М 276156

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

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

На правах рукописи

ВЕРШИНСКИЙ Анатолий Владимирович

ДЕФОРМАЦИИ ПРИ СВАРКЕ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ И МЕТОДЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ

(05.04.05 – Технология и машины сварочного производства)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва 1975

Работа выполнена в МВТУ им. Н.Э.Баумана

Научный консультант д.т.н., профессор САГАЛЕВИЧ В.М.

Официальные оппоненты:

д.т.н., профессор Мельников Н.П.
д.т.н., профессор Игнатьева В.С.
д.т.н., профессор Гохберг М.М.

Ведущее предприятие: ВНИИ Тяжмаш

Автореферат разослан "___" _____ 197 __ г.

Защита диссертации состоится "__" _____ 197 __ г.
на заседании Совета _____
Московского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшего технического училища имени Н.Э.Баумана по адресу: Москва, Б-5, 2-я Бауманская дом 5.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Училища

М276156

Зак. 1491. Тир. 120

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1276156
Вершинский А.В. Деформации

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Создание в последние годы новых облегченных металлических конструкций в самых различных областях машиностроения в значительной степени стало возможным благодаря совершенствованию сварки – автоматической, полуавтоматической и ручной. Позволяя по-новому решать вопросы конструктивных форм, этот прогрессивный технологический процесс вносит много особенностей при изготовлении и эксплуатации конструкций с точки зрения деформационной спос бности, прочности, коррозионной стойкости и т.п.

Большое количество исследований, посвященных вопросам напряженно-деформированного состояния сварных соединений и конструкций и широко проводимых в настоящее время в самых различных областях машиностроения, составляют предмет "Строительной механики сварных конструкций". Эта область находит в последнее время все более широкое применение среди известных разделов инженерной механики: строительной механики корабля, самолета, вагона, подъемно-транспортных сооружений и т.п.

С точки зрения принятой в строительной механике классификации балочные и ферменные конструкции (мостовые, козловые, контейнерные краны, летательные аппараты и т.п.) относятся к стержневым системам. Изготовление этих изделий в сварном исполнении предопределяет наличие достаточно широкого круга различных типов соединений (прямолинейных швов, круговых, кольцевых), выполнение которых приводит к значительным деформациям конструкций в виде серповидности отдельных элементов, скручивания, потери устойчивости и т.п.

№276156

Нарушения геометрической точности изделий являются серьезным дефектом с точки зрения технологии и качества изготовления конструкции, а в целом ряде случаев препятствуют снижению металлоемкости сварных элементов, особенно тонколистовых и тонкостенных. Отсюда другое направление рассматриваемого вопроса – применение методов предотвращения и устранения остаточных деформаций и напряжений при сварке.

Исследование путей обеспечения геометрической точности сварных изделий является важной актуальной научно-технической проблемой, решение которой в каждом конкретном случае возможно при комплексном подходе как в плане развития и совершенствова-

ния методов расчета, так и разработки новых более технологичных и надежных методов устранения сварочных деформаций.

Цель работы. Целью данной работы являлось

I. Разработка инженерных методов расчета остаточных сварочных деформаций и напряжений в стержневых конструкциях при выполнении прямолинейных и криволинейных сварных соединений.

2. Разработка и исследование новых более надежных и технологичных методов устранения остаточных сварочных деформаций, возникающих в стержневых конструкциях и их элементах.

В работе приведены результаты исследований, которые проводились автором в лабораториях подъемно-транспортных машин и сварки МВТУ им.Н.Э.Баумана в контакте с рядом ОКБ и предприятий.

Методы исследования. Создание расчетных методов по определению напряженно-деформированного состояния сварных конструкций и элементов - пластин, балок и т.п. - включило широкое использование ЭВМ с соответствующей разработкой программ на языке АЛГОЛ-60. Теоретические исследования базируются на положениях строительной механики и теории тепловых процессов при сварке.

Эксперименты по измерениям геометрических параметров и напряжений сварных узлов и изделий были проведены в лабораторных и заводских условиях с применением современных методов исследования (тензометрия, испытательные машины, приборы регистрации) и разработанных автором приспособлений и оснастки.

Научная новизна. В результате проведенных исследований разработаны новые методы расчета остаточных напряжений и деформаций стержневых конструкций и их элементов, возникающих при выполнении прямолинейных и криволинейных сварных соединений. Эти методы основаны на применении новых расчетных схем (с разбивкой зоны соединения на отдельные элементы - стержни) и позволяют решать широкий круг задач при наложении отдельных сварных швов и их комбинации. Разработанные методы расчета, отличаясь определенной универсальностью, обладают достаточно высокой точностью, что подтверждено экспериментальными данными.

Установлен и исследован расчетным и экспериментальным путем ряд новых деформационных эффектов, возникающих при сварке одно- и двухпроходных сварных соединений на пластинах. Разра-

2
ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ
МВТУ
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

ботаны и исследованы (с развитием расчетных критериев) новые надежные методы устранения остаточных сварочных деформаций и напряжений применительно к тонколистовым, балочным, ферменным изделиям.

Практическая ценность. Созданы новые инженерные методы расчета сварочных деформаций и напряжений с применением ЭВМ при выполнении прямолинейных и криволинейных соединений в стержневых конструкциях - балочных и ферменных, на базе которых разработан ряд новых методов устранения и регулирования сварочных напряжений и деформаций, позволяющих обеспечить надежными и простыми путями геометрическую точность обширного круга металлических сварных конструкций. Все это создает возможность достижения большого технико-экономического эффекта в народном хозяйстве.

Апробация работы. Разработанные методы расчета используются в практике ряда заводов и проектных институтов. Внедрены в производство методы устранения сварочных деформаций конструкций из алюминиевых и магниевых сплавов. Ряд новых разработанных способов по стабилизации геометрических размеров балочных изделий явился основой для создания специального оборудования на краностроительных заводах страны. Результаты исследований докладывались на 12 научно-технических отраслевых и вузовских конференциях, на международном симпозиуме по подъемно-транспортному машиностроению.

По материалам работы опубликовано 30 печатных трудов и получено 7 авторских свидетельств.

Диссертация состоит из четырех глав, изложена на 260 страницах текста, иллюстрируется 199 рисунками. В списке литературы приведены 182 наименования, в том числе 22 на иностранных языках.

I. Остаточные деформации и напряжения, возникающие при сварке стержневых конструкций. Методы их уменьшения

Теория сварочных деформаций и напряжений наряду с другими разделами науки о сварке является одним из наиболее сложных ее разделов, объединяющим вопросы строительной механики, теплопроводности, изменения характеристик материалов в широком диапазоне быстро изменяющихся температур. Большой вклад в развитие

теории сварочных деформаций и напряжений внесли работы советских ученых: Г.А.Николаева, Н.О.Окерблома, Е.О.Патона, В.П.Вологдина, Н.С.Лейкина, З.А.Винокурова, А.В.Дятлова, И.П.Байковой, И.П.Трочуна, А.А.Казимирова, С.А.Кузьминова, В.Д.Мацкевича, В.С.Игнатьевой, О.А.Бакши, Г.Б.Талыпова и многих других.

Интересные работы в области теории сварочных напряжений и деформаций были выполнены и зарубежными исследователями: В.Андерсом, М.Ватанабэ, Р.Гунертом, Д.Розенталем, В.Спрарагеном и др.

В последние годы начинают находить все большее развитие методы с применением ЭВМ (Винокуров В.А., Григорьянц А.Г., Сагалевич В.М., Махненко В.И., Прохоров Н.Н. и др.). Получает развитие метод конечных элементов (Ueda , Гатовский К.М. и др.). Ряд решений с помощью ЭВМ с использованием теории упругости и пластичности позволил определить подход в установлении некоторых закономерностей образования остаточных напряжений и деформаций при сварке. Вместе с тем следует отметить, что решений для практического использования при анализе конкретных инженерных задач еще слишком мало.

В настоящее время представляется целесообразным разработка расчетных методов применительно к разным видам конструкций и типам сварных соединений с учетом толщин и материалов, принимая за основу существующие градации в строительной механике, где общие закономерности нашли подробное развитие в теории оболочек, теории пластинок, стержневых систем и т.п.

Выполнение сварных соединений (прямолинейных, круговых, кольцевых) приводит к значительным деформациям стержневых конструкций. Так, согласно данным ряда заводов-изготовителей и институтов (ВПТИ Тяжмаш и др.) при изготовлении балок мостовых кранов отклонения (на стадии изготовления) от допусков по скручиванию (винту) составляют до 200%, по серповидности поясов до 300÷1000%, по строительному подъему балки – (+100) ÷ (-100%), от плоскости вертикальных стенок – (+100÷400%).

Возникающие остаточные перемещения являются следствием проявления различных деформационных эффектов, сопровождающих выполнение отдельных сварных соединений, – продольной и поперечной усадок, угловых деформаций.

