

М497801

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена
Трудового Красного Знамени Государственный технический
университет имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

УДК 621.791

АНТОНОВ Алексей Алексеевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЛОКАЛЬНОГО НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СВАРНЫХ
СОЕДИНЕНИЯХ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ И
СОЗДАНИЕ МАЛОГАБАРИТНОЙ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

05.03.06 - Технология и машины сварочного производства

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических
наук

Работа выполнена в Московском Государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана

Научный руководитель - академик Николаев Г.А.

Официальные оппоненты: -доктор технических наук

профессор Игнатьева В.С.

-кандидат технических наук

Шитенов И.Н.

Ведущее предприятие - НИКИМТ

Защита состоится 76^я Мая 1991 г.

на заседании специализированного совета К053.15.03 при
Московском Государственном техническом университете
им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Г.Москва Б-5,
2-я Бауманская ул., дом 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
МГТУ им.Н.Э.Баумана.

экземпляре, заверенный
ному адресу.

991 г.

В.И.Гири

М 497801.

тем 2 п.л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Создание новых конструкций в машиностроении, авиации и других отраслях промышленности сопровождается внедрением материалов повышенной прочности и эффективных способов сварки. Решение проблемы обеспечения требуемой прочности сварных соединений и конструкций, повышение их качества и работоспособности неразрывно связано с необходимостью управления напряженно-деформированным состоянием, создаваемым термическим циклом сварки.

Напряженное состояние сварных соединений оказывает воздействие на усталостную прочность в зависимости от величины и характера распределения остаточных напряжений. Малоисследованным остаются вопросы о характере распределения полей остаточных напряжений, возникающих в сварных соединениях, выполненных высококонцентрированными источниками энергии – электронным и лазерным луч. Это связано с тем, что при электронно-лучевой и лазерной сварке возникают резко локализованные поля остаточных напряжений, которые требуют разработки новых технологических процессов для снижения их уровня и диагностической аппаратуры для его контроля. Особое значение приобретают эти вопросы для сварных крупногабаритных конструкций из титановых сплавов и являются актуальными в настоящее время.

Цель работы. состоит в разработке расчетно-экспериментального метода низкотемпературной локальной обработки сварных соединений, выполненных электронно-лучевой сваркой с целью снижения уровня остаточных напряжений в тонкостенных крупногабаритных конструкциях и создании малогабаритной диагностической аппаратуры для контроля остаточных сварочных напряжений с использованием элементов волоконной оптики.

Методы исследования. Для измерения остаточных напряжений использовался метод голографической интерферометрии в сочетании с методом высверливания отверстия.

Исследование температурных полей проводилось с применением хромель-алюминиевых термопар и шлейфовых осциллографов. Кроме того, общая картина температурного поля изучалась с помощью нанесения на исследуемую поверхность термокрасок. Расчеты выполнялись на персональной ЭВМ.

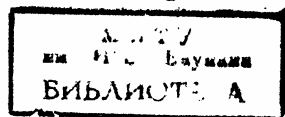
Научная новизна. I. Разработан расчетно-экспериментальный

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1497801

Антонов А.А. Разработка ме



метод и методика локального низкотемпературного воздействия на остаточные напряжения в сварных соединениях при электронно-лучевой сварке:

а) создана математическая модель, описывающая взаимодействие термоупругих напряжений с остаточными в зоне сварного соединения, позволяющая выбрать оптимальный режим низкотемпературной обработки, обеспечивающий снижение уровня первоначальных остаточных напряжений;

б) разработана программа расчета на персональной ЭВМ режимов низкотемпературной обработки сварных соединений;

в) исследовано влияние наводимого поля термоупругих напряжений на поле остаточных напряжений в сварном соединении и его перераспределение.

2. Исследованы характерные особенности полей остаточных напряжений в сварных соединениях, выполненных электронно-лучевой сваркой в титановых, алюминиевых сплавах и легированных стал.

3. Разработаны основные положения для создания диагностической аппаратуры для контроля остаточных напряжений в реальных конструкциях на основе применения лазерной техники и достижений в волоконной оптике.

4. Разработан способ определения знака измеряемых остаточных напряжений, контроля их методом отверстия в сочетании с голографической интерферометрией.

Практическая ценность работы.

