

М 374842

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

НА ДОМ
НЕ ВПИСАНО

М о с к о в с к о е

ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового
Красного Знамени высшего технического училище имени Н.Э. Баумана

На правах рукописи

СЕЛИВАНОВ Михаил Иванович

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ
ПРИ СВАРКЕ УЗЛОВ РЕШЕТЧАТЫХ КОНСТРУКЦИЙ

(Специальность 05.04.05 - Технология и
машины сварочного производства)

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

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

Научный руководитель - д.т.н., профессор САГАЛЕВИЧ В.М.

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор ВЕРШИНСКИЙ А.Э.

к.т.н., ст.н.с. ЖУКОВ М.Б.

Ведущее предприятие - ЦНИИСК им. Кучеренко

Защита диссертации состоится " " _____ 1981 г.
на заседании специализированного Совета К053.15.03 по технологии
и машинам сварочного производства Московского ордена Ленина,
ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени
высшего технического училища имени Н.Э.Баумана по адресу:
107005, Москва, 2-я Бауманская ул., дом 5.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просьба
направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ имени
Н.Э.Баумана.

Автореферат

Ученый секретарь
специализированного
д.т.н., доцент

ий В.М.

М 374842

Д-86028 от

к.668

Актуальность работы. В настоящее время промышленностью в большом объеме выпускаются различные типы решетчатых пространственных конструкций типа: стеллажей, ферм, антенн, каркасов. Одним из основных технологических процессов изготовления решетчатых пространственных конструкций является сварка. Сварка решетчатых конструкций сопровождается образованием остаточных деформаций и перемещений. Сварочные деформации оказывают отрицательное действие на последующую сборку отдельных узлов между собой, искажают форму сварных конструкций, а размеры их значительно отклоняются от проектных.

На долю устранения остаточных сварочных деформаций приходится значительный объем работ. Как правило, правка сварных решетчатых конструкций производится после сварки механическими способами. Основными недостатками механических способов является большая трудоемкость правочно-доводочных работ, снижение пластических свойств сварных швов.

Эффективное использование известных методов борьбы с остаточными деформациями и перемещениями, разработка новых методов требуют глубокого знания факторов, существенно влияющих на сварочные деформации. Необходимо знать природу и степень влияния отдельных факторов; иметь количественные характеристики этих явлений. В реальных сварных конструкциях с их многообразием геометрических параметров и технологических особенностей тем более важно выявить главные факторы, определяющие величину и характер остаточных деформаций и перемещений.

При изготовлении решетчатых конструкций применяются короткие швы, которые отличаются специфическими особенностями распространения теплового потока. Данного типа сварные соединения встречаются в широком классе сварных конструкций. В отличие от сварных соединений, где применяются длинные швы с квазистационарными тепловыми полями, сварные соединения с короткими швами практически не изучены. Поэтому изучение сварочных деформаций и перемещений в сварных типовых узлах решетчатых конструкций, а также возможностей их регулирования и уменьшения является актуальным.



26877501

Целью настоящей работы является разработка мероприятий по регулированию и уменьшению сварочных деформаций и перемещений в узлах решетчатых конструкций, свариваемых короткими швами, в процессе сварки.

Методы исследований. Основные задачи работы решались экспериментальными и теоретическими путями. Для достижения поставленной цели была разработана методика определения деформаций и перемещений как в зоне сварного соединения, так и свариваемых элементов в типовом узле.

Определение деформаций и перемещений в зоне сварного соединения осуществлялось трехкоординатными датчиками перемещений, разработанными в Ворошиловградском машиностроительном институте, которые связаны с двухкоординатными самописцами, регистрирующими перемещения в различных координатных плоскостях.

Для исследования перемещений свариваемых элементов разработана методика, основанная на регистрации перемещений группой индикаторов часового типа с фиксацией их показаний на фотопленку.

