

М 223764

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

ШИП Владимир Викторович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ СВАРНЫХ
БАЛОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ОТ ПОПЕРЕЧНЫХ ШВОВ
И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИХ РАСЧЕТА**

(05.04.05 — Технология и машины сварочного производства)

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

МВТУ

Работа выполнена в МВТУ им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель —
доктор технических наук, профессор Винокуров В. А.

Научный консультант —
кандидат технических наук, доцент Григорьянц А. Г.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, доцент Игнатьева В. С.,
кандидат технических наук, ст. н. с. Золотарев Б. Б.

Ведущее предприятие — ЦНИИПроектстальконструкция.

Автореферат разослан « 2 » февраля 1974 г.

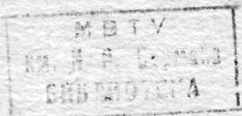
Защита диссертации состоится « » 1974 г.
на заседании Совета
Московского ордена
Знамени высшего тех.
по адресу: Москва, 10

Ваши отзывы в 2-
просьба высылать по

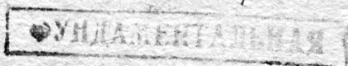
С диссертацией мо
лица.

Ученый секретарь

М 223464



Л-55600 от 28/1-74 г. О





Одной из основных проблем, которую приходится решать при использовании сварки, является проблема борьбы с остаточными напряжениями, деформациями и перемещениями. Сварочные деформации машиностроительных конструкций, изменяя форму и размеры, повышают трудоемкость изготовления сварных изделий, ухудшают их эксплуатационные свойства. В ряде случаев остаточные сварочные деформации приводят к браку в производстве, к значительным неэффективным материальным затратам. Это обстоятельство вызывает необходимость изучения природы и степени влияния на сварочные деформации различных факторов, имеющих место в реальных сварных конструкциях, с целью получения точных количественных характеристик данного влияния, связывающих величину остаточных деформаций с технологическими параметрами процесса сварки и геометрическими характеристиками изделия.

Широкое распространение среди стальных машиностроительных и строительных конструкций получили сварные балки. Данная работа посвящена исследованию деформаций сварных балочных конструкций от поперечных швов. Диссертация состоит из введения, шести глав и общих выводов.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА О ДЕФОРМАЦИЯХ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ОТ ПОПЕРЕЧНОЙ УСАДКИ ШВОВ

На деформации сварных балок от поперечных швов решающее влияние оказывают величина поперечной усадки сварного соединения и характер ее распределения по длине шва. При этом наиболее значительными являются деформации изгиба балок, вызванные удаленностью поперечного шва от центра тяжести сечения балки. Вопросам исследования поперечной усадки сварных соединений и расчета вызванных ею остаточных деформаций конструктивных элементов посвящены работы Николаева Г.А., Очерблота Н.О., Винокурова В.А., Кузьминова С.А., Байковой И.П., Ермолаева Г.В., зарубежных ученых Мализиуса Р., Масу-бучи К., Ватанабе М., Сато К. и других авторов. Проведенный анализ большого количества работ показывает, что точность расчета остаточных деформаций конструктивного элемента определяется точностью расчета поперечной усадки сварного соединения. Для свободных пластин при их полном проплавлении разными авторами получены примерно одинаковые, точные зависимости величины поперечной усадки от параметров режима сварки. Задача определения поперечной усадки значительно усложняется, если свариваемый элемент проварен не полностью или находится в составе конструкции. Можно выделить два принципиально

разных подхода к определению поперечной усадки в этом случае. Одни исследователи в расчетных зависимостях стремятся учесть влияние очень многих факторов, действующих в конструкции, степень влияния которых на поперечную усадку резко различна. Из-за множества учитываемых факторов подход оказывается сложным, вводятся многие допущения и упрощения. Другие исследователи выделяют какой-то один фактор (например, поперечная жесткость в работах японских авторов) и, полагая его основным, предлагают определять поперечную усадку в зависимости от степени влияния этого фактора. Последний подход неприемлем для сварных конструкций, где можно выделить несколько факторов, существенно влияющих на поперечную усадку. Такими факторами являются: глубина проплавления свариваемого элемента, наличие поперечных по отношению к шву элементов жесткости, предварительное напряженное состояние. Поперечные швы в балках в большинстве случаев угловые, часто выполняются многослойными. Глубина проплавления изменяется при этом в широких пределах. Швы, расположенные на полках, пересекают поперечный элемент жесткости — стенку. При укладке поперечных швов на балках, уже сваренных продольными швами, в балках действуют очень высокие остаточные напряжения от продольных швов. Таким образом, в сварных балках присутствуют все три основных фактора, которые необходимо учитывать в расчетных зависимостях для определения поперечной усадки.