При изготовлении сварных металлоконструкций получение формы и размеров в пределах допусков предопределяет в ряде случаев применение операций правки: термической и механической. Сопоставление по трудоемкости показывает, что в отдельных случаях правильные работы составляют 15% и более от трудоемкости сборки и сварки изделий, что предопределяет необходимость разработки новых методов устранения сварочных деформаций.

Использование существующих методов расчета по оценке возможных перемещений, возникающих при сварке прямолинейных и криволинейных сварных соединений в балочных и других элементах металлоконструкций, не всегда дает надежные результаты в количественном плане. Одним из существенных моментов, характеризующих точность геометрических параметров изделия, является необходимость учета действия нескольких сварных соединений.

В первой главе качественный анализ кинетики напряжений и деформаций в отдельном стержне, защемленном по концам и претерпевающим термический цикл, позволил обосновать переход к выбору новых расчетных схем.

В данной работе (гл. II, III) для широкого круга задач с прямолинейными швами рассматривается взаимодействие комбинаций стержней, на которые производится разбивка поперечных сечений свариваемых элементов, на стадии нагрева и охлаждения. Расчет производится с помощью ЭВМ и разработанных программ на языке АЛГОЛ-60. Принятая схема расчета и метод определения напряженно-деформированного состояния сварных элементов и конструкций согласуются в определенной степени с получившим в настоящее время распространение в строительной механике методом конечных элементов (МКЭ).

II. Остаточные деформации и напряжения от продольной усадки при сварке прямолинейных швов

Наличие прямолинейных сварных соединений в балочных конструкциях приводит к изгибу отдельных сварных стержней, потере устойчивости тонколистовых элементов, перемещениям узлов.

В данной главе вначале рассматриваются методы расчета временных и остаточных напряжений и деформаций для ряда широко встречающихся в практике случаев сварки прямолинейных соединений и пути уменьшения их.

Распределение температур принимается в соответствии с теорией тепловых процессов (Рыкалин Н.Н.) для мощного быстродвижущегося линейного источника тепла.

Применительно к сварке пластин стыковым швом рассматривается ряд задач, характерных для различных случаев сборки. Они решаются на основе использования следующих гипотез: I) одновременная заварка стыка по длине; 2) плоскостность поперечных сечений; 3) одноосность напряжений; 4) постоянство теплофизических характеристик материала; 5) постоянство σ_T -предела текучести и E - модуля упругости в пределах определенного диапазона повышенных температур. На рис. I в качестве примера приведена расчетная схема для определения продольных напряжений σ_x - временных и остаточных - при сварке пластин I и П.

Каждая из пластин разбивается на n продольных стержней длиной $l_ш$. В пределах ширины каждого стержня температура считается постоянной, равной температуре средней точки. Для произвольного момента времени $t_к$ на рис. I для каждого стержня показаны соответствующие температуры $T_1=T_1'$, $T_2=T_2'$ и т.д.

При сварке этих пластин выделяются два отдельных этапа. Первый этап соответствует интервалу времени от нулевого ($t_0=0$) до некоторого t_y, в течение которого две свариваемые пластины I и П деформируются раздельно и не связаны друг с другом. Стержни I и I' на данном отрезке времени находятся в состоянии пластичности и имеют $\sigma_T = 0$. После момента времени t_y в этих стержнях наступает температура, при которой возникают упругие свойства материала, и при дальнейшем остывании две пластины I и П рассматриваются как единое целое. Интервал времени $t_y \div t = \infty$ соответствует второму этапу.

При $b_1=b_2=b$ пластины I и П одинаковы и поэтому достаточно определить напряженно-деформированное состояние одной из них в отдельности до момента времени t_y, когда в стержнях I и I' не будет достигнута температура упругих свойств материала. Начиная с этого момента t_y дальнейшее определение деформаций и напряжений рассматривается в целой пластине с учетом напряженно-деформированного состояния, которое было достигнуто в отдельных частях I и П.

Существенным является выбор моментов времени или соответственно интервалов, на которые разделяется термический цикл, воз-

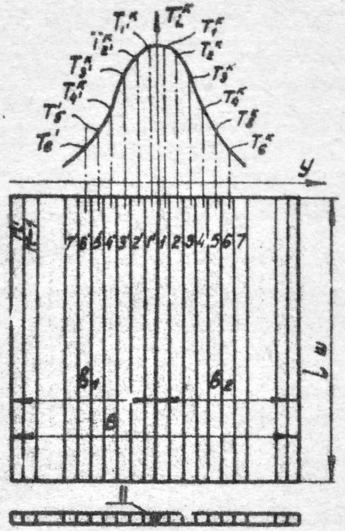


Рис. I Схема определения напряжений и деформаций от продольной усадки прямолинейного шва при сварке пластин.

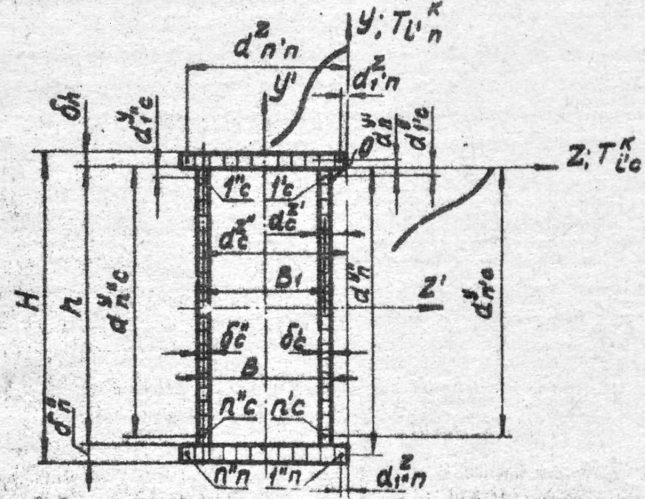


Рис. 2 Схема определения напряжений и деформаций от продольной усадки углового шва в балке.

никающий в поперечном сечении пластины, вызванный действием сварки. При этом согласно сделанным выше допущениям, во-первых, выделяются такие моменты времени, при которых в стержнях наступает температура потери или возникновения упругих свойств материала. В первом случае переход того или иного i-го стержня из упругого состояния в пластическое имеет место при $\frac{\partial T}{\partial t} > 0$, а во втором случае при $\frac{\partial T}{\partial t} < 0$. Во-вторых, определяются моменты времени, при которых в стержнях возникают максимальные температуры T_i^{max}. Расположение в ряд полученных времен дает диапазон и тервалов $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots \Delta t_K$, в пределах которых должны укладываться выбираемые последовательно шаги времени. При этом должно соблюдаться следующее неравенство

$$\Delta t \leq \Delta t_K$$

После расположения в ряд вычисленных моментов времени $t_0 = 0, t_1, t_2 \dots t_K$ и вычисления интервалов $\Delta t_1 = t_1 - t_0 \dots \Delta t_K = t_K - t_{K-1}$ осуществляется определение напряжений и деформаций в пластине I (и II). В течение отрезка времени Δt_K температура каждого i-го стержня изменяется на

$$\Delta T_i^K = T_i^K - T_i^{K-1}$$

что приводит к возникновению температурных деформаций стержня

$$\varepsilon_i^K = \alpha \cdot \Delta T_i^K$$

Определение напряженно-деформированного состояния пластины конечных размеров осуществляется с помощью двух уравнений статики и уравнения совместности деформаций, принятого в виде уравнения прямой (Николаев Г.А.): $\sum_1^n P_x^K = 0$, $\sum_1^n M_0^K = 0$

$$p_i^K = \frac{p_1^K (n-1) + (p_n^K - p_1^K)(i-1)}{n-1}$$

где p_i^K – составляющая совместной деформации i-го стержня на интервале времени Δt_K.

Полагая площади всех стержней одинаковыми, уравнения статики в приращениях напряжений использовались в виде:

$$\sum_1^n \Delta\sigma_i^K = 0, \quad \sum_1^n \Delta\sigma_i (2i-1) = 0$$

Приращения же упругих напряжений в i-ом стержне на любом временном интервале Δt_K определялись как:

$$\Delta\sigma_i^K = -(\varepsilon_i^K - p_i^K) E$$

На начальных отрезках времени Δt_K при $K = 1, 2 \dots$ некоторые стержни ($i = 1, 2 \dots$) пластины в определенные момен-

ты времени $t_к$ достигают температуры T_y, при которой происходит потеря упругих свойств. На интервале $t_{к+1}$ температура этих стержней превышает T_y, что учитывается снятием напряжений предела текучести при сжатии, которые возникают на стадии нагрева. При этом прикладываются напряжения обратного знака $+\sigma_T$, что отражается в уравнениях равновесия:

$$-\sum_{i}^{n}(\varepsilon_i^к - p_i^к)E + \xi\sigma_T = 0$$

$$\sum_{j}^{n}(\varepsilon_i^к - p_i^к)E(2i-1) + \xi\sigma_T[2(j-1)-1] = 0$$

При этом $T_{j-1}^{max} > T_y$, $\xi = 1$

Применение этих уравнений справедливо до момента времени $t_к$, когда $T_i^{max} \le T_y$. При $t > t_{к_1}$ в некоторых стержнях, имевших температуру выше T_y, идет процесс охлаждения, в то время как более удаленных от оси шва стержнях идет процесс нагрева и $\frac{\partial T}{\partial t} > 0$. При $t > t_к$ имеем, что $\xi = 0$.