1. Исследован характер распределения остаточных напряжений после электронно-лучевой сварки в сварных соединениях реальных конструкций из сплавов ОI420. ВТI, ВТ6.

2. Создана малогабаритная аппаратура, позволяющая осуществлять оперативное измерение величины остаточных напряжений в сварных соединениях различных материалов. Время одного измерения - 5 минут. Точность измерения может достигать 5 ± 10 МПа.

3. Разработан способ и создано устройство для определения знака остаточных напряжений методом голографической интерферометрии.

4. Выбраны режимы низкотемпературной обработки сварных соединений конкретных узлов из титановых и алюминиевых сплавов и сталей.

5. Результаты работы внедрены на АНТК имени Туполева,

НИАТ и НПО "Композит".

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на научном семинаре кафедры "Технология и оборудование сварочного производства", на III Всесоюзном симпозиуме "Технологические остаточные напряжения", г.Кутаиси, 1988г.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Работа изложена на 224 страницах машинописного текста, содержит 90 рисунков, 4 таблицы и 104 наименований литературных источников.

Содержание работы.

Во введении дано обоснование актуальности выполненного исследования, приведены основные положения, вынесенные на защиту.

В главе I дан анализ состояния вопроса по изучаемой проблеме. Остаточные напряжения всегда появляются в конструкциях после сварки. Они оказывают значительное влияние на эксплуатационные характеристики сварных соединений. Их влияние проявляется через два основных фактора - упругую потенциальную энергию, запасенную остаточными напряжениями, и максимальные значения напряжений в отдельных зонах сварного соединения. В этой главе рассматривается влияние остаточных напряжений на точность сварных конструкций после механической обработки, стабильность размеров, возникновение холодных трещин, статическую прочность, ударное нагружение, развитие трещины, вибрационную прочность, сварную устойчивость, коррозионное растрескивание. Делается вывод, что трудно соотнести, в общем случае, степень влияния максимальных значений напряжений или запасенной упругой энергии. Однако в конкретных случаях такое деление дает возможность выбрать наиболее подходящий способ снижения остаточных напряжений.

Методы снижения остаточных напряжений условно делятся на досварочные, мероприятия в процессе сварки и послесварочные. Коротко рассматривается ряд досварочных методов и мероприятий в процессе сварки. Основное внимание уделено послесварочным методам. Это объясняется тем, что они наиболее употребимы в единичном и мелкосерийном производстве, когда нельзя заранее определить возможные остаточные напряжения. Послесварочные ме-

тоды различаются по типу воздействия: механические, термические, термо-механические. Они также различаются по их воздействию на общий уровень остаточных напряжений (снижение потенциальной энергии) и на максимальные (пиковые) значения остаточных напряжений. Изучение конкретных способов снижения остаточных напряжений показало, что их выбор зависит от того, какие эксплуатационные характеристики наиболее важны в данном изделии. Рассматриваются такие методы, как отжиг, приводящий к полному снятию остаточных напряжений, методы механического воздействия: обкатка, проковка, виброобработка, УЗ-обработка, целенаправленное нагружение, электрогидроимпульсная обработка.

Также описываются методы термического воздействия: термо-механический, термоциклический, докальные методы термического воздействия. Отмечено, что при применении методов локального термического воздействия при ограничении максимальной температуры можно значительно снижать уровень остаточных напряжений без применения дорогостоящего оборудования и не изменяя физических свойств материала.

В этой же главе рассмотрены методы измерения остаточных напряжений в сварных соединениях. Измерение остаточных напряжений является сложной технической проблемой, так как все имеющиеся методы основаны не на непосредственном измерении напряжений, а через косвенные измеряемые параметры материала или через измерения деформационных перемещений. Физические методы измерения (магнитоупругий, ультразвуковой, рентгеновские и др.) малопригодны для исследования остаточных напряжений в сварных соединениях, т.к. изменения в физических свойствах и структуре оказывают столь сильное влияние на результат, что определить реальные остаточные напряжения очень трудно.

Для измерения остаточных напряжений в сварных конструкциях используются механические методы. Они основаны на измерении деформаций, возникающих при разгрузке определенного объема. Обычно это осуществляется разрезанием, вырезанием квадратиков, высверливанием отверстия или кольцевой проточки. Возникающие при этом деформации регистрируются механическими датчиками или тензодатчиками.