Исходя из состояния изучаемого вопроса и свойств объекта исследования, были поставлены следующие задачи работы:

1. Экспериментальное и теоретическое исследование поперечной усадки пластин при неполных проплавлениях.
2. Выявление особенностей поперечной усадки пластин, подкрепленных поперечными по отношению к шву элементами жесткости.
3. Определение на основе экспериментальных исследований степени влияния конструктивных параметров и технологических факторов на деформации сварных балок от поперечных швов.
4. Разработка достоверной и оперативной методики расчета остаточных деформаций сварных балок от поперечных швов.
5. Создание нормативных материалов для расчета деформаций балочных стальных конструкций от сварки поперечных швов.

П. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ УСАДКИ ПЛАСТИН ПРИ НЕПОЛНЫХ ПРОПЛАВЛЕНИЯХ

Экспериментальные исследования во всех разделах работы проводились на образцах из низкоуглеродистой стали СтЗсп. Размеры образцов выбирались близкими к размерам реальных конструктивных эле-

ментов, режимы сварки были взяты из диапазона рабочих режимов, используемых на производстве. Во всех экспериментах измерялась поперечная усадка свариваемого элемента на базе 100 мм в нескольких сечениях по длине шва. Измерения производились на обеих поверхностях образца съемным механическим деформометром конструкции МВТУ им. Баумана. В ряде случаев определялись и остаточные поперечные напряжения методом, основанным на принципе разгрузки участков металла от остаточных напряжений при механической разрезке образца.

Исследование поперечной усадки при неполных проплавлениях осуществлялось на пластинах разной толщины: от 6 до 60 мм при сварке под флюсом и от 4 до 60 мм при сварке в среде CO_2 . Образцы представляли собой прямоугольные пластины размером 250х500 мм в первом случае и 200х500 мм во втором. Производилась наплавка валика на различных режимах на пластины разной толщины. При наплавке под флюсом на переменном токе использовались 3 режима, обеспечивающие величины погонной энергии $q/\sqrt{c}$ – 2500 кал/см, 5300 кал/см, 13700 кал/см, при наплавке в среде CO_2 также 3 режима – 2100 кал/см, 2650 кал/см, 3400 кал/см.

При неполном проплавлении величина поперечной усадки определяется зависимостью

$$\Delta_{\text{non}} = A \cdot \frac{\alpha}{c\gamma} \cdot \frac{q}{\sqrt{c} \cdot \delta}, \text{ см}, \quad (I)$$

где α – коэффициент линейного расширения, $1/^\circ\text{C}$; $c\gamma$ – объемная теплоемкость, кал/см³°C; δ – толщина пластины, см.

A – безразмерный коэффициент пропорциональности между погонной энергией, введенной на единицу толщины пластины, и величиной образовавшейся при этом Δ_{non} . Исследование влияния глубины проплавления на поперечную усадку сводится к определению коэффициента A , учитывающего уменьшение усадки в случае неполного проплавления по сравнению с полным. Полученные экспериментально многочисленные данные о величине Δ_{non} пластин разной толщины позволили установить зависимости коэффициента A от режима сварки. В качестве энергетического параметра, определяющего величину коэффициента A , была выбрана удельная погонная энергия $q/\sqrt{c} \cdot \delta$, количественно характеризующая величину энергии, аккумулированной в зоне сварного соединения в случае неполного проплавления. В работе установлено, что коэффициент A линейно зависит от удельной погонной энергии, изменяясь в очень широких пределах (рис. I).

