М420553

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

М о с к о в с к о е
ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного знамени высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

МАРТЫНЕНКО Владимир Тихонович

УДК 621.791.763.2

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КОНДЕНСАТОРНОЙ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ ПО КОНТУРУ ДЕТАЛЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ТОЛЩИНЫ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОИЗВОДСТВУ ПРИБОРОВ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

(Специальность 05.04.05 - Технология и машины сварочного производства)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва 1964

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

Научный руководитель - к.т.н., доцент КАГАНОВ Н.Л.

Официальные оппоненты: д.т.н.,профессор МАКАРОВ Э.Л.
к.т.н.,доцент НАЗАРОВ Г.В.

Ведущее предприятие - указано в решении специализированного совета.

Защита состоится "1" ноября 1984 г. на заседании специализированного совета К053.I5.03 в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана по адресу: I07005, Москва, 2-я Б[illegible] 5

Ваш о[illegible]ым высылать

С дис[illegible]ища.

Авто[illegible]

Жела[illegible]менно извести[illegible]на имя председ[illegible]

Учен[illegible] специал[illegible] д.т.[illegible]ЬСКИЙ В.М.

М420553

Под[illegible] 100 экз.
Зак[illegible] Л-66550

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В современной технике используется большое количество изделий, при производстве которых необходимо сваривать кольцевыми швами по плоскости детали резко различной толщины. В частности, в приборах теплотехнического контроля, основным рабочим органом которых является упругий чувствительный элемент, мембрана из прецизионного сплава сваривается с массивной арматурой. Наиболее рациональным методом получения указанных соединений является конденсаторная рельефная сварка, позволяющая менее чем за 10^{-2} с получать прочноплотное соединение по всему периметру шва. Однако вопросы технологии рельефной сварки по замкнутому контуру деталей толщиной менее 3×10^{-4} м из прецизионных сплавов с деталями неограниченной толщины в настоящее время не изучены, а применение известных рекомендаций не дает положительных результатов. Поэтому разработка методов и средств получения прочноплотного соединения деталей указанного типа является актуальной задачей и отвечает насущным нуждам промышленности. Решение этой задачи позволит снизить материалоемкость конструкции и обеспечит повышение производительности труда.

Целью настоящей работы является выявление методов, условий и средств получения высококачественного прочноплотного соединения мембран из сплава 36НХТЮ толщиной $(1,5...3,0) \times 10^{-4}$ м с арматурой неограниченной толщины с помощью рельефной сварки и внедрение результатов исследований в производство.

Методы исследований. Основные задачи работы решались экспериментальным и расчетным путем. Влияние термодеформационного цикла сварки на свойства сплава 36НХТЮ выявлялось с помощью экспериментального исследования механических характеристик сплава и его сварных соединений, а также путем металлографического и рентгеноспектрального анализа. Для качественной оценки распределения электрических и температурных полей в зоне сварки использованы физическое моделирование электрических полей и математическое моделирование тепловых процессов с помощью ЭЦВМ. Поиск параметра процесса, характеризующего качество сварки, велся на базе экспериментальных исследований, основой которых было осциллографирование электрических и механических параметров процесса сварки.

Научная новизна. Экспериментальными и теоретическими исследованиями установлено, что наиболее важным условием достижения высоких эксплуатационных свойств сварных соединений упругих чув-

Инв. 133

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана
1420553
Мартыненко В.Т. Разработка

МГТУ им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

ствительных элементов из сплава 36НХТЮ, выполненных конденсаторной рельефной сваркой и подвергающихся после сварки старению, является наличие литой зоны по всему периметру шва, которая обеспечивает высокую пластичность соединения. Повышенная пластичность металла шва и зоны термического влияния при сварке с расплавлением объясняется протеканием в зоне соединения процесса прерывистого выделения частиц γ'-фазы на стадии охлаждения шва и увеличением размеров выпавших частиц при последующем старении.

Исследования электротепловой обстановки при рельефной сварке деталей толщиной $(1,5...3,0)\times10^{-4}$ м с деталями неограниченной толщины позволили выявить условия получения температурного поля, обеспечивающего образование литого ядра в стыке свариваемых деталей по всему периметру шва, главные из которых состоят в том, что к моменту начала пропускания сварочного тока рельеф должен иметь, при прочих номинальных размерах, в поперечном сечении форму трапеции с соотношением размеров оснований 1,3...1,6, а неравномерность ширины верхнего основания рельефа по периметру шва не должна превышать 1,25.

