

М430452

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

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

На правах рукописи

ПОПКОВСКИЙ Виктор Александрович

УДК 621.791.763.1.052:539.4

ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ
КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКОЙ, ПОСРЕДСТВОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ
ПОЛЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

(Специальность 05.03.06 – Технология и машины сварочного
производства)

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Работа выполнена в Могилевском машиностроительном институте.

Научные руководители: доктор технических наук, профессор
САГАЛЕВИЧ В.М.
кандидат технических наук, доцент
БЕРЕЗИЕНКО В.П.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
ОРЛОВ Б.Д.
кандидат технических наук, доцент
ШИП В.В.

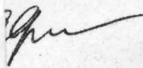
Ведущее предприятие - ПО "Минский тракторный завод"
им. В.И. Ленина.

Защита состоится "25" IV 1985 г. на заседании
специализированного совета Д053.15.07 при Московском ордена
Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Крас-
ного Знамени высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана
по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская, 5.

Ваш отзыв в 1-м экземпляре, заверенный печатью, просим

я в библиотеке МВТУ.

_____ 1985 г.

 Э.А. ГЛАДКОВ

5 к печ. 15.03.85

6 Объем 1 п.л.

M430452

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В решениях XXVI съезда КПСС отмечалось, что одной из основных задач одиннадцатой пятилетки является экономия трудовых ресурсов и сырья. Этого можно достичь за счет снижения металлоемкости и трудоемкости изготовления сварных конструкций, внедрения более эффективных способов сварки, т.е. использования ресурсосберегающей технологии. Примером может служить замена дуговой сварки контактной точечной при изготовлении ответственных металлоконструкций. Целесообразность такой замены обусловлена рядом присущих контактной точечной сварке по сравнению с дуговой преимуществ.

Анализ металлоконструкций, выпускаемых на предприятиях ПО "Гомсельмаш", ПО "Могилевлифтмаш", показал, что в производстве достаточно широко используются нахлесточные соединения, выполненные дуговой сваркой, которые без дополнительных конструктивных изменений могут быть переведены на контактную точечную сварку. В этом случае достигается значительный экономический эффект. Кроме того, в ряде конструкций, при незначительных конструктивных доработках, может быть также успешно применена контактная точечная сварка.

Вместе с тем следует отметить, что внедрение этого вида сварки в производство, особенно это касается несущих соединений больших толщин, во многих случаях ограничено из-за низкой усталостной прочности точечных соединений. Таким образом, повышение усталостной прочности соединений, выполненных контактной точечной сваркой, является актуальной задачей, отвечающей насущным нуждам промышленности. При этом, поскольку на указанных предприятиях наибольшее распространение получила низкоуглеродистая сталь, все исследования производились применительно к этому материалу.

Целью настоящей работы является повышение усталостной прочности соединений из низкоуглеродистой стали толщиной свыше 3,0-3,0 мм, выполненных контактной точечной сваркой.

Методы исследования. Основные задачи работы решались расчетными и экспериментальными путями. Для достижения поставленной цели была разработана методика расчета сварочных напряжений в точечных соединениях, основанная на использовании метода конечных элементов, теории неизоэргического пластического течения, метода



дополнительных деформаций и метода источников.

Измерение остаточных напряжений в точечном соединении производилось ультразвуковым методом.

Распределение температур на стадии охлаждения точки определялось посредством использования термпар.

Для определения усталостной прочности точечных соединений разработана новая схема испытаний.

Обработка экспериментальных данных производилась с использованием методов математической статистики.

Научная новизна. Разработан и проверен алгоритм расчета методом конечных элементов поля сварочных напряжений в точечном соединении, отличающийся рассмотрением термдеформационных процессов в объемной постановке и учетом соединения свариваемых листов в ограниченной области.

Установлено, что поле остаточных напряжений в точечном соединении носит объемный характер, при этом в области действия концентратора рабочих напряжений образуются сжимающие осевые остаточные напряжения, а радиальные и тангенциальные напряжения в этой зоне ниже, чем средние напряжения по толщине листа. Показано, что такой характер распределения остаточных напряжений на границе литого ядра обусловлен различием температур центральной части и периферии точки в процессе охлаждения.