Прямые, соответствующие сварке под флюсом при $q/\sqrt{c}$ 2500 кал/см (2) и $q/\sqrt{c}$ – 5300 кал/см (3) совпали, образовав зависимость для

диапазона режимов сварки. Это совпадение объясняется близкими формами зон проплавления в этих случаях, т.е. близкой сосредоточенностью источников тепла по толщине. При очень большом увеличении погонной энергии при сварке под флюсом ($q/\sqrt{\epsilon} = 13700$ кал/см, прямая I), как показал анализ макрошлифов швов, резко увеличилась ширина шва и гораздо менее интенсивно увеличилась глубина проплавления. Такое изменение характера ввода тепла привело к меньшим значениям коэффициента A в случае I, чем в случаях 2 и 3 для одного и того же значения $q/\sqrt{\epsilon} \cdot \delta$. При сварке в среде CO_2 (рис. I, $q/\sqrt{\epsilon} = 3400$ кал/см-4, $q/\sqrt{\epsilon} = 2650$ кал/см-5, $q/\sqrt{\epsilon} = 3400$ кал/см-6) коэффициент A также линейно зависит от удельной погонной энергии, но при ее увеличении растет интенсивнее. Последнее обстоятельство связано с некоторым возрастанием глубины проплавления при увеличении $q/\sqrt{\epsilon} \cdot \delta$ (при уменьшении δ) в случае сварки в среде CO_2 , чего не наблюдалось при сварке под флюсом на переменном токе. И при сварке в среде CO_2 на величину A существенное влияние оказала форма зоны проплавления, т.е. характер ввода тепла. При одном и том же значении $q/\sqrt{\epsilon} \cdot \delta$ в случае неполного проплавления наиболее сосредоточенный по толщине источник (6) обеспечил большую величину A , наименее сосредоточенный (4) — меньшую. При малых значениях $q/\sqrt{\epsilon} \cdot \delta$ (большие толщины) различия в форме зон проплавления перестают сказываться и зависимости 2, 3, 4, 5, 6 совпадают.

Коэффициент A для случая наплавки валика на полубесконечное тело (очень большие толщины) можно принять равным 0,15. В случаях проплавлений, близких к полным, он равен I.

Ш. РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ УСАДКИ ПЛАСТИН ПРИ НЕПОЛНЫХ ПРОПЛАВЛЕНИЯХ

В расчетах сварочных напряжений и деформаций эффективное применение находит аппарат теории упругости и пластичности. Теория пластичности, позволяющая получать не только качественные, но и точные количественные зависимости деформаций от режима сварки, была использована в работах Бакши О.А., Игнатьевой В.С., Талипова Г.Б., Винокурова В.А. и Григорьянца А.Г., Сагалевича В.М. и Золотарева Б.Б., Махненко В.И. и Великоиваненко Е.А.

В данной работе с целью установления закономерностей образования поперечной усадки в случае неполного проплавления пластины была решена в численном виде упруго-пластическая задача. При ее решении рассматривались процессы образования и последующего изменения напряжений и деформаций, вызванных введением сварочного тепла, в слое единичной толщины, выделенном из пластины двумя сече -

ниями, перпендикулярными шву. Температурное поле в выделенном слое (распределение температур по толщине пластины) определялось от мгновенного линейного в направлении оси шва источника с учетом отражения тепла от поверхностей пластины и теплоотдачи в воздух. Мощность источника была равна количеству тепла, вводимого в слой при сварке. Принятая расчетная схема, воспроизводила условия развития поперечных деформаций в зоне сварного соединения при сварке свободных пластин. На стадии нагрева расчетный слой помещался в жесткую заделку, на стадии остывания его поперечное сокращение происходило свободно. Был разработан метод численного решения с использованием ЦВМ поставленной упруго-пластической сварочной задачи, являющийся продолжением расчетных методов, изложенных в работах Винокурова В.А. и Григорьянца А.Г. В качестве физической модели упруго-пластически деформируемого материала была принята схема идеально пластичного материала без упрочнения. Учитывалась зависимость механических свойств металла (низкоуглеродистая сталь) от температуры. Весь этап сложного нагружения от введения тепла до полного остывания разбивался на четыре шага во времени. На каждом шаге задача решалась как для случая простого нагружения с использованием аппарата теории малых упруго-пластических деформаций, но с учетом пластических деформаций, полученных на предыдущем шаге. Этот учет заключался в вычислении напряжений упруго-пластического состояния по физическим формулам теории пластичности, в которых в качестве деформаций использовались нагрузочные деформации, являющиеся разностью полной деформации элементарного участка на некотором приближении данного шага и его пластической деформации, полученной на предыдущем шаге. При упруго-пластическом решении задачи на каждом шаге применялся метод упругих решений (метод дополнительных нагрузок). Упруго-пластическое тело рассматривалось как упругое с дополнительными фиктивными объемными силами, необходимыми для его равновесия. В процессе последовательных приближений объемные силы снимались, определялись возникающие при этом деформации и каждый участок тела приводился пластическим деформированием в соответствие с внешними условиями. Деформации от снятия объемных сил вычислялись путем дифференцирования возникающих при этом перемещений, которые определялись из решения линейного неоднородного дифференциального уравнения с частными производными второго порядка эллиптического типа, связывающего производные перемещения с величиной снимаемых объемных сил. Уравнение решалось методом Фурье с описанием распределения численно заданных объемных сил

