

М202543

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

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

АЗИМОВ Байрам Пигамович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ СВАРНЫХ
БАЛОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ОТ ПРОДОЛЬНЫХ ШВОВ**

(05.04.05 — Технология и машины сварочного производства)

Диссертация написана на русском языке

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



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, доцент ВЕРШИНСКИЙ А. В.

Ведущее предприятие: ЦНИИПроектстальконструкция.

1973 г.

» 1973 г.

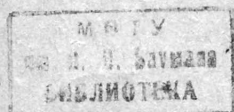
дена Ленина и ордена
технического училища
107005, 2-я Бауман-

печатью, просьба вы-

в библиотеке Учи-

M202543

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ



Одной из важных проблем при производстве сварных конструкций является определение сварочных деформаций, напряжений и перемещений, влияние которых на характеристики сварных соединений и конструкций в процессе эксплуатации весьма разнообразно. Наличие сварочных деформаций и напряжений приводит к отклонениям действительных геометрических форм и размеров от проектных, что в свою очередь увеличивает трудоемкость изготовления сварной конструкции, снижает эксплуатационные качества, способствует снижению устойчивости и несущей способности, затрудняет сборку отдельных узлов, а в некоторых случаях делает ее даже невозможной. Изучение сварочных деформаций, напряжений и перемещений, а также получение расчетных зависимостей, связывающих основные виды деформаций и перемещений в сварных соединениях с технологическими параметрами процесса сварки и геометрическими характеристиками свариваемых элементов, позволяет правильно и обоснованно назначать припуски на механическую обработку и разрабатывать мероприятия по устранению и уменьшению искажений формы и размеров.

Весьма распространенными среди стальных машиностроительных конструкций являются сварные балки. Исследованию деформаций, напряжений и перемещений в балочных конструкциях при сварке их продольными швами посвящена данная работа, состоящая из введения, шести глав и общих выводов.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ОБ ИССЛЕДОВАНИИ ДЕФОРМАЦИЙ БАЛОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ СВАРКЕ ИХ ПРОДОЛЬНЫМИ ШВАМИ

В теории сварочных деформаций и напряжений основное внимание уделяется изучению двух элементов деформации — продольной усадочной силе R_{yc} и поперечной усадке $\Delta_{\text{пос}}$. Продольная усадочная сила определяется суммой остаточных пластических деформаций укорочения, образующихся в результате неравномерного нагрева материала и последующего остывания. Поперечная усадка определяется поперечными перемещениями кромок свариваемых пластин при нагреве их перемещающимся источником тепла и последующей фиксации этого перемещения кристаллизующимся металлом на стадии охлаждения.

При сварке продольными швами балочных конструкций из низкоуглеродистых сталей образование напряжений и деформаций происходит практически также, как и при сварке стык.

Основными компонентами деформаций в этом случае является значительная деформация изгиба и укорочение балки из-за продоль-

ной усадке швов.

Вопросам изучения образования продольных деформаций и напряжений посвящены работы Николаева Г.А., Очерблома Н.О., Вологодина В.П., Трочуна И.П., Прохорова Н.Н., Машкевича В.Д., Кузьминова С.А., Байковой И.Н. и других. Основным направлением этих работ является графоаналитический метод определения сварочных деформаций и напряжений в предположении одноосности напряженного состояния.

Анализ работ ряда вышеназванных авторов показывает, что в большинстве из них основное внимание уделялось изучению влияния на продольную усадочную силу погонной энергии сварки q/v_c , в результате чего была установлена линейная зависимость между усадочной силой P_{yc} и q/v_c . Коэффициент пропорциональности $B = \frac{P_{yc}}{q/v_c}$ принимался постоянным вне зависимости от изменения удельной погонной энергии $q/v_c \delta$. Соотношения между усадочной силой и режимом сварки, предложенные Очерблом Н.О., Кузьминовым С.А. и другими, нередко дают величину P_{yc} , отличающуюся как правило, в большую сторону от действительной величины усадочной силы, определяемой экспериментально на низкоуглеродистых сталях.

Из практики изготовления сварных конструкций известно, что кроме погонной энергии сварки на величину P_{yc} заметно влияет и жесткость свариваемого элемента конструкции. Однако в настоящее время вопрос о влиянии жесткости на усадочную силу изучен крайне недостаточно. Результаты теоретических и экспериментальных исследований различных авторов противоречивы. Установление истинной зависимости между усадочной силой, режимом сварки и жесткостью является крайне важным для практических целей.