Практическая ценность. В результате исследований выявлены условия и пути получения соединения с расплавлением при рельефной сварке мембран толщиной $(1,5...3,0)\times10^{-4}$ м из сплава 36НХТЮ с арматурой. Разработан и внедрен на МПО "Манометр" технологический процесс рельефной сварки узлов дифманометров. Внедрение разработанной технологии позволило повысить коэффициент использования металла в 2,5 раза, а производительность труда в 1,5 раза. Годовая экономическая эффективность от внедрения составила 27200 рублей.

Апробация работы. По основным разделам работы сделаны доклады на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" в МВТУ им.Н.Э.Баумана (ноябрь 1980 г.), на Всесоюзной межотраслевой научно-технической конференции "Проблемы проектирования и механизации производства гибких металлических трубопроводов и сильфонов" в г. Уфе (октябрь 1982 г.).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и выводов по работе. Содержит 20 таблиц, 56 рисунков, приложения и 115 наименований использованных литературных источников, изложена на 131 странице машинописного текста.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена объекту исследования, выбору базового способа сварки, обзору литературы по рельефной сварке, а также предварительным экспериментам и постановке цели и задач работы. Базовым изделием являлся чувствительный элемент дифференциального манометра, в котором мембрану из сплава 36НХТЮ толщиной $(1,5...3,0)\times10^{-4}$ м необходимо приварить прочноплотным швом к арматуре из того же сплава или нержавеющей стали 12Х18Н10Т. К сварным соединениям упругих чувствительных элементов предъявляются высокие требования по герметичности и прочности в условиях повторно-статического нагружения. Используемые в промышленности способы сварки обеспечивают получение соединений требуемого качества. Однако эти способы сварки обусловливают применение арматуры трудоемкой в изготовлении и характеризующейся низким коэффициентом использования металла (~ 0,3), а также имеют низкую производительность. Наиболее рациональным методом получения указанных соединений является конденсаторная рельефная сварка, позволяющая использовать арматуру оптимальной конструкции и имеющая высокую производительность.

Анализ литературных данных по рельефной сварке деталей резко различной толщины показал, что соединение при указанном способе сварки формируется, как правило, в твердом состоянии. Причем большинство опубликованных работ посвящено вопросам разработки технологии и исследования свойств сварных соединений из низкоуглеродистых сталей, не подвергающихся после сварки термической обработке. С целью выявления возможности применения рельефной сварки для соединения упругих чувствительных элементов из дисперсионно-твердеющих сплавов была сварена партия образцов с использованием известных рекомендаций по типоразмерам рельефа и режимам сварки. Часть образцов после сварки подвергалась старению в соответствии с типовой технологией термообработки, а вся партия испытывалась внутренним давлением до разрушения. Свойства рельефных соединений сопоставлялись со свойствами для аналогичных соединений, выполненных шовной сваркой.

В результате сопоставления было установлено, что прочность образцов, сваренных рельефной сваркой и не прошедших послесварочного старения, выше, чем у аналогичных образцов, сваренных шовной сваркой. Однако после термической обработки (старения), упрочняющей сплав 36НХТЮ, прочность образцов, сваренных рельеф-

ной сваркой, резко падает, а у образцов, выполненных шовной сваркой, даже несколько возрастает.

Анализ микрошлифов сварных соединений позволил установить, что в образцах, сваренных рельефной сваркой, соединение получено в твердом состоянии, а в образцах, сваренных шовной сваркой, имеется литая зона, состоящая из ядер, перекрывающих друг друга. Вероятно, служебные свойства сварных соединений из сплава 36НХТЮ, подвергающихся после сварки старению, во многом зависят от характера термодеформационного цикла сварки. Поэтому для выявления условий, методов и средств получения высококачественных соединений узлов упругих чувствительных элементов из сплава 36НХТЮ, выполняемых конденсаторной рельефной сваркой, необходимо было решить следующие задачи:

- выявить структурное состояние металла в зоне сварного соединения, обеспечивающее высокую работоспособность узла при заданных условиях эксплуатации;

- определить оптимальную форму и размеры рельефа, обеспечивающие необходимое структурное состояние металла в зоне соединения, для чего с помощью исследования электрических и температурных полей изучить влияние формы и размеров рельефа на температурное поле в зоне сварки;

- установить оптимальные параметры режима конденсаторной рельефной сварки по контуру упругих чувствительных элементов из сплава 36НХТЮ толщиной $(1{,}5...3)\times10^{-4}$ м с арматурой;

- выявить параметр процесса рельефной сварки, наиболее полно характеризующий его качество по периметру шва;

- на основании исследований разработать технологию сварки и внедрить ее в производство.

