

М249476

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

СУЛАМАНИДЗЕ Артур Константинович

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА
КОНДЕНСАТОРНОЙ ШОВНОЙ СВАРКИ
НИКЕЛЯ ТОЛЩИНОЙ 0,05—0,3 мм

(05.04.05 — Технология и машины сварочного производства)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в МВТУ им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель —
кандидат технических наук, доцент КАГАНОВ Н. Л.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор БРАТКОВА О. Н.
кандидат технических наук, доцент ~~ГУСЕВ С. Ф.~~ *Чаканов А.А.*

Ведущее предприятие: указано в решении Ученого Совета.

Автореферат разослан « » 1974 г.

Защита диссертации состоится « » 1974 г.
на заседании Совета Московского ордена Ленина и ордена
Трудового Красного Знамени высшего технического училища
им. Н. Э. Баумана по адресу: Москва, 107005, 2-я Бауман-
ская ул., дом 5.

Ваши отзывы на автореферат в 2 экземплярах, заверен-
ные печатью, просьба высылать по указанному адресу.

С диссертацией МВТУ
им. Н. Э. Баумана.

Ученый секретарь ОВ
к. т. н., до

М249476

ВВЕДЕНИЕ

Решением XXIV съезда КПСС предусмотрено резкое увеличение выпуска изделий электронной техники. В частности, перед специальными отраслями приборостроения поставлена задача расширения производства топливных элементов химических источников тока.

В процессе производства этих изделий приходится сваривать никель толщиной от 0,05 до 0,3 мм. От качества сварки в сильной мере зависят технико-эксплуатационные свойства изделий, их работоспособность и долговечность.

В имеющейся отечественной и зарубежной литературе практически отсутствуют рекомендации по шовой сварке никеля малых толщин. Ряд специфических особенностей тонкого никеля как конструкционного материала создают значительные затруднения при его сварке.

Известные методы сварки тонких материалов не позволяют получать высокие и стабильные показатели качества соединений.

Поэтому основной целью работы является изыскание, исследование и разработка способа, режимов и условий сварки тонкого никеля, гарантирующего возможно более полное выполнение требований к соединению и процессу сварки.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка литературы.

Глава I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Топливные элементы из никеля находят все возрастающее применение как составная часть привода и как источник энергии электро-мобилей, железнодорожных вагонов, разного рода морских и амфибийных транспортных средств, для отопления квартир, в установках для кондиционирования воздуха. Широкое и все возрастающее применение электрохимических источников тока с топливными элементами обусловлено их высоким к.п.д., достигающим 65-70%, их благоприятными весовыми и габаритными характеристиками, бесшумностью, минимальным тепловыделением, возможностью полезного использования продуктов химических реакций (в частности воды) при их работе.



Общая протяженность сварных соединений одной батареи топливных элементов из никеля достигает 500 метров и более. Обычно электроды топливных элементов свариваются из двух никелевых пластин, одна из которых имеет толщину 0,05 мм, а вторая - 0,3 мм. Поэтому исследование, исследование и разработка процесса сварки никеля малых толщин (0,05-0,3 мм) является важной задачей.

Анализ качества сварных соединений тонкого никеля, выполненных в условиях производства, показывает, что многие из этих соединений не удовлетворяют требованиям по прочности и герметичности. Это нередко является основной причиной недостаточной надежности и малого срока службы топливных элементов. Потери средств, обусловленные низким качеством сварных соединений никеля, исчисляются миллионами рублей.

В имеющейся отечественной и иностранной литературе практически отсутствуют сведения о целесообразных способах, режимах и условиях сварки тонкого никеля. Принципиально возможные способы осуществления сварных соединений топливных элементов отличаются значительным разнообразием. К ним относятся: ультразвуковая сварка, сварка электронным лучом в вакууме, сварка лучом лазера, импульсная аргоно-дуговая сварка вольфрамовым электродом, микроплазменная сварка и контактная сварка во всех ее разновидностях. Каждый из этих способов развивается и находит свое применение.

В настоящее время наметилась тенденция применять для изготовления электродов топливных элементов материалы толщиной от 0,05 до 0,3 мм. Наиболее перспективным процессом при таких толщинах является конденсаторная шовная сварка, которая по сравнению с современными возможными способами сварки не уступает им по прочности и герметичности соединения, превосходит эти способы по производительности, отличается простотой и надежностью оборудования. Поэтому в качестве базового способа осуществления сварных соединений топливных элементов выбрана конденсаторная сварка.