На основании вышеизложенного сформулированы следующие задачи исследования:

1. Установить влияние технологических и конструктивных параметров на величину усадочной силы P_{yc} в сварных балках: погонной энергии сварки, жесткости свариваемого элемента, количества слоев при многопроходной сварке, схемы распространения тепла.

2. Разработать расчетный метод определения усадочной силы в зависимости от технологических параметров процесса сварки с учетом жесткости свариваемого элемента конструкции.

3. Установить количественные соотношения для определения усадочной силы P_{yc} в зависимости от режима сварки и жесткости конструкции с целью разработки инструкции по расчету общих сварочных деформаций в балках.

П. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НА УСАДОЧНУЮ СИЛУ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СВАРИВАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, РЕЖИМА СВАРКИ И ПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕПЛОТДАЧИ

Основными факторами, влияющими на деформации, напряжения и продольную усадочную силу являются режим сварки, жесткость свариваемых элементов, условия теплоотдачи с поверхности, схема распространения тепла.

При изучении влияния жесткости на величину усадочной силы был предложен расчетный метод определения $P_{ус}$ с учетом жесткости свариваемых элементов. Сущность этого метода заключается в следующем.

Анализ большого количества экспериментальных эпюр распределения остаточных напряжений и пластических деформаций, полученных при сварке пластин из низкоуглеродистой стали, показал, что они имеют форму, близкую к трапеции, а в зоне разогрева выше 500° остаточные напряжения $\sigma_{ост}$ постоянны и достигают предела текучести материала σ_T . Это обстоятельство позволяет заменить истинную эпюру остаточных напряжений и деформаций трапецеидальной эпюрой, которая и использована при установлении зависимости между усадочной силой и жесткостью при одно- и многопроходной сварке в предположении одноосности напряженного состояния.

Усадочная сила при укладке однопроходного одностороннего шва в тавровых, нахлесточных и уголковых соединениях балочных конструкций, а также при сварке встык с учетом продольной и изгибной жесткости $1: \left(\frac{e_x^2}{J_x} + \frac{e_y^2}{J_y} + \frac{1}{F} \right)$ вычисляется по формуле:

$$P_{ус} = \frac{P_{ус абс жс}}{1 - \frac{P_{ус абс жс}}{\sigma_T} \left(\frac{e_x^2}{J_x} + \frac{e_y^2}{J_y} + \frac{1}{F} \right)}, \text{ кг} \quad (I)$$

где e_x, e_y - расстояния между точкой приложения усадочной силы и осями, проходящими через центр тяжести площади поперечного сечения F ; J_x, J_y - осевые моменты инерции, см^4 ; $P_{ус абс жс} = V_{абс жс} \frac{q_0}{\delta_{расч}}$ - усадочная сила для абсолютно жесткого тела, зависящая только от погонной энергии сварки q/v_s ; $V_{абс жс}$ - коэффициент пропорциональности, не являющийся величиной постоянной и определяемый экспериментально в зависимости от удельной погонной энергии сварки $q_0 = q/v_s \delta_{расч}$, кал/см^2 ; σ_T - предел текучести материала, кг/см^2 ; $\delta_{расч}$ - расчетная толщина свариваемых элементов, см .

При многопроходной сварке усадочная сила $P_{усн}$ с учетом продольной и изгибной жесткости относительно одной оси $x-x$ вычисляется по формуле

$$P_{ycn} = P_{yc} \left[1 + \frac{\Delta F_{nл}}{F_{nл}} \left(\frac{e_x^2}{F_x} + \frac{1}{F} \right) \left(\frac{P_{усадб.ж.}}{\sigma_T} + F_{nл} + \Delta F_{nл} \right) \right] + \Delta F_{nл} \sigma_T \quad (2)$$

где $F_{nл} = \frac{2P_{усадб.ж.}}{\sigma_T} - F_1$ — площадь зоны пластических деформаций при укладке однопроводного одностороннего шва; $\Delta F_{nл}$ — приращение площади зоны пластических деформаций при многопроходной сварке, определяемое в зависимости от количества проходов; $F_1 = \frac{0,484 q}{\sigma_T \cdot 500 \eta_c}$ — площадь зоны с остаточными напряжениями $\sigma_{хост} = \sigma_T$, определяемая приближенно для случая быстро движущегося источника.