Интервалы времени, рассматриваемые для моментов $t_{к_1+1} \div t_{к_2}$, соответствуют понижению температуры в I стержне до $T_1^{к_2} = T_y$, т.е. возникновению упругих свойств на оси стыкового шва. Номер стержня, учитывающий начало суммирования, определяется из следующих соображений:

при нагреве стержней, когда

$$\frac{\partial T_j^к}{\partial t} \ge 0 \text{ имеем } T_j^к \le T_y, T_{j-1}^{к-1} > T_y, \xi = 0$$

если $T_{j-1}^к = T_y$, то $\xi = 1$

При остывании стержней, когда: $\frac{\partial T_j^к}{\partial t} < 0$, $\xi = 0$

имеем $T_j^к < T_y$, $T_{j-1}^к \ge T_y$.

После достижения температуры в I стержне $T_1^{к_2} = T_y$ в момент времени $t_{к_2}$ две пластины I и II далее рассматриваются вместе как одно целое. Уравнение равновесия одно ввиду симметрии

$$\sum_{i}^{n}(\varepsilon_i^к - p_i^к) = 0$$

Для интервалов времени $\Delta t_к$ при $к > (к_2+1)$

$$p_i^к = const$$

Окончательно уравнения статики после преобразований имеют вид для интервалов времени с $к = 1 \div к_1$

$$(n-j)p_i^к + (j+n-2)p_n^к = \frac{2(n-1)}{n-j+1}\left(\alpha\sum_{j}^{n}\Delta T_i^к - \xi\frac{\sigma_T}{E}\right)$$

$$(F-L)p_i^к + Lp_n^к = (n-1)\left[\alpha\sum_{j}^{n}\Delta T_i^к(2i-1) - \xi\frac{\sigma_T}{E}(2i-3)\right]$$

где $L = 2\sum i^2 - \frac{n(n+1)-2}{2}(n-j+1)$; $F = (n-1)(j+n-1)(n-j+1)$

Система двух линейных уравнений с двумя неизвестными p_1^k и p_n^k позволяет определить распределение напряжений и деформаций в начальные моменты времени.

Для интервалов времени Δt_k при $K=(K_1+1)\div K_2$ а при $K>K_2$ имеем:

$$p_i^k = \frac{1}{n}\alpha \sum_j^n \Delta T_i^k$$

Определение p_1^k позволяет вычислить приращение упругих напряжений $\Delta\sigma_i^k$, а затем найти результирующее напряжение:

$$\sigma_i^k = \sigma_i^{k-1} + \Delta\sigma_i^k$$

В тех случаях, когда величина σ_i^k превосходит предел текучести σ_T по абсолютному значению, производится приближение. Вначале рассматривается стержень r_m, у которого

$$\left|\frac{\sigma_{r_m,m}^k}{\sigma_T}\right| = \max > 1$$

где m – порядковый номер приближения.

В результате приближения m приращения напряжений $\Delta\sigma_{i,m}^k$ в стержнях определяются из уравнений статики:

$$\sum_i^n \Delta\sigma_{i,m}^k = 0$$

$$\sum \Delta\sigma_{i,m}^k (2i-1) = 0$$

Эти вычисления производятся последовательно на каждом интервале времени Δt_k до полного остывания сварного соединения. Таким образом определяются как временные, так и остаточные напряжения

Данная методика реализована с помощью программ, составленных на языке АЛГОЛ-60, на машинах М-222, Минск-32, БЭСМ-4.

В зоне соединения при сварке пластин из малоуглеродистой стали имеют место остаточные напряжения растяжения, равные пределу текучести. Существенным является то, что по оси шва и вблизи его ост. точные деформации β имеют положительный знак, а по краям сварной пластины – отрицательный. Это является отличием от известных решений, которые не учитывают раздельного изгиба пластин I и II на стадии нагрева. Подобное обстоятельство ранее отмечалось лишь экспериментально Рыбаковым В.М., а качественно описывалось Окерблюмом Н.О., но с других позиций.

Применение расчетной схемы раздельного деформирования свариваемых пластин определяется длиной шва и режимом сварки.

Традиционный подход к выбору расчетной схемы, принятый в ряде работ, заключался в использовании одного уравнения статики при симметрично расположенном шве $\Sigma p_x^k = 0$

Это соответствует случаю стыковой сварки пластин, когда начало и конец шва отстоят от конца стыка. Пластины при этом

предварительно собраны на прихватках или на планках, обеспечивающих жесткое соединение их между собой.

Этот случай в данной работе также был рассчитан по приведенной методике и показал хорошую сходимость с экспериментальными данными. Остаточные деформации p_i^k имеют отрицательный знак после полного остывания сварного соединения.

С целью установления влияния геометрических параметров поперечного сечения пластин на распределение остаточных напряжений и деформаций было проведено экспериментальное исследование (Ст.3, АМг6) на пластинах разной ширины.

Установлено, что за расчетную ширину $2b_p$ зоны остаточных напряжений и деформаций при сварке широких пластин следует принимать

$$2b_p = 2b_{тр.} + 2k \cdot l_ш$$

$$k = 2{,}5 \div 3$$

где $2b_{тр.}$ – расстояние от оси шва, в котором максимальная температура при нагреве не превышает 20^0С.

Это приближенное соотношение основано на использовании известного в теории упругости принципа Сен-Венана. Применение его осуществлено для самоуравновешенной "нагрузки" зоны сварного шва – внутренних тепловых усилий при нагреве и остывании. Существенна связь между шириной расчетной зоны b_p и длиной шва $l_ш$.

Разработанная методика расчета по учету эффекта продольной усадки прямолинейных швов позволила установить влияние геометрических параметров свариваемых пластин на характер распределения и величины остаточных напряжений и деформаций. В частности показано, что с увеличением жесткости (или ширины b_1, b_2) их ширина зоны максимальных растягивающих напряжений увеличивается, а затем стабилизируется.

При рассмотрении случая сварки пластин разной ширины была принята та же методика с корректировкой на раздельное деформирование элементов в начальной стадии нагрева. Проведены вычисления для ряда задач, в том числе и при наплавке валика на кромку.

Решения были выполнены и для случая сварки пластин из сплава АМг6, для которого принималась температура $T_y = 250^0$С. При этом учитывался эффект Баушингера для данного материала, который проявляется в снижении предела текучести при растяжении после предварительного сжатия (до $-\sigma_т$). Это обстоятельство,

установленное экспериментально (гл. I), позволило объяснить причину развития сравнительно низких остаточных напряжений в зоне соединения для сплава АМг6, а также для магниевого сплава МА2-I.

Как развитие разработанного метода расчета, была составлена система уравнений для определения напряженно-деформированного состояния балок при выполнении продольных швов. В работе приводится вывод уравнений для сварки углового поясного шва в коробчатой балке. На рис. 2 показана схема разбивки поперечного сечения на стержни площадью F . В качестве начала отсчета выбиралась точка О. Распределение тепла источника между стенкой и поясом принималось на основе известных рекомендаций (Казимиров А.А., Бельчук Г.А. и др.). Использовались три уравнения равновесия и уравнение совместности деформаций в виде уравнения плоскости:

$$\Sigma P_x^к = 0$$
$$\Sigma M_y^к = 0$$
$$\Sigma M_z^к = 0$$
$$Ax+By+Cz+D = 0$$

После преобразований, аналогичных приведенным выше для пластин, были получены четыре линейных уравнения с четырьмя неизвестными $P_{i'n}^к$, $P_{n'n}^к$, $P_{i''n}^к$, $P_{n''n}^к$, которые определялись для подсчета упругих напряжений в стержнях. Приближения на интервалах $\Delta t_к$ были выполнены в той же последовательности, что и на пластинах. Решение подобных задач охватывает широкий круг различных составных сварных элементов, содержащих продольные соединения. Принципиально уравнения те же. Отличие только в учете конкретной конфигурации поперечного сечения.

Ряд решений по расчету временных и остаточных напряжений и деформаций был выполнен для случая последовательного выполнения сварных угловых швов на коробчатой балке. При этом учитывалось напряженно-деформированное состояние, создаваемое предыдущими соединениями. В этом состоит одно из существенных преимуществ предлагаемого метода расчета.

Результаты исследований остаточных и временных деформаций и напряжений в различных конструктивных элементах и конструкциях послужили основой для разработки новых методов устранения сварочных деформаций ответственных сварных изделий.