Вторая глава отражает результаты исследований свойств сплава 36НХТЮ и его сварных соединений. В работах В.В.Караваевой, А.Г.Рахштадта, Р.Д.Строкатова, В.Ф.Суховарова и др. подробно изучен механизм структурных превращений в сплаве 36НХТЮ и его механические характеристики при различных видах термомеханической обработки. Вместе с тем, в литературе отсутствуют сведения о свойствах сварных соединений из сплава 36НХТЮ.

Анализ используемых в промышленности технологических процессов изготовления упругих чувствительных элементов показал, что перед формовкой мембран для повышения пластичности сплава 36НХТЮ он закаливается (нагревается до 950...1100°С с последую-

щим охлаждением в воде). После сварки мембран с арматурой и между собой чувствительный элемент подвергается старению (при 650...750°С в течение 3...4 часов) для придания материалу высоких упругих свойств. При старении фиксируется форма чувствительного элемента и происходит упрочнение сплава вследствие выделения γ'-фазы $Ni_3(Ti,Al)$. Известно, что характер и степень упрочнения сплава при старении во многом определяются режимом закалки, предшествующей старению. В то же время, воздействие на закаленный металл сварочного термодеформационного цикла должно привести к существенному изменению свойств металла. Поэтому после старения свойства металла в зоне сварки будут определяться характером сварочного цикла. Анализ термического цикла при конденсаторной сварке показал, что его воздействие на металл аналогично режиму повторной закалки от температуры, превышающей 1150°С. Кроме того, при сварке имеет место пластическая деформация металла, степень которой зависит от условий формирования шва.

С целью выявления причин, влияющих на свойства металла в зоне сварного соединения, было проведено исследование механических характеристик и структуры сплава 36НХТЮ, обработанного термическим циклом подобным сварочному. В качестве исходного материала был взят сплав, закаленный от T =1050°С, который имеет $\sigma_в$ =64х10^7 Па и δ =35%. После старения (T =700°С, t = =4 часа) в структуре исходного сплава имеет место как прерывистое, так и непрерывное выделение частиц γ'-фазы, при этом предел прочности возрастает до $\sigma_в$ =137х10^7 Па, а пластичность падает до δ =14,6%.

Механические характеристики сплава определялись на плоских образцах размером (65х5х0,3)х10^{-3} м, которые нагревались под повторную закалку импульсом тока длительностью 28х10^{-3} с. Для того, чтобы учесть разное время пребывания сплава в температурном интервале интенсивного выделения γ'-фазы (что имеет место при сварке с расплавлением и в твердом состоянии) образцы после нагрева импульсом тока охлаждались водой или на воздухе.

Изучение механических характеристик сплава, прошедшего повторную закалку импульсом тока с охлаждением в воде, показало, что его прочность и пластичность остались на исходном уровне. После старения обработанного таким образом сплава он имеет $\sigma_в$ = =110х10^7 Па и δ =9,2%. Структурными исследованиями установлено,

что в сплаве при старении произошло преимущественно непрерывное выделение частиц γ'-фазы вследствие выпадения по границам зерен мелкодисперсных карбидных частиц. По данным В.Ф.Суховарова оба указанных фактора являются основными причинами ухудшения механических характеристик сплава.

У сплава, подвергнутого повторной закалке с охлаждением на воздухе, после старения механические характеристики близки по значению с характеристиками исходного состаренного сплава - $\sigma_в = 120 \times 10^7$ Па, а $\delta = 15{,}8\%$. Это явилось следствием того, что при закалке на воздухе по границам зерен произошло прерывистое выделение γ'-фазы, получившее при последующем старении свое развитие. Кроме того, в зонах, где на стадии закалки произошло выделение частиц γ'-фазы, при старении может иметь место частичное перестаривание вследствие увеличения размеров выделившихся частиц. Эти явления способствуют повышению пластичности состаренного сплава.