Проведенный количественный анализ выражения (1) показывает, что с изменением жесткости свариваемых элементов конструкции при постоянной погонной энергии q/η_c величина усадочной силы P_{yc} , а следовательно и величина коэффициента пропорциональности $B = \frac{P_{yc}}{q/\eta_c}$ может изменяться до 1,5 раз.

При анализе влияния поверхностной теплоотдачи и параметров режима сварки на усадочную силу с целью исключения влияния жесткости и схемы распространения тепла был рассмотрен случай наплавки валика на пластину неограниченной ширины с полным проплавлением всей толщины δ , то есть принималась схема линейного источника тепла в бесконечной пластине. Было установлено, что в случае наличия поверхностной теплоотдачи с увеличением удельной погонной энергии сварки $q/\eta_c \delta_{расч}$ рост ширины зоны пластических деформаций и усадочной силы в бесконечно широкой пластине $P_{усадб.ж.}$ происходит менее интенсивно по сравнению с увеличением погонной энергии q/η_c , а следовательно коэффициент пропорциональности $B_{адб.ж.}$, характеризующий усадочную силу, уменьшается. Это уменьшение $B_{адб.ж.}$ достигает 50% и более. В случае отсутствия поверхностной теплоотдачи коэффициент пропорциональности $B_{адб.ж.}$ сохраняется постоянным при изменении удельной погонной энергии q_0 .

Влияние схемы распространения тепла на величину усадочной силы было рассмотрено для двух крайних случаев: а) наплавки валика с полным проплавлением на бесконечно широкую пластину (схема линейного источника тепла); б) наплавки валика на полубесконечное тело (схема точечного источника тепла). Расчетом и экспериментально установлено, что усадочная сила в случае линейного источника на (25+30)% больше, чем в случае точечного источника тепла.

Таким образом, продольная усадочная сила может изменяться в широких пределах в зависимости от жесткости свариваемых элементов, удельной погонной энергии сварки и схемы распространения тепла. При производстве сварных конструкций эти отклонения являются немалыми и их необходимо учитывать.

Приведенные в этой главе зависимости о влиянии на усадочную силу различных факторов получены для простых схем в предположении одноосности напряженного состояния и дают качественную картину.

Количественные зависимости могут быть получены двумя путями: либо использованием более точных методов расчета на базе теории упругости и пластичности, либо экспериментальным путем.

Последующие главы работы посвящены расчетному и экспериментальному установлению зависимости усадочной силы от технологических параметров процесса сварки и жесткости свариваемых элементов.

Ш. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О НАПРЯЖЕНИЯХ, ДЕФОРМАЦИЯХ И УСАДОЧНОЙ СИЛЕ В ПЛАСТИНЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ И УСЛОВИЯХ СВАРКИ

При расчете сварочных деформаций и напряжений весьма перспективным представляется использование аппарата теории упругости и пластичности. Аппарат теории упругости применительно к сварочному процессу был использован в работах Лейкина Н.С., Бакши О.А., Винокурова В.А., Игнатьевой В.С., Касаткина Б.С. и Лобанова Л.И. и других. Результаты упругого решения дают важные представления о качественной картине распределения напряжений и деформаций. Для получения точных количественных зависимостей при решении сварочных задач применяется аппарат теории пластичности, который был использован в работах Бакши О.А., Талыпова Г.Б., Игнатьевой В.С., Винокурова В.А. и Григорьянца А.Г., Сагалевича В.М. и Золотарева Б.Б., Махненко В.И. и Великоиваненко Е.А.

Сварку таврового, нахлесточного или углового соединений в отношении образования деформаций и напряжений в элементах можно рассматривать как наплавку валика на лист и на кромку пластины. Поэтому решение задачи о напряжениях и деформациях в численном виде, которое рассматривается в данной главе, было проведено для случая наплавки валика на бесконечную пластину с целью расчетного установления зависимости усадочной силы от удельной погонной энергии сварки и поверхностной теплоотдачи. Задача решалась с учетом неодновременности укладки шва по его длине с использованием методов теории упругости для двухосного напряженного состояния.

В этом случае компоненты напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ в бесконечной пластине, вызванные квазистационарным температурным полем от линейного источника тепла с учетом теплоотдачи с поверхностей, определяются в предположении абсолютно упругой деформационной характеристики материала с постоянным модулем упругости E_0 . Значения

компонентов напряжений вычислялись численным интегрированием при помощи метода Гаусса на ЦВМ. Пределы интегрирования назначались в зависимости от координат рассматриваемой точки пластины и заданной погрешности вычислений.