двойными тригонометрическими рядами. Для решения задачи был разработан алгоритм и составлена программа решения в системе **FORTRAN** применительно к ЦВМ "**SYSTEM 4-50**". Задача была решена для одной погонной энергии сварки 1460 кал/см и толщин 1,6 см; 1,2 см; 0,8 см; 0,64 см; 0,56 см; 0,48 см.

В результате решения установлено, что при неполном проплавлении величина поперечной усадки, которую можно характеризовать интегралом поперечных пластических деформаций $\epsilon_{y_{пл}}$, образуясь в области высоких температур, мало меняется на стадии последующего остывания. Уменьшение $\epsilon_{y_{пл}}$ укорочения за счет пластических деформаций удлинения высокотемпературной зоны при ее остывании в первые моменты времени сопровождается развитием $\epsilon_{y_{пл}}$ укорочения в нижерасположенных зонах. При дальнейшем остывании деформации $\epsilon_{y_{пл}}$ меняются очень мало. Путем анализа напряженного состояния и распределений $\epsilon_{y_{пл}}$ в расчетной области в различные моменты времени установлено, что на образование поперечной усадки и на величину коэффициента A при неполном проплавлении пластины существенно влияет сопротивление непроплавленной части толщины развитию $\epsilon_{y_{пл}}$ укорочения в высокотемпературной области. С уменьшением толщины (при том же значении $q/\sqrt{\sigma}$) создаются более благоприятные условия для развития $\epsilon_{y_{пл}}$ укорочения, увеличивается площадь зон, где они развиваются, что вызывает интенсивный рост коэффициента A с увеличением $q/\sqrt{\sigma}$ при неполных проплавлениях. Полученная зависимость A от $q/\sqrt{\sigma}$ имеет линейный характер, как и в экспериментальных данных, приведенных на рис. I. При полных проплавлениях $A = 1$. Теоретически установленные закономерности образования поперечной усадки находятся в полном соответствии с экспериментальными результатами, приведенными в главе II. Сравнение расчетных и экспериментальных величин поперечной усадки показало хорошую сходимость результатов расчета и эксперимента: отклонения составляли 10+15%.

Анализ различных постановок рассматриваемой задачи показал, что метод упругих решений не обеспечивает быстрой сходимости решения упруго-пластических сварочных задач, характеризующихся резкой локализованностью областей пластической деформации. При его использовании на каждом приближении силовому воздействию подвергаются все элементарные участки рассчитываемой области. В одних участках назначается излишняя пластическая деформация, в других она оказывается недостаточной. Эти несоответствия в распределении пластической деформации приходится устранять за счет значительно-го количества приближений, что увеличивает машинное время решения задачи.

В целях ускорения сходимости решения упруго-пластических сварочных задач представляется перспективной разработка методов решения, позволяющих назначать пластическую деформацию избирательно, лишь в наиболее неуравновешенных элементарных участках.

IV. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ УСАДКИ ПЛАСТИН, ПОДКРЕПЛЕННЫХ ПОПЕРЕЧНЫМИ К ШВУ ЭЛЕМЕНТАМИ ЖЕСТКОСТИ

На поперечную усадку пластины в зоне расположения поперечного по отношению к шву элемента жесткости способны оказать влияние повышенная поперечная жесткость сварного соединения и дополнительный теплоотвод из зоны сварного соединения в этот элемент. Некоторые исследователи полагают, что уменьшение усадки может быть вызвано высокой изгибной жесткостью конструктивного элемента по сравнению со свободной пластиной и вводят изгибную жесткость в расчетные схемы и зависимости.

Основным образцом в исследованиях данного раздела работы был сварной тавр — наиболее простой случай подкрепления пластины (полки) элементом жесткости (стенкой). Размеры полки — $8 \times 470 \times 1000$ мм, размеры стенки — $8 \times 380 \times 1000$ мм. Производилась наплавка в среде CO_2 ($q/\eta_c = 3700$ кал/см) поперечного валика на полки тавров и на пластины, размеры которых были такими же, как и размеры полки. Остаточные напряжения от продольных швов перед сваркой поперечных швов были сняты отпуском.

В результате экспериментов получены распределения поперечной усадки от поперечного шва в полках тавра, тавра со стенкой, перерезанной под поперечным швом узкой вертикальной прорезью, тавра, приваренного к жесткой плите (двутавра), тавра, у которого часть стенки вблизи полки очень интенсивно охлаждалась проточной водой, а также в свободной пластине и в пластине с искусственным охлаждением той зоны, которая в полке тавра жестко связана со стенкой. Путем предварительного подбора расхода охлаждающей воды теплоотвод из охлаждаемой зоны пластины обеспечивался близким к теплоотводу из полки в стенку. Для контроля условий теплоотвода во всех экспериментах производилась запись термических циклов в нескольких характерных точках полок тавров и пластин.

Анализ результатов показывает, что в зоне искусственного теплоотвода поперечная усадка пластины заметно снижается, что приводит к уменьшению ее средней величины по длине шва. Охлаждение стенки тавра привело к некоторому дополнительному уменьшению поперечной усадки полки в зоне расположения стенки, но в целом усадка по сравнению с усадкой полки обычного тавра изменилась мало, т.к. в

высокотемпературной области, наиболее важной для образования поперечной усадки, из полки, как следует из термических циклов, в обоих случаях отводилось примерно одинаковое количество тепла. В уменьшении поперечной усадки полки за счет теплоотвода в элементы жесткости основную роль играет тепло, отводимое из полки в высокотемпературной области в продольные швы и примыкающую часть стенки.

Поперечная усадка полки двутавра, изгибная жесткость которого была в пять раз больше, чем у тавра, была такой же и по характеру распределения, и по средней величине, как усадка полки тавра. Замеры распределения по высоте стенки тавра поперечных перемещений на базе 100 мм показали, что поперечные сечения стенки искривляются в небольшой зоне, примыкающей к полке. Видимо, именно эта зона стенки оказывает самое активное сопротивление поперечной усадке полки. В остальной части стенки сечения остаются плоскими, поворачиваясь на некоторый угол.

Поперечная усадка полки тавра с перерезанной стенкой была меньше, чем усадка пластины с искусственным теплоотводом, но больше, чем усадка полки тавра со сплошной стенкой. Такое отличие объясняется высокой поперечной жесткостью зон полки, связанных со стенкой по обе стороны от прорези. В случае сплошной стенки поперечная жесткость сварного соединения больше, чем в случае перерезанной стенки, и усадка уменьшается еще значительно.

У. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ДЕФОРМАЦИИ СВАР- НЫХ БАЛОК ОТ ПОПЕРЕЧНЫХ ШВОВ

В экспериментах данного раздела работы использовались в основном тавровые балки, предварительно сваренные односторонними и двухсторонними продольными швами с величиной катета от 6 до 12 мм. Толщина полки равнялась 12 мм (влияние на поперечную усадку толщины полки рассмотрено в главе II), ширина — 200 мм. Исследовалась также поперечная усадка полок балок П-образного сечения с разной величиной свеса полки.

Производилась трехслойная поперечная наплавка, а также сварка в среде CO_2 трехслойного поперечного углового шва на полках балок и на пластинах. Погонная энергия сварки одного слоя — 3200 кал/см. Кроме поперечной усадки пластин и полок, измерялись на специальном приспособлении на базе 1890 мм прогибы балок от поперечных швов. Влияние геометрических параметров (величины катета и вида

продольного шва, толщины и высоты стенки, величины свеса полки) оценивалось на образцах без остаточных напряжений от продольных швов.

В результате экспериментов установлено, что поперечная усадка полки балок меньше, чем усадка свободной пластины, причем при увеличении катета продольного шва, а также при переходе от односторонних к двусторонним продольным швам усадка полки и прогибы балки от поперечного шва уменьшаются. Более крупные продольные швы обеспечивали большую протяженность зон полки, жестко связанных со стенкой, в эти швы и через них в стенку отводилось большее количество тепла в высокотемпературной области. При увеличении толщины стенки поперечная усадка полки также несколько уменьшалась, что объясняется влиянием тех же факторов. Однако, при достаточно крупных продольных швах, обеспечивающих высокую поперечную жесткость и близкие условия теплоотвода из полки в стенку, влияние толщины стенки невелико. Уменьшение высоты стенки с 200 до 30 мм не привело к изменению средней величины поперечной усадки полки от первого слоя. И в данном случае очень большое изменение изгибной жесткости (момент инерции сечения балки уменьшился в 12 раз) не повлияло на усадку. Полученные данные о влиянии геометрических параметров балок на поперечную усадку находятся в полном соответствии с результатами главы IV.

В работе было исследовано влияние на поперечную усадку факторов, связанных с технологией сварки балок: способа и погонной энергии сварки (в главе II), остаточных напряжений от продольных швов, многослойности и последовательности сварки слоев поперечного шва. Остаточные напряжения от продольных швов существенно увеличивают поперечную усадку полки и прогибы балки. Усадка резко увеличивается в зонах действия сжимающих продольных напряжений в конце и особенно в начале поперечного шва, что связано, видимо, с увеличением поперечных перемещений на стадии нагрева под действием продольных напряжений. Растягивающие продольные напряжения поперечную усадку полки от поперечного шва не уменьшают, т.к. они действуют в узкой жесткой зоне полки вблизи стенки и как бы несколько увеличивают и без того высокую поперечную жесткость сварного соединения в этой зоне. Эффект увеличения поперечной усадки тем больше, чем выше уровень сжимающих продольных напряжений. Получена линейная зависимость приращения поперечной усадки $\Delta \epsilon$, вызванного действием сжимающих продольных напряжений, от их максимальной величины. Величина максимальных сжимающих напряжений связана с таким распространенным расчетным параметром, как фиктивная продоль-

ная усадочная сила P_{yc} . С привлечением экспериментальных данных Б.П.Азимова нами получена зависимость $\Delta\epsilon$ от величины P_{yc} .

$$\Delta\epsilon = -7,2 \cdot 10^{-3} + 3,44 \cdot 10^{-7} \cdot P_{yc}, \text{ см} \quad (2)$$

Зависимость (2) справедлива для случаев сварки поперечных швов на полках тавровых и двутавровых балок при $2 \cdot 10^4 \text{ кг} \leq P_{yc} \leq 5 \cdot 10^4 \text{ кг}$. При $P_{yc} < 2 \cdot 10^4 \text{ кг}$ $\Delta\epsilon = 0$.

При сварке 3-х слойных поперечных угловых швов на пластинах и полках балок установлен характер приращения поперечной усадки и прогибов от различных слоев.

В случае сварки коротких многослойных поперечных швов на пластинах и на полках балок (при малой ширине полки) с увеличением количества слоев существенно возрастает неравномерность распределения поперечной усадки по длине шва: в начале шва усадка значительно больше, чем в конце, что связано с влиянием остаточных поперечных напряжений от предыдущих слоев. Эта неравномерность вызывает дополнительный прогиб балки в плоскости полки, который может достигать значительной величины. Экспериментально показано, что эту неравномерность усадки можно резко уменьшить, изменяя направление сварки последующего слоя по сравнению с предыдущим.

Остаточные поперечные напряжения от поперечного шва в полке невелики. На концах поперечного шва и в зоне расположения стенки они сжимающие, в остальной части полки — растягивающие.

УГ. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДЕФОРМАЦИЙ БАЛОК ОТ ПОПЕРЕЧНЫХ ШВОВ И ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

Полученные результаты позволили разработать расчетные зависимости и создать инженерную методику расчета остаточных деформаций балок от поперечных швов. Структура методики была определена особенностями поперечной усадки полки и прогибов балки от поперечных швов, установленными в главах Ц,Ш,IV,У. Последовательность расчета деформаций балки от поперечного шва рассматривается применительно к шву I на рис.2.

После определения количества тепла, введенного в полку, определяется поперечная усадка полки без учета влияния остаточных напряжений от продольного шва. При этом принимается, что в зоне $l_{нд}$ полки (рис.2), жестко связанной со стенкой, поперечная усадка формируется в условиях, близких к условиям ее формирования при укладке валика на полубесконечном теле, а в остальной части полки $l_{нл} = B_n - l_{нд}$, как в свободной пластине. В случае одностороннего продольного шва

$l_{n\delta} = \delta_c + K$, в случае двустороннего - $l_{n\delta} = \delta_c + 2K$, где δ_c - толщина стенки, K - величина катета. Поперечная усадка в зоне $l_{n\delta}$ ($\Delta_{n\delta}$) определяется по формуле (1) при значении $A = A_{n\delta} = 0,15$, при этом $\delta = \delta_p = \delta_n + K$. Здесь δ_n - толщина полки, δ_p - условная расчетная толщина, учитывающая теплоотвод из полки в продольные швы и примыкающую зону стенки. Поперечная усадка в зоне l_{nl} (Δ_{nl}) также определяется по формуле (1) при $\delta = \delta_n$ и при значении A , вычисленном по одной из приведенных в работе формул, которые являются аналитическим представлением зависимостей, изображенных на рис. 1. Усадка полки балки без остаточных напряжений от продольных швов в случае однослойного поперечного шва или первого слоя равна

$$\Delta_{cp} = \frac{\Delta_{n\delta} \cdot l_{n\delta} + \Delta_{nl} \cdot l_{nl}}{B_n} \quad (3)$$

Поперечная усадка полки балки с остаточными напряжениями для того же случая может быть вычислена по формуле

$$\Delta_1 = \Delta_{cp} + \Delta_{\sigma} \quad (4)$$

Здесь Δ_{σ} - приращение усадки от действия остаточных напряжений, вычисляемое по формуле (2) в зависимости от величины . Приращение поперечной усадки от каждого слоя, смещенного на полку, равно

$$\Delta_n = (0,5 \div 0,7) \cdot \Delta_1 \quad (5)$$

Коэффициент 0,5 относится к балкам с крупными двусторонними продольными швами, 0,7 - к балкам с односторонними швами с малой величиной катета. Суммарная поперечная усадка полки от многослойного поперечного углового шва будет равна

$$\Delta_{non} = \Delta_1 + m \cdot \Delta_n, \quad (6)$$

где m - количество слоев, смещенных на полку.

Для балок без остаточных напряжений от продольных швов в формулы (5) и (6) вместо Δ_1 подставляется Δ_{cp} .

Использование вычисленной величины Δ_{non} в известных расчетных зависимостях, полученных на основе метода фиктивных сил и приведенных в работах Николаева Г.А. и Винокурова В.А., позволяет определить углы излома, прогибы и продольные укорочения балок от поперечных швов. Основные положения изложенной методики применимы и для определения деформаций балок от приварки поперечных ребер жесткости (швы 2 и 3 на рис. 2) к полкам и стенке. Сравнение результатов расчета по данной методике с результатами экспериментов показало хорошую сходимость расчетных величин поперечной усадки пластин и полок, а также прогибов балок с экспериментально определенными величинами.

Полученные расчетные зависимости, разработанная методика вошли в "Инструкцию для расчета остаточных деформаций и перемещений при сварке балочных стальных металлоконструкций". Инструкция, выпущенная на кафедре "Машины и автоматизация сварочных процессов" МВТУ им. Н.Э.Баумана, предназначена для машиностроительных заводов.

ВЫВОДЫ

1. При сварке поперечных швов в балочных конструкциях основное влияние на поперечную усадку оказывают факторы, действующие непосредственно в зоне сварного соединения. Степень влияния на поперечную усадку отдаленных зон сварной конструкции невелика.

2. При сварке швов с неполным проплавлением величина поперечной усадки зависит от способа сварки, рода тока, глубины и формы проплавления. Установлено, что коэффициент A , определяющий вместе с удельной погонной энергией величину поперечной усадки при различных степенях проплавления, линейно зависит от удельной погонной энергии.

3. Получены зависимости для определения коэффициента A при неполных проплавлениях в довольно широком диапазоне погонных энергий сварки под флюсом на переменном токе и в среде углекислого газа. В случае проплавлений, близких к полным, коэффициент A равен единице, при наплавке на полубесконечное тело его можно принять равным 0,15. Для промежуточных случаев даны таблицы и формулы.

4. Разработан метод численного решения с использованием ЦМ упруго-пластической сварочной задачи о поперечной усадке пластин при неполных проплавлениях.

5. На основе теоретического исследования с помощью разработанного метода численного решения сварочной задачи и результатов экспериментов установлены основные закономерности образования поперечной усадки пластин при неполных проплавлениях.

6. Основными причинами уменьшения поперечной усадки пластин, подкрепленных поперечными к шву элементами жесткости, являются теплоотвод из зоны сварного соединения в эти элементы, а также высокая поперечная жесткость сварного соединения в зоне, связанной с элементами жесткости. Изгибная жесткость существенного влияния на поперечную усадку не оказывает.

7. При сварке поперечных швов на полках балок без остаточных напряжений от продольных швов на величину поперечной усадки и прогибов оказывают влияние величина катета и вид продольного шва (односторонний или двусторонний шов). Влияние толщины стенки невелико, высота стенки на поперечную усадку полки существенно не влияет.

8. Установлено, что остаточные напряжения от крупных продольных швов в балках являются фактором, значительно увеличивающим поперечную усадку полки от поперечных швов. Поперечная усадка тем больше, чем выше уровень сжимающих продольных напряжений. Получена аналитическая формула для определения приращения поперечной усадки полок тавровых и двутавровых балок, вызванного действием остаточных напряжений, в зависимости от величины продольной усадочной силы.

9. При сварке многослойных угловых швов на пластинах поперечная усадка от первого слоя пропорциональна количеству тепла, введенного в пластину. Слой, смещенный на пластину, вызывает приращение усадки, равное величине усадки от первого слоя; слой, смещенный на привариваемый конструктивный элемент, дает незначительное увеличение усадки.

10. При сварке многослойных угловых поперечных швов на полках балок, сваренных продольными швами, наибольшая величина поперечной усадки и прогиба имеет место от первого слоя. Слой, смещенный на полку, вызывает приращение усадки, равное 50-70% усадки от первого слоя; слой, смещенный на привариваемый конструктивный элемент, усадку и прогиб балки не увеличивает.

11. Разработана инженерная методика расчета деформаций сварных тавровых и двутавровых балок от поперечных швов, учитывающая конструктивные и технологические особенности сварных балок, используемых в конструкциях тяжелого машиностроения. Из сравнения результатов расчета деформаций по данной методике с результатами эксперимента и из приведенных примеров расчета видно, что разработанная методика достоверна, проста и оперативна в использовании.

12. Материалы работы, созданная методика явились составной частью "Инструкции для расчета деформаций и перемещений при сварке балочных стальных металлоконструкций". Инструкция используется на Ново-Краматорском машиностроительном заводе им. В.И.Ленина, а также выслана в ряд организаций, занимающихся вопросами сварки балочных конструкций, по запросу данных организаций. Планируется создание на ее основе отраслевой инструкции.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Шип В.В., Винокуров В.А., Григорьянц А.Г. Особенности поперечной усадки пластин, подкрепленных элементами жесткости. - "Известия ВУЗов. Машиностроение", 1972, № II.

2. Шип В.В., Винокуров В.А., Григорьянц А.Г. Исследование де-

формаций сварных балок от поперечных швов. - "Сварочное производство", 1973, № 6.

3. Винокуров В.А., Григорьянц А.Г., Азимов Б.П., Шип В.В.
Деформации и перемещения при сварке балочных стальных конструкций.
- "Прочность сварных конструкций и точность их изготовления". Тезисы докладов. МВТУ им. Н.Э. Баумана М., 1973.

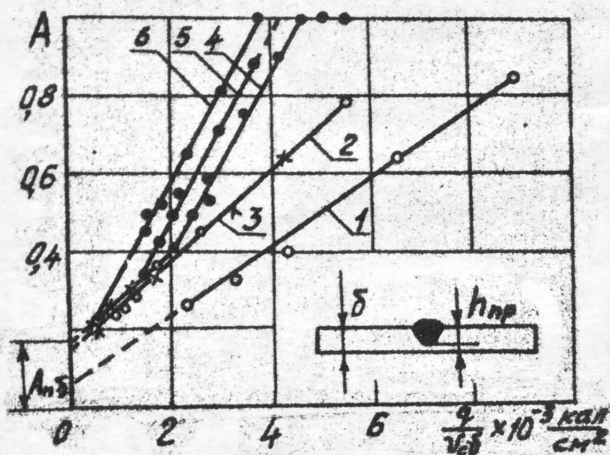


Рис.1.

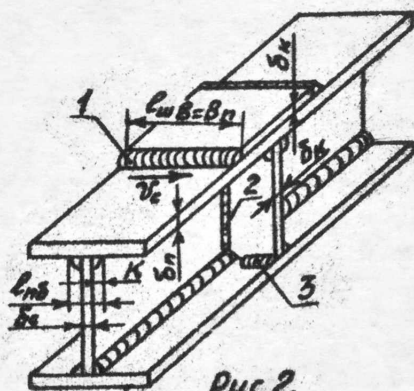


Рис.2.