой технологии сварки являются невысокая стабильность качества герметизации и высокая трудоемкость. Невысокая стабильность качества герметизации обусловлена склонностью процесса к образованию выплесков, нестабильностью скользящих контактов в сварочном контуре, а также низкой стойкостью оправок, которые необходимо менять уже после сварки 200 корпусов. Высокая трудоемкость вызвана частой сменой оправок и наличием ручных трудно автоматизируемых операций, связанных с установкой и фиксацией корпу-

сов на оправках. Перечисленные недостатки играют важную роль, поскольку забракованные после герметизации приборы являются дорогими, почти готовыми изделиями. На основании этого целью данной работы являлось повышение качества и снижение трудоемкости процесса шовной контактной сварки тонкостенных корпусов фотоприемников.

Для достижения поставленной цели было предложено осуществлять шовную контактную сварку в процессе прокатывания изделий по электродам, выполненным в виде плоских параллельно расположенных пластин. Это позволяет исключить скользящие контакты из сварочного контура и обходиться без внутренних оправок. Однако, в случае сварки без внутренних оправок возникает ряд проблем, связанных с наличием тока шунтирования, протекающего по детали, прилегающей к электродам. Поэтому в работе решались следующие задачи: исследовать особенности формирования соединений при односторонней сварке тонкостенных тел вращения без внутренних оправок; разработать оборудование, обеспечивающее резкое увеличение производительности; разработать технологию герметизации цилиндрических корпусов, позволяющую повысить процент выхода годных; внедрить результаты работ в производство.

В главе 2 приведено описание разработанного источника питания повышенной частоты и механической части экспериментального оборудования, обеспечивающего прокатывание цилиндрических деталей корпуса по электродам без внутренних оправок и скользящих контактов во вторичном контуре.

Источник питания сварочного тока был выполнен на базе управляемого тиристорного инвертора последовательного типа. Источник формирует последовательность разнополярных импульсов тока, разделенных микропаузами. Сварка одной точки шва осуществляется пачкой импульсов, длительность которой задается системой управления. С помощью системы управления и ключевого устройства осуществляется также автоматическое регулирование, обеспечивающее постоянство амплитудного значения падения напряжения между электродами от каждого импульса тока в пачке. Как показано в работах Атаманова В. Н., Круглова Г. Н., Матвеева В. И. и др., такое регулирование обеспечивает стабилизацию размеров сварных соединений и

препятствует образованию выплесков. В отличие от известных решений в разработанном источнике регулирование амплитудного значения тока осуществляется посредством ключевого устройства, обеспечивающего подключение дополнительной обмотки сварочного трансформатора к входному балластному конденсатору. Такое подключение дополнительной обмотки позволяет перераспределять энергию, передаваемую сварочным трансформатором, между нагрузкой и входным балластным конденсатором, что обеспечивает снижение коммутационных токов, стабилизацию длительности отдельных импульсов тока и повышение КПД источника.

Разработанная механическая часть экспериментальной установки содержит сварочные электроды, выполненные в виде двух параллельно расположенных пластин, помещенных в направляющие. Электроды имеют возможность только возвратно-поступательного движения, что обеспечивает исключение скользящих контактов. Прокатывание свариваемых изделий по электродам осуществляется с помощью механизма вращения, содержащего приводной барабан и подающий диск. Использование приводного барабана и подающего диска позволило исключить операцию фиксации изделий, а также совместить во времени вспомогательные и сварочные перемещения.

В главе 2 приведены результаты испытаний разработанного оборудования, в результате которых была установлена принципиальная возможность получения сварных соединений между тонкостенными деталями корпуса без внутренних оправок. Параметры режима сварки выбирались из условия формирования соединений при полном отсутствии выплесков и минимальной величине общей деформации корпуса. Соединения, отвечающие перечисленным требованиям, были получены при поддержании амплитудного значения падения напряжения между электродами на уровне 2,2 В, длительности пачки импульсов 10 мс и усилия на электроды менее 2 кг. Однако, процесс формирования соединений сопровождался перегревом детали, прилегающей к электродам, о чем свидетельствовало оплавленное никелевое покрытие в заворе. В связи с этим, возникла необходимость в проведении детальных исследований особен-

ности формирования соединений при сварке параллельными электродами.

В главе 3 приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований особенностей процесса формирования соединений при односторонней сварке тонкостенных тел вращения без внутренних оправок. Исследования включали анализ распределения значений плотности тока в зоне сварки, определение значений температур в зазоре, изучение кинетики перемещения электродов и формирования сварных соединений. При этом основное внимание уделялось поиску эффективных средств снижения перегрева металла в зазоре между электродами.