Одним из основных деформационных эффектов является возникновение потери устойчивости сжатых частей конструкций (или элементов). В сравнении с деформациями изгиба перемещения при потере устойчивости могут достигать значительно больших величин.

Применение известных технологических приемов (активных сил, прокатки, проковки шва) не всегда возможно по конструктивным соображениям.

С целью устранения деформаций потери устойчивости тонколистовых сварных элементов был разработан метод поперечного обжатия зоны сварного соединения (рис. 3). Обжатие производится в направлении, перпендикулярном оси шва, на ширине участка с остаточными растягивающими напряжениями. В результате пластической деформации по толщине происходит пластическая деформация в плоскости пластины, в том числе и в направлении оси шва X . Это вызывает снижение напряжений растяжения в сечениях, расположенных в зоне обжатия, и приводит к уменьшению уравновешивающих напряжений сжатия. Уменьшение свободной длины сжатого элемента обеспечивает увеличение критических напряжений. Проведенные эксперименты на пластинах из ст. 3 и АМг6, а также вычисления, показали высокую надежность разработанного метода в сочетании с простотой практического осуществления. Сварные пластины, имевшие стрелку прогиба 5÷45 мм после сварки, в результате обжатия в одном или нескольких сечениях по длине шва стали плоскими. Приложение усилия производилось с помощью стандартного прессового оборудования.

Данный метод послужил основой для создаваемого в настоящее время специального прессового оборудования применительно к поточным линиям сборки и сварки балок мостовых кранов.

Для конструкций и элементов, когда применение усилий по тем или иным причинам невозможно, был разработан метод глубокого охлаждения (рис. 4) сварного соединения - с целью снижения деформаций потери устойчивости после сварки тонколистовых изделий.

Сварной шов и примыкающая к нему зона на участке "в" охлаждаются до низких температур одновременно с нагревом соседних участков "а" до повышенных температур. Таким образом, создаваемый градиент температур в сварном соединении является как бы продолжением процесса остывания после сварки. Возникающие пластические деформации удлинения на участке "в" после выравнивания

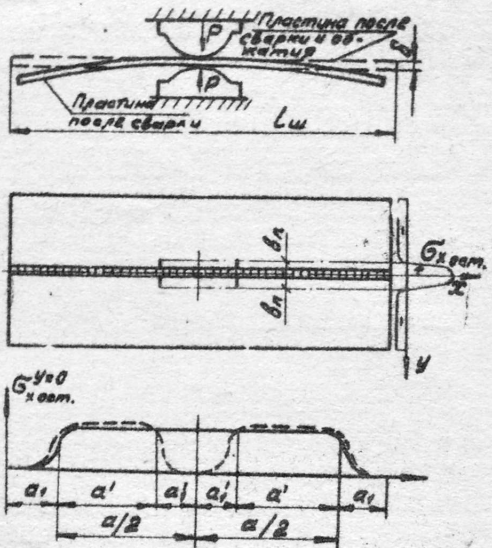


Рис. 3 Схема метода поперечного обжатия зоны сварного соединения с целью устранения деформаций потери устойчивости.

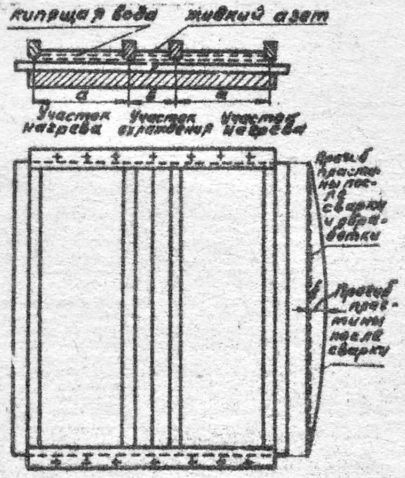


Рис. 4 Схема метода глубокого охлаждения зоны шва для устранения остаточных сварочных деформаций.

температур в результате такой обработки приводят к перераспределению поля остаточных напряжений, в частности, к уменьшению величины сжимающих (и растягивающих) напряжений. Это, в свою очередь, вызывает уменьшение деформаций потери устойчивости тонколистового элемента.

Проведенные эксперименты подтвердили надежность данного метода. Так, обработка сварных пластин толщиной 2,3,4 мм из АМг6 производилась с помощью жидкого азота ($T = -196^{\circ}C$) и кипящей воды, что привело к снижению остаточных продольных напряжений от сварки в зоне шва с 10 $\frac{кг}{мм^2}$ до 5 $\frac{кг}{мм^2}$ и значительному устранению (до 70 ÷ 80%) деформаций потери устойчивости.

Применение этого метода возможно и для уменьшения деформаций изгиба сварных элементов.

В работе показана приемлемость разработанного метода расчета для определения величин и характера распределения внешних усилий, прикладываемых до сварки к балочному элементу с целью уменьшения остаточных перемещений и напряжений. Приведенные зависимости позволяют расчетным путем установить оптимальные варианты сборки изделий.

III. Остаточные напряжения и деформации от поперечной усадки при сварке прямолинейных швов

Значительная роль в развитии остаточных напряжений и деформаций, возникающих при сварке балочных, ферменных конструкций и их элементов, принадлежит действию поперечной усадки сварных соединений. Поперечное укорочение сварных прямолинейных швов имеет место в узкой зоне в поперечном по отношению к шву направлении. Вместе с тем величины поперечной усадки зачастую достигают больших значений, что при наличии закреплений приводит к возникновению высоких остаточных напряжений.

В гл. III рассмотрены различные случаи определения остаточных напряжений и деформаций от поперечной усадки швов в пластинах и балках.

В частности, проведено определение временных и остаточных напряжений при сварке свободных пластин и пластин собранных на прихватках или выводных планках. Так, на рис. 5 приведена расчетная схема, согласно которой зона сварного стыкового соединения разбита на n стержней длино l с поперечным сечени-

ем F, оси которых совпадают с направлением координаты y. В процессе выполнения стыкового шва и по окончании его в результате различного протекания тепловых процессов во времени в стержнях будут возникать напряжения σ_i – временные и остаточные.

За длину l стержня принимается ширина зоны остаточных растягивающих продольных напряжений, возникающих от продольной усадки (гл. П). Считается (на основе экспериментальных данных), что в пределах этой ширины остаточная поперечная деформация распределена равномерно.

С учетом влияния теплоотдачи величина свободных поперечных укорочений во времени будет

$$\Delta_n^t = \frac{\alpha}{c\gamma} \frac{q}{\sqrt{\delta}} \exp(-\delta t)$$

где $\Delta_n = \frac{\alpha}{c\gamma} \frac{q}{\sqrt{\delta}}$ (Окерблом Н.О., Кузьминов С.А.).

Возникновение напряжения в каком-либо стержне наступает при достижении им температуры упругого состояния материала. Так, для малоуглеродистой стали эта температура составляет примерно 600°С.

Определение напряжений в стержнях производится последовательно на временных интервалах $\Delta t_к$. Величина интервала принимается равной $\Delta t_к = \frac{a}{v}$ где a – расстояние между стержнями, v – скорость сварки.

При этом используются те же уравнения статики и уравнение совместности деформаций в виде уравнения прямой (гл. П).

Если в каких-либо стержнях напряжение σ_i будет превосходить предел текучести $\sigma_т$ по абсолютной величине, то в этом случае осуществляются приближения по аналогии с теми, как это было сделано в гл. П.

Суммирование приращений упругих напряжений для каждого стержня по всем интервалам $\Delta t_к$ позволяет определить остаточные поперечные напряжения в стыковом шве.

Решение задач с помощью программ для реализации алгоритмов по определению временных и остаточных поперечных напряжений позволило установить характер распределения их и величины. По краям шва при сварке свободных пластин имеют место растягивающие напряжения, а в средней части – сжимающие. Качественно картина распределения остаточных напряжений соответствует той,

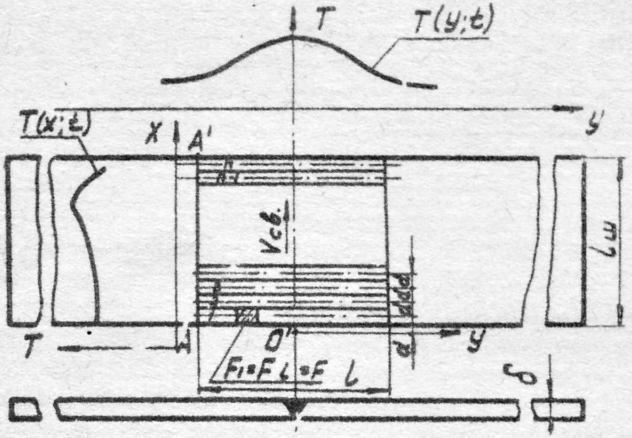


Рис. 5. Расчетная схема определения остаточных напряжений в пластине от поперечной усадки прямолинейного шва.