Используя формулы теории упругости для случая плоско-напряженного состояния определяются компоненты деформаций упругого поля, соответствующие напряжениям $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$.

Далее с целью определения зоны пластических деформаций и усадочной силы при сварке бесконечной пластины $R_{усабс.ж.}$ выполняется приближенное пластическое решение задачи, заключающееся во введении гипотезы, согласно которой в образовании остаточных пластических деформаций $\epsilon_{х_{пл.ост.}}$, а значит и усадочной силы, участвуют только продольные деформации ϵ_x упругого решения. На этом этапе решения используются зависимости предела текучести σ_T и модуля упругости E материала от температуры. При определении $\epsilon_{х_{пл.ост.}}$, характеризующих $R_{усабс.ж.}$, решение задачи ведется путем последовательного прослеживания во времени развития упругопластических деформаций от начала нагрева до полного остывания.

Результаты решения плоской задачи сравнивались с результатами решения одноосной задачи, использующей гипотезу плоских сечений и мгновенную укладку шва, с последовательным учетом на стадиях нагрева и охлаждения пластических деформаций, в образовании которых участвуют лишь только температурные деформации αT .

Для решения задач на ЦВМ "Минск-22" были составлены алгоритмы и программы решения в системе инженерного автокода (АКИ).

Решение подобных задач позволяет, изменяя начальные условия в задачах, варьировать параметрами процесса сварки, условиями теплоотдачи с поверхностей пластин, что в свою очередь дает возможность установить количественные соотношения между $R_{усабс.ж.}$ и погонной энергией сварки в зависимости от удельной энергии q_0 . По результатам решения плоской задачи применительно к низкоуглеродистым сталям установлено, что при поверхностной теплоотдаче, соответствующей теплоотдаче в воздух, ($\alpha_T = 0,0005 \text{ кал/см}^2 \text{сек}^\circ\text{C}$), коэффициент пропорциональности $V_{абс.ж.}$ с увеличением удельной погонной энергии в диапазоне $q_0 = (1250-9000) \text{ кал/см}^2$ уменьшается от 5,77 до 3,4 кг-см/кал. Увеличение поверхностной теплоотдачи до $\alpha_T = 0,001 \text{ кал/см}^2 \text{сек}^\circ\text{C}$ приводит к уменьшению усадочной силы на 15-20%.

Сопоставление результатов решения плоской и одноосной задач

показывает, что в первом случае усадочная сила и коэффициент $\delta_{\text{ус, макс}}$ на 15-25% меньше, чем во втором случае, что объясняется меньшей величиной продольных деформаций упругого решения ϵ_x по сравнению с температурными деформациями ΔT .

Анализ, полученных из упругого решения результатов распределения напряжений, показывает, что характер их распределения существенно отличается от характера распределения температурных напряжений $\Delta T \epsilon_0$. Следует отметить, что продольные напряжения σ_x заметно меньше величины $\Delta T \epsilon_0$, в особенности вблизи источника тепла, что объясняется податливостью окружающего металла вследствие его упругости.

В предположении одноосности поля напряжений была решена задача и для пластин конечной ширины с целью выявления влияния жесткости на усадочную силу. Так же, как и в предыдущей главе, установлено уменьшение усадочной силы с увеличением жесткости конструкции, что было подтверждено многочисленными экспериментами, результаты которых представлены в главе V.

IV. МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СВАРНЫХ БАЛОК НА ИХ ДЕФОРМАЦИЮ ОТ ПРОДОЛЬНЫХ ШВОВ

Для установления количественных зависимостей между усадочной силой, режимом сварки и жесткостью свариваемых элементов конструкции, а также проверки полученных расчетом закономерностей было проведено экспериментальное исследование для случая сварки балок с различной продольной и изгибной жесткостью, выполненных из низкоуглеродистой стали Ст.3 толщиной 8, 12 и 16 мм. Рассматривались следующие типы сварных соединений: тавровое, нахлесточное и угловое. Размеры балок были выбраны такими, чтобы максимально приблизиться к размерам машиностроительных балочных конструкций. Для тавровых балок использовались пластины следующих размеров: стенка - 2500x200x12 мм, полка - 2500x200x12(16) мм. Размеры свариваемых пластин в угловых балках были 2500x200x12(16) мм. Для балок с нахлесточными соединениями размеры нахлесточного элемента, привариваемого к стенке тавровой балки, были 2500x100x8(12) мм.