Для того, чтобы выявить влияние пластической деформации на свойства сплава, повторно закаленного импульсом тока, образцы после закалки в воде пластически деформировались ($\varepsilon = 35\%$). После старения указанные образцы имели низкую прочность и пластичность - $\sigma_в = 105 \times 10^7$ Па и $\delta = 3{,}5\%$, что в соответствии с данными В.Ф.Суховарова является следствием сохранения наклепа после старения в сплаве со структурой непрерывного выделения частиц γ'-фазы. Образцы, деформированные и состаренные после закалки на воздухе, также имели низкие механические характеристики - $\sigma_в = 108 \times 10^7$ Па , $\delta = 5{,}1\%$. По данным Р.Д.Строкатова низкие механические характеристики сплава в данном случае обусловлены микроструктурной неоднородностью материала.

На основании изложенного, а также учитывая, что при сварке в твердом состоянии имеет место большая степень пластической деформации, а металл шва меньшее время находится в температурном интервале интенсивного выделения γ'-фазы, чем при сварке с расплавлением, можно ожидать более низких свойств сварных соединений, выполненных в твердом состоянии.

Изучение распределения микротвердости в сварных соединениях, выполненных с расплавлением и в твердом состоянии, показало, что металл шва и околошовной зоны соединения с расплавлением имеет после старения твердость ниже, чем основной металл. Кроме того, структурными исследованиями установлено, что в зоне

сварного шва соединения с расплавлением после старения имеет место прерывистое выделение частиц γ'-фазы. Одновременно рентгеноспектральный анализ литого ядра на приборе "CAMECA" MS-46 позволил выявить значительную химическую неоднородность по объему ядра, что также является одной из причин недоупрочнения (низкая микротвердость) литого ядра.

Металл шва и околошовной зоны соединения в твердом состоянии имеет после старения более высокую твердость, чем основной металл, из-за значительного наклепа, который не снимается при старении вследствие упрочнения зоны сварки за счет непрерывного выделения частиц γ'-фазы.

Испытания на растяжение образцов, сваренных внахлестку контактной шовной сваркой с расплавлением и в твердом состоянии, подтвердили предположение о более высокой прочности и пластичности после старения образцов, сваренных с литым ядром в стыке деталей: они разрушаются при усилии в 1,2...1,5 раза большем и имеют пластичность в 1,4...2,7 раза выше, чем образцы, сваренные в твердом состоянии.

Проверка метрологических характеристик чувствительных элементов показала, что повышенная пластичность зоны сварного соединения, выполненного с расплавлением, не оказывает отрицательного влияния на линейность и вариацию перемещения мембран.

Поскольку в условиях эксплуатации механические напряжения, возникающие в материале чувствительного элемента, не превышают предела упругости для окончательного выбора вида соединения, обеспечивающего высокие служебные характеристики изделия, были проведены испытания узлов на повторно-статическую нагрузку рабочим давлением. Испытывались узлы, сваренные с арматурой рельефной сваркой в твердом состоянии и контактной шовной сваркой с гарантированным расплавлением соединяемых деталей. После каждых 5000 циклов нагружения осуществлялся контроль герметичности узлов гелиевым течеискателем.

Испытания показали, что узлы, сваренные как с расплавлением, так и в твердом состоянии и не прошедшие старения, остались герметичными после 50000 циклов нагружения, что вдвое превышает ресурс работы прибора. После старения в результате воздействия 25000 циклов нагружения 45% изделий, сваренных в твердом состоянии, разгерметизировались, в то время как все узлы, сваренные шовной сваркой, остались герметичными.

На основании полученных результатов был сделан вывод, что для узлов чувствительных элементов, подвергающихся после сварки старению, наиболее важным условием достижения высокой долговечности при повторно-статических нагрузках является наличие литой зоны по всему периметру шва. Для узлов, не подвергающихся после сварки старению, допустимо формирование соединения как с расплавлением, так и в твердом состоянии.

Третья глава посвящена исследованию особенностей электрических и температурных полей, возникающих при рельефной сварке мембран с арматурой, с целью выявления условий формирования литой зоны в стыке деталей. Поскольку рельеф в процессе формирования соединения осаживается и изменяет свою форму, необходимо учитывать это изменение при расчете электротепловых полей. На основании осциллографирования электрических и механических параметров процесса сварки была выявлена схема изменения формы рельефа и принята физическая модель формирования соединения с расплавлением. В принятой модели можно выделить три основные стадии.