На основании комплекса теоретических и экспериментальных исследований показано, что наведению благоприятного поля остаточных напряжений в области действия концентратора напряжений, а также повышению усталостной прочности точечных соединений способствуют: ужесточение режима сварки, проковка по периферии точки или посредством электродов со сферической рабочей поверхностью, приложение ковочного усилия после отключения сварочного тока с запаздыванием, не превышающим время, за которое периферия точки остывает до температуры $700...800^{\circ}\text{C}$; выдержка ковочного усилия до температуры в сварной точке $100-300^{\circ}\text{C}$.

Практическая ценность. На основании результатов исследований разработана технология контактной точечной сварки низкоуглеродистой стали с последующей проковкой, обеспечивающая повышение усталостной прочности точечных соединений посредством наведения благоприятного поля остаточных напряжений в области действия концентратора рабочих напряжений, что позволило обосновать и осуществить перевод ряда несущих соединений с дуговых методов сварки на контактную точечную.

Апробация работы. По основным разделам работы сделаны и одобрены доклады на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" в ИВТУ им. Н.Э.Баумана, в апреле 1981г.; на научно-технической конференции "Применение математических методов и вычислительной техники в сварочном производстве", в декабре 1980г., в г.Киеве; на научно-технической конференции по передовым методам сварки, посвященной 125-летию со дня рождения Н.Г.Славянова, в мае 1979г., г.Пермь; Всесоюзной научно-технической конференции "Пути повышения эффективности контактной сварки", в октябре 1980г., г.Таганрог; на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Могилевского машиностроительного института в 1983-1984г.г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, включая 3 авторских свидетельства и 2 положительных решения Госкомитета СССР по делам изобретений и открытий.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и выводов по работе. Содержит 2 таблицы, 74 рисунка и 135 наименований использованных литературных источников, изложена на 123 страницах машинописного текста.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I. Состояние вопроса, цель и задачи исследования

Анализ сварных металлоконструкций, выпускаемых на предприятиях ПО "Томсельмаш" и ПО "Могилевлифтмаш", показал, что в производстве еще широко используются нахлесточные соединения, выполненные дуговой сваркой, которые без существенных конструктивных изменений могут быть переведены на контактную точечную сварку. Кроме того, в ряде узлов при незначительных конструктивных доработках может быть также успешно применена контактная точечная сварка.

Однако, данные соединения, как правило, являются несущими и, таким образом, к ним предъявляют повышенные требования по прочностным показателям.

Анализ условий работы отобранных узлов показал, что они эксплуатируются при циклически изменяющихся нагрузках и, следовательно, наиболее вероятной причиной выхода их из строя является усталостное разрушение. Вместе с тем, предварительные усталостные испытания показали, что в отдельных случаях соеди-

нения, выполненные контактной точечной сваркой по существующей технологии, не удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям. Таким образом, внедрение контактной точечной сварки взамен дуговой в отмеченных случаях становится возможным только при условии повышения усталостной прочности точечных соединений.

В отобранных под контактную точечную сварку узлах толщины свариваемых деталей изменялись в пределах от 4 до 8 мм, при этом для их изготовления, как правило, использовалась низкоуглеродистая сталь Ст.3.

Вопросам повышения усталостной прочности точечных соединений посвящен ряд работ ученых-сварщиков как в нашей стране /Т.А.Николаев, Н.О.Окороков, А.С.Гельман, Б.Д.Орлов, В.М.Сагалев, О.А.Бакиш, А.И.Гуляев, Б.Б.Золотарев и др./, так и за рубежом /Хан-Йонг, Бескен, Гаверс и др. /.

Анализ литературных данных показал, что усталостная прочность точечных соединений из низкоуглеродистой стали зависит в основном от следующих факторов :

- концентрации рабочих напряжений,
- поля остаточных напряжений.

Таким образом, повысить усталостную прочность рассматриваемых точечных соединений можно путем изменения одного, либо обоих приведенных факторов.