Сварка производилась наиболее часто применяемыми при изготовлении балочных конструкций способами. Режимы сварки подбирались экспериментально и соответствовали применяемым на производстве. При этом погонная энергия сварки была следующая: при сварке в $\text{CO}_2 \frac{Q}{v_c} \approx 2600$ кал/см, при сварке под флюсом $\frac{Q}{v_c} \approx 2900$ кал/см, при ручной сварке

электродами типа УОНИ 13 $\frac{q}{v_c} \approx 8500$ кал/см. Для более точного расчета эффективной тепловой мощности сварочной дуги было проведено экспериментальное определение эффективного к.п.д. путем калориметрических опытов.

Одновременно при исследовании эффективного к.п.д. была установлена зависимость между погонной энергией сварки q/v_c и площадью наплавленного металла $F_{ш}$, которая при автоматической сварке а) в CO_2 - $q/v_c = 9000 F_{ш}$ [кал/см]; б) под флюсом - $q/v_c = 12500 F_{ш}$ [кал/см]; в) при ручной сварке - $q/v_c = 12000 F_{ш}$ [кал/см]. Полученные зависимости позволяют в случаях, когда режим сварки неизвестен, но задан катет шва, определить приближенно погонную энергию сварки. Эти зависимости отличаются от зависимостей, приведенных в работах ряда авторов.

При экспериментальном определении усадочной силы при одно- и многопроходной сварке балок различной жесткости были использованы три самостоятельных способа: 1) с использованием эпюры распределения остаточных пластических деформаций $\epsilon_{х_{пл.ост.}}$, площадь под которой пропорциональна усадочной силе

$$P_{yc} = E_0 \sum \epsilon_{х_{пл.ост.}} F_{\phi} \quad (3)$$

где F_{ϕ} - площадь сечения фибры с учетом ширины реза;

2) путем замера прогиба балки f , определяемого на базе $L_0 = 1890$ мм на специальном приспособлении

$$P_{yc} = \frac{8 E_0 J_x f}{L_0^3 e_x} \quad (4)$$

3) путем замера деформации нейтральной оси балки $\epsilon_{ц.т.}$

$$P_{yc} = \epsilon_{ц.т.} E_0 F \quad (5)$$

Остаточные напряжения и пластические деформации определялись механическим способом, основанным на принципе полной разгрузки участков металла от остаточных напряжений при их разрезке. Измерения проводились съемным механическим деформометром конструкции МВТУ им. Баумана на базе 100 мм. Эта часть исследований проводилась только на тавровых балках при одно- и многопроходной сварке в CO_2 с использованием методики, позволяющей определять остаточные напряжения и деформации также непосредственно и в зоне углового шва.

У. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И СРАВНЕНИЕ ИХ С РАСЧЕТНЫМИ ВЕЛИЧИНАМИ И СУЩЕСТВУЮЩИМИ ФОРМУЛАМИ

Экспериментальные результаты, полученные по изложенным в гл. IV методикам, позволили установить количественные соотношения, необходимые при вычислении усадочной силы в зависимости от режима сварки и жесткости свариваемых элементов конструкции, а также подтвердить результаты расчетов, выполненных в предыдущих главах.

Экспериментально устанавливается, что с уменьшением жесткости величина фиктивной усадочной силы P_{yc} увеличивается (рис. 1, область 1). В исследованном диапазоне жесткостей при изменении $f: (\frac{E^2}{\sigma} + f)$ от 42,5 см² до 15,65 см² коэффициент пропорциональности $B = \frac{P_{yc}}{q/v_c}$, характеризующий усадочную силу, возрастал: при сварке в CO₂ ($q/v_c = const = 2500 - 2800$ кал/см) от 8 кг.см/кал до 10,5+11 кг.см/кал; при сварке под флюсом ($q/v_c = const \approx 2600$ кал/см) от 8,1 кг.см/кал до 10 кг.см/кал. Полученные экспериментальные результаты хорошо совпадают с данными расчета, проведенного по предложенной формуле (1), учитывающей влияние жесткости на усадочную силу (рис. 1 кривая 2).

Результаты анализа, проведенного в главе II, указывают на нелинейную зависимость P_{yc} от погонной энергии сварки q/v_c . Для получения количественной зависимости между усадочной силой и режимом сварки была проведена обработка большого количества экспериментальных данных, полученных для различных q/v_c , при помощи выражения (1), с целью исключения влияния на усадочную силу жесткости конструкции. Установлено, что коэффициент пропорциональности $B_{абс.жс.}$, характеризующий усадочную силу $P_{уабс.жс.}$, уменьшается с увеличением удельной погонной энергии сварки q/v_c (рис. 2, область 1), причиной чего является, как ранее было установлено, существенное влияние поверхностной теплоотдачи.