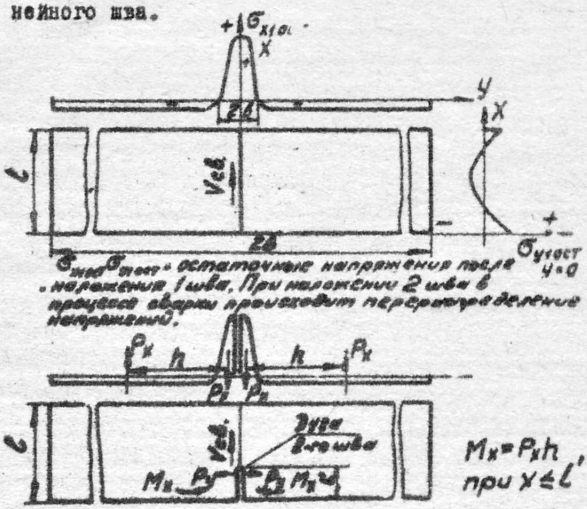


Рис. 6. Схема перераспределения остаточных напряжений при выполнении второго шва. M_x – изгибающий момент от действия остаточных продольных напряжений от первого шва, P_y – усилие от действия остаточных поперечных напряжений от первого шва.

№ 276156

МВТУ им. Н. Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

которая была получена Фридлендером И.А., где также рассматривался случай свободной поперечной деформации.

Схема и метод расчета остаются справедливыми и для случая сварки скрепленных пластин. Учет скреплений или прихваток по длине сварного соединения осуществляется соответствующей записью уравнений статики.

В работе приведены примеры вычислений остаточных сварочных напряжений для случаев сварки пластин с выводными планками и на прихватках по длине стыка. Следует отметить, что наличие прихваток для некоторых режимов сварки приводит к изменению характера и величины остаточных поперечных напряжений. Это установлено расчетом и экспериментально на пластинах из ст. 3 и сплава АМг6. Учет влияния прихваток производится введением дополнительных стержней в расчетную схему.

Перемещение дуги по стыку приводит к последовательному "срезанию" прихваток или заменяющих их соответствующих стержней, что обусловливает необходимость в учете перераспределения напряжений в определенные моменты времени.

В практике изготовления балочных конструкций находит широкое применение двухсторонняя или двухпроходная сварка при соединении отдельных элементов, пластин. Как показывают измерения на натурных конструкциях, выполнение подобных сварных швов приводит к большим геометрическим отклонениям, являющимися недопустимыми в сравнении с установленными нормами.

Так, например, при изготовлении стенок пролетных балок мостовых кранов, которые собираются из габаритных листовых полотнищ, выполнение двусторонней сварки стыков приводит к изменению величины строительного подъема на 15÷33%. Экспериментальным путем установлено, что существенная роль в этом принадлежит сварочным деформациям, возникающим при втором проходе стыка.

Для выявления физики данного явления, характера и величин поперечной деформации были проведены соответствующие измерения на пластинах из малоуглеродистой стали ст. 3. Пластины размерами 440x1310x6 мм, 230x1320x6 мм, а также натурные листовые полотнища - 1600x5950x8 мм сваривались автоматической сваркой под флюсом с двух сторон.

Выполнение второго шва приводит к значительному увеличению поперечной усадки соединения и явно выраженной неравномер-

ности ее вдоль стыка.

Причина возникновения градиента поперечной усадки находит качественное объяснение в следующем. В результате наложения первого шва в его зоне возникает остаточное напряженное состояние, которое является самоуравновешенным.

Выполнение второго шва по существу происходит по напряженному металлу. Сварка второго шва приводит при достаточно высокой погонной энергии к "перерезанию" имеющегося сварного соединения от первого прохода и разделению пластины на две в начальные моменты времени. В зоне дуги при втором проходе в результате перераспределения продольных и поперечных остаточных напряжений возникает момент M и усилие P_y (рис. 6). Момент определяется эпюрой остаточных продольных напряжений, как

$$M = P_x \cdot h$$

Основное влияние на кинетику перемещений при сварке второго шва оказывает наличие изгибающего момента M, направленного на сближение кромок свариваемых пластин позади дуги, в результате чего максимум поперечной усадки имеет место всегда в начале второго шва.

На основании приведенного анализа разработано несколько путей учета данного эффекта при изготовлении сварных листовых элементов.

Первый путь традиционный – геометрические размеры сварного изделия обеспечиваются соответствующей сборкой, предусматривающей изменение какого-либо параметра в сторону, обратную сварочным деформациям. Второй путь уменьшения влияния неравномерности поперечных укорочений двухсторонних швов заключается в последовательном изменении направлений вторых швов для соседних стыков. Третий путь – в увеличении размеров выводных планок и длины швов, соединяющих их с пластинами, четвертый – применение однопроходной сварки вместо двухсторонней.

Разработанные рекомендации послужили основой для создаваемого в настоящее время стенда для сборки стенок пролетных балок мостовых кранов.

Стабилизация строительного подъема стенок позволяет устранить и другой серьезный дефект, имеющий место при изготовлении коробчатых балок – скручивание или винтообразность. Этот дефект проявляется после сборки на прихватках стенок с верхним поясом

и приварки диафрагм. Причина возникновения этого геометрического дефекта состоит в том, что стенки балки имеют разный строительный подъем, о чем и говорилось выше.

В гл. III приводится также расчетное определение напряженно-деформированного состояния балочных элементов при выполнении поперечных швов. Рассмотрены случаи выполнения коротких и протяженных соединений. На рис. 7 представлена расчетная схема по определению остаточных напряжений и деформаций при выполнении короткого прямолинейного шва на стенке балочного элемента коробчатого сечения.

Возникновение поперечной усадки соединения приводит к продольному укорочению и изгибу балки. Термин "короткий" шов следует считать условным, понимая при этом возможность принятия в расчетной схеме гипотезы об одновременной укладке шва по длине. Считая, как и ранее, реализацию поперечной усадки в пределах выделенного участка l, соответствующего ширине зоны растягивающих продольных напряжений $\sigma_x = \sigma_т$, имеем следующие уравнения при "сшивании" элемента I и условно выделенной балки II:

$$\Sigma P_y = 0 \qquad (\Delta'_{A_1} + \Delta''_{A_1}) + (\Delta'_{A_4} + \Delta''_{A_4}) = \Delta_n$$

$$\Sigma M_x = 0$$

$$\Sigma M_z = 0 \qquad (\Delta'_{A_2} + \Delta''_{A_2}) + (\Delta'_{A_3} + \Delta''_{A_3}) = \Delta_1.$$

В соответствии с рис. 6 имеем:

$$P = \sigma_1 F_ш + \frac{1}{2}(\sigma_2 - \sigma_1) F_ш, \qquad F_ш = l_ш \cdot \delta_c$$

где $F_ш$ – площадь сечения шва,

δ_c – толщина стенки.

Углы поворота поперечных сечений элемента II относительно осей X и Z будут равны:

$$\varphi_x = \frac{P z_p \cdot l}{E \mathcal{J}_x^{II}}, \qquad \varphi_z = \frac{P(x_p + b) l}{E \mathcal{J}_z^{II}}$$

Моменты инерции $\mathcal{J}_x^{II}$ и $\mathcal{J}_z^{II}$ элементы балки II берутся относительно центральных осей X и Z. Далее определяются перемещения точек

$$\Delta'_{A_1} = \Delta'_{A_4} = \frac{Pl}{EF_{II}} + \frac{1}{2}\varphi_x z_{A_1} + \frac{1}{2}\varphi_z x_{A_1}$$

$$\Delta''_{A_1} = \Delta''_{A_4} = \frac{Pl}{2EF_{\mathcal{J}}} + \frac{P(\frac{1}{2}l_ш - x_p) l}{2E\mathcal{J}_{z'}} \cdot \frac{l_ш}{2}$$

Здесь через $\mathcal{J}_{z'}$ обозначен момент инерции элемента I относительно оси z'.

После соответствующих подстановок определяются σ_1 и σ_2. Если при подсчете этих составляющих окажется, что какое-либо из значений превышает предел текучести, то необходим переход

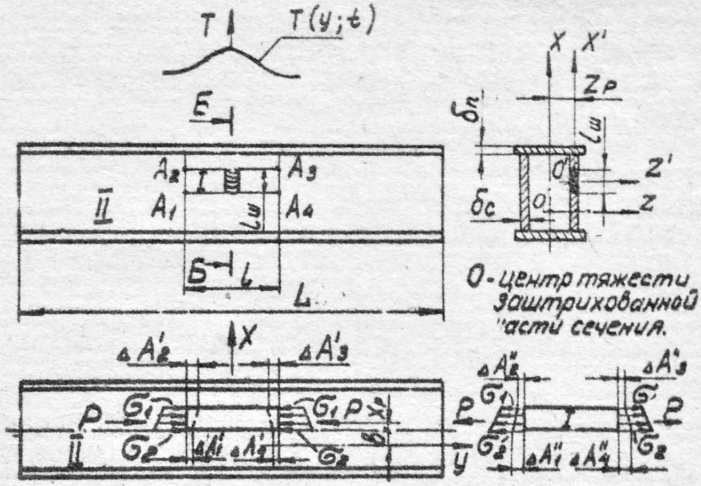


Рис. 7 Расчетная схема определения остаточных деформаций балки от поперечной усадки прямолинейного шва.

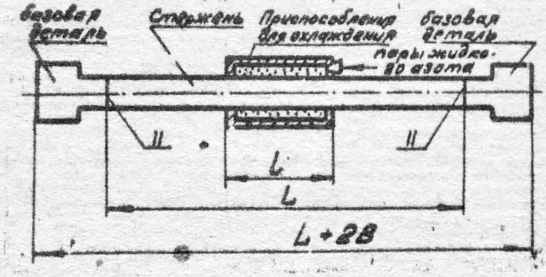


Рис. 8 Схема метода предварительного и сопутствующего при сварке глубокого охлаждения стержней для уменьшения деформаций фермонных конструкций.

к упруго-пластической схеме решения.

Числовые расчеты по разработанной методике нашли удовлетворительное экспериментальное подтверждение.

Исследование развития временных и остаточных напряжений от поперечной усадки швов при выполнении протяженных по длине соединений на балках строится с учетом неодновременности сварки. Используются три уравнения статики и уравнение совместности деформаций в виде уравнения плоскости.

Разработанные методы расчета деформаций сварных элементов от поперечной усадки швов позволяют обоснованно определять характер и величины внешних усилий, прикладываемых перед сваркой к элементам с целью компенсации сварочных деформаций.

Большое количество поперечных швов в сварных балочных элементах (например, в металлоконструкциях мостовых кранов, кранов-перегружателей, козловых, контейнерных и т.п.) приводит на стадии изготовления их к значительным отклонениям из плоскости тонколистовых элементов (стенок и др.). Одна из основных причин этих геометрических искажений - возникновение угловых деформаций при сварке больших и малых диафрагм со стенками. С целью уменьшения перемещений из плоскости в практике ряда заводов находит применение так называемая операция "растяжка". Однако, создавая предварительно напряженную конструкцию, что установлено в данной работе расчетным и экспериментальным путем на натурных изделиях, она снижает несущую способность балки с точки зрения местной устойчивости сжатых тонколистовых элементов. Это является одним из примеров влияния технологичности конструкции на ее работоспособность и весовые показатели. Для устранения этой операции необходимо уменьшить угловые деформации при сварке диафрагм со стенками.

Обычный, широко применяемый способ сварки - сварка вручную угловым швом. Помимо значительных угловых деформаций, сопровождающих такие соединения тонколистовых элементов, имеется большой недостаток этой технологии с точки зрения условий работы сварщика.

В данной работе приводится несколько конструктивных вариантов применения специальных диафрагм, имеющих в месте соединения со стенками утолщения. В качестве соединений предлагается использовать проплавные электрозаклепки. Наличие утолщений на диафраг-

мах обеспечивает надежную и простую технологию сварки с использованием стандартного оборудования и позволяет получать качественное сварное соединение.

Все предложенные варианты были опробованы при сварке балок из ст. 3 с толщиной стенок 4,5,6 мм. Экспериментальное исследование проводилось по определению полей остаточных напряжений и деформаций. В частности, было установлено, что угловые деформации при сварке стенок с диафрагмами практически равны нулю.

Перспективным следует также считать применение точечных соединений, выполненных контактной сваркой, для тех же случаев приварки диафрагм и ребер жесткости в балках замкнутого профиля. Однако, практического распространения для крупногабаритных балочных конструкций метод контактной сварки пока не получил.

В данной работе разработано новое устройство, у которого электроды каждой пары, расположенные по одну сторону свариваемого изделия, жестко соединены между собой по плоскости в продольном направлении и разделены изоляционной прокладкой. Это обеспечивает устранение индуктивности вторичного контура и повышение стабильности процесса сварки.

Выполнение сварных соединений в самых разнообразных конструкциях предопределяет много особенностей работы их и при эксплуатации. В первую очередь, это относится к действию внешней нагрузки, создающей поле напряжений, которые взаимодействуют с остаточными сварочными напряжениями. В ряде случаев при работе балочных крупногабаритных конструкций существенным оказывается деформативность сварных элементов, возникающая как в начальной стадии эксплуатации, так и в течение продолжительного времени.

В настоящей работе рассматриваются закономерности развития остаточных прогибов применительно к сварным пролетным балкам, изготовленным из ст. 3. Для оценки влияния на остаточные прогибы балок различных типов соединений были выполнены экспериментальные исследования.

С этой целью были проведены измерения на моделях балок и натурных металлоконструкциях, которые заключались в испытаниях их на поперечный изгиб при разовом статическом и знакопостоянном циклическом нагружениях. Испытания показали, что остаточные прогибы балок со сварными швами появляются при срав-

нительно небольших напряжениях от внешней нагрузки. В зависимости от вида и расположения швов величина остаточного прогиба существенно различается.

Для сварных балок характерным является более быстрая стабилизация величины остаточного прогиба по сравнению с прокатными балками. В диапазоне допускаемых напряжений от внешней нагрузки она осуществляется после 2.10^3 циклов.

Наибольшие величины остаточных прогибов зафиксированы на сварных балках, имеющих поперечные шва. Основное приращение величины прогиба наблюдается в течение первых 500 циклов нагружения.

Испытания балок на циклическую нагрузку, приложенную посередине, были дополнены испытаниями их и на подвижную нагрузку. Действие подвижной нагрузки характерно для многих металлоконструкций кранов, мостов и т.п.

Анализ экспериментальных данных показывает, что величина остаточного прогиба сварных балок при действии циклической нагрузки, приложенной в среднем сечении пролета, или подвижной составляет $(0,2 \div 1)/1000L$, где L - длина пролета. Величина $1/1000L$ равна величине строительного подъема балок, закладываемой конструктивно и технологически при изготовлении.

На основании изучения процесса развития остаточных прогибов пролетных сварных балок при эксплуатации рекомендуются следующие мероприятия. Во-первых, увеличение проектной величины строительного подъема в два раза против существующей величины, равной 1/1000 пролета. Во-вторых, необходимо предварительное циклическое подвижное нагружение пролетной балки после сборки моста в пределах 300 ÷ 500 циклов нагрузкой, соответствующей уровню наибольших рабочих напряжений. В-третьих, уменьшение остаточных вторичных деформаций можно осуществить путем снижения остаточных сварочных напряжений.

В гл. III приведена схема расчета остаточных напряжений и деформаций балок при учете комбинации прямолинейных сварных соединений, а также определены возможности применения и перспективы развития разработанных методов (гл. II, III) для различных конструкционных материалов.

IУ. Остаточные деформации и напряжения при сварке криволинейных соединений

Применение криволинейных сварных соединений в виде круговых, кольцевых и т.п. швов в элементах малых толщин различных металлоконструкций также является источником значительных геометрических искажений изделия - местных и общих.

В главе IУ приведены закономерности образования деформаций потери устойчивости пластин, возникающих при сварке криволинейного шва, установленные на основе изучения полей остаточных напряжений.

Определяющими факторами при рассмотрении полей остаточных деформаций, перемещений и напряжений данного вида соединения являются: I) жёсткость пластины; 2) жесткость свариваемого элемента (фланец, заплатка), зависящая от конструктивного оформления; 3) режим сварки.

Задача по определению остаточных сварочных напряжений, возникающих в соединении, сводится к определению этих величин при "сшивании" отдельных зон - кольцевой пластины, кольца и фланца.

Условия "сшивания" записываются следующим образом:

$$|U_{r2A}| + U_{r2B} = \Delta_n$$
$$|U_{r1B}| + U_{r1B} = \varepsilon_t r_1$$

или

$$|U_{r2A}| + U_{r2B} = \varepsilon_t r_2$$
$$|U_{r1B}| + U_{r1B} = \varepsilon_t r_1$$

где $U_{r2A}, U_{r2B}, U_{r1B}, U_{r1B}$ - радиальные перемещения пластины кольца,

Δ_n - свободная поперечная усадка шва,

ε_t - деформация кольца в окружном направлении, обусловленная продольной усадкой.

Решение данной системы уравнений позволяет определить плоско-напряженное состояние кругового сварного соединения для случая вварки в бесконечную пластину элемента жесткости.

Решения для случаев вварки элементов жесткости в пластины из малоуглеродистой стали Ст.3 и сплава АМг6 нашли хорошее экспериментальное подтверждение. Следует отметить превалирующее действие поперечной усадки на напряженное состояние соединения для разнообразных конструктивных форм свариваемого кругового элемента (фланца, штуцера, патрубка и т.п.). Лишь в некоторых отдель-

ных случаях, когда наружный диаметр пластины незначительно отличается от диаметра шва, продольная усадка становится определяющей. В большинстве практических случаев вваривaемый элемент находится в состоянии растяжения.