Как следует из литературных данных, наиболее универсальными, экономичными и эффективными являются методы, повышающие усталостную прочность точечных соединений посредством наведения благоприятного поля остаточных напряжений. Различными авторами было установлено, что распределение остаточных напряжений в точечном соединении зависит в основном от жесткости режима сварки и силового воздействия, передаваемого электродами сварочной машины. Вместе с тем, до настоящего времени не имеется четкого представления о том, каким образом указанные факторы и в особенности отдельные их параметры, такие как продолжительность сварки, место и момент приложения, а также длительность выдержки ковочного усилия и т.д., оказывают влияние на распределение остаточных напряжений по всему объему сварного соединения. Особенно это касается области, прилегающей к концентратору напряжений, распределение остаточных напряжений, в которой представляет наибольший интерес. Отсутствие такого рода данных объясняется тем, что существующие экспериментальные и расчетные методы исследования остаточных напряжений в точечном соединении пред -

назначены либо для исследования плоского напряженного состояния, либо решают задачу в объемной постановке, но с существенными упрощениями, искажающими реальную картину распределения напряжений. В результате, при изготовлении сварных конструкций, недостаточно полно используются возможности данного пути повышения усталостной прочности точечных соединений.

Поставленная в работе цель потребовала решения следующих задач:

1. Разработка математической модели термомеханического цикла контактной точечной сварки, описывающей объемное поле остаточных напряжений.
2. Проведение расчетной и экспериментальной проверки предлагаемой методики расчета.
3. Исследование влияния параметров контактной точечной сварки с проковкой на характер распределения остаточных напряжений в области действия концентратора напряжений.
4. Исследование влияния поля остаточных напряжений на работоспособность точечных соединений при циклически изменяющихся нагрузках.
5. Разработка и внедрение в производство рекомендаций по выбору параметров режима контактной точечной сварки и проковки, позволяющих повысить усталостную прочность точечных соединений.

Глава 2. Методика расчета остаточных напряжений в точечных соединениях

Анализ поля остаточных напряжений в точечных соединениях производился на основании использования метода конечных элементов. При этом, для описания расчетной схемы применялись объемные конечные элементы, представляющие собой кольца с треугольным поперечным сечением.

Физическая нелинейность, связанная с упругопластическими деформациями и нестационарным температурным полем, описывалась с помощью теории неизотермического пластического течения, согласно которой приращение полной деформации определяется суммой:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p + \delta_{ij} d\varepsilon^T$$

где ε_{ij}^e и ε_{ij}^p — соответственно компоненты тензора упругой и пластической составляющих полной деформации, ε^T — температурная деформация, δ_{ij} — символ Кронекера.

Упругая и температурная составляющие полной деформации определяются соотношениями неадиабатической теории упругости, в пределах которой справедлив обобщенный закон Гука с учетом изменения механических характеристик материала в зависимости от температуры. Пластическая составляющая, в формулировке И.А.Биргера, описывается соотношением:

$$d\varepsilon_{ij}^p = \frac{3}{2} \frac{S_{ij}}{\bar{\sigma}} d\varepsilon_i^p,$$

здесь S_{ij} - девиатор напряжений, $d\varepsilon_i^p$ - интенсивность приращения пластических деформаций, $\bar{\sigma}$ - интенсивность напряжений.

Для описания физической нелинейности использовался численный метод - метод дополнительных деформаций. В сочетании с методом конечных элементов метод дополнительных деформаций реализуется следующим образом. Первоначально, на каждом этапе нагружения (шаге во времени) решается упругая задача

$$\{\Delta q^{(n,1)}\} = [A^n]^{-1} \{ \Delta P^{(n)} \} + \{ \Delta F_{\varepsilon}^{(n)} \},$$

где $[A^n]$ - объединенная матрица жесткости всей системы элементов на n -том этапе нагружения, а $\{ \Delta P^{(n)} \}$, $\{ \Delta F_{\varepsilon}^{(n)} \}$ и $\{ \Delta q^{(n,1)} \}$ соответственно векторы-столбцы приращений внешней нагрузки, усилий, обусловленных температурными деформациями, перемещений узлов конечных элементов.

Затем определяются напряжения в конечных элементах и производится проверка на наличие пластической деформации. Для этих целей используется условие пластичности Хубера-Мизеса, а зависимость между напряжениями и деформациями аппроксимируется диаграммой для идеального упруго-пластического материала.