Теоретические решения получены при использовании основных уравнений теории распространения тепла при сварке, теории упругости и теории пластичности. Реализация решений осуществлялась в численном виде на ЭЦМ БЭС 10-33.

Научная новизна. На основании комплекса теоретических и экспериментальных исследований установлены закономерности образования временных и остаточных деформаций и перемещений элементов решетчатых конструкций, свариваемых короткими швами.

Установлено, что в основе образования временных и остаточных перемещений элементов, свариваемых короткими швами, лежат следующие виды деформаций и перемещений в зоне сварных соединений: продольные деформации укорочения, неравномерные по длине шва; поперечные перемещения кромок свариваемых элементов, образующие неравномерную по длине шва поперечную усадку; смещение привариваемого элемента относительно листа в направлении движения источника тепла, а также существенный вклад в образование временных и остаточных перемещений эле -

ментов вносит изменение геометрии свариваемого соединения в процессе сварки.

Практическая ценность. В результате проведенных исследований выявлены закономерности образования сварочных деформаций и перемещений при сварке короткими швами, позволяющие качественно оценивать ожидаемые остаточные перемещения профильных элементов решетчатых конструкций и регулировать их технологическими приемами, а также на основе полученных закономерностей образования временных и остаточных перемещений элементов, свариваемых короткими швами, разработан метод регулирования остаточных перемещений консольных элементов в решетчатых конструкциях, основанный на создании в зоне сварного соединения растягивающих усилий, уменьшающих пластические деформации при нагреве, и на изменении геометрии сварного соединения в процессе сварки приложением кратковременного внешнего усилия к привариваемому элементу в процессе сварки, и выявлены основные параметры метода.

Апробация работы. Основные разделы работы и результаты исследований докладывались на научном семинаре кафедры "Машины и автоматизация сварочных процессов" в МВТУ им. Н.Э.Баумана (ноябрь 1977 г.), на шестой научно-технической конференции, посвященной 110-ой годовщине со дня рождения В.И.Ленина в г. Калуге (апрель 1980 г.).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и выводов по работе. Содержит 5 таблиц, 65 рисунков и 101 наименование использованных литературных источников, изложена на 129 страницах машинописного текста.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена объекту исследования, обзору литературы по вопросам сварочных деформаций и перемещений элементов конструкций, а также постановке цели и задач работы. Деформационные процессы, развивающиеся при сварке, являются, как известно, следствием неравномерного распре-

ления тепла в металле от сварочного источника. Работ, посвященных анализу, расчету и изучению распределения температур при сварке элементов конструкций короткими швами практически нет.

Вопрос о сварочных деформациях и перемещениях рассматривался во многих работах как советских ученых Николаева Г.А., Винокурова В.А., Куркина С.А., Сагалевича В.М., Вершинского А.В., Мехневко В.И., Байковой И.П., Кузьмина С.А., Григорьянца А.Г., Гатовского К.М., так и зарубежных исследователей. Анализ расчетных методов определения сварочных деформаций и перемещений показывает, что в отечественной и зарубежной литературе практически не освещены вопросы о перемещениях и деформациях в сварных соединениях и конструкциях, свариваемых короткими швами. Основные расчетные и практические рекомендации даются для длинных швов с квазистационарными тепловыми полями.

При сварке короткими швами наблюдаются неквазистационарные тепловые поля, что, вероятно, приведет к некоторым особенностям образования деформаций и перемещений в сварном соединении.