Сопоставление значений коэффициентов $B_{абс.жс.}$, полученных из экспериментов и расчетными способами (рис. 3), показывает, что результаты решения плоской задачи (кривая 2) по сравнению с одноосной (кривая 3) значительно лучше согласуются с данными эксперимента (рис. 3).

Следует еще раз отметить, что в известных в настоящее время методах расчета коэффициент пропорциональности между P_{yc} и q/v_c принимается практически постоянным, в то время как он может меняться на 50% и более с изменением q_0 .

При вычислении коэффициента $B_{абс.жс.}$, необходимого при расчетном вычислении усадочной силы, можно пользоваться выражением

$$B_{абс.жс.} = \frac{23000}{q_0 + 3000} + 1,5 \quad (6)$$

полученным путем описания экспериментальных результатов (область I на рис. 2) гиперболической зависимостью, которая действительна в диапазоне удельных погонных энергий $q_0 = 1000 - 9000$ кал/см² (рис. 2, кривая 2).

Проведенный анализ экспериментально полученных данных распределения остаточных пластических деформаций при многопроходной сварке

тавровых балок позволил установить зависимости для определения приращения площади зоны пластических деформаций $\Delta F_{пл}$ при сварке как тавровых соединений, так и уголкового и нахлесточных соединений. Следует отметить, что при двухсторонней односторонней сварке по сравнению с односторонней при постоянной погонной энергии сварки q/v_c имеет место увеличение ширины зоны пластических деформаций только в полке, которое должно приниматься равным $\delta_c + 2 \times \frac{1}{3} K$, то есть $\Delta F_{пл}$ определяется толщиной стенки δ_c и катетом углового шва K .

При многосторонней сварке втавр $\Delta F_{пл}$ определяется приращением катета углового шва соответствующего прохода и толщиной стенки. При сварке уголкового соединения приращение площади зоны пластических деформаций $\Delta F_{пл}$ определяется практически площадью наплавленного металла проходов, следующих за первым проходом.

Полученные зависимости для определения $\Delta F_{пл}$ необходимы для расчетного определения усадочной силы при многосторонней сварке с помощью предложенной формулы (2), а также могут быть использованы при определении $F_{пл}$.

Экспериментально установлено, что при многосторонней сварке балок увеличение усадочной силы от последующих проходов происходит практически лишь от того валика, укладка которого дает приращение площади зоны пластических деформаций.

При двухсторонней односторонней сварке тавровых балок с $q/v_c = const$ усадочная сила $P_{усл-2}$ определяется следующим соотношением $P_{усл-2} = (1,3 + 1,44) B \cdot q/v_c$, что отличается от обычно рекомендуемого соотношения $P_{усл-2} = 1,15 B \cdot q/v_c$. Сопоставление результатов экспериментов с результатами расчетов, выполненных по формуле (2) для многосторонней сварки, дает вполне удовлетворительную сходимость.

При сварке тавровых и нахлесточных соединений балок одно- и многосторонними продольными швами наряду с определением продольной усадочной силы определяли поперечную усадку $\Delta_{поп}$ и деформацию гребовидности β .

Результаты исследования показывают, что при сварке длинными швами величина $\Delta_{поп}$ практически остается постоянной по всей длине шва. Установлено количественное соотношение между $\Delta_{поп}$ и удельной погонной энергией сварки $q/v_c \delta_{расч}$:

$$\Delta_{поп} = A \cdot \frac{\alpha}{\sigma_f} \cdot \frac{q}{v_c \delta_{расч}} \quad (7)$$

Коэффициент пропорциональности A в формуле (7) изменяется в пределах: а) для случаев сварки с малой удельной погонной энергией $q/\eta\delta_{расч}=(1000-2000)$ кал/см² $A=0,32-0,38$; б) для случаев сварки с большими $q/\eta\delta_{расч}=(5000-6000)$ кал/см² $A=0,88-1,14$. При других значениях $q/\eta\delta_{расч}$ для определения коэффициента A следует пользоваться зависимостями, предложенными в работах Шипа В.В., Винокурова В.А. и Григорьянца А.Г.