При наличии пластических деформаций, во втором приближении, снова решается упругая задача, но уже с усилиями, обусловленными дополнительными пластическими деформациями

$$\{\Delta q^{(n,2)}\} = [A^{(n)}]^{-1} \{ \Delta P^{(n)} \} + \{ \Delta F_{\varepsilon}^{(n)} \} + \{ \Delta F_{\varepsilon}^{(n,1)} \},$$

при этом, приращение напряжений внутри элемента определяется следующим образом

$$\{\Delta \sigma\} = [D] (\{ \Delta \varepsilon \} - \{ \Delta \varepsilon_p \} - \{ \Delta \varepsilon^p \}).$$

Итерационный процесс уточнения решения на каждом шаге во времени (этапе нагружения) продолжается до совпадения с заданной точностью значений интенсивности напряжений $\sigma_i^{(n,k)}$ и предела текучести $\sigma_f(T)$ в элементах, подверженных пластическому деформированию.

В дальнейшем процедура решения задачи методом конечных элементов не отличается от общепринятой.

Приведенный алгоритм реализован для ЭИМ "Минск-32", программирование осуществлялось на алгоритмическом языке ФОРТРАН-IV.

В процессе счета изменение механических характеристик материала в зависимости от температуры осуществлялось на основании табличных данных. При этом, для значений температур, находящихся между табличными данными, величины механических характеристик определяли с помощью квадратичной интерполяции.

Глава 3. Расчет тепловых процессов при контактной точечной сварке

На основании анализа литературных данных была принята следующая расчетная схема распределения теплового потока при контактной точечной сварке. Тепловыделение по толщине свариваемого изделия считается неизменным, а в радиальном направлении постоянно в пределах диаметра литого ядра, за его границей резко снижается до нуля. При этом предполагается, что характер снижения тепловыделения за пределами диаметра литого ядра подчиняется нормальному закону распределения.

Представленная расчетная схема описывалась с помощью непрерывнодействующих в бесконечном теле нормально-круговых источников тепла.

При численной реализации расчетной схемы непрерывное по толщине свариваемых листов тепловыделение было заменено действием равномерно распределенных по толщине нормально-круговых источников тепла. При расчетах количество источников задавалось таким, чтобы шаг между ними составлял 0,25 мм.

Равномерность распределения теплового потока в радиальном направлении в пределах сварной точки обеспечивалась посредством введения одновременно действующих в одном и том же месте источника и стока определенной мощности и сосредоточенности.

Значения этих параметров подбирались на основании численного анализа.

Теплообмен на наружной поверхности свариваемых изделий задавался в зависимости от того, имеет ли место в данный момент контактирование медных водоохлаждаемых электродов с деталью, или же контакт отсутствует. При наличии контакта задавались граничные условия первого рода, при отсутствии такого контакта свободные поверхности деталей рассматривались как адиабатические границы.

Окончательное выражение, описывающее распределение температур как в процессе нагрева точки, так и при ее охлаждении, выглядит так :

$$T(r, z, t) = \frac{1}{c\gamma(4\pi\alpha)^{3/2}} \int_{INF(t-t_{cb})}^t \left(\frac{\sum_{n=1}^1 \sum_{m=1}^N (z') \exp \left[-\frac{(z' + \frac{N+1}{2})h - (2\delta + x')Nt - nh)^2}{4\alpha t} \right]}{\sqrt{t}} \right) dt$$

$$\times \left[\frac{q' \exp \left(-\frac{r^2}{4\alpha(t_0' + t)} \right)}{(t_0' + t)} - \frac{q'' \exp \left(-\frac{r^2}{4\alpha(t_0'' + t)} \right)}{(t_0'' + t)} \right] dt, \quad INF = \begin{cases} 0, & \text{если } t \leq t_{cb} \\ 1, & \text{если } t > t_{cb} \end{cases}$$

где N - количество источников, распределенных по толщине сварного соединения ; h - шаг между ними ; q - тепловая мощность источника ; α - коэффициент температуропроводности ; $c\gamma$ - объемная теплоемкость ; K - коэффициент сосредоточенности теплового потока источника ; $t_0 = 1/4\alpha K$; t_{cb} - время протекания сварочного тока.

Поскольку приведенный интеграл относится к разряду "неберущихся", вычисление его производилось численно-методом Симпсона.