На основе вышеизложенного были поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать литературные источники о методах снижения и измерения остаточных напряжений.
2. Выбрать метод измерения остаточных напряжений и создать измерительное оборудование.
3. Изучить характер распределения остаточных напряжений после сварки, термообработки и т.д. методом голографической интерферометрии
4. Исследовать механизм воздействия наведенных временных локальных упругих температурных напряжений на поля собственных остаточных напряжений в сварных соединениях.
5. Разработать способы создания локального температурного поля.
6. Разработать рекомендации по локальной обработке сварных соединений в конкретных изделиях с целью повышения надежности и работоспособности сварного соединения.
7. Создать малогабаритную диагностическую аппаратуру с использованием достижений лазерной интерферометрии и волоконной оптики.

Во второй главе изложены основные сведения о методе определения напряжений высверливанием отверстия в сочетании с голографической интерферометрией.

Даются основные сведения о голографии. Рассматриваются основные оптические схемы голографических интерферометров, их преимущества и недостатки. Показано, что схема Денисюка (во встречных пучках) менее пригодна для создания специального прибора для измерения остаточных напряжений, чем схема Лейта.

Метод измерения напряжений с помощью высверливания отверстия применяется наиболее широко. Измерение деформаций кромок высверленного отверстия чаще всего осуществляется тензодатчиками. В США принят стандарт E837-85 на метод измерения остаточных напряжений. Он основывается на высверливании глухого отверстия и регистрации деформации с помощью розетки из трех тензодатчиков. По принципу Сен-Венана, деформации затухают на расстоянии от кромки $2+3$ диаметра отверстия. При этом снижение деформаций при удалении от кромки отверстия идет по экспоненциальному закону. Тензодатчики располагаются на некотором удалении от кромки отверстия и регистрируют лишь незначительную усредненную часть деформаций. Это снижает точность измерения

напряжений. Кроме того обеспечение соосности между отверстием и розеткой тензодатчиков тоже является сложной задачей. Поэтому применение метода, позволяющего измерять поле деформаций (перемещений) в окрестности отверстия и не требующего предварительной подготовки поверхности (наклейки датчиков), является очень перспективным. Таким методом явилась голографическая интерферометрия. Методика измерения заключается в следующем. Измеряется нормальная компонента вектора перемещений. На голограмме подсчитывается число интерференционных полос и по их числу определяется величина перемещения: $\Delta = \frac{\lambda}{2} \frac{N}{\sin \alpha}$, где λ - длина волны лазерного излучения, N - число полос, α - угол падения предметного пучка на исследуемую поверхность. При невозможности определить количество полос и для повышения точности измерения величину перемещений можно определить исходя из координаты любой полосы. Экспоненциальная зависимость имеет следующий вид: $\Delta(r_3) = \Delta(r) e^{-a(r/r_3)^d}$, где $\Delta(r)$ - значение компоненты перемещения в любой точке окрестности отверстия; $\Delta(r_3)$ - значение на кромке отверстия; a - степенной показатель; r - координата точки на главной оси; r_3 - радиус высверленного отверстия.

Изучение голограммы позволяет однозначно судить об ориентации главных осей напряжений. Переход от перемещений на кромке к напряжениям осуществляется по законам линейной теории упругости. При ограничении глубины сверления величиной радиуса сверления расчетные формулы сильно упрощаются и имеют следующий конечный вид:

$$\sigma_x^0 = \frac{\Delta x}{\Delta_{1x}^0} ; \quad \sigma_y^0 = \frac{\Delta y}{\Delta_{1y}^0} , \quad \text{где}$$

Δ_x, Δ_y - компоненты вектора перемещения на кромке;
 $\Delta_{1x}^0, \Delta_{1y}^0$ - перемещения от единичного напряжения; $\Delta_{1x}^0 = \Delta_{1y}^0$

Вносимый при измерении дефект можно учесть через коэффициент концентрации напряжений K . Так для случая $R=0,42$ $K=1,7$

Голограмма дает представления о направлении главных осей напряжений. Но вопрос о направлении перемещений, а следовательно о знаке напряжений, до последнего времени оставался открытым. Предложен способ определения направления перемещений по взаимодействию интерференционных полос от известного и неизвестного

по направлению поля перемещений. Известное поле перемещений создается локальным дозированным ударом по поверхности, вызывающим "выплеск" кромок вокруг ударного углубления. "Выплеск" соответствует положительному знаку напряжений. На основе вышеизложенного создано устройство для определения знака остаточных напряжений.

Была проведена модернизация прибора "Лимон-2" для измерения остаточных напряжений. Создан новый узел изъятия дозированного объема материала. Съемный узел крепления объектива, что значительно расширило возможности прибора.

Разработана серия малогабаритных интерферометров, позволявшая снизить габариты и массу оборудования, упростить эксплуатацию. При этом основные технические характеристики оборудования не изменились. Уменьшение габаритов и массы оборудования происходило по двум направлениям. Во-первых, отделение интерферометра от лазера. Это основывалось на применении стекловолоконной оптики.

Во-вторых, изменение оптической схемы позволило довести до минимума количество оптических элементов. Это уменьшило погрешности, вносимые погрешностями изготовления и установки оптических элементов. В результате проведенных мероприятий масса новых приборов составила 0,5 кг против 20 кг "Лимона-2".

Глава 3 посвящена исследованиям остаточных напряжений в различных сварных соединениях с использованием разработанного оборудования. Целью исследований было проверить работоспособность созданного оборудования на различных типах сварных соединений, на различных материалах и сплавах, в лабораторных и заводских условиях работы.

Особую важность приобрели исследования остаточных напряжений в сварных соединениях, выполненных высококонцентрированными источниками теплоты — лазером и электронным лучом.

Исследовано влияние подварок на изменение поля остаточных напряжений при ремонте конструкций с вафельным фоном из сплава I201. Выяснено, что можно допускать только одно- и двухкратные подварки для исправления дефектов шва.

Проводились исследования по печному отжигу сварных соединений из магниевых сплавов. Предложены новые режимы обработки, отличающиеся более низкими температурами и временами обработки.

Возможности метода голографической интерферометрии в сочетании с методом отверстия позволили коснуться вопроса о распределении остаточных напряжений в сварном соединении, полученном сваркой взрывом. Было изучено распределение остаточных напряжений в сварном соединении типа $Al-Ti$. При этом отмечен резкий градиент остаточных напряжений в районе плоскости сварки.

Таким образом была показана возможность применения разработанного оборудования для измерения остаточных напряжений в сварных конструкциях из стали, Al - и Ti - сплавов, полученных различными видами сварки.

Также были выполнены работы по разработке технологического процесса локальной термической обработки балки центроплана, свариваемой электронно-лучевой сваркой.

Ранее после сварки проводилась общая печная обработка всего изделия. Цель работы состояла в разработке способа локальной обработки электронным лучом отдельных зон изделия, обеспечивающей необходимое снижение уровня остаточных напряжений. В результате исследований были выбраны режимы обработки, обеспечивающие необходимые требования.

Четвертая глава посвящена методам локальной низкотемпературной обработки.

Изучением вопроса локальной термообработки занимались и ранее. Однако до последнего времени работ, позволяющих вывести теоретические изыскания на уровень их практического применения, не было.

Рассмотрим схему локальной низкотемпературной обработки. Предварительно необходимо оговориться, что эпюра продольных остаточных напряжений относительно оси " y " всегда уравнивается. Как было установлено ранее, в переплавленной зоне остаточные напряжения достигают предела текучести σ_T .

В результате нагрева отдельных зон сварного соединения образуется поле временных напряжений. Его наложение на поле остаточных напряжений приводит к локальным пластическим деформациям в зонах, где сумма остаточных и временных напряжений превышает предел текучести. Это можно выразить следующими формулами:

$$\sigma_{\Sigma}' = \begin{cases} \sigma_T, & \text{при } \sigma_x^{\text{ост}} + \sigma_x^{\text{вР}} \geq \sigma_T \\ \sigma_x^{\text{ост}} + \sigma_x^{\text{вР}}, & \text{при } \sigma_x^{\text{ост}} + \sigma_x^{\text{вР}} < \sigma_T \end{cases}$$

На наводимое поле временных напряжений накладывается ряд ограничений.

Во-первых, создаваемое временное поле не должно являться источником возникновения поля новых остаточных напряжений. Во-вторых, максимальные температуры не должны в любой точке изделия превышать заранее известную величину. Превышение такой температуры может вызвать фазовые и структурные изменения. В-третьих, пониженные температуры позволяют обрабатывать изделия из материалов, склонных к газонасыщению при высоких температурах без защитной атмосферы.

После создания необходимого температурного градиента нагрев прекращается. В результате после снятия поля временных температурных напряжений образуется новое поле остаточных напряжений $\sigma_x^{\text{ост}}$. Оно отличается тем, что в областях, перенесших пластическую деформацию, произошло резкое снижение остаточных напряжений. Изменения остаточных напряжений в иных областях связаны с перераспределением напряжений.

На основе вышесказанного была создана программа для расчета на персональном компьютере полей остаточных напряжений после локальной низкотемпературной обработки. Программа позволяет выбрать наиболее оптимальные режимы обработки.

Были проведены исследования по влиянию локальной низкотемпературной обработки на снижение уровня остаточных напряжений в сварных соединениях из Al и Ti сплавов (OI420, BTI, BT6).

Перед обработкой в образцах измерялось поле остаточных напряжений, затем зачеканивались хромель-алюминиевые термодпары. Обычно в пластине зачеканивалось до шести термодпар в наиболее характерных точках. Кроме того на поверхность наносились мазки термолкрасок. Это позволяло наряду с точным измерением температуры в определенных точках изучать и общее температурное поле.

Создание температурного градиента возможно несколькими способами. Проводилось изучение ряда из них: непосредственная заливка жидкого теплоносителя на поверхность изделия; непосредственное пропускание электрического тока через определенные зо-

ны изделия, охлаждение отдельных зон при общем нагреве всего изделия, нагрев наведением вихревых токов и нагрев расфокусированным лазерным или электронным излучением.

При заливке жидкого теплоносителя на околошовную область применялись свинец и олово. Их низкая температура плавления гарантировала отсутствие структурных превращений. Однако возможности данного способа ограничены и он малопригоден для промышленного применения.

Наиболее целесообразным является способ нагрева непосредственным пропусканием электрического тока. Для этого может применяться оборудование для контактной точечной и роликовой сварки.

Интересен и перспективен способ охлаждения отдельных зон изделия при общем его нагреве. Он может реализовываться сразу после сварки, используя теплоту, накопленную в изделии во время сварки. Охлаждение шва может осуществляться проточной водой, жидким азотом и т.д. Этот способ ранее изучался в работах В.М.Сагалевица.

Нагрев наведением вихревых токов. Для исследования этого способа было создано специальное оборудование, состоящее из тиристорного преобразователя частоты ТПЧ-320 и индуктора с перпендикулярным магнитным полем.

Разогрев поверхностных слоев осуществляется за счет скин-эффекта. При этом глубина проникновения поверхностных токов " Δ " составляет для алюминиевых сплавов около 2,9 мм, а для титановых - 5 мм. Этот способ достаточно перспективен. Он позволяет обеспечить непрерывный контроль за температурным полем в процессе нагрева. Для охлаждения шва и дальних зон, где возможен перегрев, применялись специальные медные водоохлаждаемые накладки.

Большие возможности заложены в методе обработки с помощью расфокусированного лазерного или электронного луча. Обработка ведется сразу после сварки на том же оборудовании.

Было проведено значительное количество экспериментов, позволяющее выяснить вопросы воздействия локальной обработки на поле остаточных напряжений. Так при заливки на шов расплавленного свинца на образце из сплава АМГ-6 произошло снижение остаточных напряжений с 230 до 150 МПа.

На индукционной установке изучены вопросы воздействия различных по форме и величине температурных полей на поля остаточных напряжений. Для *Ас*-сплавов в центре шва остаточные напряжения снижались в три раза, а для титановых - в четыре раза. Время такой обработки - 20-30 сек. Отмечено некоторое расширение границы зоны растягивающих остаточных напряжений, что объясняется перераспределением остаточных напряжений после обработки.

Обработка импульсами тока зоны сварного соединения с остаточными напряжениями осуществлялась на контактной конденсаторной машине типа ТКМ-15. Предельные энергетические параметры обработки зоны сварного соединения выбирались из условия, при котором на пластинах, свободных от остаточных напряжений, выполнялась импульсная обработка. После обработки измерялось наведенное поле остаточных напряжений.

Критерием выбора режима служили параметры, при которых не возникали в пластине остаточные напряжения, при этом считалось, что при обработке наводятся только временные термоупругие напряжения. Превышение этих параметров приводило к появлению поля остаточных напряжений.

Импульсной обработке подвергались зоны сварного соединения как с растягивающими, так и сжимающими остаточными напряжениями. Наибольший эффект по снижению уровня остаточных напряжений был получен при обработке областей со сжимающими напряжениями.

Разработан и внедрен технологический процесс обработки кольцевого шва заготовки элемента стойки шасси самолета диаметром 115 мм из стали 30ХГСН2А с толщиной стенки 13 и 23 мм. Сварка и последующая обработка выполнены электронным лучом. Уровень максимальных остаточных напряжений после локальной обработки кольцевого шва не превышал 20 МПа.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. На основе применения лазерной интерферометрии и оптоволоконной оптики разработана малогабаритная аппаратура оперативного контроля остаточных напряжений в сварных соединениях, полученных с использованием высококонцентрированных ис-

точников теплоты (электронный луч, лазерная сварка). Разработаны основные требования для конструирования малогабаритной аппаратуры и ее отдельных узлов.

2. Предложен способ и создано устройство, определения знака остаточных сварочных напряжений при исследовании напряженно-деформированного состояния методом отверстия и голографической интерферометрии.

3. Исследованы поля остаточных напряжений в сварных соединениях сплавов ОI420, ВТI, ВТ6, выполненных электронно-лучевой сваркой. Установлено наличие в шве остаточных напряжений, близких к пределу текучести материала.

4. Предложены новые режимы термообработки сварных соединений магниевых сплавов ВМДЮ и МА2-I, отличающиеся пониженными температурными и временными параметрами.

5. Разработан способ локальной термической обработки балки центроплана электронным лучом, используемым для сварки этого изделия. Применение такой обработки после сварки позволило отказаться от последующей печной обработки изделия в целом.

6. Разработаны математическая модель и программа для расчета на ЭВМ воздействия временных температурных упругих полей напряжений на поле собственных остаточных напряжений при локальной низкотемпературной обработке.

7. Показано, что обработка на пониженных температурах отдельных областей сварного соединения позволяет эффективно снижать уровень остаточных напряжений. К преимуществам метода низкотемпературной обработки относятся:

- Возможность обработки материалов, склонных к газонасыщению при высоких температурах без применения защитной атмосферы.

- Отсутствие влияния на структуру и механические свойства сварного соединения.

8. Отработаны режимы локальной низкотемпературной обработки сварных соединений из сплавов ОI420, ВТI, ВТ6 толщиной 2+6 мм, выполненных электронно-лучевой сваркой. Предложенные режимы обработки позволили снизить величину растягивающих остаточных напряжений в 2+4 раза.

9. Разработан ряд способов создания неоднородного темпе-

ратурного поля:

- Нагрев околошовной зоны путем заливки расплавленного теплоносителя.

- Нагрев путем пропускания через околошовную зону импульсов электрического тока с использованием оборудования для контактной сварки.

- Нагрев путем обработки изделия в переменном высокочастотном электромагнитном поле в индукторе.

- Нагрев расфокусированным электронным или лазерным лучом, используемым при сварке изделия.

10. Изучены вопросы применения высококонцентрированного импульса электрического тока в качестве средства снижения уровня остаточных напряжений в соединении из сплава ОI420, полученного электронно-лучевой сваркой. Подтверждена результативность такого воздействия. Установлено, что эффективность воздействия на основной металл и металл шва различна.

II. Результаты работ внедрены на АНТК имени Туполева, НИИТ и НПО "Композит".

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Антонов А.А. Остаточные напряжения в сварном соединении пластин из магниевого сплав. - В сб.: Современные проблемы сварки. - М., 1984. - С. 205-110.

2. Чернышев Г.Н., Антонов А.А. (мл.) Взаимодействие остаточных сварочных и упругих температурных напряжений. - В сб.: Технологические остаточные напряжения: Материалы III Всесоюзного симпозиума. - М., 1988. - С. 370-377.

3. Антонов А.А. (мл.) Регулирование остаточных сварочных напряжений путем наведения термоупругих напряжений. - Физика и химия обработки материалов. - 1991. - № 1. - С. 121-124.