Анализ распределения значений плотности тока в зоне сварки был выполнен расчетным методом, основанным на решении дифференциального уравнения электрического поля в геометрической системе электрод-деталь. Результаты расчетов показали, что при использовании предложенной односторонней схемы токоподвода в толще металлов создается неравномерное электрическое поле с максимальной напряженностью по границам контактов электрод-деталь со стороны зазора. При этом неравномерность поля во многом определяется геометрическими размерами зоны сварки. Так, с увеличением ширины контактов электрод-деталь возрастает неравномерность распределения значений плотности тока как в плоскости этих контактов, так и в толще металлов, расположенных под электродами. В то же время наибольшие значения плотности тока, располагаясь по границам этих контактов, остаются практически неизменными. С другой стороны, увеличение расстояния между электродами приводит не только к снижению значений плотности тока, но, что особенно важно, к их значительному выравниванию как в толще металлов, так и по границам контактов электрод-деталь. Таким образом, перегрев детали, прилегающей к электродам, является следствием высоких значений плотности тока по границам контактов, обусловленных схемой токоподвода. Расчетами установлено, что эффективным средством выравнивания значений плотности тока, а, следовательно, и снижения перегрева, является увеличение расстояния между электродами. Однако возможности этого пути в случае сварки малого-

баритных корпусов фотоприемников ограничены конструктивными размерами изделий, в связи с чем максимально возможная величина зазора не превышает двух миллиметров.

Измерения температур в зазоре, выполненные с помощью микротермопар, подтвердили правильность выводов, полученных расчетным путем. Так, при увеличении расстояния между электродами с 1 мм до 2 мм значение температуры в областях, прилегающих к электродам, снижалось с 1400°C до 1200°C . Однако это снижение еще не обеспечивает получение качественной сварки, т.к. значения температур в приэлектродных зонах превышают значения температурного интервала вторичной рекристаллизации кобальта ($950^{\circ}\text{C} - 1010^{\circ}\text{C}$), которая, как известно, вследствие интенсивного роста размеров зерен обуславливает снижение вакуумной плотности тонкостенных корпусов.

Ограничение значений температур при сварке корпусов фотоприемников осуществлялось за счет создания условий для интенсивного отвода тепла в электрод. С этой целью было предложено устанавливать рабочую поверхность электрода под некоторым углом к образующей корпуса. При этом необходимо, чтобы в процессе протекания тока граница контакта электрод-деталь перемещалась по направлению к центру зазора за счет увеличения размеров этого контакта. Тогда расположенные на границе максимальные значения плотности тока, оставаясь практически неизменными с увеличением ширины контакта, также будут перемещаться в направлении к центру зазора. В свою очередь основная масса электрода будет входить в контакт с локальными зонами интенсивного тепловыделения, ограничивая в них значения температур. Наиболее просто такой процесс реализуется при использовании электродов со скошенной под углом рабочей поверхностью.

Посредством измерения термо-эдс в зазоре было установлено, что при использовании электродов со скошенной рабочей поверхностью удается осуществлять сварку при значениях температур в зазоре, не превышающих значений температурного интервала вторичной рекристаллизации кобальта. Однако, имеются моменты времени, свои для различных углов скоса, начиная с которых происходит резкое увеличение ско-

рости нагрева. Совместное измерение значений температур и перемещений электродов позволило установить, что эти моменты совпадают с моментами остановки электродов в процессе пропускания тока. Детальное изучение графиков перемещения электродов показало, что эти перемещения носят поэтапный характер. В работе было условно выделено пять характерных этапов. На первом этапе, что соответствует начальному моменту сварки, перемещение электродов отсутствует. Перемещение электродов начинается на втором этапе и связано с формированием сварных соединений. На третьем этапе происходит резкое снижение скорости перемещения электродов вплоть до их полной остановки. Это связано с тем, что во время второго этапа формирование соединений осуществляется, в основном, за счет расплавления никелевого покрытия деталей корпуса. К концу этапа в зоне сплавления в контакт входят основные металлы, и процесс формирования соединений резко замедляется. На четвертом этапе вновь происходит относительно быстрое перемещение электродов. Однако, оно уже не связано с формированием соединений, а обусловлено общей деформацией деталей корпуса. На пятом этапе перемещения электродов заканчиваются. В случае строгого согласования длительности пропускания тока с длительностью второго этапа перемещения электродов значения температур в зазоре не превышают 500°C , что не влияет на качество герметизации и позволяет осуществлять сварку без общей деформации деталей корпуса в отсутствие внутренних оправок.