Первая стадия начинается с момента пропускания сварочного тока и продолжается до момента начала осадки рельефа, когда $l \approx 0{,}75\,l$ м. Вероятно, температура металла в контакте рельеф – деталь в этот момент составляет $\sim 0{,}8\,T_{пл}$, что выше температуры размягчения (800°С), но ниже температуры плавления (1410°С).

Вторая стадия начинается с интенсивной деформации рельефа. Условно можно принять, что при этом деформируются все слои металла, нагретые выше 800°С. После этого деформация прекращается вследствие того, что в соприкосновение с тонкой деталью войдет недостаточно прогретый металл рельефа. При этом из-за увеличения площадки контактирования рельеф – деталь роль вершины рельефа в качестве концентратора тепловыделения снижается и зона максимальных температур перемещается в основание рельефа. В результате роста температуры в основании рельефа зарождается очаг плавления.

На третьей стадии деформация рельефа возобновляется и не прекращается до полной его осадки. Зона плавления при этом растет, распространяясь как в тонкую, так и в массивную деталь.

Для исследования электрических полей был выбран экспери-

ментально-расчетный метод (физическое моделирование с помощью плоских металлических моделей). Результаты исследований позволили установить, что к моменту начала осадки рельефа трапецеидальной формы его высота $h_р$ и ширина основания $a_р$ не оказывают влияния на распределение плотности тока в тонкой детали. Уменьшение $h_р$ и $a_р$ приводит к повышению плотности тока в основании рельефа, что можно использовать для повышения тепловыделения в этой зоне.

Наиболее существенное влияние на распределение плотности тока в зоне сварки оказывает ширина контакта рельеф - деталь $b_{р-д}$, поскольку изменение размера этого контакта приводит к изменению условий прохождения тока в тонкой детали, в рельефе и в массивной детали вблизи основания рельефа.

Изучение характера изменения электрического поля в процессе осадки рельефов одной высоты, но с разной шириной основания, показало, что с уменьшением ширины основания возрастает роль рельефа в качестве концентратора тока на всех стадиях формирования соединения. Полученные результаты исследований, с учетом возможности изготовления и контроля размеров рельефа в условиях серийного производства, позволили сделать вывод о том, что для сварки мембран толщиной $(1,5...3,0)\times10^{-4}$ м с арматурой целесообразно ограничить высоту рельефа, имеющего форму трапеции к моменту начала пропускания сварочного тока, до размера $1,2\times10^{-4}$м, а ширину основания рельефа принять равной $2,1\times10^{-4}$ м.

Оценка температурного состояния металла в зоне сварки проводилась путем решения дифференциального уравнения теплопроводности методом конечных разностей с помощью ЭЦВМ. При этом учитывалось изменение формы рельефа в процессе его осадки в соответствии с принятой моделью формирования соединения. Расчеты температурных полей позволили установить, что в соединении с рельефом, имеющим к моменту начала осадки форму, близкую треугольнику ($b_{р-д}$ мало), литое ядро после закрытия зазора смещается в массивную деталь. Это происходит потому, что область высоких температур в тонкой детали на первой и второй стадиях была незначительной, а роль теплоотвода в электрод велика. Вероятно, для смещения литого ядра в стык нужно обеспечить к моменту закрытия зазора прогрев тонкой детали до высоких температур в большем объеме. Указанное условия может быть достигнуто при увеличении размера контакта рельеф - деталь. Предельным случаем

такого рельефа является рельеф прямоугольной формы. Однако расчеты показали, что уже на первой стадии формирования соединения весь объем рельефа нагревается до температур, превышающих $0,8T_{пл}$, и, следовательно, он мгновенно осаживается, прекрадая свое существование в качестве концентратора тепловыделения. Поэтому и в этом случае к концу процесса сварки литое ядро располагается в массивной детали. Вместе с тем, благодаря более обширной области высоких температур в тонкой детали на первой стадии наблюдается смещение ядра в сторону стыка. Полученные результаты позволили сделать предположение, что для смещения литого ядра в стык необходимо использовать рельеф в форме трапеции с таким соотношением размеров, чтобы обеспечить на первой стадии развитие высоких температур в тонкой детали и сохранить необходимый градиент температуры по высоте рельефа к концу второй стадии. С помощью расчетов установлено, что указанные условия реализуются, когда отношение ширины основания рельефа к ширине контакта рельеф - деталь находится в пределах I,3...I,9.