Анализ литературных данных и производственного опыта применения конденсаторной шовой сварки никеля указанных толщин показывает, что она не всегда гарантирует достаточную стабильность качества соединения.

Поэтому в качестве основной задачи исследования являлось выявление таких условий и режимов ее осуществления, которые гарантировали бы полное удовлетворение всех требований к указанным соединениям.



В связи с этим предстояло решить следующие задачи:

1. Подготовить экспериментальную сварочную машину, пригодную для конденсаторной сварки никеля толщиной 0,05–0,3 мм.
2. Разработать методику и подготовить необходимые устройства для определения основных параметров режима и условий сварки.
3. Разработать методику и изготовить необходимые устройства для оценки качества сварных соединений.
4. Произвести экспериментальный и теоретический анализ особенностей процесса конденсаторной сварки.
5. Выявить наиболее целесообразные технологические приемы, режимы и условия сварки, гарантирующие достижение высоких и стабильных показателей качества соединений.

Глава II. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЧАСТИ РАБОТЫ

Для проведения экспериментальных работ была изготовлена шовно-точечная машина типа К-51, разработанная Н.А. Кагановым на кафедре сварки МВТУ им. Н.Э. Баумана. Машина оснащена конденсаторным дозатором энергии К-29, сварочным трансформатором с коэффициентом трансформации 36 и позволяет плавно регулировать зарядное напряжение в пределах от 250 до 600 В, емкость батарей конденсаторов в пределах от 100 до 2000 мкФ, усилие сжатия электродов в пределах от 5 до 30 кг.

Экспериментальные исследования проводились в основном на плоских листах размерами 75x55x0,3 мм и 50x35x0,05 мм, которые сваривались по периметру 45x30 мм роликовой сваркой так, что получался замкнутый сосуд (примерно в середине одного (толстого) листа перед сваркой просверливалось отверстие диаметром 8–10 мм).

Измерение сопротивления холодных контактов производилось непосредственно в сварочной машине при фактическом усилии сжатия электродов путем пропускания через зону сварки переменного тока промышленной частоты силой 1,5–2 А.

Процесс формирования соединений изучался синхронным осциллографированием сварочного тока и напряжений в межэлектродной области в сочетании с металлографическими исследованиями.

Герметичность соединений испытывалась на плотность под давлением простейшим видом "испытание подушки". Прочность соединений оценивалась по результатам испытаний на отрыв образцов, вырезанных из имитаторов и натуральных электродов топливных элементов.

Глава III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНДЕНСАТОРНОЙ ШОВНОЙ СВАРКИ НИКЕЛЯ

Для решения задач, поставленных в главе I, проведены экспериментальные и теоретические исследования особенностей процессов конденсаторной шовной сварки никеля толщиной 0,05–0,3 мм. Многочисленные предварительные эксперименты позволили установить, что регулированием в широких пределах параметров режима сварки, подбором материала, геометрии и интенсивности охлаждения рабочих частей электродов не удается устранить прилипание одного из разнополярных электродов к свариваемой детали. Прилипание сопровождается непроваром, нарушением герметичности, ухудшением внешнего вида соединения и, следовательно, является основным препятствием для получения высокого и стабильного качества соединений.

Анализ литературных данных и результат предварительных экспериментов позволили высказать предположение, что основной причиной указанных дефектов процесса сварки является неодинаковое тепловыделение в каждом из электродных контактов вследствие действия эффекта Пельтье. Сущность явления Пельтье заключается в том, что тепловыделение в контакте разнородных металлов зависит от направления тока. При прохождении тока от положительного по термоэлектрическому соотношению металла, к отрицательному, теплота Пельтье добавляется к Джоулевой теплоте, а при обратном направлении тока – вычитается. Из указанного следует, что при контактной сварке униполярным импульсом тока базировать тепловые расчеты лишь на законе Джоуля-Денца без учета теплоты Пельтье нельзя.