Глава 4 посвящена разработке промышленного образца полуавтоматической установки и оптимизации конструктивно-технологических параметров процесса герметизации цилиндрических корпусов фотоприемников диаметром 3,85 мм. Приведено описание угла крепления электродов, обеспечивающего быструю их смену без нарушения ориентации рабочих поверхностей относительно деталей корпуса. Разработанная полуавтоматическая установка обладает высокой кинематической производительностью, которая при сварке корпусов диаметром 3,85 мм составляет 2000 штук в час, что в 5 раз превышает производительность прежних установок.

На разработанной установке были проведены исследования

по оптимизации конструктивно - технологических параметров процесса сварки с целью обеспечения высокого качества герметизации корпусов фотоприемников малого диаметра. Исследования выполнялись с использованием статистических методов планирования экстремальных экспериментов. В результате математической обработки экспериментальных данных было получено уравнение регрессии, адекватно описывающее процесс герметизации в исследуемой области факторного пространства. Уравнение регрессии в натуральных значениях факторов имеет вид:

$$Y(X) = 76,5 + 3640 \cdot t \text{ п.и.} + 0,625 \cdot \angle \alpha - 2,19 \cdot 10^5 \cdot t \text{ мп}$$

где: $Y(X)$ - процент выхода годных по герметичности;
 $t \text{ п.и.}$ - длительность пачки импульсов сварочного тока (мс);
 $\angle \alpha$ - угол скоса рабочей поверхности электродов (гр.);
 $t \text{ мп}$ - длительность микропаузы между отдельными импульсами тока в пачке (мс).

Анализ полученного уравнения показывает, что в выбранной области изменения конструктивно-технологических параметров наибольшее влияние на процент выхода годных оказывает длительность микропаузы между отдельными импульсами тока в пачке ($t \text{ мп}$). По всей видимости это связано с тем, что отвод тепла в электроды при больших значениях микропаузы начинает сказываться не только на значениях температур в контакте электрод - деталь, но и на значениях температур в контакте деталь - деталь, что приводит к нарушению условий нормального протекания процессов формирования соединений. Статистическая значимость и знаки коэффициентов B_1 и B_2 показывают, что увеличение как времени пачки импульсов ($t \text{ п.и.}$), так и угла скоса рабочей поверхности электродов ($\angle \alpha$) приводит к увеличению параметра оптимизации.

Расчеты, выполненные с помощью полученной линейной модели, показывают, что в исследуемой области с учетом ошибки в определении значений $Y(S\{\bar{y}\} = 1,7)$ параметр оптимизации достигает своего предельного значения.

Линейная модель позволяет также установить допустимую область изменения конструктивно-технологических параметров, в которой сохраняется требуемое качество герметизации полу-

проводниковых фотоприемников. Таким образом, проведенные исследования позволили установить оптимальные значения конструктивно-технологических параметров процесса шовной контактной сварки, обеспечивающие средний процент выхода годных фотоприемников, равный 98,7 %, что на 2,7 % выше существующего. Оптимальные значения параметров режима герметизации корпусов диаметром 3,85 мм представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Оптимальные значения конструктивно-технологических параметров процесса герметизации корпусов фотоприемников диаметром 3,85 мм.	
Наименование параметра	Значение параметра
Напряжение между электродами, В	2,2
Расстояние между электродами, мм	2,0
Усилия на электроды, Н	14,0
Длительность пачки импульсов тока, мс	5,5
Длительность паузы между пачками, мс	17 - 23
Угол скоса рабочей поверхности, гр.	16,0
Длительность микропаузы между отдельными импульсами тока в пачке, мкс	30,0
Скорость сварки, мм/с	7,2

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В результате анализа существующей технологии герметизации тонкостенных цилиндрических корпусов фотопремников с использованием традиционной двухсторонней схемы токоподвода установлено, что основными причинами, сдерживавшими повышение качества и снижение трудоемкости процесса шовной контактной сварки, являются нестабильность сопротивления скользящих контактов и низкая стойкость внутренних токоподводящих оправок.

2. Отрицательное влияние неустойчивости сопротивлений скользящих контактов и низкой стойкости внутренних токоподводящих оправок возрастает с уменьшением диаметра герметизируемых корпусов. При этом в рамках двухстороннего токоподвода повышение стойкости оправок затруднительно вследствие малых внутренних размеров свариваемых деталей.