Известно, что неплоскостность контактирования деталей при рельефной сварке по замкнутому контуру оказывает существенное влияние на однородность качества шва по его периметру. Изучение этого вопроса проводилось на базе исследования распределения плотностей тока на металлических моделях, имитирующих осевое сечение узла в плоскости максимального перекоса. Анализ полученных результатов показал, что при неодинаковой ширине площадок контактирования наблюдается перераспределение тока между указанными площадками. Однако, поскольку сопротивление участка рельеф - деталь мало по сравнению с сопротивлением всего участка электрод - электрод, токи, протекающие через площадки существенно разной ширины, отличаются незначительно. Так, при отношении ширины площадок равном I,5, токи, протекающие через них, отличаются только на I5%, что не обеспечивает требуемой компенсации тепловыделения. Как следствие этого, будет иметь место непровар части периметра шва. С использованием данных расчета температурных полей установлено, что для получения однородного качества шва по периметру соединения необходимо, чтобы изменение ширины площадки контактирования по периметру рельефа не превышало 25%. При этом уменьшается диапазон оптимальных значений $a_р/b_{р\text{-}д}$ до I,3...I,6.

Четвертая глава посвящена экспериментальной проверке основ-

ных теоретических положений, выбору методики расчета параметров режима сварки, выявлению параметра, наиболее полно характеризующего качество соединения, а также практическому применению результатов исследований.

Для проведения исследований была разработана технологическая оснастка, обеспечивающая контактирование деталей, с величиной неплоскостности, не превышающей выявленную при расчете электротепловых полей.

Рельеф, изготавливаемый на арматуре, имел в поперечном сечении форму треугольника. Изготовление рельефа с заданной точностью обеспечивалось обработкой на станке с ЧПУ.

Выбор метода расчета усилия сжатия свариваемых деталей велся на базе решений, известных в теории обработки металлов давлением. Определение основных характеристик геометрии импульса сварочного тока проводилось по методике Н.Л.Каганова.

Для проверки выявленных в 3 главе условий формирования соединения с расплавлением были проведены исследования по изучению влияния начального значения $a_p/b_{p\text{-}g}$ на качество формируемого соединения. Изменение отношения $a_p/b_{p\text{-}g}$ осуществлялось за счет изменения ширины $b_{p\text{-}g}$ путем деформирования рельефа соответствующим усилием сжатия. О качестве формируемого соединения судили по шлифам. Экспериментальные исследования подтвердили ранее сделанные выводы по результатам расчетов электротепловых полей об условиях качественного формирования шва. Так, для формирования соединения с расплавлением необходимо, чтобы начальное значение отношения $a_p/b_{p\text{-}g}$ находилось в пределах I,3...I,6. При значениях $a_p/b_{p\text{-}g}$ больше I,6 наблюдаются значительные выплески в процессе сварки и формирование соединения происходит в твердом состоянии. В случае уменьшения значения $a_p/b_{p\text{-}g}$ до I,2 зона максимальных температур смещается в основание рельефа в массивную деталь и соединение также формируется в твердом состоянии.

Проведенные в данной работе исследования позволили выявить оптимальные параметры режимов сварки и размеры исходного рельефа треугольной формы (угол при вершине α_p и высоту h_p), обеспечивающие формирование соединения со сплошной литой зоной по всему периметру шва, при сварке мембран из сплава 36НХТЮ толщиной $(I,5...3,0)\times10^{-4}$ м с арматурой из того же сплава или нержавеющей стали I2Х18Н10Т (таблица I).

Таблица I.