С целью устранения остаточных деформаций и напряжений в зонах сварных соединений был разработан ряд методов, в том числе два метода обработки давлением: метод обжатия компенсационного кольца вваривaемого элемента жесткости и метод обжатия усиления шва нагретым пуансоном. Применение этих методов предусматривает использование стандартного или специального прессового оборудования и отличается высокой надежностью процессов. Установлено расчетное определение геометрических и силовых параметров этих методов.

Разработанные методы позволяют путем уменьшения остаточных напряжений в зоне шва вследствие компенсации упругой радиальной составляющей восстановить устойчивость пластины. Достигается это с помощью приложения внешних усилий к сварному элементу.

В тех случаях, когда подход с двух сторон к соединению ограничен или невозможен по конструктивным или технологическим соображениям, более целесообразным оказывается применение метода глубокого охлаждения. Вваривaемый элемент жесткости выполняется таким образом, что в зоне стыка он имеет так называемое фиксируемое кольцо, по которому устанавливается зажимное приспособление. Элемент жесткости перед сваркой охлаждается в жидком азоте, после чего собирается совместно с зажимным приспособлением и подвергается дальнейшему охлаждению в течение всего процесса сварки. После остывания шва прекращается подача азота, а зажимное приспособление снимается. В результате повышения температуры вваривaемого элемента происходит увеличение его размеров, которые вследствие охлаждения были равны $D-\Delta D$ (в месте стыка) и $d-\Delta d$ (в месте фиксируемого кольца), и компенсация упругой радиальной составляющей остаточных напряжений.

Проведенные эксперименты по сварке фланцев из АМг6 диаметром 220 мм, 150 мм, 300 мм подтвердили приемлемость данного метода.

Криволинейные швы являются одним из наиболее ответственных за усталостную прочность ряда сварных машиностроительных конструкций балочного и рамного типа. В условиях интенсивной эксплуа-

тации машин трещины в сварных соединениях зачастую обнаруживаются при малом числе циклов нагружения.

Теоретические основы малоцикловой усталости нашли свое отражение в работах Сереносна С.В., Москвитина В.В., Шнейдеровича Р.М., Куркина С.А., Гохберга М.М., Менсона, Коффина, Хиршберга и др. Значительный вклад в изучение вопросов усталостной прочности сварных соединений внесли работы Асзиса А.Е., Дучинского Б.Н., Ильясевича С.А., Кудрявцева И.В., Труфякова В.И., Навроцкого Д.И., Кудрявцева П.И. и многих других.

Одним из этапов настоящих исследований являлась разработка мероприятий по повышению долговечности сварных узлов балок на основе изучения влияния конструктивно-технологических факторов на работоспособность элементов сварных балочных конструкций. Как результат, разработана методика исследований, позволяющая оценить влияние основных конструктивных и технологических параметров на работоспособность сварных узлов в условиях циклических нагрузок. Испытания образцов и элементов конструкций в режиме повторно-статического и высокочастотного переменного нагружения проводились на специально оборудованном стенде на базе машины МУП-50 и др.

Экспериментально установлено, что появление трещины в зоне концентраторов сварных элементов при малоцикловом растяжении определяется величиной накопленной пластической деформации. Интенсивность процесса накопления пластических деформаций и их предельный уровень, соответствующий появлению микротрещины в равных условиях внешнего нагружения, зависит от исходного распределения остаточных напряжений по сечению сварного элемента.

Циклическое воздействие растягивающей нагрузки в малоцикловом диапазоне напряжений и наличие остаточных сжимающих напряжений, характерных для ряда сварных соединений, обуславливает знакопеременный цикл, повышающий интенсивность накопления повреждения, по сравнению с пульсирующим циклом суммарных напряжений.

Показано, что для увеличения долговечности сварных несущих узлов конструкций, содержащих криволинейные соединения, целесообразно применять приемы по разделению зон максимальной концентрации растягивающих напряжений от внешней нагрузки и остаточных напряжений.

Разработка конкретных конструктивно-технологических рекомендаций применительно к балкам кранов общего назначения реализована в виде соответствующей технической документации, переданной ряду заводов.

Среди многообразия существующих тонкостенных стержневых конструкций особое место занимают ферменные конструкции, изготавливаемые из алюминиевых, магниевых и титановых сплавов. Они предназначены для размещения на них элементов различных приборов, узлов и коммуникаций. Выполнение кольцевых сварных соединений приводит к значительным перемещениям узлов ферм. На основе расчетного и экспериментального определения деформаций изделий с целью компенсации поперечных укорочений стержней был разработан метод предварительного глубокого охлаждения. Стержень (труба, уголок и т.п.) обычно приваривается по концам к жестким деталям (рис. 8). При длине стержня L расстояние между базовыми точками составляет $L+2\delta$. Поперечная усадка двух швов составит $2\Delta_n$ и расстояние между базовыми точками будет $L+2\delta-2\Delta_n$ при свободной деформации.

Для компенсации укорочения берется стержень длиной $L+2\Delta_n$ и укорачивается посредством предварительного и сопутствующего охлаждения на величину $2\Delta_n$ перед сваркой. Экспериментальное и следование изложенного метода показало хорошие результаты при сварке ферм из алюминиевых сплавов.

Применение комплекса разработанных методов по устранению сварочных деформаций стержневых конструкций и стабилизации геометрических параметров изделий (гл. П, Ш, IУ) позволяет обеспечить значительное снижение трудоемкости изготовления сварных конструкций, а в ряде случаев создает возможность снижения веса отдельных крупногабаритных узлов и элементов.

Технико-экономические расчеты показывают, что при изготовлении металлоконструкций мостовых кранов применительно к программе ГУПТИАШ годовая экономия составляет свыше 250000 руб.

ВЫВОДЫ

I. Разработан метод расчета с применением ЭВМ остаточных напряжений и деформаций от действия продольной усадки прямолинейных сварных соединений. Расчетная схема сварного элемента,

представляющая разбивку его на отдельные продольные стержни, позволяет определять временные и остаточные напряжения на основе известных уравнений теории тепловых процессов и строительной механики.

2. Показано на примерах расчетного определения напряженно-деформированного состояния пластин влияние выполнения способа сборки на характер деформирования поперечного сечения свариваемых элементов. В частности установлено, что сварка напроход стыковым швом нескрепленных по концам соединения пластин приводит в ряде случаев к возникновению в околошовной зоне остаточных деформаций растяжения. Проведено исследование влияния жесткости свариваемых пластин и режима сварки на распределение остаточных напряжений и деформаций. Установлено приближенное соотношение по определению расчетной ширины габаритных пластин; в частности, показано, что влияние жесткости зависит от длины соединения, в чем проявляется известный в теории упругости принцип Сен-Венана: остаточные напряжения и деформации имеют место в зоне шва и по мере удаления от него стремятся к нулю.

3. Проведено расчетное определение напряженно-деформированного состояния балок при выполнении продольных швов (поясных и т.п. ; по той же методике п.I) для случая сварки одного и нескольких соединений. Это позволило установить существенное влияние каждого последующего шва на распределение напряжений и деформаций в балках от предыдущих швов. Преимущество разработанной методики особенно важно при учете действия нескольких сварных соединений. Экспериментальные данные подтверждают результаты расчетов по разработанному методу.

4. Применительно к тонколистовым сварным элементам разработан и экспериментально обоснован метод устранения деформаций потери устойчивости, названный методом поперечного обжатия зоны сварного соединения. Обжатие по толщине производится в одном или нескольких поперечных сечениях по длине шва, исходя из критерия устойчивости сжатых частей пластины.

Этот метод положен в основу создаваемого в настоящее время оборудования для ряда заводов, предназначенного для поточных линий и сварки балок мостовых кранов.

5. Разработан и экспериментально подтвержден метод глубокого охлаждения зоны растягивающих напряжений сварного соединения

с одновременным нагревом периферийных участков, позволяющий осуществить снижение остаточных напряжений и устранить деформации потери устойчивости сварных листовых элементов.

Показана возможность применения разработанного метода расчета остаточных напряжений и деформаций для установления обоснованной величины и характера приложений внешних усилий к свариваемым элементам перед сваркой с целью уменьшения остаточных деформаций изгиба.

6. Разработана расчетная методика с применением ЭВМ по определению остаточных напряжений, возникающих от поперечной усадки прямолинейных однопроходных сварных соединений в пластинах; рассмотрены случаи сварки свободных и скрепленных пластин с учетом неодновременного наложения шва по длине.

Расчетные схемы построены по тому же принципу, что и при рассмотрении действия продольной усадки (п.I): разбивка зоны сварного соединения на стержни по длине шва позволяет учитывать неодновременность сварки и оценивать влияние режимов процесса и условий сборки на напряженно-деформированное состояние околошовной зоны.