В настоящее время многими авторами предложены и разработаны многочисленные методы устранения и предотвращения сварочных деформаций и перемещений, но лишь немногие из них могут быть использованы для пространственных решетчатых конструкций. Одни из них не могут быть применены ввиду специфического конструктивного оформления конструкций данного класса, другие не обеспечивают необходимую точность изделий или чрезмерно удлиняют срок изготовления. Остаточные перемещения в узлах и элементах решетчатых конструкций трудно устранить с помощью послесварочных методов обработки. Поэтому разработку методов и приемов снижения и регулирования остаточных перемещений и деформаций целесообразно осуществлять в направлении предотвращения образования перемещений в процессе сварки. Учитывая то обстоятельство, что к моменту окончания сварки короткого шва практически вся зона находится в высокотемпературной области, не исключено для устранения сварочных перемещений применение методов, которые предполагают воздействие как на шов, так и на элементы узлов. Эти методы при

сварке коротких швов могут быть проще реализованы, чем при сварке протяженных швов. Эффективность мероприятий по уменьшению и регулированию остаточных перемещений свариваемых элементов основывается на четких представлениях о характере временных перемещений в процессе сварки и на знании основных закономерностей образования остаточных деформаций и перемещений.

Таким образом, исходя из главной цели работы — обеспечение точности геометрических размеров и формы сварных решетчатых конструкций — необходимо было решить следующие задачи: разработать методику экспериментального определения деформаций и перемещений в зоне сварного соединения и свариваемых элементов; провести теоретическое исследование температурных полей при сварке короткими швами, экспериментальное исследование комплекса деформаций и перемещений в зоне сварного соединения при сварке коротким швом; теоретическое и экспериментальное определение влияния конструктивно-технологических факторов на величину временных и остаточных перемещений элементов, свариваемых короткими швами. На основании проведенных исследований разработать метод по снижению и регулированию остаточных перемещений элементов в узлах решетчатых конструкций в процессе сварки.

Вторая глава посвящена теоретическому исследованию температурных полей при сварке короткими швами. Для расчета температуры от сварочного источника, движущегося по пластине, используется принцип наложения. При определении температурных полей в процессе сварки короткими швами необходимо учитывать ограниченность размеров пластины и, ввиду малого времени заварки шва, период теплонасыщения. Распространение тепла в пластине ограниченной длины рассматривается как результат действия действительного источника тепла в безразмерной пластине и дополнительно введенного фиктивного источника тепла, который по характеру влияния на распространение тепла соответствует условиям на кромке тела. Температура произвольной точки пластины выражается суммой температур в данной точке от действительного и фиктивного источников. Для расчета температур после гашения дуги процесс остывания пред-

оставляется как совместное с момента окончания сварки движение источника и стока одинаковой мощности. Температура произвольной точки пластины в процессе остывания шва определяется разностью температур в этой точке от источника и стока. При нахождении температур точек пластины от линейного источника использовались таблицы, разработанные сотрудниками ИЭС им. Е.О.Патона. Исследования распределений температур в пластинах $\delta = 5 \cdot 10^{-3}$ м из низкоуглеродистой стали от коротких швов длиной от $20 \cdot 10^{-3}$ м до $100 \cdot 10^{-3}$ м при скоростях сварки от $0,327 \cdot 10^{-2}$ м/с до $0,510 \cdot 10^{-2}$ м/с позволили выявить особенности температурных полей коротких швов.

Температурное поле при наложении короткого шва непрерывно изменяется в процессе заварки шва по всей длине. Температура точек нарастает с увеличением длины заваренного участка шва. Распределение температур при наложении короткого шва является осесимметричным, а остывание таких швов можно считать происходящим почти одновременно по всей длине, однако распределение температуры по длине и ширине шва в момент окончания сварки является неравномерным, и неравномерность распределения температуры тем выше, чем выше значение погонной энергии источника.