Режимы сварки и размеры рельефа

Диаметр шва м х 10^{-3}	Im кА	t_n с х 10^{-3}	F даН	α_p	h_p м х 10^{-4}
I0	I2,0	30	290		
I4	I7,5	35	400	60^0	I,65...I,8
I6	20	38	460		

Для выбора параметра, наиболее полно характеризующего качество получаемого соединения, были проведены эксперименты по сварке узлов упругих чувствительных элементов. В процессе сварки записывались осциллограммы сварочного тока $i(t)$, падения напряжения на свариваемых деталях $u_{дд}(t)$, перемещения подвижного электрода сварочной машины $S(t)$. Испытания на повторно-статическую нагрузку и анализ микрошлифов соединений показали, что параметром, наиболее полно характеризующим качество соединения, является напряжение на участке деталь - деталь. На основании многочисленных экспериментов установлено, что для случая сварки с расплавлением по всему периметру осциллограмма $u_{д\text{-}д}(t)$ имеет ярко выраженный горизонтальный участок. Этот участок свидетельствует о протекании в зоне сварки процесса плавления. Установлено, что для случая сварки чувствительных элементов толщиной (I,5...3,0)х10^{-4} с арматурой неограниченной толщины величина напряжения плавления лежит в пределах (0,43...0,47) В. При этом длительность стадии плавления находится в пределах, определяемых соотношениями:

$$t_p / t_н = I,42...I,56$$
$$t_м / t_p = 0,55...0,65,$$

где t_p - время от момента включения тока до завершения плавления;

$t_н$ - время нарастания тока до амплитудного значения;

$t_{пл}$ - время плавления.

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований была разработана технология сварки мембранных коробок дифференциальных манометров и датчиков давления. Производственное апробирование разработанной технологии на МПО "Манометр" показало ее высокую эффективность. Разработанная технология доведена до промышленного применения. Результаты внедрения отражены в основных выводах.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведены испытания мембранных упругих чувствительных элементов при повторно-статической нагрузке. Установлено, что сварные соединения упругих чувствительных элементов из сплава 36НХТЮ, выполненные конденсаторной рельефной сваркой как с литой зоной, в стыке деталей, так и в твердом состоянии и не подвергающиеся после сварки старению, обладают высокой работоспособностью при повторно-статической нагрузке.

2. Исследования эксплуатационных характеристик мембранных упругих чувствительных элементов выявили, что наиболее важным условием достижения высокой работоспособности при повторно-статической нагрузке сварных соединений упругих чувствительных элементов из сплава 36НХТЮ, выполненных конденсаторной рельефной сваркой и подвергающихся после сварки старению, является наличие литой зоны по всему периметру шва.

Отсутствие такой зоны при сварке в твердом состоянии значительно снижает работоспособность соединений.

3. Экспериментально установлено, что при сварке с формированием литой зоны в стыке деталей вследствие большего тепловложения, чем при сварке в твердом состоянии, в зоне термического влияния происходит прерывистое выделение частиц γ'-фазы на стадии охлаждения сварного шва. Развитие процесса прерывистого выделения частиц γ'-фазы и увеличение их размеров при последующем старении являются определяющими причинами повышения пластичности зоны соединения.

4. Металлографический анализ показал, что при сварке в твердом состоянии, вследствие меньшего тепловложения, чем при сварке с формированием литой зоны, частицы γ'-фазы не выделяются на стадии охлаждения сварного шва. После старения в зоне сварного соединения преобладает структура непрерывного выделения γ'-фазы вследствие выпадения по границам зерен мелкодисперсных карбидных частиц, что является одной из причин пониженной пластичности металла шва.

5. Необходимость использования при сварке в твердом состоянии повышенных значений усилия сжатия деталей приводит к значительному наклепу металла в зоне соединения. После старения наклепанный металл имеет пониженную пластичность вследствие сохранения наклепа в металле со структурой непрерывного выделения частиц γ'-фазы.

6. С использованием расчетно-экспериментального метода исследованы поля плотностей тока при рельефной сварке деталей тол-

щиной $(1,5...3)\times10^{-4}$ м с деталями неограниченной толщины из сплава 36НХТЮ и установлено, что:

а) наиболее существенное влияние на поле плотности тока в тонкой детали, в рельефе и в массивной детали у основания рельефа оказывает размер контакта рельеф - деталь;

б) поле плотности тока в тонкой детали не зависит от высоты рельефа и угла при его вершине;

в) толщина тонкой детали не оказывает существенного влияния на распределение плотности тока в контакте рельеф - деталь, в рельефе и в массивной детали, в то же время увеличение толщины тонкой детали приводит к снижению и выравниванию плотности тока в контакте электрод - тонкая деталь;

г) целесообразно высоту рельефа, имеющего в поперечном сечении форму трапеции, ограничить величиной $1,2\times10^{-4}$ м, а ширину основания рельефа принять $2,1\times10^{-4}$ м.