О влиянии направления тока на тепловые процессы контактной сварки некоторые исследователи – Хасс, Вьянт, Камерон, Балковец, Каганов, Кочергин и другие – указывали и раньше. Существуют графо-аналитические методы количественной оценки роли эффекта Пельтье: аналитические методы Балковца, Карслоу и Егера; графические методы Бальдера и Шольца. Однако эти методы весьма приближенные, так как некоторые величины выбраны сугубо произвольно. Попытки использовать их при наших условиях сварки не дали положительных результатов. Из анализа существующих методик можно сделать следующие выводы: оценка влияния эффекта Пельтье, получаемая при указанных методах расчета, может быть значительно уточнена, если было бы известно действительное значение напряжения Пельтье.

Эта задача нами была решена следующим образом: согласно теории термоэлектричества в "плюсовом" контакте теплота Пельтье до-

бавляется, а в "минусовом" контакте отнимается от джоулевой теплоты. Теплота Пельтье

$$Q_n = \int_{t_0}^{t_{\max}} U_n \cdot i \, dt \quad (1)$$

За время dt

$$dQ^+ = dQ_{\text{дж}} + dQ_n \quad (2)$$

$$dQ^- = dQ_{\text{дж}} - dQ_n \quad (3)$$

Отсюда

$$dQ_n = \frac{dQ^+ - dQ^-}{2} \quad (4)$$

В то же время

$$dQ^+ = U^+ \cdot i \, dt \quad (5)$$

$$dQ^- = U^- \cdot i \, dt \quad (6)$$

Подставляя (5) и (6) в (4), получим

$$dQ_n = \frac{(U^+ - U^-) i \, dt}{2} \quad (7)$$

С другой стороны

$$dQ_n = U_n \cdot i \, dt \quad (8)$$

Приравнявая (7) и (8), получим уравнение

$$U_n = 0,5(U^+ - U^-) \quad (9)$$

согласно которому значения напряжения Пельтье равно полуразности значений падений напряжений в "плюсовом" и "минусовом" контактах разнородных металлов.

"Плюсовым" контактом здесь и в дальнейшем считается контакт, в котором ток проходит от положительного металла к отрицательному по термоэлектрическому соотношению.

Для экспериментального подтверждения теории го вышеизложенной методике необходимо осциллографировать мгновенные значения тока и напряжений в "плюсовом" и "минусовом" контактах при одинаковых значениях "холодных" сопротивлений. (Для нашего конкретного случая значения напряжения Пельтье экспериментально определялись следующим образом: между двумя медными, одинаковыми по форме и размерам, электродами зажималась никелевая пластина. Выравнивание сопротивлений верхнего и нижнего контактов "электрод - деталь" достига-

ется специальной притиркой под сварочным давлением электродов к пластине. Для сведения к минимуму нагрева приэлектродных контактов и возникающей при этом термо-э.д.с. измерение сопротивления производилось переменным током силой 1,5 - 2 а. Напряжение, снимаемое с приэлектродных контактов, подводилось к ламповому вольтметру). Разделение пополам разности указанных напряжений представляют собой, согласно уравнению (9) мгновенные значения напряжений Пельтье. Количество теплоты Пельтье рассчитывалось по формуле (1). Использование этой методики позволило установить, что количество теплоты Пельтье для приэлектродного контакта медь - никель составляет $\pm 8\%$ от Джоулевой теплоты.

Вероятность прилипания электродов к свариваемым деталям и многие другие процессы в электродных контактах определяются характером изменения мгновенных значений температур и их максимальными значениями в этих частях сварочной цепи.

В условиях, когда скорости нарастания температур достигают $10^5 - 10^6$ °C/с, когда непосредственный доступ к зонам максимального нагрева затруднен, прямое измерение этих температур практически невозможно. Поэтому большой интерес представляет разработка косвенного метода определения кинетики изменения температур и их максимальных значений. Предложенный метод определения действительных значений напряжений Пельтье (9) открыл возможность оценки этих температур, используя для этого первое соотношение Томсона, согласно которому

$$T = \frac{1}{e} U_{\pi} \quad (10)$$

Это соотношение характеризует температуры в том контакте, в котором теплота Пельтье добавляется к теплоте Джоуля. Значение дифференциальной термо-э.д.с. e для сочетания металлов медь - никель берется из экспериментальных кривых Бальдера, согласно которым для температур от 300 до 900°K значения e сравнительно мало изменяются и поэтому для расчетов принимается их среднее значение, равное 26 мкВ/°K. Максимальная ошибка при усреднении не превышает $\pm 5\%$. При указанном значении e и напряжении Пельтье по уравнению (10) рассчитывалась кривая изменения мгновенных значений максимальных температур в "плюсовом" контакте в процессе конденсаторной сварки.

Сопоставление данных о падении напряжения в "плюсовом" контакте с напряжением Пельтье показывает, что зависимость между ними для сочетания металлов медь - никель может быть выражена формулой

$$U_n = 0,082 U^+ \quad (11)$$

Имея это соотношение, можно ограничиться определением Подставив затем в уравнение (10) определенное по формуле (11) значение U_n и усредненное значение ϵ находится, что

$$T = 3150 U^+ / ^\circ K \quad (12)$$

Выявленная взаимосвязь падения напряжения и максимальной температуры в электрическом контакте позволила установить, что прилипание "плюсового" электрода из меди к никелю начинается при значении напряжения Пельтье 18 мВ, или общем напряжении в этом контакте 0,22 В, что соответствует температуре начала прилипания 430°C.

Пользуясь разработанной методикой, было выявлено влияние параметров режима сварки на склонность к прилипанию. Установлено, что интенсивное прилипание "плюсового" электрода из меди к никелю уменьшается с уменьшением амплитудного значения тока и с увеличением усилия сжатия в "плюсовом" контакте. Толщина детали оказывает незначительное влияние на напряжение Пельтье и интенсивность прилипания электрода к детали.

Глава IV. РАЗРАБОТКА СПОСОБА СВАРКИ, ЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Проведенные предварительные эксперименты применительно к конденсаторной шовной сварке тонкого никеля показали, что одним из главных затруднений для успешного использования этого способа сварки являлось прилипание электродов к свариваемым деталям. Проведенные исследования позволили установить, что при толщинах свариваемых деталей 0,05–0,3 мм и обычном способе шовной конденсаторной сварки комбинированием материала, формы и размеров рабочей части электрода, а также параметров режима не удастся предупредить прилипание. Прилипание медных электродов к никелевым деталям начинается тогда, когда минимальное значение суммарного падения напряжения в контакте становится равным или превышает 0,22 В. Исходя из этого представляет практический интерес выявление возможных методов и средств снижения напряжения в электродных контактах.

Анализ влияния сварочного усилия на падение напряжения в контактах навело на мысль применить такой способ сварки, при котором было бы возможно регулировать величину усилия сжатия "плю-

совом" приэлектродном контакте независимо от сварочного усилия. При этом на "минусовом" электроде и в сварочном контакте усилие сжатия должно быть настолько малым, чтобы гарантировать получение требуемой литой зоны при отсутствии прилипания "минусового" электрода к детали, а на "плюсовом" электроде усилие должно быть настолько большим, чтобы падение напряжения в контакте "электрод-деталь" было меньше 0,22В и, следовательно, температура нагрева была значительно меньше 430⁰С и тем самым полностью исключалась вероятность прилипания электрода к детали. Для реализации возможности отдельного регулирования усилий в приэлектродных контактах была разработана специальная схема токоподвода, согласно которой электроды смещены относительно друг друга.

Применение разработанного способа сварки отдельного регулирования усилия сжатия в приэлектродных контактах и устройства для осуществления этого способа позволило регулировать величину усилия сжатия в "плюсовом" контакте "электрод - деталь" независимо от сварочного усилия. Резкое увеличение усилия сжатия и площади сопряжения в "плюсовом" приэлектродном контакте дало возможность поддерживать падение напряжения контакта ниже уровня напряжения прилипания и температуры ниже температуры прилипания.

Применение указанного способа позволило обеспечить высокую прочность и герметичность соединений никелевых деталей толщиной 0,05-0,3 мм, благоприятный внешний вид, достаточные размеры и симметричное расположение литой зоны при отсутствии прилипания электродов к свариваемым деталям.

В дальнейшем были исследованы конструктивно-технологические возможности и особенности предложенного способа сварки и определена область оптимальных значений наиболее важных параметров режима сварки применительно к соединениям топливных элементов.