Сварка второго углового шва в тавровом соединении с неизменной погонной энергией q/η вызывает приращение поперечной усадки в полке на величину примерно равную $\Delta_{пол}$ от первого углового шва. При многопроходной сварке втавр увеличение поперечной усадки в полке вызывает только лишь валики, смещенные на полку, а приращение $\Delta_{пол}$ определяется долей тепла, отводимой в нее.

Экспериментально установлено, что деформация грибовидности полки тавровой балки практически постоянна по длине шва и может определяться при сварке в CO_2 и под флюсом при помощи номограмм Кузьмина С.А. и Михайлова В.С. Также установлено, что угловой поворот полки тавровой балки относительно стенки существенно зависит от их предварительного закрепления друг относительно друга, то есть длины и шага прихваток. При сборке тавровой балки ниточным швом последующая укладка основного шва практически не вызывает углового поворота полки относительно стенки, т.е. винтообразность балки отсутствует.

У1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ДЕФОРМАЦИЙ БАЛОК ПРИ СВАРКЕ ИХ ПРОДОЛЬНЫМИ ШВАМИ.

На основе проведенных в работе экспериментальных исследований и предложенного расчетного метода определения усадочной силы с учетом жесткости свариваемых элементов предложена методика расчета общих деформаций балочных конструкций при одно- и многопроходной сварке их продольными швами.

Эта методика расчета явилась составной частью выпущенной на кафедре "Машины и автоматизация сварочных процессов" ИЭТУ им. Н.Э.Баумана "Инструкции для расчета деформаций и перемещений при сварке балочных стальных металлоконструкций", которая предназначена для машиностроительных заводов и в настоящее время используется на Ново-Краматорском машиностроительном заводе им. В.И.Ленина.

Использование предложенной методики расчета общих деформаций от продольных швов в балочных конструкциях рассмотрено в приведенных в работе примерах по определению продольного укорочения, изгиба и угла поворота концов тавровой и двутавровой балок при одно- и многопроходной сварке.

ВЫВОДЫ

1. В результате литературного обзора, анализа известных данных и проведенных в работе экспериментов и расчетов установлено, что в настоящее время в известных методах расчета коэффициент пропорциональности между усадочной силой и погонной энергией сварки практически принимается постоянным, не учитывается жесткость свариваемых элементов и схема распространения тепла.

2. На основе анализа по схеме одноосного напряженного состояния установлено, что основными факторами, влияющими на величину продольной усадочной силы, являются жесткость свариваемых элементов и удельная погонная энергия сварки. С уменьшением жесткости уменьшаются пластические деформации удлинения на стадии остывания, что приводит к росту остаточных пластических деформаций укорочения, а следовательно и усадочной силы. При увеличении удельной погонной энергии величина коэффициента пропорциональности между усадочной силой и погонной энергией сварки уменьшается вследствие существенного влияния теплоотдачи.

3. Путем численного решения на ЦВМ упругой задачи о напряжениях и деформациях в предположении двухосного напряженного состояния и неодновременности укладки шва по его длине показано, что распределение напряжений и деформаций существенно отличается от характера температурных напряжений и деформаций по гипотезе плоских сечений. Продольные напряжения упругого решения σ_x заметно меньше напряжений $\sigma_{xT\theta}$, вследствие податливости металла, окружающего зону нагрева.

4. Выполнены приближенные пластические решения об определении усадочной силы с использованием результатов плоской задачи и на основе одноосного напряженного состояния путем последовательного прослеживания во времени развития упругопластических деформаций.

5. Разработана методика экспериментального определения остаточных деформаций и напряжений, а также усадочной силы в сварных балках от продольных швов тремя самостоятельными способами: с ис-

пользованием эпилы остаточных пластических деформаций, путем замеров прогиба балки и деформации нейтральной оси балки.

6. На основе многочисленных экспериментов со сварными балками и пластинами установлена зависимость усадочной силы от режима сварки, которая носит нелинейный характер. Расчетом и экспериментально показано, что коэффициент пропорциональности между усадочной силой и погонной энергией сварки уменьшается в 1,5-2,0 раза с увеличением удельной погонной энергии в диапазоне $q_{\text{с}} = (1000-9000)$ кал/см² и может определяться предложенной зависимостью (6).

7. Экспериментально и расчетом установлено, что с уменьшением жесткости свариваемых балок в рассмотренном диапазоне усадочная сила $P_{\text{ус}}$ возрастает на 30-40% для исследованных погонных энергий. Предложена зависимость для определения $P_{\text{ус}}$ с учетом жесткости, предела текучести материала и режима сварки при одно- и многопроходной укладке швов.