При наложении короткого шва на пластину ограниченной длины распределение температуры по длине зависит от направления наложения шва. При наложении шва в направлении от края пластины распределение температуры по длине шва более равномерно, чем в пластинах ограниченной длины при наложении шва в направлении к краю пластины. Это объясняется отражением тепла от края пластины, что повышает температуру точек, расположенных около кромки в начальный период сварки. При наложении шва в направлении к кромке пластины неравномерность распределения температуры по длине шва значительно выше, чем в рассмотренных выше случаях. Отражение от расположенной впереди источника кромки пластины резко повышает температуру точек пластины, расположенных вблизи кромки в период окончания сварки. При наложении шва в направлении к кромке пластины распределение температуры по длине шва зависит от длины шва. С уменьшением длины шва неравномерность распределения температуры по длине

шва значительно увеличивается. Ввиду того, что при соединении элементов в узлах решетчатых конструкций коротким швом, схемы ввода тепла в каждый элемент различны, распределение температуры по длине шва в свариваемых элементах тоже различно. Таким образом, установлено, что при сварке короткими швами температурное поле неравномерно в продольном и поперечном направлениях и непрерывно меняется в процессе сварки. Величина температуры и степень неравномерности распределения температуры зависят от схемы ввода тепла или направления сварки, от погонной энергии и длины шва.

Третья глава посвящена теоретическому исследованию деформаций и перемещений в зоне сварного соединения при сварке двух пластин по незамкнутому контуру с последующим их остыванием.

При решении задачи были приняты следующие допущения: 1. принимается схема плоско-напряженного состояния; 2. учитывается фактор движения источника тепла; 3. расчет ведется по теории пластического течения; 4. материал идеально упруго-пластический и изотропный.

Расчет температурного поля, возникающего в пластине от движущегося источника постоянной мощности, осуществляется интегрированием функций температуры от мгновенного линейного источника. Учет отражения от кромок производится введением дополнительного фиктивного источника, а определение температуры после гашения дуги осуществляется с помощью фиктивного стока тепла. Температура произвольной точки пластины в определенный момент времени в процессе сварки и остывания определяется как сумма температур в данной точке от всех действующих источников в данный момент времени. Расчет температур выполнялся по дискретной схеме.

В данной работе решается задача о нахождении остаточных перемещений, возникающих в результате сварки двух пластин по незамкнутому контуру с последующим их остыванием. Задача решается по схеме плоско-напряженного состояния, для которого рассматриваются три компонента напряжений и деформаций. Используется теория течения, которая устанавливает связь между приращениями составляющих пластической деформации

ции и приращениями напряжений. Считаем, что материал без упругости и поверхность текучести $F(\{\sigma\}) = 0$ имеет вид $\sigma_i = \sigma_T(T)$ (σ_i — интенсивность напряжений). Из-за наличия пластической области задачу формулируем в терминах приращений напряжений и деформаций так же и для тех элементов пластины, которые в данный момент времени находятся в упругом состоянии, для этого предполагается постоянство свойств материала для небольшого временного интервала, который выбирается в качестве элементарного шага при решении задачи.

Для определения напряжений и деформаций в упругой области используется метод минимизации функционала полной энергии деформации, который основан на доказываемой методами вариационного исчисления теореме о том, что уравнения равновесия удовлетворяются, если найдено непрерывное поле перемещений, такое, что оно доставляет минимум функционалу.

Полные перемещения и напряжения получаем в процессе решения суммированием начальных значений этих величин (на первом временном интервале — нулевых) с полученными приращениями соответствующих компонентов

$$\{\sigma\}_i = \{\sigma\}_{i-1} + \{d\sigma\}_i \cdot \Delta t_i,$$

$$\{\delta\}_i = \{\delta\}_{i-1} + \{d\delta\}_i \cdot \Delta t_i,$$

где Δt_i — шаг решения задачи по времени.

Разбиение свариваемых пластин на подобласти осуществляется линиями, параллельными осям координат. Каждая прямоугольная подобласть разбивается на две треугольные диагональю. Аппроксимация поля перемещений и деформаций заимствована из метода конечных элементов для треугольной области. Связь между деформациями и перемещениями будет описываться в матричной форме следующим выражением

$$\{\epsilon\} = [B] \cdot \{\delta\}^e$$

Матрица $[B]$ составляется сразу для всей области (т.е. глобальная матрица). Производится вычисление глобальной матрицы системы линейных алгебраических уравнений $[K] = [B]^T \cdot [D] \cdot [B]$; осуществляется факторизация ленточной матрицы $[K] = [L] \cdot [L]^T$; решается система линейных алгебраических уравнений для факторизованной матрицы $[K]$ согласно следующим выражениям: $[K] \cdot X = \delta$, а $[K] = [L] \cdot [L]^T$; тогда $[L] \cdot [L]^T X = \delta$, если