С целью выявления конструктивно-технологических особенностей и оптимальных условий сварки необходимо было уточнить методику измерения электрических параметров зоны сварки. Для этого было проведено качественное моделирование процесса с помощью плоской модели. В качестве материала модели применена нержавеющая сталь толщиной 0,2 мм. Моделировалось разное состояние "плюсового" контакта "электрод - деталь", с помощью которого имитировалось изменение усилия сжатия в этом контакте. Через модели пропускался постоянный ток и измерялись значения падения напряжений на каждом участке в межелектродной области, а также суммарное падение напряжения между электродами. На основе проведенных измерений были получены следующие данные:

1. С увеличением усилия сжатия (уменьшением сопротивления) "плюсового" приэлектродного контакта уменьшается падение напряжения этого контакта, а падение напряжения в других контактах зоны сварки растет соответственно с ростом тока;

2. При расчете суммарного падения напряжения в случае разработанного нами способа сварки нельзя пренебрегать падением напряжений на участке нижней ("плюсовой") детали между осями электродов длиной, обозначенной l^+ , т.е.

$$U_{\Sigma} = U_{\Sigma D}^- + U_{DD} + U_D^+ + U_{\Sigma D}^+ \quad (13)$$

где U_{Σ} — суммарное падение напряжения в межэлектродной области;

$U_{\Sigma D}^-, U_{\Sigma D}^+$ — падение напряжения в "минусовом" и "плюсовом" приэлектродных контактах;

U_{DD} — падение напряжения в контакте "деталь — деталь";

U_D^+ — падение напряжения на участке "плюсовой" детали между осями электродов.

Величина U_D^+ составляет около 30% от общего падения напряжения зоны сварки.

Моделирование также позволило: 1) выяснить базы измерения падения напряжений в различных участках зоны сварки и 2) как оказалось, изменение сопротивления в "плюсовом" приэлектродном контакте приводит к изменению напряжений и на остальных участках зоны сварки только за счет изменения значения тока.

Полученные моделированием результаты хорошо подтверждаются осциллограммами электрических параметров в межэлектродной области реального процесса сварки и металлографическим анализом соединения:

1. Увеличение усилия сжатия в "плюсовом" контакте "электрод — деталь" от 10 до 70 приводит к уменьшению амплитудного значения напряжения в этом контакте от 0,2 до 0,05 В, при этом растут амплитудные значения тока на 8–10% и размеры литого ядра в 1,5 раза. Аналогичное увеличение размеров литого ядра наблюдалось при постоянном значении усилия сжатия и межэлектродного расстояния, но с увеличением амплитудного значения сварочного тока на 8–10%;

2. С увеличением межэлектродного расстояния падает амплитудное значение тока и уменьшаются размеры литого ядра, причем падают амплитудные значения падения напряжения в контактах межэлектродной области за исключением падения напряжения на участ-

ке толстолистовой детали, ростом которого и определяется увеличение суммарного значения падения напряжения между электродами.

Проведенные исследования применительно к новому способу позволили рекомендовать режимы сварки топливных элементов, основные из которых приведены в таблице.

Указания в таблице режимы были разработаны применительно к машине К-51 при значении коэффициента трансформации $K_{тр} = 36$. Уровень сварочного усилия выбирался из условия стабилизации переходных сопротивлений вследствие протекания в зоне контактирования пластических деформаций.

Установлено, что для получения высокого и стабильного качества соединения усилие в "длинном" приэлектродном контакте должно быть в 2-3 раза больше, чем сварочное при возможно минимальном расстоянии между осями электродов.

Таблица

Толщина материала никель + никель, мм	Зарядное напряжение, В	Емкость батареи конденсаторов, мкф	Сварочное усилие, кг	Частота импульсов, импульс/мин.	Скорость сварки, мм/мин
0,05-0,3	420	540	12	150	60
0,15-0,15	350	1500	15	120	60
0,3 -0,3	400	1500	15	100	60

В качестве электродных материалов применялась медь М1. Диаметр сварочного ролика 140-180 мм, толщина 4-6 мм, радиус закругления рабочей поверхности 2-3 мм.

Внешний вид электродов топливных элементов, сваренных по разработанному способу конденсаторной сверлой удовлетворителен, герметичность и прочность высокие.

Для оценки качества сварных соединений, получаемых предлагаемым способом сварки и стабильности самого способа сварки, по результатам разрушающих испытаний был проведен статистический анализ качества. Гистограммы распределения прочности носят характер близкий к нормальному. Нормальность распределения прочности была проверена на вероятностной бумаге, где была получена хорошая сходимость результатов. Эмпирические гистограммы были аппроксимированы теоретическими кривыми Гауса. С помощью аналитических зависимостей было получено среднее арифметическое значение прочности и среднее квадратическое отклонение значения прочности

для существующего и предлагаемого способов сварки. Прочность соединений, сваренных существующим способом составила $\bar{X}_1 = 7,28$ кг, тогда как при предлагаемом способе $\bar{X}_2 = 7,01$ кг. Среднеквадратичные отклонения соответственно составили $S_{\bar{X}_1} = 0,47$ кг, $S_{\bar{X}_2} = 0,24$ кг.