3. На основе анализа конструктивных особенностей корпусов фотоприемников и возможных схем токоподвода установлено, что наиболее перспективной является односторонняя схема токоподвода, которая позволяет осуществлять шовную контактную сварку тонкостенных цилиндрических деталей в процессе прокатывания изделий по параллельно расположенным пластинчатым электродам, что устраняет необходимость во внутренних оправках и позволяет исключить скользящие контакты из сварочного контура.

4. При поддержании постоянным падения напряжения между параллельно расположенными пластинчатыми электродами максимальные значения плотности тока имеют место по границам контактов электрод-деталь со стороны зазора и практически не зависят от протяженности зоны контактирования вдоль образующей цилиндрических деталей.

5. Теоретически и экспериментально установлено, что конфигурация и динамика изменения электрических и температурных полей в процессе формирования каждой отдельной точки шва определяется взаимным пространственным расположением рабочей поверхности электродов и образующей цилиндрических деталей. Показано, что :

- в случае, когда рабочая поверхность электродов располагается параллельно образующей цилиндрических деталей, положение границы контакта электрод-деталь со стороны зазора, определяющее положение зоны с максимальными значениями плотности тока, большую часть времени формирования каждой отдельной точки шва остается практически неизменным, что вызывает перегрев металла в зазоре между электродами и приводит к изменению формы изделия, а также к потере герметичности тонкостенных корпусов в результате вторичной рекристаллизации;

- в случае, когда рабочая поверхность электродов располагается под углом к образующей цилиндрических деталей, под действием сварочных усилий происходит направленное перемещение границы контакта электрод-деталь, а, соответственно, и зоны с максимальными значениями плотности тока, в результате которого холодные участки рабочей поверхности вступают в контакт с зонами интенсивного тепловыделения в процессе формирования каждой отдельной точки шва, что при определенном сочетании длительности нагрева с величиной угла позволяет ограничить значения температур в зазоре ниже значений температурного интервала вторичной рекристаллизации.

6. Экспериментально установлено, что при увеличении угла между рабочей поверхностью электродов и образующей цилиндрических деталей с 5° до 15° ширина сварного шва, которая может быть сформирована без изменения формы изделий снижается с 0,4 мм до 0,28 мм.

7. В результате регрессионного анализа установлено влияние таких конструктивно-технологических параметров, как величина угла между рабочей поверхностью электродов и образующей цилиндрических деталей, длительность пачек импульсов сварочного тока, длительность пауз между пачками и величина микропауз между отдельными импульсами тока в пачке на качество герметизации тонкостенных корпусов фотоприемников, а также определены оптимальные сочетания этих параметров.

8. Показано, что сила трения, возникающая между рабочей поверхностью медных электродов, боковой поверхностью цилиндрических коваровых деталей и боковой поверхностью медного приводного барабана, обеспечивает равномерное прокатывание изделий по параллельно расположенным пластинчатым электродам.

9. В результате проведенных исследований разработаны промышленная полуавтоматическая установка и технологический процесс, позволяющие осуществлять шовную контактную сварку тонкостенных цилиндрических корпусов фотоприемников без внутренних оправок и скользящих контактов в сварочном контуре.

10. Внедрение разработанных процесса и полуавтоматической установки на заводе "Сапфир" в серийное производство фотоприемников для герметизации тонкостенных цилиндрических корпусов позволило увеличить средний процент выхода годных с 96% до 98,7% при одновременном повышении производительности в 5 раз.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Матвеев В. И., Афанасьев Л. К., Лукашев А. В. Перспективы применения высокочастотной сварки для деталей из тонколистовых металлов. // Техника и технология сварки в радиоглектронике и приборостроении: Материалы краткосрочного семинара. - Л.: ЛДНТП, 1983. - С. 77-79.

2. Лукашев А. В. Применение односторонней шовной контактной сварки с автоматической подстройкой режима для герметизации корпусов фотоприборов. // Труды МВТУ. - 1987. - N 491. - С. 53-60.

3. А. С. №1277501 (СССР), МКИ В 23 К 11/08. Устройство для шовной контактной сварки телескопических соединений / В. Н. Атаманов, А. В. Лукашев, В. И. Матвеев, А. В. Аксенов, П. Б. Косарев и др. - 1986. - ДОП.

4. А. с. 1682085 (СССР), МКИ В 23 К 11/24. Управляемый источник для контактной сварки на повышенных частотах / В. Н. Атаманов, А. В. Лукашев, Г. Н. Круглов, В. И. Матвеев, И. А. Ломов. // Открытия, изобретения... - 1991. - №37.