8. При сварке тавровых и нахлесточных соединений продольными швами поперечная усадка и угловая деформация полки тавровой балки распределяется по длине шва практически равномерно.

9. На основе проведенных исследований разработана новая методика расчета деформаций балочных конструкций от продольных швов, которая изложена в выпущенной МВТУ им. Баумана инструкции, предназначенной для машиностроительных заводов и используемой в настоящее время на НКМЗ им. В.И.Ленина.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Азимов Б.П., Винокуров В.А., Григорьянц А.Г. Влияние жесткости конструкций и погонной энергии сварки на усадочную силу. "Сварочное производство", 1973, № 2.

2. Азимов Б.П., Винокуров В.А., Григорьянц А.Г. Определение усадочной силы при многопроходной сварке балок. "Сварочное производство", 1973, № 5.

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. МВТУ им. Баумана, Тезисы докладов, М., 1973.

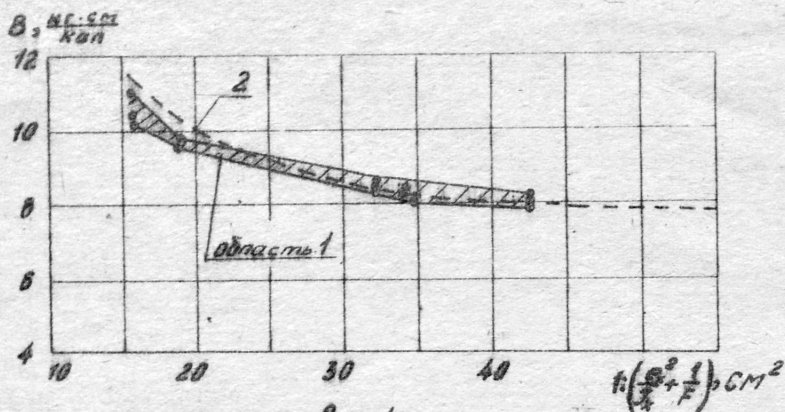


Рис. 1

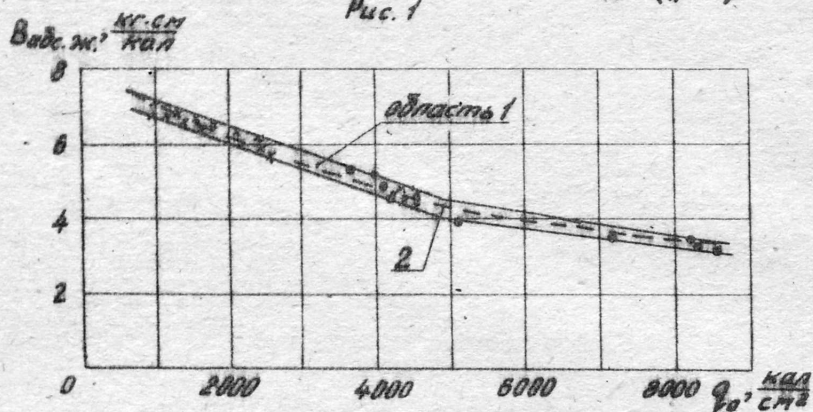


Рис. 2

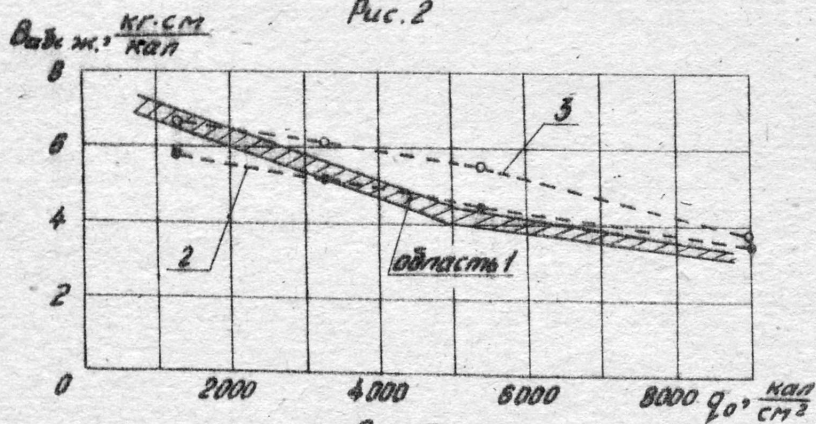


Рис. 3