7. Экспериментальным и расчетным путем установлено возникновение градиента поперечной усадки при выполнении двусторонней сварки пластин; показано, что максимальное значение поперечной усадки имеет место в начале второго шва; подобный эффект объясняется действием остаточных напряжений от продольной усадки, которые при выполнении второго шва неуравновешены и создают изгибающий момент в плоскости пластины; разработаны практические пути устранения неравномерности поперечной усадки от второго прохода применительно к крупногабаритным сварным конструкциям.

8. Разработана расчетная методика с применением ЭВМ по определению остаточных напряжений и деформаций от поперечной усадки коротких и протяженных по длине сварных соединений в балках основанная на схеме расчета п.6; показана возможность применения данного метода с целью расчетного определения характера и величины внешних усилий, направленных на уменьшение деформаций изделия.

9. Разработаны методы устранения угловых деформаций при выполнении тавровых сварных соединений; в частности, предложены конструктивно-технологические мероприятия, позволяющие обеспе-

чить простую и надежную технологию проплавных электрозаклепочных соединений для приварки элементов жесткости в балочных конструкциях; разработано устройство по применению контактной точечной сварки тех же элементов, обеспечивающее осуществление безиндукционной сварки крупногабаритных изделий.

10. Приведен расчетный метод учета совместного действия продольной и поперечной усадок различных сварных соединений.

Определены пути дальнейшего развития разработанных методов расчета остаточных напряжений и деформаций для широкого круга материалов.

11. Экспериментальным путем установлено, что вторичные остаточные деформации, возникающие при нагружении сварных балок, являются следствием взаимодействия остаточных сварочных напряжений и напряжений от внешней нагрузки; разработаны практические методы стабилизации геометрических параметров крупногабаритных сварных балок: увеличение величины строительного подъема в ряде случаев, циклическое подвижное нагружение новых сварных изделий.

12. Разработана расчетная методика по определению остаточных напряжений и перемещений при выполнении криволинейных сварных соединений в тонколистовых элементах и ферменных конструкциях, показано превалирующее действие поперечной усадки на напряженное состояние зоны шва; установлено расчетным и экспериментальным путем, что уровень остаточных напряжений в радиальном направлении круговых швов, как правило, превосходит уровень критических напряжений, что приводит к потере устойчивости пластин.

13. Разработаны методы осадки компенсационного кольца ввариваемого элемента жесткости и метод обжатия шва нагретым пуансоном, имеющие целью устранение деформаций потери устойчивости тонких пластин с криволинейными сварными соединениями. На основе разработанных методов внедрено в производство специальное прессовое оборудование.

Разработан метод глубокого охлаждения ввариваемого элемента жесткости с одновременной фиксацией его в жестком приспособлении до и во время сварки; показано, что без приложения внешних усилий к пластине можно снижать остаточные напряжения в зоне шва и восстанавливать устойчивость пластин.

I4. Разработан метод глубокого охлаждения зоны по длине стержней ферменных конструкций, предусматривающий обработку их до и во время сварки с целью компенсации поперечной усадки кольцевых швов и обеспечения геометрической точности изделия.

I5 Экспериментальным путем показано, что на прочность сварных узлов балок при малоцикловом нагружении оказывают существенное влияние остаточные сварочные напряжения в зоне концентраторов; испытаниями на плоских и балочных элементах с криволинейными сварными соединениями установлено, что долговечность сварных соединений при наличии концентраторов в значительной степени определяется уровнем и знаком остаточных напряжений в опасной зоне.

I6. На основе экспериментальных исследований малоцикловой усталости разработаны конструктивно-технологические мероприятия повышения несущей способности сварных узлов балочных изделий с криволинейными швами, являющимися очагом разрушения широкого круга металлоконструкций; получено комплексное решение, направленное на снижение как конструктивной, так и технологической концентрации напряжений.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Вершинский А.В. Деформации и напряжения, возникающие при сварке металлических конструкций мостовых кранов. Сб."Подъемно-транспортные машины". Тула, I973.
2. Вершинский А.В.,Динасылов А.Д. Метод расчета сварочных напряжений и деформаций с применением ЭВМ." Технические науки", Сб. МВ и ССО Каз.ССР, вып. ХУШ, I975.
3. Вершинский А.В., Сагалевич В.М., Панферов Н.М., Яровинский Ю.Л. Способ устранения сварочных деформаций. Авт. свид. № 469560.
4. Вершинский А.В., Сагалевич В.М., Панферов Н.М. Уменьшение деформаций, возникающих при сварке элементов малых толщин "Известия вузов. Машиностроение", № I0, I974.
5. Вершинский А.В. Определение остаточных напряжений в сварных соединениях от поперечной усадки. Сб. "Исследование свойств сварных соединений и элементов конструкций". Труды МВТУ, № I82, I974.

6. Вершинский А.В., Кошеверов А.Д. Изменение строительного подъема при сварке пролетных коробчатых балок мостовых кранов. Тезисы докладов Республиканской научно-технической конференции по сварке. Могилев, 1972.
7. Вершинский А.В., Кошеверов А.Д. Поперечные деформации при сварке стенок коробчатых балок мостовых кранов "Вестник машиностроения", № 6, 1973.
8. Вершинский А.В., Прохоров В.Н., Динасылов А.Д., Кошеверов А.Д. О некоторых конструктивно-технологических особенностях сварных узлов мостовых кранов. Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического совещания "Новые пути проектирования, расчета, испытаний и эксплуатации ПТМ и контейнеров". Ленинград, 1974.
9. Вершинский А.В., Вершинский В.В. Устройство для контактной точечной и шовной сварки. Авт. свид. № 267771.
10. Сагалевич В.М., Вершинский А.В. Расчет остаточных напряжений круговых сварных швов в пластинах. "Известия вузов. Машиностроение", № 6, 1968.
11. Вершинский А.В., Панферов Н.М., Швецов В.И. Способы устранения сварочных деформаций от круговых швов в элементах малых толщин. Сб. "Остаточные напряжения и прочность сварных соединений и конструкций", Труды МВТУ № 133, 1969.
12. Сагалевич В.М., Вершинский А.В. Способ уменьшения остаточных сварных деформаций и напряжений в тонколистовых и оболочковых конструкциях. Авт. свид. № 228176.
13. Вершинский А.В., Панферов Н.М., Сагалевич В.М., Яровинский Ю.Л. Способ предотвращения сварочных деформаций. Авт.свид. № 288187.
14. Вершинский А.В., Сагалевич В.М., Панферов Н.М., Земанов Л.Д. Пресс для предварительной деформации зоны сварных соединений "Машины, приборы, стенды". Каталог № 3, МВТУ, 1972.
15. Вершинский А.В., Сагалевич В.М., Панферов Н.М., Яровинский Ю.Л. Приспособление для охлаждения стержневых элементов с целью снижения сварочных деформаций. "Машины, приборы, стенды". Каталог № 3, МВТУ, 1972.
16. Вершинский А.В., Сагалевич В.М., Яровинский Ю.Л., Панферов Н.М. Способ снижения сварочных деформаций и напряжений. Авт. свид. № 390887.

17. Вершинский А.В., Сагалевич В.М., Панферов Н.М. Сварочные деформации ферменных конструкций. "Известия вузов". "Машиностроение", № 10, 1972.
18. Сагалевич В.М., Мезенцева С.А., Вершинский А.В., Басиев К.Д., Панферов Н.М. Способ устранения деформаций и напряжений. Авт. свид. № 406670.
19. Сагалевич В.М., Прохоров Н.М., Вершинский А.В. Влияние остаточных напряжений на работоспособность сварных соединений и деформирование материала при циклических нагрузках. Сб. "Исследование свойств сварных соединений и элементов конструкций". Труды МВТУ № 182, 1974.
20. Вершинский А.В., Прохоров В.Н. Особенности работы сварных соединений мостовых кранов. Сб. "Подъемно-транспортные машины", вып. I, Тула, 1973.
21. Вершинский А.В., Прохоров В.Н. Работоспособность некоторых сварных узлов мостовых кранов. Сб. "Подъемно-транспортные и горные машины", Тула, 1972.
22. Вершинский А.В., Прохоров В.Н., Сагалевич В.М., Зайцев А.И. Концевая балка. Авт. Свид. № 405806.
23. Сагалевич В.М., Вершинский А.В., Прохоров В.Н., Прочность сварных опорных узлов металлоконструкций мостовых кранов, "Сварочное производство", № 4, 1974.
24. Сагалевич В.М., Вершинский А.В., Прохоров В.Н. Малоцикловая усталость сварных элементов балочных металлоконструкций. Сб. "Малоцикловая усталость сварных конструкций". Ленинград, 1973.
25. Прохоров В.Н., Вершинский А.В., Сагалевич В.М., Рядцова Л.В. Прочность несущих сварных узлов крановых мостов при циклических нагрузках. НИИИНФОРМТЯЖМАШ. 6-74-49.