Сравнение стабильности способов сварки производилось путем нахождения коэффициента вариации, при этом были получены следующие значения:

- а) существующим способом $V_1 = 14\%$;
- б) предлагаемым способом $V_2 = 3,4\%$.

Сравнительная вероятность равнонадежности соединений, сваренных по существующему и предлагаемому способам вычислялась с помощью определения относительного показателя качества для соединений сваренных старым и новым способом. Согласно этому было получено, что

$Q_{\gamma} = 2,75$, т.е. вероятность равнонадежности соединения, сваренного предлагаемым способом гораздо больше, чем для соединений, сваренных существующим способом.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что при использовании существующих способов дуговой сварки униполярным импульсом тока не удается получить сварное соединение никелевых пластин с формированием литого ядра без прилипания электрода со стороны положительного источника питания.

2. На основе теоретических и экспериментальных исследований установлено, что прилипание обусловлено главным образом действием эффекта Пельтье.

3. Разработан расчетно-экспериментальный метод количественной оценки напряжения Пельтье, позволивший определить теплоту Пельтье. Для приэлектродного контакта медь - никель оно составляет $\pm 8\%$ от количества Джоулевого тепла, выделяемого в этом контакте.

4. Выявлена взаимосвязь падения напряжения и максимальной температуры в контакте разнородных металлов, что позволило определить напряжения и температуру начала прилипания. При сочетании металлов медь - никель напряжение начала прилипания равно 0,22 В, а температура начала прилипания равна 430°C .

5. Выявлено влияние параметров режима сварки на склонность к прилипанию. Установлено, что процесс прилипания уменьшается с уменьшением усилия сжатия в контакте. Толщина детали влияет на процесс незначительно.

6. Разработан способ контактной сварки на основе раздельно-

го регулирования усилия сжатия в каждом из электродных контактов, что позволило регулировать тепловое состояние в "плюсовом" контакте "электрод - деталь" независимо от сварочного усилия.

7. Исследованы технологические возможности и особенности предложенного способа сварки, определена область оптимальных значений наиболее важных параметров режима сварки, применительно к соединениям топливных элементов.

Установлено, что для получения высокого и стабильного качества соединения усилие в "плюсовом" приэлектродном контакте должно быть в 2-3 раза больше, чем сварочное, при расстоянии между электродами 1-2 мм.

8. Использование разработанного способа сварки при изготовлении опытных конструкций топливных элементов на производстве дало положительные результаты.

По сравнению с существующим способом шовной сварки прочность соединений возрасла более, чем в 2 раза при увеличении стабильности в 4 раза.

Гарантирована герметичность и полностью исключено прилипание.

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Каганов Н.Л., Суламанидзе А.К. Экспериментальный метод количественной оценки теплоты Пельтье при контактной сварке. Тезисы докладов конференции "Механизация и автоматизация сварочного производства", Могилев, 1972.
2. Каганов Н.Л., Суламанидзе А.К. Исследование влияния эффекта Пельтье при конденсаторной сварке. Сб. аннотаций ХУП юбилейной научно-технической конференции, Тбилиси, 1972.
3. Каганов Н.Л., Суламанидзе А.К. Методика измерения температуры тела при конденсаторном заряде. Сб. материалов "Прогрессивные способы сварки в машиностроении", Ташкент, 1973.
4. Каганов Н.Л., Суламанидзе А.К. Расчетно-экспериментальный метод количественной оценки напряжения Пельтье и его взаимосвязь с температурой. "Известия вузов. Машиностроение", № 10, 1973.
5. Каганов Н.Л., Суламанидзе А.К., Шаши Д.М. Исследование и разработка способа конденсаторной шовной сварки никеля. "Известия вузов. Машиностроение", № 11, 1973.
6. Суламанидзе А.К. Некоторые вопросы контактной сварки. Тезисы докладов ХУП научно-технической конференции, Ц, Тбилиси, 1974.