$[L] \cdot X = Y$; то $[L] \cdot Y = \delta$. Уравнения $[L] \cdot Y = \delta$ и $[L] \cdot X = Y$ легко решаются прямыми вычислениями неизвестных X и Y соответственно. По полученным компонентам перемещений узловых точек, осуществляется вычисление поля напряжений и реакций в точках контура, для которых заданы компоненты перемещений.

"Сшивание" верхней и нижней пластин в сваренных точках контура по приращениям компонентов перемещений ΔU и ΔV достигается путем применения итераций в следующем порядке: первоначально решается задача для нижней пластины с некоторыми внешними силами f_n , приложенными в сваренных точках контура (в начальный момент $f_n^{(0)} = 0$). Полученные из решения этой задачи перемещения вводятся как граничные для соответствующих точек контура верхней пластины, и решается задача определения реакций в этих узлах, т.е. определяются значения $f_n^{(1)}$, которые вводятся как внешняя нагрузка для нижней пластины, итерации повторяются до тех пор, пока относительные изменения (f_n) не станут меньше некоторой константы, задаваемой в исходных данных.

Переход к расчету по формулам пластического течения осуществляется при выполнении следующего неравенства: $|6\tau - 6\tau^{n-1}| < \epsilon \cdot 6\tau$; константа ϵ вводится в исходных данных и в данном варианте была выбран $\epsilon = 0,05$, т.е. при соблюдении этого неравенства точка считается лежащей на поверхности текучести. Если вычисленное на предыдущем шаге $6\tau > 6\tau$, то в этом случае также осуществляется переход к расчету по формулам теории пластического течения. При этом 6τ полагается равным $6\tau^{n-1}$, что вносит погрешность в описание свойств материала, но позволяет сохранить состояние равновесия перед вычислениями на следующем временном шаге. В главе приводится описание работы подпрограммы, блок-схема программы и описание работы блоков.

На основании проведенного решения задачи, для нескольких вариантов параметров процесса сварки были получены значения временных и остаточных напряжений в нескольких характерных сечениях сварного соединения, и значения временных и остаточных перемещений сечения верхней пластины, совпадаю-

шего с кромкой нижней пластины. Анализ полученных результатов решения показывает, что величина и направление продольного перемещения и угол поворота выбранного поперечного сечения верхней пластины зависят от длины швов, режима сварки, направления наложения швов и очередности их наложения.

Четвертая глава посвящена экспериментальной проверке основных закономерностей образования остаточных перемещений элементов при их сварке короткими швами, выявлению влияния регулируемых параметров процесса сварки на величину и характер временных и остаточных перемещений свариваемых элементов. Для проведения экспериментальных исследований разработана методика для определения перемещений и деформаций в зоне сварного соединения, основанная на использовании емкостного трехкоординатного датчика перемещений, и для определения перемещений свариваемых элементов.

Полученные результаты экспериментальных исследований показали, что ввиду большей величины продольных перемещений тчек, лежащих на оси движения источника тепла при его движении по кромке пластины, по сравнению с продольными перемещениями точек при движении источника по средней части пластины $u_{кр}$ (даже при условии равного ввода тепла в рассматриваемые элементы), при сварке элементов втавр или внахлестку короткими швами наблюдается смещение $\Delta_{см}$ одного свариваемого элемента относительно другого в направлении движения источника тепла. Отношение $u_{кр}/u_{ср}$ зависит от длины заваренного участка шва и не зависит от величины погонной энергии. Отношение $u_{кр}/u_{ср}$ с ростом длины заваренного участка шва увеличивается и достигает значений, равных 1,35 при длине шва $l = 100 \cdot 10^{-3}$ м. Смещение одного свариваемого элемента относительно другого в направлении движения источника тепла с ростом длины шва и толщины полки в тавровом соединении увеличивается.

Экспериментальные исследования показали, что при сварке короткими швами, когда наблюдается неквазистационарное температурное поле, поперечные перемещения кромки пластины неодинаковы по длине шва, что приводит к неравномерной поперечной усадке по длине шва. С ростом длины наложенного участка

ка и величины погонной энергии поперечная усадка растет, причем степень неравномерности поперечной усадки по длине шва растет с ростом погонной энергии и уменьшением длины шва. Неравномерность поперечной усадки тем выше, чем короче шов.

Экспериментально установлено, что при наложении короткого шва на пластину ограниченных размеров продольные деформации укорочения неравномерны по длине шва, и степень неравномерности продольных деформаций укорочения зависит от направления сварки и величины погонной энергии. Чем выше погонная энергия, тем выше степень неравномерности продольных деформаций по длине шва. При сварке от края пластины для рассматриваемых образцов и величин погонной энергии величина продольного укорочения шва выше на $(15 + 24) \cdot 10^{-6}$ м, чем при сварке к краю пластины.

Результаты экспериментов, полученные при изучении влияния очередности и направления наложения швов на перемещения профильных элементов в узлах решетчатых конструкций, показали, что наименьшая величина остаточных продольных и угловых перемещений наблюдается при наложении фланговых швов в направлении к краю фасонки, причем фланговые швы должны накладываться до наложения лобового шва. Наибольшая величина остаточных продольных перемещений укорочения и остаточных угловых перемещений наблюдается при наложении фланговых швов в направлении от края фасонки. Очередность заварки фланговых швов не оказывает существенного влияния на величину и характер продольных перемещений и на величину угловых перемещений, но оказывает влияние на характер угловых перемещений, меняя направление поворота привариваемого элемента на противоположное. Наложение лобового шва оказывает влияние на угловые и продольные перемещения в том случае, если лобовой шов накладывается первым. В этом случае наложение лобового шва приводит к увеличению как остаточных продольных перемещений укорочения, так и остаточных угловых перемещений привариваемого элемента. Таким образом, установлено, что при сварке типовых узлов решетчатых конструкций существенное влияние на остаточные перемещения свариваемых элементов оказывает направление сварки и очередность наложения швов.

На величину остаточных продольных и угловых перемещений

привариваемого профильного элемента внахлестку к фасонке оказывает влияние длина нахлестки профиля на фасонку. С ростом величины нахлестки остаточные продольные перемещения укорочения при наложении фланговых швов от края фасонки увеличиваются. При наложении фланговых швов к краю фасонки остаточные продольные перемещения являются перемещениями удлинения и величина их увеличивается с ростом нахлестки.

Наибольшая величина остаточных угловых перемещений наблюдается при нахлестке, равной $(30 + 50) \cdot 10^{-3}$ м, при дальнейшем увеличении нахлестки величина остаточных угловых перемещений снижается.

На основании исследований установлено, что на остаточные продольные и угловые перемещения привариваемого элемента не влияют собственная жесткость элемента и его геометрия, т.е. вид привариваемого профиля. Существенное влияние на величину остаточных продольных и угловых перемещений оказывает режим сварки. Увеличение погонной энергии приводит к увеличению как остаточных продольных, так и остаточных угловых перемещений. Если при сварке профильного элемента с фасонкой очередность и направление наложения шва таково, что угловые перемещения на стадии охлаждения стремятся к нулю, то с увеличением погонной энергии приводит вначале к уменьшению величины остаточных угловых перемещений, а дальнейшее увеличение погонной энергии вызывает увеличение остаточных угловых перемещений, но в противоположную сторону.

На величину остаточных угловых и продольных перемещений оказывает влияние местоположение предварительных закреплений (прихваток). Прихватки располагались напротив друг друга по длине привариваемого участка профильного элемента. Экспериментальные исследования показали, что чем дальше расположение прихваток от кромки фасонки, тем величины остаточных продольных и угловых перемещений ближе к величинам остаточных продольных и угловых перемещений при сварке незакрепленного элемента. Расположение прихваток не влияет на характер продольных и угловых перемещений.

Пятая глава посвящена разработке метода регулирования перемещений консольных профильных элементов в процессе сварки узлов короткими швами. Показано, что применение методов уstra-

нения остаточных сварочных перемещений консоли, основанных на послесварочной пластической деформации, нецелесообразно из-за большого количества консолей, требующих правки (на пример; при сварке консольно-сложного стеллажа), и из-за снижения пластических свойств шва.

В основе предлагаемого метода регулирования остаточных угловых перемещений кратковременным приложением внешнего усилия лежат следующие принципы: уменьшение пластической деформации при нагреве созданием в зоне сварного соединения растягивающих усилий в процессе сварки; изменение геометрии сварного соединения в процессе сварки. Метод заключается в следующем: к профильному элементу, который приваривается, в определенный момент времени прикладывается внешнее усилие и поддерживается в течение некоторого малого промежутка времени (4 + 6 сек). Приложенное усилие создает некоторый изгиб профильного элемента, который фиксируется накладываемым швом. Далее усилие снимается и процесс сварки продолжается по стандартной технологии.

Прикладывать усилие к привариваемому элементу целесообразно в процессе заварки первого шва, когда жесткость свариваемого соединения невелика, что позволяет прикладывать незначительные усилия.

Основными параметрами такого метода регулирования остаточных угловых перемещений в процессе сварки являются: длина заваренного участка шва в момент приложения усилия, величина прикладываемого усилия и время действия усилия. Величину прикладываемого усилия можно предварительно определить по формулам сопротивления материалов, основанным на дифференциальном уравнении упругой линии

$$P = \frac{\omega_{\max} \cdot 3EI}{l^3},$$

где P — определяемое усилие; $\omega_{\max}$ — максимальная величина перемещения свободного конца консоли; l — длина консоли.

Результаты исследования влияния параметров метода на величину остаточных угловых перемещений показали, что наибольшее влияние на остаточные угловые перемещения в процессе сварки оказывает величина прикладываемого усилия и длина

наложенного участка шва до момента приложения усилия. С ростом величины усилия, увеличением времени его действия и уменьшением длины наложенного участка шва до момента приложения усилия эффективность влияния метода на величину остаточных угловых перемещений привариваемого консольного элемента возрастает. Установлено, что оптимальное время действия прикладываемого усилия $4 + 6$ секунд, а оптимальная длина заваренного участка шва в момент приложения усилия составляет $30 \cdot 10^{-3} \div 60 \cdot 10^{-3}$ м.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. При определении температуры в свариваемых элементах от наложения коротких швов необходимо учитывать период теплонасыщения и ограниченность размеров свариваемых элементов. Температурное поле при сварке короткими швами неравномерно в продольном и поперечном направлениях и непрерывно меняется в процессе сварки. Неравномерность распределения температуры зависит от схемы ввода тепла, погонной энергии и длины шва. Рост погонной энергии и уменьшение длины шва приводит к росту неравномерности температурного поля в продольном и поперечном направлениях.

2. Разработан метод решения упруго-пластических задач на ЭВМ по определению напряжений и деформаций в соединениях, сваренных короткими швами, с учетом неодновременности укладки шва по длине. Результаты решения показывают, что временные и остаточные напряжения неравномерны по длине и по ширине сварного шва и зависят от параметров сварочного процесса.

3. При сварке пластин по незамкнутому контуру величина остаточных продольных напряжений $\sigma_{x \text{ ост.}}$ и ширина зоны растягивающих остаточных продольных напряжений $2b_p$ изменяются по длине шва. Величина максимальных продольных $\sigma_{x \text{ ост.}}$ достигает σ_t и выше в конце шва, по сравнению с начальными участками, на $30 \div 40$ МПа. $\sigma_{x \text{ ост.}}$ во втором шве больше на $15 \div 20$ МПа, а ширина зоны $2b_p$ во втором шве больше, чем в первом. Ширина зоны $2b_p$ в более узкой пластине первого и второго шва несколько меньше, чем в широкой пластине.

Направление и величина продольных и угловых перемещений привариваемого элемента зависят от направления наложения швов, очередности их заварки, длины швов и режима сварки. Наибольшее

влияние на продольные и угловые перемещения оказывает заварка первого шва.

4. Разработана методика, позволяющая проводить комплексные экспериментальные исследования временных и остаточных перемещений при сварке элементов короткими швами. Экспериментально установлено, что на перемещения элементов сварных узлов решетчатых конструкций, сваренных короткими швами, оказывают влияние следующие конструктивные и технологические факторы:

- а) направление и последовательность наложения швов;
- б) местоположение предварительных закреплений (прихваток);
- в) величина нахлестки профильного элемента (длина фланговых швов);
- г) режим сварки.

Установлено, что взаимное перемещение свариваемых элементов не зависит от собственной жесткости привариваемого профильного элемента.

5. Экспериментальные исследования показали, что основными видами деформаций и перемещений в зоне сварного соединения, определяющими перемещения привариваемого элемента при сварке короткими швами, являются:

- а) продольные пластические деформации, создающие продольное укорочение;
- б) неравномерные по длине шва поперечные перемещения кромок свариваемых элементов, создающие неравномерную по длине шва поперечную усадку;
- в) смещение привариваемого элемента относительно пластины в направлении движения источника тепла за счет протекания сдвиговых деформаций, ввиду различной тепловой обстановки в соединяемых элементах;
- г) изменение геометрии свариваемых соединений в процессе сварки.

6. Разработан метод регулирования остаточных угловых перемещений привариваемых профильных элементов в процессе сварки путем кратковременного приложения внешнего усилия к привариваемому элементу. В основу метода положены следующие принципы:

- а) уменьшение пластической деформации при нагреве;
- б) изменение геометрии сварного соединения в процессе наложе-

ния шва.

7. Экспериментальными исследованиями установлено, что основными параметрами метода регулирования остаточных угловых перемещений кратковременным нагружением привариваемого элемента внешним усилием являются: величина прикладываемого усилия, время действия усилия и длина заваренного участка шва в момент приложения усилия.

8. С ростом величины усилий, увеличением времени его действия и уменьшением длины наложенного участка шва до момента приложения усилия эффективность влияния метода на величину остаточных угловых перемещений привариваемого элемента возрастает. Установлено, что оптимальное время действия приложенного усилия для уголка $36 \times 36 \times 4$ составляет 4 – 6 секунд, а оптимальная длина заваренного участка шва в момент приложения усилия составляет $30 \cdot 10^{-3} + 60 \cdot 10^{-3}$ м.

Содержание диссертации отражено в работах:

1. Селиванов М.И., Сагалевич В.М., Янченко Ю.А. Определение влияния коротких швов на деформации профильных элементов. – НИИИНФОРМТЯМАШ, 1976, № 21, с. 16–20.
2. Селиванов М.И., Сагалевич В.М. Определение перемещений в направлении движения источника тепла при сварке короткими швами. – НИИИНФОРМТЯМАШ, 1977, № 12, с. 19–22.
3. Селиванов М.И., Козлов С.А., Головин А.И. Особенности сварки стеллажей для испытания кранов-штабелеров. – В кн.: Шестая научно-техническая конференция, посвященная 110-ой годовщине со дня рождения Владимира Ильича Ленина. Калуга, 1980, с. 120–121.