Результаты расчета температурного поля на каждом шаге во времени записывались на магнитную ленту и, впоследствии, считывались программой вычисления сварочных напряжений.

Опытная проверка методики расчета температур показала, что отклонение расчетных данных от результатов эксперимента не превышает 10...15% и, таким образом, данная методика может быть использована при численном анализе характера распределения остаточных напряжений в точечных соединениях.

Глава 4. Расчетная и экспериментальная апробации методики вычисления сварочных напряжений

Проверка методики расчета производилась в двух направлениях: на задачах, имеющих точные решения, а также сопоставлением с данными измерений остаточных напряжений непосредственно в точечных соединениях.

Апробация методики расчета на задачах, имеющих точные решения, производилась с целью определения скорости сходимости решения к точному, степени дискретизации исследуемого объекта (густоты сетки разбиения расчетной схемы на конечные элементы), учета влияния температурного фактора, точности результатов вычисления в упругопластической области и т.д. Для этих целей использовались известные решения задачи о упругом деформировании сплошного цилиндра постоянной толщины под действием неравномерного в радиальном направлении температурного поля и о упругопластическом деформировании толстостенной трубы под действием внутреннего давления.

Сопоставление показало, что предлагаемая методика расчета с точки зрения механики деформируемых тел, удовлетворяет требованиям точности.

Экспериментальная проверка методики расчета осуществлялась путем измерения остаточных напряжений в точечном соединении ультразвуковым методом. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных позволило сделать заключение о верности выбранной расчетной модели и методики расчета в целом, при этом установлено, что отклонение результатов расчета от экспериментальных данных не превышает 11%.

Глава 5. Результаты определения остаточных напряжений и работоспособность точечных соединений

В результате численного анализа исследована кинетика развития сварочных напряжений в точечном соединении, выявлены основные закономерности образования поля остаточных напряжений. На рис. 1 приведено распределение нормальных радиальных σ_r , тангенциальных σ_t и осевых σ_z остаточных напряжений по площади сечений точечного соединения, перпендикулярного плоскости. Как видно, термомеханический цикл контактной точечной сварки приводит к образованию в соединении объемного напряжен-

ного состояния, для которого характерно наличие областей со сжимающими остаточными напряжениями, области, непосредственно прилегающей в процессе сварки к электроду, а также районе пересечения границы литого ядра и внутренней поверхности листа, в то время как основная часть металла межэлектродного пространства подвержена действию растягивающих напряжений.

Посредством проведения численного эксперимента было установлено, что наличие сжимающих остаточных напряжений в области, непосредственно прилегающей к электродам сварочной машины обусловлено объемным характером температурного поля на стадии охлаждения точки. Присутствие же характерной "впадины" в зоне пересечения границы литого ядра и внутренней поверхности листов (рис. I) обусловлено наличием металлической связи между свариваемыми листами.

Далее исследовалось влияние различных параметров термомеханического цикла контактной точечной сварки на распределение остаточных напряжений в области действия концентратора напряжений. Проведенный анализ показал, что наиболее благоприятное поле остаточных напряжений в указанной области образуется при выполнении следующего комплекса мероприятий:

- сварка осуществляется при наиболее жестких режимах;
- ковочное усилие прикладывается после отключения сварочного тока с запаздыванием, не превышающим время, за которое периферия точки остывает до температуры $700 \dots 800^{\circ}\text{C}$;
- проковка осуществляется по периферии точки; в тех случаях, когда проковка осуществляется посредством электродов сварочной машины, используются электроды со сферической рабочей поверхностью;
- ковочное усилие выдерживается до температуры в центре точки равной $100 \dots 300^{\circ}\text{C}$.

На практике время запаздывания приложения ковочного усилия $t_{\text{зап}}$, а также время выдержки усилия проковки $t_{\text{ков}}$ для малоуглеродистых и низколегированных сталей могут быть определены с помощью следующих выражений:

$$t_{\text{зап}} \leq \frac{0,026}{\delta/A + 0,035},$$

$$t_{\text{ков}} \geq \frac{0,16}{0,38\delta/A + 0,035}, \text{ где}$$

$$A = 0,1(2\delta + 3)^2 + (2\delta + 3)\sqrt{t_{св}} + 12t_{св},$$

δ — толщина свариваемых листов в мм.

Приведенные выражения получены на основании анализа зависимости описывающих температурное поле при контактной точечной сварке, экспериментальных данных, а также, исходя из предположения о том, что диаметр литого ядра d_A равен

$$d_A = 2\delta + 3(\text{мм})$$

Наряду с анализом распределения остаточных напряжений исследовалось также влияние параметров режима сварки и на работоспособность точечных соединений при циклически изменяющихся нагрузках. Для этих целей была разработана новая схема испытаний точечных соединений, отличающаяся меньшим разбросом результатов испытаний и сравнительно небольшой продолжительностью испытаний при использовании стандартного оборудования.

Испытания образцов точечных соединений показали, что посредством наведения благоприятного поля остаточных напряжений в области действия концентратора можно повысить усталостную прочность точечных соединений в 1,8 раза, а статическую — на 25%.

Прочностные испытания сварных узлов, выполненных контактной точечной сваркой, при условиях, максимально приближенных к эксплуатационным, показали, что они удовлетворяют требованиям прочности, предъявляемым к ним. В результате этого были разработаны конструктивно-технологические рекомендации, позволяющие осуществить перевод ряда узлов с дуговых методов сварки на контактную точечную.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

I. Анализ состояния вопроса показал, что одним из наиболее экономичных и эффективных путей повышения усталостной прочности соединений, выполненных контактной точечной сваркой на низкоуглеродистых сталях, является наведение благоприятных сжимающих остаточных напряжений в области действия концентратора напряжений. Вместе с тем, существующие расчетные и эксперимен-

точные методы исследования полей остаточных напряжений в точечных соединениях не позволяют произвести анализ напряженного состояния в указанной области, поскольку либо предполагают наличие плоского напряженного состояния, либо решают задачу в объемной постановке, но с существенными упрощениями, искажающими реальную картину распределения напряжений. В результате при изготовлении сварных конструкций недостаточно полно используются возможности данного пути повышения усталостной прочности точечных соединений.

2. Разработана методика расчета остаточных напряжений, обусловленных термомеханическим циклом контактной точечной сварки, основанная на использовании метода конечных элементов, теории неизотермического пластического течения, метода дополнительных деформаций и метода источников, отличающаяся:

а) рассмотрением термомеханических процессов, происходящих при контактной точечной сварке, в объемной постановке;

б) учетом изменения механических характеристик материала в процессе сварки в зависимости от температуры;

в) неравномерностью сетки разбиения расчетной модели точечного соединения на конечные элементы, с измельчением ее в области действия концентратора напряжений;

г) учетом дискретного характера соединения свариваемых листов;

д) быстрой сходимостью итерационного процесса и сравнительно небольшими затратами машинного времени при относительно высокой степени дискретизации исследуемого объекта (погрешность при этом не превышает 11%).

3. На основании численного анализа установлены основные закономерности образования поля остаточных напряжений. Показано, что в результате контактной точечной сварки образуется объемное поле остаточных напряжений, характерной особенностью которого является наличие сжимающих радиальных σ_r , тангенциальных σ_t и осевых σ_z напряжений в области, непосредственно прилегающей в процессе сварки к электродам контактной машины, а также в районе пересечения границы литого ядра и внутренней поверхности листов. В остальных областях металла межэлектродного пространства действуют растягивающие остаточные напряжения.

Установлено, что основными причинами, приводящими к образованию сжимающих остаточных напряжений в сварной точке, являются

неравномерность температурного поля точки на стадии охлаждения в радиальном и осевом направлениях, а также наличие в ограниченной зоне металлической связи между свариваемыми листами.

4. Исследовано влияние различных параметров термомеханического цикла контактной точечной сварки на характер распределения остаточных напряжений. Показано, что наиболее благоприятное поле сжимающих остаточных напряжений в области действия концентратора напряжений образуется при выполнении следующего комплекса мероприятий :

- а) сварка осуществляется при наиболее жестких режимах ;
- б) ковальное усилие прикладывается после отключения сварочного тока с запаздыванием, не превышающем времени, за которое периферия точки остывает до температуры $700...800^{\circ}\text{C}$;
- в) проковка осуществляется по периферии точки : в тех случаях, когда проковка выполняется посредством электродов сварочной машины, используются электроды со сферической рабочей поверхностью;
- г) ковальное усилие выдерживается до температуры в центре точки, равной $100...300^{\circ}\text{C}$.

На основании этих данных получены зависимости, позволяющие определить время запаздывания и длительность выдержки ковального усилия.

5. Установлено, что при наиболее опасном для точечного соединения виде нагружения, на отрыв в районе действия концентратора напряжений наибольшие значения принимают радиальные растягивающие напряжения σ_r , при этом концентрация напряжений составляет $K_\sigma = 4,8$. Этим объясняется развитие усталостной трещины по направлению к наружной поверхности листа.

6. Показано, что в точечных соединениях, выполненных с учетом разработанных рекомендаций, благодаря использованию благоприятного поля остаточных напряжений, имеет место снижение уровня напряжений, действующих при нагружении в области концентратора, в результате чего повышается усталостная прочность соединений.

7. Разработана новая схема испытаний точечных соединений при циклически изменяющихся нагрузках, отличающаяся :

- а) сравнительно небольшой продолжительностью испытаний при использовании стандартного оборудования (в 3 раза быстрее, чем по известным схемам нагружения);

б) меньшим разбросом результатов испытаний ;

в) возможность проведения испытаний при симметричном цикле нагружения и совместном действии усилий отрыва и среза.

8. Испытания образцов точечных соединений из низкоуглеродистой стали толщиной 6,0+6,0 мм показали, что посредством наведения в области действия концентратора напряжений благоприятного поля остаточных напряжений можно повысить усталостную прочность точечных соединений в 1,8 раза, а статическую прочность на 25%.

9. Прочностные испытания узлов, выполненных контактной точечной сваркой по рекомендуемой технологии, показали, что они удовлетворяют требованиям, предъявляемым к ним, и, следовательно, могут быть использованы в производстве. В результате, за счет внедрения на ПО "Гомсельмаш" и ПО "Могилевлифтмаш" контактной точечной сварки взамен дуговой, годовой экономический эффект составляет 84194 руб.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах :

1. Попковский В.А., Березиенко В.П., Сагалевич В.М. О влиянии режима проковки на усталостную прочность соединений, выполненных точечной сваркой. - Автом. сварка, 1981, № 5, с.68.

2. Сагалевич В.М., Березиенко В.П., Попковский В.А. О расчете остаточных напряжений при контактной точечной сварке. - В кн.: Повышение надежности и долговечности деталей машин, механизмов и сварных конструкций: Тез. докл. респ. конф. Минск, 1982, с.11-12.

3. Березиенко В.П., Попковский В.А. Остаточные напряжения в соединениях, выполненных контактной точечной сваркой. - В кн.: Прочность и технология изготовления сварных конструкций: Тез. докл. Всесоюз. конф. М., 1983, с.31-34.

4. Березиенко В.П., Попковский В.А. Исследование поля остаточных напряжений соединений, выполненных контактной точечной сваркой, с помощью метода конечных элементов. - В кн.: Пути повышения эффективности сварочного производства и улучшения качества сварных конструкций: Тез. докл. респ. конф. Минск, 1978, с.14-16.

5. Березиенко В.П., Попковский В.А. О повышении усталостной прочности соединений, выполненных контактной точечной сваркой. - В кн.: Тез. докл. конференции, посвященной 50-летию подготовки инженеро-сварщиков. Владивосток, 1980, с.33-34.

6. Попковский В.А., Березиенко В.П. Некоторые пути повышения усталостной прочности соединений, выполненных контактной точечной сваркой. - В кн.: Пути повышения эффективности контактной сварки: Тез. докл. Всесоюзн. конф. Таганрог, 1980, с. 74-75.

7. К усталостным испытаниям соединений, выполненных контактной точечной и рельефной сваркой / В.П. Березиенко, А.А. Жебровский, В.А. Попковский и др. - Заводская лаборатория, 1983, № 12, с. 68-70.

8. Бейманов Э.Ф., Попковский В.А. Применение контактной точечной сварки при изготовлении металлоконструкций лифта. - В кн.: Повышение надежности и долговечности деталей машин, механизмов и сварных конструкций: Тез. докл. респ. конф. Минск, 1982, с. 4-5.

9. Березиенко В.П., Попковский В.А., Жебровский А.А. О повышении качества и снижении металлоемкости узлов сельскохозяйственных машин за счет рационального применения способов сварки. - В кн.: Повышение качества и технологического уровня сельскохозяйственных машин - ключевое звено продовольственной программы: Тез. докл. респ. конф. Минск, 1983, с. 86-87.

10. А.С. 761195 /СССР/. Электрод для контактной точечной сварки / В.П. Березиенко, В.А. Попковский. - Оpubл. в Б.И., 1980, № 33.

11. А.С. 965670 /СССР/. Способ контактной точечной сварки / Ю.А. Цумарев, В.А. Попковский, В.П. Березиенко. - Оpubл. в Б.И., 1982, № 38.

12. А.С. 1087818 /СССР/. Сварной образец для определения циклической прочности сварного соединения / В.А. Попковский, В.П. Березиенко, Ю.А. Цумарев. - Оpubл. в Б.И., 1984, № 15.

13. Положительное решение по заявке № 3669983 от 07.12.83. Способ контактной сварки / В.А. Попковский, В.П. Березиенко, Ю.А. Цумарев.

14. Положительное решение по заявке № 3728715/28 от 01.03.84. Сварной образец для определения циклической прочности сварного соединения / В.А. Попковский, Ю.А. Цумарев, В.П. Березиенко.

В.П. Березиенко

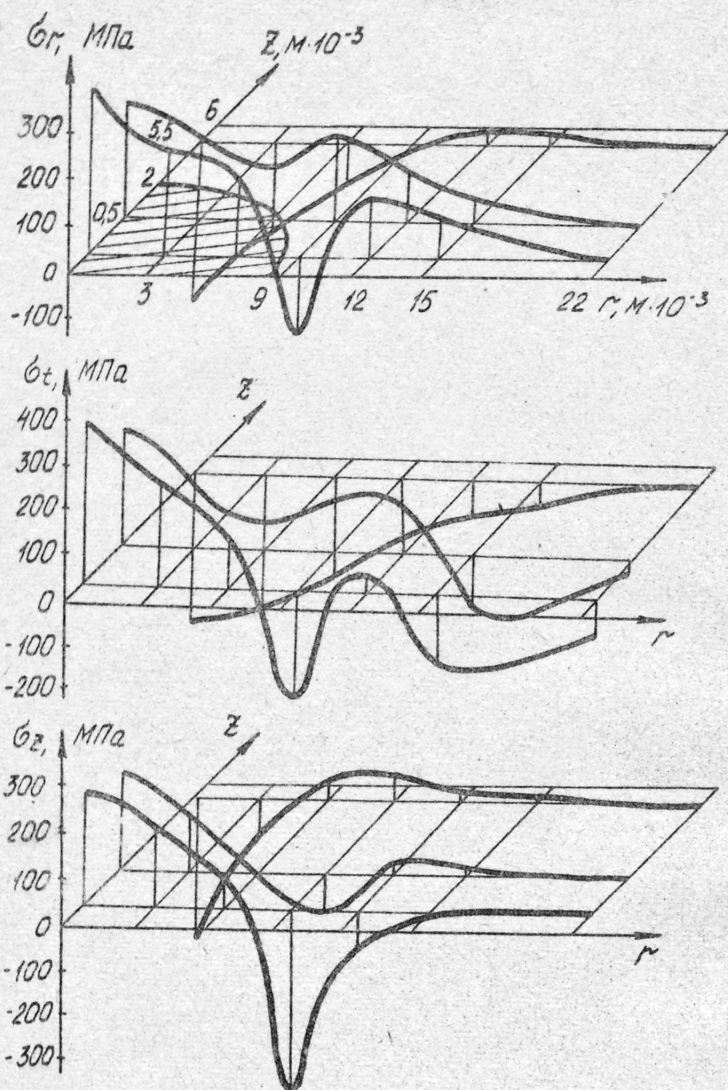


Рис.1. Распределение остаточных напряжений в соединении, выполненном контактной точечной сваркой