7. С учетом найденного распределения плотностей тока и ограничений на размеры рельефа изучены температурные поля, возникающие при конденсаторной рельефной сварке деталей толщиной $(1,5...3,0)\times10^{-4}$ м с деталями неограниченной толщины из сплава 36НХТЮ, и установлено, что:

а) температурное поле к концу процесса сварки существенно зависит от распределения температур в зоне сварки к моменту начала интенсивной осадки рельефа;

б) при использовании рельефов, имеющих в поперечном сечении форму близкую треугольнику и прямоугольнику, не обеспечивается формирование литой зоны в стыке деталей ввиду недостаточного прогрева тонкой детали в первом случае и смещения зоны максимальных температур в тело рельефа во втором случае;

в) для получения литого ядра, расположенного в стыке соединяемых деталей, необходимо, чтобы к моменту начала интенсивной осадки рельеф имел в поперечном сечении форму трапеции, у которой отношение ширины нижнего основания (основание рельефа) к ширине верхнего основания (площадка контактирования рельеф - деталь) находилось в пределах 1.3...1,6;

г) для получения соединения с расплавлением по всему периметру шва необходимо, чтобы отношение максимального размера контакта рельеф - деталь к минимальному его размеру вдоль периметра шва не превышало 1,25, так как в противном случае, несмотря на наблюдаемое перераспределение тока по сечениям кольцевого рельефа,

не будет обеспечиваться необходимая плотность тока, позволяющая получать взаимное расплавление соединяемых деталей во всех сечениях шва.

8. На основании результатов исследований разработана рациональная технология рельефной сварки по кольцевому контуру (d_w =I,0...I,6xI0^{-2} м) мембран из сплава 36НХТЮ толщиной (I,5...3,0)xI0^{-4} м с арматурой из того же сплава или нержавеющей стали I2Х18Н10Т. В соответствии с разработанной технологией для формирования соединения со взаимным расплавлением соединяемых элементов следует применять:

- рельеф, выполненный на арматуре и имеющий в исходном состоянии в поперечном сечении форму треугольника, размеры которого составляют: высота h_p =(I,65...I,8)xI0^{-4} м; угол при вершине α_p =60^0;

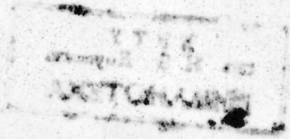
- сварочный ток с амплитудным значением I7...2I кА, общим временем действия (35...42)xI0^{-3}с и длительностью фронта нарастания (0,8...I,0)xI0^{-3}с;

- усилие сжатия свариваемых деталей 290...460 даН.

9. Показателем высокого качества соединений при рельефной сварке по контуру деталей из сплава 36НХТЮ толщиной (I,5...3,0)x xI0^{-4}м с деталями неограниченной толщины является такая геометрия осциллограммы напряжения на свариваемых деталях, у которой величина напряжения на участке плавления лежит в пределах 0,43... 0,47 В, длительность участка плавления находится в пределах, определяемых соотношениями t_p/t_N = I,42...I,56 и t_m/t_p=0,55... 0,65, где t_p - время нагрева и плавления металла, t_N - время нарастания тока до амплитудного значения, t_m - время плавления металла.

I0. Доведена до промышленного применения на Московском заводе "Манометр" технология конденсаторной рельефной сварки по контуру узлов упругих чувствительных элементов и датчиков давления. Годовой экономический эффект от внедрения разработанной технологии составляет 27200 рублей при программе выпуска 90000 приборов.

Экономия достигается за счет уменьшения расхода основных и сварочных материалов и повышения производительности труда.



Содержание диссертации отражено в работах:

1. Каганов Н.Л., Мартыненко В.Т. Особенности конденсаторной рельефной сварки дисперсионно-твердеющих сплавов типа 36НХТЮ. - Известия вузов. Машиностроение, 1981, № II, с.133-135.

2. Каганов Н.Л., Мартыненко В.Т. Оценка процесса конденсаторной рельефной сварки по контуру мембранных узлов дифференциальных манометров. - Известия вузов. Машиностроение, 1982, № I, с.113-117.

3. Исаев А.П., Мартыненко В.Т. Исследование особенностей температурных полей при рельефной сварке разнотолщинных деталей. - Сварочные работы в энергетическом строительстве, 1983, № 3, с.6-12.

МВТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА