

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Факультет технологии и исследования материалов
Кафедра «Сварка и лазерные технологии»

Кархин Виктор Акимович
Хомич Павел Николаевич

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ, ДИФФУЗИОННЫХ
И ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Методические указания к выполнению лабораторных работ

Санкт-Петербург
2011

АННОТАЦИЯ

В методическом пособии изложены лабораторные работы, которые знакомят с основными видами сварочных деформаций и напряжений и позволяют составить представление об образовании сварочных деформаций и напряжений в сварных соединениях, способах их уменьшения, инженерных методах расчета деформаций, напряжений и перемещений, экспериментальными методами их измерения.

Методические указания предназначены для студентов, изучающих дисциплины «Теория сварочных деформаций и напряжений» и «Математическое моделирование тепловых, диффузионных и деформационных процессов».

СОДЕРЖАНИЕ

Условные обозначения	4
Введение	6
Лабораторная работа № 1	
Временные и остаточные деформации и напряжения при нагреве.....	7
Лабораторная работа № 2	
Определение временных и остаточных продольных сварочных деформаций при наплавке валика на кромку полосы.....	12
Лабораторная работа № 3	
Определение остаточного прогиба при выполнении шва на полосе в свободном состоянии и с предварительным изгибом.....	27
Лабораторная работа № 4	
Определение остаточного прогиба и продольного укорочения тавровой балки.....	35
Лабораторная работа № 5	
Определение остаточных поперечных деформаций при стыковке сварных полос.....	41
Лабораторная работа № 6	
Угловые деформации при сварке таврового соединения.....	46
Лабораторная работа № 7	
Уменьшение остаточных сварочных деформаций и напряжений методом последующего растяжения.....	52
Лабораторная работа № 8	
Влияние пластических свойств металла на прочность при наличии сварочных напряжений.....	60
Литература	64
Приложение 1	65
Приложение 2	66

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

A	– площадь поперечного сечения балки, пластины, стержня, м^2
A^p	– площадь поперечного сечения зоны пластических деформаций, м^2
A_w	– площадь поперечного сечения шва, м^2
a	– температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$
C	– кривизна, $1/\text{м}$
c	– удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг К})$
E	– модуль продольной упругости, Па
e	– эксцентриситет, расстояние до центра тяжести, м
F	– сила, Н
F_s	– усадочная сила, Н
h	– толщина, мм
I	– ток дуги, А
I_y, I_z	– момент инерции относительно осей y и z , м^4
L	– длина, м
ΔL	– продольное укорочение, м
L_w	– длина шва, м
l_w	– катет шва, м
Q	– энергия, Дж
q	– мощность, Вт
q_1	– погонная энергия, $\text{Дж}/\text{м}$
T	– температура, К
ΔT	– приращение температуры, К
T_0	– начальная температура, К
T_{\max}	– максимальная температура, К
T_e	– максимальная температура, при которой металл не разупрочняется, К
ΔT_{\max}	– максимальное приращение температуры, К
T^*	– температура полного разупрочнения металла, К
t	– время, с
t_w	– время сварки, с
U	– напряжение дуги, В
v	– скорость сварки, $\text{м}/\text{с}$
W	– ширина пластины, м
ΔW	– поперечное укорочение пластины, м
w	– прогиб, м
w^p	– ширина или полуширина пластической зоны, м
α	– коэффициент линейного температурного расширения, $1/\text{К}$
β	– угловая деформация
ε	– деформация
ε_0	– начальная деформация
ε_{re}	– остаточная деформация
ε_l	– деформация нагрузки
ε_x	– полная продольная деформация (вдоль оси x)
ε_x^e	– продольная упругая деформация

- ε_x^p – продольная пластическая деформация (вдоль оси y)
 ε_y – упругая деформация, соответствующая пределу текучести
 ε_y^p – поперечная пластическая деформация
 ε^T – температурная деформация
 η – КПД теплового источника
 λ – теплопроводность, Вт/(м К)
 μ_x – коэффициент продольного укорочения
 ρ – плотность, г/м³
 σ – напряжение, Па
 σ_0 – начальное напряжение, Па
 σ_{re} – остаточное напряжение, Па
 σ_l – напряжение нагрузки, Па
 σ_x – продольное напряжение (вдоль оси x), Па
 σ_y – предел текучести, Па
 σ_y – поперечное напряжение (вдоль оси y), Па

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные работы знакомят с основными видами сварочных деформаций и напряжений и позволяют составить представление об образовании сварочных деформаций и напряжений в сварных конструкциях; методах расчета деформаций, напряжений и перемещения; способах их уменьшения; экспериментальных методах их измерения деформаций и напряжений.

Лабораторные работы выполняются параллельно с прослушиванием лекционного курса и выполнении практических работ по дисциплине «Теория сварочных деформаций и напряжений» направления инженерной подготовки специальности 110700 «Металлургия сварочного производства» и дисциплине «Математическое моделирование тепловых, диффузионных и деформационных процессов» магистерской программы «Теоретические основы процессов сварки» направления 150400 «Металлургия». Для их проведения отводится 15...30 часов. Одновременно в работе принимают участие группа студентов из 3 – 4 человек, которые за 2 часа должны проделать экспериментальную часть работы. Расчетная часть лабораторных работ выполняется на практических занятиях.

Для допуска к выполнению каждой работы студент обязан ознакомиться с ее содержанием. В описании работы имеются ссылки на литературу с указанием страниц, где подробнее изложен соответствующий материал. Список литературы приведен в конце пособия и содержит большинство книг по теории сварочных деформаций, выпущенных массовым тиражом.

Лабораторная работа № 1
**ВРЕМЕННЫЕ И ОСТАТОЧНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ
И НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ НАГРЕВЕ**

Цель работы

Исследование возникновения временных и остаточных деформаций и напряжений при нагреве ([3]: с. 9 – 10; [8]: с. 9 – 23; [15]: с. 32 – 47).

Содержание работы

Работа состоит из двух частей:

- а) определение возникновения температурных деформаций и напряжений в пластине при нагреве;
- б) определение возникновения напряжений и деформаций при наплавке валика на пластину.

Используют пластину с вырезами (рис. 1.1, а). Пластины укладывают на подставку и устанавливают на крайних полосах два механических тензометра с базой L_T .

Теоретическая часть

Рассмотрим продольные деформации и напряжения пластины при небольшом нагреве центральной части средней полосы C с помощью нагревающего элемента (рис. 1.1, а). Если бы полоса C могла свободно удлиняться, то ее удлинение было пропорционально температурной деформации ε^T :

$$\Delta L_C^T = \varepsilon^T L_C = \alpha \Delta T L_C, \quad (1.1)$$

где $\Delta T = 0,5 \cdot \Delta T_{\max}$ – среднее повышение температуры средней полосы относительно крайних полос (предполагается, что по ширине температура постоянна, а по длине изменяется линейно от максимальной ΔT_{\max} в центральной точке O до начальной на краю средней полосы, как показано на эпюре, рис. 1.1, б).

Однако свободному удлинению нагретой средней полосы C частично препятствуют холодные крайние полосы K , которые через верхнюю и нижнюю полосы B и H воздействуют на нее с сжимающей силой F (рис. 1.1, б), в результате чего в средней полосе возникают сжимающие напряжения σ_C (упругие деформации укорочения ε_C^e) и она укоротится на величину:

$$\Delta L_C^e = \varepsilon_C^e L_C. \quad (1.2)$$

Общие деформации ε (их еще называют наблюдаемыми, измеряемыми, действительными) представляют собой алгебраическую сумму упругих ε^e и температурных ε^T деформаций:

$$\varepsilon_C = \varepsilon_C^e + \varepsilon^T, \quad (1.3)$$

и, следовательно, перемещение на базе L_C равно:

$$\Delta L_C = \Delta L_C^T + \Delta L_C^e. \quad (1.4)$$

Одновременно в обеих крайних полосах возникает реактивная растягивающая сила той же величины F (образуются продольные растягивающие напря-

жения σ_K и упругие деформации удлинения ε_K^e). Так как величины σ_K и ε_K переменны по длине из-за переменности сечения, то общее удлинение крайней полосы ΔL_K складывается из удлинений всех участков:

$$\Delta L_K = \Delta L_{K1} + \Delta L_{K2} + \Delta L_{K3} = \varepsilon_{K1} L_{K1} + \varepsilon_{K2} L_{K2} + \varepsilon_{K3} L_{K3}. \quad (1.5)$$

Так как в крайних полосах температурные деформации $\varepsilon_{K_i}^T = 0$, то общие деформации ε_{K_i} совпадают с упругими $\varepsilon_{K_i}^e$ ($i = 1, 2, 3$).

Положим, что нижняя и верхняя полосы B и H абсолютно жесткие (плоское сечение $A - A$ принимается неподвижным, а сечение $B - B$ перемещается в положение $B' - B'$ и остается плоским, рис. 1.1, б). Поэтому

$$\Delta L_C = \Delta L_K. \quad (1.6)$$

Это уравнение позволяет найти силу F и, следовательно, временные напряжения и деформации во всех поперечных сечениях пластины, для чего следует воспользоваться законом Гука: $\sigma = E\varepsilon$ (рис. 1.1, в).

Средние расчетные напряжения в месте установки тензодатчиков σ_{K2} можно сравнить с экспериментальными напряжениями, которые легко найти по разности показаний тензометров до начала нагревания и в момент выключения нагревающего элемента. Следует иметь в виду, что в действительности средняя температура крайних полос выше начальной за счет теплопроводности верхней и нижней полос, а эти связующие полосы не абсолютно жесткие. Все эти факторы завышают расчетные временные напряжения и деформации.

После полного остывания средняя полоса возвращается к прежним геометрическим размерам, поле обратимых упругих деформаций и напряжений исчезает. Об отсутствии остаточных напряжений и деформации свидетельствует возврат стрелки тензометра в начальное положение.

В случае дуговой наплавки валика по центру средней полосы механизм образования временных напряжений и деформаций в крайних полосах аналогичен уже рассмотренному, то есть действие шва можно представить в виде внешней растягивающей силы. Отличие заключается в том, что при высоком нагреве в средней полосе дополнительно образуются пластические деформации укорочения ε^p , а общие деформации равны:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^T.$$

После полного остывания в средней полосе остаются необратимые пластические деформации укорочения, в результате чего укорачиваются средняя и крайние полосы (влияние шва можно заменить внешней сжимающей усадочной силой). Разность показаний тензометров до наплавки и после полного остывания характеризует полные деформации укорочения и, следовательно, упругие деформации укорочения и напряжения сжатия в крайних полосах пластины.

Приборы и материалы

1. Две отожженные пластины из низкоуглеродистой стали (толщина 5 мм, $L_C = 200$ мм, $L_{K1} = L_{K3} = 70$ мм, $L_{K2} = 60$ мм, $B_C = 80$ мм, $B_{K1} = 60$ мм, $B_{K2} = 40$ мм; рис. 1.1, а)
2. Подставка с нагревающим элементом и гальванометром с присоединенной термопарой в центральной точке O .
3. Подставка с пластиной для наплавки валика.
4. Два механических тензометра с базой $L_T = 20$ мм.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться по инструкции с устройством механических тензометров и правилами их крепления.
2. С помощью струбцин закрепить тензометры на пластине (см. рис. 1.1, а) и проверить их установку.
3. Начальные показания тензометров записать в таблицу 1.1.
4. Включить нагревающий элемент и повысить температуру в центре средней полосы пластины на $\Delta T_{\max} = 150 - 200$ К.
5. По достижении требуемой температуры нагрева выключить нагревающий элемент и записать показания тензометров и гальванометра с термопарой в точке O (рис. 1.1, а) в таблицу 1.1.
6. Рассчитать временные напряжения.
7. После полного остывания пластины записать показания тензометров.
8. Установить тензометры на втором образце, записать их начальные показания.
9. Наплавить валик на среднюю полосу пластины вдоль её продольной оси.
10. Записать показания тензометров в момент окончания наплавки и показания после полного остывания пластины.

Содержание отчета

1. Описание эксперимента, табл. 1.1 и рис. 1.1 с указанием всех величин и размерностей.
2. Расчет временных напряжений в крайних полосах при нагреве средней полосы (свойства стали приведены в Приложении 1).
3. Пример расчета временных напряжений в крайних полосах по показаниям тензометров.
4. Анализ экспериментальных и расчетных данных.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие напряжения называются временными, остаточными?
2. Какие напряжения (сжатия или растяжения) имеются в средней и крайних полосах пластины в момент окончания нагрева средней полосы? Какие при этом имеются упругие, температурные и полные деформации (удлинения или укорочения)?

3. На сколько необходимо увеличить среднюю температуру подогрева ΔT , чтобы в средней полосе образовались пластические деформации укорочения?

4. Как изменится величина сжимающей силы и напряжения в средней нагретой полосе при увеличении толщины пластины в 2 раза?

5. Какие напряжения и деформации остаются после нагрева средней полосы пластины и ее полного остывания?

6. Почему расчетные напряжения больше экспериментальных при нагреве средней полосы пластины?

7. Какие напряжения (сжатия или растяжения) возникают в крайних полосах пластины в момент окончания наплавки? После полного остывания? Какие при этом возникают упругие и полные деформации (удлинения или укорочения)?

8. Каковы остаточные полные деформации (удлинения или укорочения) средней и крайних полос после наплавки валика?

Деформации и напряжения в пластине при нагреве и наплавке Таблица 1.1

Вариант опыта	№ тензометра	Показания тензометров, мкм			Температура нагрева ΔT_{\max} , К	Временная деформация	Остаточная деформация	Временные напряжения, МПа		Остаточные напряжения, МПа
		до нагрева (наплавки)	при окончании нагрева (наплавки)	после остывания				Эксперимент	Расчет	
Нагрев										
Наплавка					-				-	

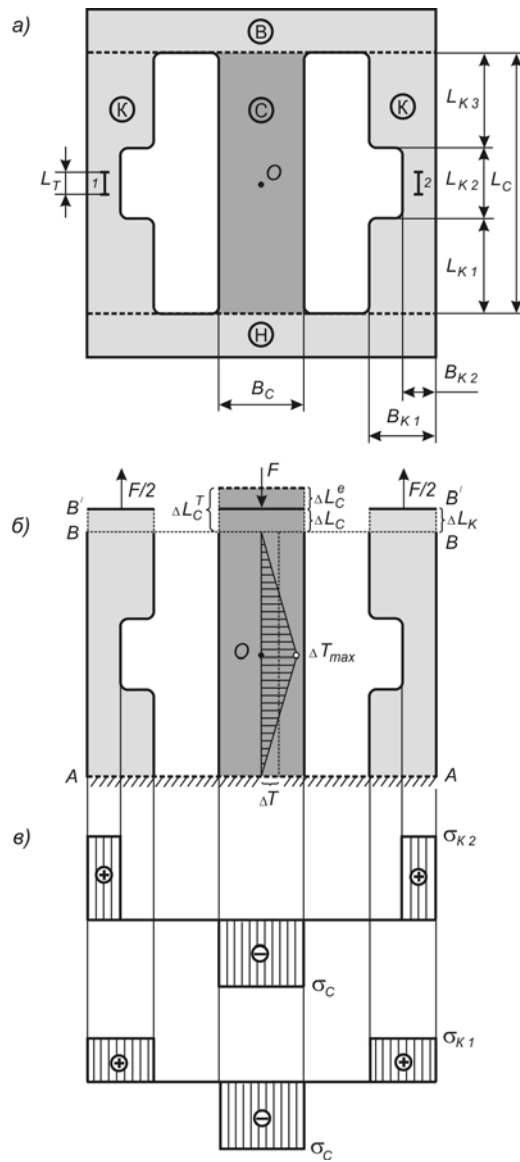


Рис. 1.1 Нагрев средней полосы пластины:
 а – пластина с вырезами;
 б – расчетная схема;
 в – эпюры продольных напряжений
 в сечениях пластины.

Лабораторная работа № 2
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ И ОСТАТОЧНЫХ
ПРОДОЛЬНЫХ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ
ПРИ НАПЛАВКЕ ВАЛИКА НА КРОМКУ ПОЛОСЫ**

Цель работы

Экспериментальное и расчетное определение временных и остаточных деформаций полосы при наплавке валика на ее продольную кромку.

Содержание работы

Рассмотрим развитие продольных сварочных деформаций и напряжений в процессе наплавки валика на продольную кромку полосы (рис. 2.1) ([1]: с. 9 – 23; [8]: с. 8, 9, 33 – 39, 49 – 58; [10]: с. 35 – 38, [11]: с. 264 – 271, [13]: с. 479 – 501, [15]: с. 74 – 78). Задачу теории термопластичности будем решать численным методом.

При сварке и наплавке продольные сварочные напряжения и деформации возникают из-за неравномерного по сечению нагрева полосы и для определения ее деформаций необходимо знать распределение температуры в поперечных сечениях.

Повышение температуры в любой точке x, y широкой полосы можно найти по уравнению предельного состояния нагрева пластин сосредоточенным линейным источником теплоты, движущимся по кромке полосы ([1]: с. 16; [17]: с. 80):

$$\Delta T(x, y) = \frac{q}{\pi \lambda h} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) K_0\left(\frac{v\sqrt{x^2 + y^2}}{2a} \sqrt{1 + \frac{4ab}{v^2}}\right), \quad (2.1)$$

где q – эффективная мощность дуги ($q = \eta UI$, где η – КПД, U – напряжение, I – ток дуги); h – толщина пластины; $K_0(u)$ – модифицированная функция Бесселя второго рода нулевого порядка от аргумента u ; b – коэффициент температуротдачи, учитывающий интенсивность понижения температуры пластины вследствие поверхностной теплоотдачи. Изотермы подвижного температурного поля в полосе показаны на рис. 2.2. Затемнена зона, нагретая выше температуры T^* .

Выберем одно из центральных поперечных сечений полосы. Если полоса достаточно длинная, то ее конечные участки не будут оказывать влияния на развитие деформаций и напряжений в удаленных от концов центральных сечениях. Выбранное центральное сечение неподвижной пластины в разные моменты времени будет находиться в различных положениях относительно подвижного источника теплоты, например, в положении 0–0, 1–1, 2–2 и т. д. (рис. 2.2). И тогда рассмотрение напряжений и деформаций в выбранном сечении во времени можно заменить последовательным рассмотрением напряжений и деформаций в данный момент в поперечных сечениях, удаленных на различные расстояния x от источника теплоты.

При определении сварочных деформаций и напряжений сделаем следующие допущения:

1. Напряженное состояние одномерное, только продольные напряжения σ_x отличны от нуля.
2. Справедлива гипотеза плоских сечений.
3. Материал полосы однородный и упругопластичный (рис. 2.3 а);
4. Предел текучести σ_Y и соответствующая ему упругая деформация ε_Y зависят от температуры, а модуль упругости E не зависит от температуры (рис. 2.3 б). Материал выше температуры T^* теряет упругие свойства.

При сварке распределение температуры $\Delta T(y)$ и, следовательно, поле температурных деформаций $\varepsilon^T(y)$ в поперечном сечении $x = \text{const}$ нелинейно. Согласно гипотезе плоских сечений полные продольные деформации металла изменяются по линейному закону. Несоответствие полных деформаций температурным вызывает в общем случае упругие и пластические деформации металла. Таким образом, полные деформации $\varepsilon_x(y)$, которые наблюдаются по изменению размеров тела, являются алгебраической суммой температурных $\varepsilon^T(y)$, упругих $\varepsilon_x^e(y)$ и пластических деформаций $\varepsilon_x^p(y)$:

$$\varepsilon_x(y) = \varepsilon^T(y) + \varepsilon_x^e(y) + \varepsilon_x^p(y) \quad (2.2)$$

Температурные деформации $\varepsilon^T(y)$ обратимы, они однозначно определяются распределением температуры $\Delta T(y)$:

$$\varepsilon^T(y) = \alpha \Delta T(y) \quad (2.3)$$

Здесь за ноль принята температурная деформация при температуре среды T_0 .

Пластические деформации необратимы, поэтому для их определения в период охлаждения металла необходимо знать весь путь деформирования. В период нагрева металла сечения $x = \text{const}$ развиваются пластические деформации одного знака (пластические деформации укорочения), поэтому накопленную пластическую деформацию можно определить, рассматривая это сечение только в данный момент времени.

Сечение 0–0 (рис. 2.2) находится в не нагретой области полосы, поэтому все деформации будут равны нулю.

Сечение 1–1 (рис. 2.2) характерно тем, что оно пересекает изотерму T^* в точке ее максимальной ширины и поэтому является граничным сечением, в котором все волокна при температуре $T < T^*$ нагреваются. Деформации в сечении 1–1 можно определить, не рассматривая деформированного состояния зоны впереди этого сечения. Поэтому с целью уменьшения количества сечений для определения остаточных деформаций примем первым сечение 1–1.

На рис. 2.4 а показано распределение деформаций в сечении 1–1. В соответствие с формулой (2.2) разность между полными $\varepsilon_x(y)$ и температурными $\varepsilon^T(y)$ деформациями представляет собой упругие деформации $\varepsilon_x^e(y)$, эпюра которых затемнена, и пластические деформации $\varepsilon_x^p(y)$. Знак упругой деформации легко определяется сравнением полных и температурных деформаций. Если продольные волокна в действительности удлиняются меньше, чем это следует из температурных деформаций ($\varepsilon_x < \varepsilon^T$), то это волокно сжато и в нем возникают

деформации укорочения $-|\varepsilon_x^e|$ и $-|\varepsilon_x^p|$, а если $\varepsilon_x > \varepsilon^T$, то возникают деформации удлинения $+|\varepsilon_x^e|$ и $+|\varepsilon_x^p|$.

Упругие деформации ε_x^e сопровождаются напряжениями, пластические деформации ε_x^p дополнительных напряжений не вызывают (рис. 2.3 а). Продольные напряжения σ_x должны быть взаимно уравновешены по поперечному сечению A , так как внешние силы отсутствуют. Уравнения равновесия по силе и моменту можно записать в виде:

$$\begin{aligned} 1. \int_A \sigma_x(y) dA &= 0; \\ 2. \int_A y \sigma_x(y) dA &= 0. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Напряжения связаны с упругими деформациями законом Гука:

$$\sigma_x(y) = \varepsilon_x^e(y) E \quad (2.5)$$

а упругие деформации могут быть найдены из уравнения (2.2):

$$\varepsilon_x^e(y) = \varepsilon_x(y) - [\varepsilon^T(y) + \varepsilon_x^p(y)] = \varepsilon_x(y) - \varepsilon_x''(y) \quad (2.6)$$

При наличии пластической составляющей упругие деформации $\varepsilon_x^e(y)$ всегда определяются разностью между полными деформациями ε_x и суммой температурных и пластических деформаций $\varepsilon_x'' = \varepsilon^T + \varepsilon_x^p$.

В уравнениях (2.4) можно перейти к деформациям согласно закону Гука (2.5) Так как приняли, что $E = \text{const}$:

$$1. \int_A \sigma_x(y) dA = Eh \int_W \varepsilon_x^e(y) dy = Eh \int_W \left\{ \varepsilon_x(y) - [\varepsilon^T(y) + \varepsilon_x^p(y)] \right\} dy = 0$$

$$\text{или } \int_W \varepsilon_x(y) dy = \int_W [\varepsilon^T(y) + \varepsilon_x^p(y)] dy, \quad (2.7)$$

так как в случае полосы постоянной толщины $dA = hdy$.

Аналогично получим второе уравнение:

$$2. \int_W y \varepsilon_x(y) dy = \int_W y [\varepsilon^T(y) + \varepsilon_x^p(y)] dy \quad (2.8)$$

Справа в уравнениях стоит площадь и первый статический момент относительно оси ε площади, заключенной между координатными осями ε , y и кривой температурных и пластических деформаций $\varepsilon_x''(y)$ (площади $OabcdeO$ на рис. 2.4 а).

Обозначим:

$$\int_W [\varepsilon^T(y) + \varepsilon_x^p(y)] dy = F^{Tp} \quad (2.9)$$

$$\int_W y [\varepsilon^T(y) + \varepsilon_x^p(y)] dy = M^{Tp}$$

Распределение температурных деформаций $\varepsilon^T(y)$ известно. Если известны пластические деформации ε_x^p , то из уравнений (2.7) и (2.8) следует:

$$\begin{aligned}
1. \int_W \varepsilon_x(y) dy &= F^{Tp} \\
2. \int_W y \varepsilon_x(y) dy &= M^{Tp}
\end{aligned}
\tag{2.10}$$

Из этих уравнений можно найти два любых параметра прямой $\varepsilon_x(y)$, например, при $y = 0$ и $y = W$ ее значения $\varepsilon_x(0)$ и $\varepsilon_x(W)$. Уравнения (2.10) показывают, что интегральная разность между кривой $abcde$ и прямой $\varepsilon_x(y)$ равна нулю (равновесие внутренних сил) и статический момент этой разности тоже равен нулю (равновесие моментов внутренних сил).

Решая два уравнения равновесия (2.10), получим ([1]: с. 18):

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x(0) &= \frac{4F^{Tp}}{W} - \frac{6M^{Tp}}{W^2} \\
\varepsilon_x(W) &= -\frac{2F^{Tp}}{W} + \frac{6M^{Tp}}{W^2}
\end{aligned}
\tag{2.11}$$

Так как пластические деформации не известны, то полные деформации $\varepsilon_x(0)$ и $\varepsilon_x(W)$ следует искать методом последовательных приближений:

- задаться начальными значениями $\varepsilon_x(0)$ и $\varepsilon_x(W)$ прямой $\varepsilon_x(y)$;
- выделить упругие деформации $\varepsilon_x^e(y)$, максимальные значения которых могут быть $\varepsilon_y(T)$;
- определить площадь F^{Tp} и момент M^{Tp} ;
- определить $\varepsilon_x(0)$ и $\varepsilon_x(W)$ по формулам (2.11);
- сравнить значения $\varepsilon_x(0)$ и $\varepsilon_x(W)$ с начальными;
- если полученные разности деформаций больше допустимой погрешности δ , то прямую $\varepsilon_x(y)$ провести через вновь вычисленные точки $\varepsilon_x(0)$ и $\varepsilon_x(W)$;
- выделить $\varepsilon_x^e(y)$;
- определить площадь F^{Tp} и момент M^{Tp} и т. д.

Положение прямой корректировать до тех пор, пока уравнения (2.11) не удовлетворятся с заданной точностью.

В результате получим уравновешенное напряженное и деформированное состояние сечения 1–1. В зоне шириной y_b (y_b – абсцисса точки b) упругие деформации и, следовательно, напряжения отсутствуют из-за высокой температуры (так как $\varepsilon_y(T) = 0$ при $T > T^*$), в ней имеются только пластические деформации. В волокне $y_0 \approx y_c$ имеются как пластические деформации укорочения cf , так и упругие деформации укорочения, равные $\varepsilon_y(T_e)$.

Кривизна линии центров тяжести поперечных сечений в точках любого сечения приближенно определяется по формуле:

$$C = \frac{\varepsilon_x(0) - \varepsilon_x(W)}{W}
\tag{2.12}$$

Максимальная температура в сечении 2–2 равна T^* (рис. 2.2 и 2.4 б). При определении полных деформаций в ней за начальные пластические деформации могут быть приняты уже известные пластические деформации в сечении 1–1.

(Новые пластические деформации, возникающие за время перемещения исследуемого сечения из положения 1–1 в положение 2–2, мы пока не знаем. Наша задача – найти их, а пока примем их нулевыми). Алгебраически складывая температурные и пластические деформации по координатно, получим сумму $\varepsilon'_x(y) = \varepsilon^T(y) + \varepsilon_x^p(y)$ в виде кривой *ade*. Примем начальные значения полных деформаций кромок $\varepsilon_x(0)$ и $\varepsilon_x(W)$, проведем прямую $\varepsilon_x(y)$. Из разности $\varepsilon'_x(y)$ и $\varepsilon_x(y)$, как и ранее, выделим упругую составляющую с учетом температуры и пластическую составляющую, которая будет представлять собой новые пластические деформации (приращение пластических деформаций) в начальном приближении. Зная суммарные пластические деформации за весь предшествующий период, можно построить новую сумму температурных и пластических деформаций $\varepsilon_x''(y) = \varepsilon^T(y) + \varepsilon_x^p(y)$ (кривую *ijkme* на рис. 2.4 б). Как и ранее, определяем площадь $F^{Tp}(OijkmeO)$, момент M^{Tp} , точность удовлетворения уравнений (2.11) и последовательно уточняем положение прямой полных деформаций $\varepsilon_x(y)$ и значения пластических деформаций $\varepsilon_x^p(y)$.

Из рис. 2.4 б можно видеть, что после сечения 1–1 появились новые пластические деформации укорочения в зоне $y_k - y_m$, зона пластических деформаций расширилась с y_d до y_m . Вблизи валика на ширине y_j развиваются пластические деформации удлинения из-за того, что холодная часть полосы удерживает валик от большого укорочения при его интенсивном охлаждении. Эти новые пластические деформации удлинения частично компенсируют пластические деформации укорочения. Например, при $y = 0$ были пластические деформации укорочения, равные ag , а остались равными ig . Так как почти всюду $T < T^*$, то вблизи валика возникают также упругие деформации удлинения и, следовательно, напряжения растяжения.

Разность $\varepsilon^T(y)$ и кривой *ijkme* представляет собой накопленные пластические деформации укорочения в сечении 2–2, которые могут быть приняты в качестве начального приближения при определении деформаций в сечении 3–3. По изложенной расчетной методике можно последовательно рассмотреть деформации во всех последующих сечениях, которые выбираются так, чтобы разность между максимальной температурой в соседних сечениях ΔT_{\max} была равна заданной. Чем меньше ΔT_{\max} (чем больше сечений), тем точнее решение задачи.

Анализируя процесс развития деформаций, можно заметить, что при относительно высокой температуре заканчивается развитие пластических деформаций укорочения и рост зоны пластических деформаций (рис. 2.4 г), в то время как пластические деформации удлинения развиваются вплоть до полного остывания (рис. 2.4 е). Ширина зоны пластических деформаций y^p (рис. 2.4 е) значительно превышает ширину y_b изотермы T^* (рис. 2.4 а). Вблизи валика остаточные упругие деформации достигают максимального значения ε_y (рис. 2.4 е). При значительной тепловой энергии в узкой полосе на кромке с валиком могут быть остаточные упругие деформации меньше ε_y .

После полного остывания валик получит остаточное укорочение ($-|\varepsilon_x(0)|$), противоположная кромка – остаточное удлинение $\varepsilon_x(W)$ (рис. 2.4 е). Линия

центров тяжести поперечных сечений всегда получает остаточное укорочение ($-|\varepsilon_x(W/2)|$). У остаточной кривизны C знак противоположный начальному, то есть при нагреве полоса выпуклая, после нагрева – вогнутая.

С целью ускорения расчета деформации по изложенному алгоритму может быть составлена и реализована компьютерная программа. Принципиальная блок-схема показана на рис. 2.5. В качестве исходных данных задаются геометрические размеры полосы, режим сварки и свойства материала. При вычислении поперечное сечение полосы разбивается на отдельные участки (призмы) с шагом $\Delta y \approx 1$ мм и в каждом i -м участке последовательно прослеживается температура T_i , деформация ε_i и т.д. в различные моменты времени (в различных сечениях относительно источника нагрева).

По распределению упругих деформаций $\varepsilon_x^e(y)$ можно построить эпюру напряжений $\sigma_x(y)$, пользуясь формулой (2.5) (рис. 2.4 ж). Видно, что вблизи валика остаточные напряжения достигают предела текучести, в упругой области напряжения меняются по линейному закону.

Проследим путь деформирования волокна с координатой y_0 (на рис. 2.4 деформированное состояние этого волокна показано светлым кружком на кривой температурных и пластических деформаций $\varepsilon_x''(y)$). На рис. 2.6 показана диаграмма деформирования с точками, номера которых соответствуют номерам сечений. В сечении 1–1 (рис. 2.4 а) в волокне $y_0 \approx y_c$ имеются как пластические деформации укорочения ε_f , так и упругие деформации укорочения, равные ε_y . Затем происходит разгрузка (сечения 2–2, 3–3), упругие деформации укорочения уменьшаются, пластические деформации в это время не происходят. Позже (сечение 4–4) происходит упругое нагружение; упругие деформации удлинения растут, достигая максимального значения ε_y (сечения 5–5 и 6–6). Остаточные пластические деформации укорочения волокна y_0 $\varepsilon_{x\ re}^p$ равны разности полных $\varepsilon_{x\ re}$ и упругих деформаций, $-|\varepsilon_{x\ re}| - \varepsilon_y$.

Определенные по рис. 2.4 упругие и пластические деформации позволяют выделить по всей полосе зоны пластических и упругих деформаций, зоны сжимающих и растягивающих напряжений (рис. 2.7). Затемненная зона нагрета выше температуры T^* . При меньшей температуре в пластической зоне вблизи валика образуются растягивающие напряжения, равные пределу текучести σ_y . Граница пластической зоны лежит в области сжимающих напряжений (пластическая зона темнее упругой зоны).

Зная полные деформации $\varepsilon_x(0)$, $\varepsilon_x(W/2)$, $\varepsilon_x(W)$ и кривизну продольной оси (линии центров тяжести поперечных сечений $x_0 - x_0$) C в выбранных сечениях, можно поточечно построить их распределение по длине полосы. Момент окончания наплавки $t = t_w$ показан на рис. 2.8 б.

По кривизне $C(x)$ можно найти форму продольной изогнутой оси (ее координаты $y(x)$), пользуясь приближенным уравнением:

$$C(x) = \frac{d^2 w(x)}{dx^2} \quad (2.13)$$

Кривизну $C(x)$ можно проинтегрировать численно, представляя ее в виде фиктивной распределенной нагрузки $q_f(x)$ на фиктивной балке. Тогда полученный фиктивный момент $M_f(x)$ численно равен значению прогибов продольной оси $w(x)$. Этот прием основан на том, что момент от распределенной нагрузки тоже определяется двойным интегрированием. Фиктивная консольная балка по сравнению с действительной заделана с противоположного конца, чтобы выполнялось граничное условие по моменту.

В момент окончания сварки эпюра $C(x)$ показана отдельно на рис. 2.8 в. Ее можно по участкам заменить на равномерно распределенную нагрузку q_f . Для определения момента в точке А равномерно распределенную нагрузку справа можно заменить равновеликими сосредоточенными силами F_f , приложенными в центре тяжести участков. В момент окончания сварки форма изогнутой продольной оси показана на рис. 2.8 г.

Пренебрегая концевыми участками, считаем, что после полного остывания кривизна по длине шва постоянна. Тогда момент в точке А от нагрузки справа по длине L (рис. 2.8 а) равен:

$$M_{fA} = \frac{q_f L^2}{2} \text{ или } w_A = \frac{CL^2}{2} \quad (2.14)$$

Вид изогнутой оси полосы после полного остывания показан на рис. 2.8 е. На длине шва изогнутая ось представляет собой дугу окружности, так как кривизна C и, следовательно, радиус кривизны $\rho = 1/C$ постоянны.

Аналогично можно рассчитать прогиб w_A точки А в любое время t . На рис. 2.8 ж показано изменение прогиба w_A точки А во времени t , полученное экспериментально. Там же нанесены расчетные точки.

Зная распределение по длине продольных деформаций линии центров тяжести поперечных сечений $\varepsilon_x(W/2)$ (рис. 2.8 б), можно найти изменение длины полосы по оси $x_0 - x_0$:

$$\Delta L = \int_{L_w} \varepsilon_x(W/2) dx \quad (2.15)$$

В момент окончания сварки будет удлинение полосы $(+ |\varepsilon_x(W/2)|)$, рис. 2.8 б). После полного остывания $\varepsilon_x(W/2) = - |\varepsilon_x(W/2)| = \text{const}$ на длине L_w и полоса укоротится по оси $x_0 - x_0$ на величину:

$$\Delta L = \varepsilon_x(W/2)L_w \quad (2.16)$$

Таким образом, изложенный численный метод позволяет определять временные и остаточные деформации и напряжения, изгиб полосы и изменение ее длины, выделять зону пластических деформаций (перемещений).

Приборы и материалы

1. Отожженная полоса из низкоуглеродистой стали длиной 500 – 520 мм, шириной $W = 80 - 120$ мм, толщиной $h = 8 - 10$ мм (рис. 2.1).
2. Установка для записи сварочных деформаций (перемещений).
3. Линейка, штангенциркуль, секундомер.

Порядок выполнения работы

1. Определить размеры полосы h и W штангенциркулем и линейкой и занести их значения в таблицу 2.1.
2. На расстоянии $L_A \approx 10$ мм от торца полосы закрепить упор, на который будет упираться стержень механического усилителя (рис. 2.1).
3. Установить и закрепить полосу в зажимном устройстве установки так, чтобы стержень механического усилителя упирался в центр нижней плоскости упора, а перо самописца было посередине диаграммной ленты. Сделать с помощью пера пометку начала записи.
4. Замерить расстояние от оси стержня до торца полосы L_A и занести его значение в таблицу 2.1.
5. Наплавить валик на продольную кромку полосы от свободного торца к закреплённому, замеряя время сварки t_w , силу тока I и напряжение дуги U . Средние значения замеров занести в табл. 2.2.
6. Не выключая секундомера, по истечении 2 мин. от начала сварки сделать первую контрольную метку на диаграммной ленте, повторяя их через 30 с в течение 5 мин., и через 1 мин. до тех пор, пока не выравняется температура по сечению полосы (о чем будет свидетельствовать горизонтальная линия на диаграмме). После сварки протяжку диаграммной ленты между метками можно выключить.
7. Замерить длину шва L_w и занести ее значения в таблицу 2.1.
8. На диаграммной ленте у каждой метки указать время и действительный прогиб полосы w , который рассчитывается по вертикальному перемещению пера: $w = w/k$, где k – коэффициент усиления.

Содержание отчета

1. Описание эксперимента с рисунками (рис. 2.1, 2.3) и таблицами (табл. 2.1, 2.2) с расчетом эффективной энергии q и погонной энергии $q_1 = q/v$. Значение КПД дуги приведено в приложении 2.
2. Подклеенная диаграммная лента и график временной зависимости прогиба полосы (рис. 2.8 ж).
3. Расчёт температуры и температурных деформаций в поперечных сечениях с максимальной температурой 1) > 600 °С, 2) 600 °С, 3) 500 °С, 4) 400 °С, 5) 300 °С, 6) 200 °С, 7) 100 °С, 8) 20 °С (табл. 2.3). Расчет производится при условиях: коэффициент линейного расширения $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$ 1/°С; коэффициент поверхностной теплоотдачи $b = 0,001$ 1/°С; температура среды $T_o = 20$ °С; $\Delta T_{\max} = 100$ °С; $\eta = 0,7$; $\delta = 10^{-6}$. Свойства стали приведены в Приложении 1.
4. Температурное поле в полосе при наплавке с указанием сечений (рис. 2.2 в масштабе).
5. Графики деформаций во всех сечениях (рис. 2.4) с указанием номера сечения, максимальной температуры T_{\max} , координаты сечения.
6. Эпюра остаточных напряжений (рис. 2.4 ж).

7. Диаграмма деформирования точки, максимальная температура которой 500 °С (рис. 2.6 в масштабе). Координату точки можно найти на рисунке с изотермами.

8. Границы пластической и упругой зоны, сжимающих и растягивающих напряжений (рис. 2.7 в масштабе).

9. Распределение полных деформаций $\varepsilon_x(0)$, $\varepsilon_x(W/2)$, $\varepsilon_x(W)$ и кривизны C (рис. 2.8 а, б).

10. Расчет прогиба заданной точки A в момент окончания наплавки и после полного остывания с рисунками (рис. 2.8 в-е). Расчетные значения нанести на график $w_A(t)$ (рис. 2.8 ж).

11. Анализ экспериментальных и расчетных данных.

12. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие допущения приняты при численном методе определения сварочных деформаций и напряжений?

2. Как определяются полные деформации в сечении 1–1, 2–2 и т.д.?

3. Каково распределение продольных напряжений в сечении 1–1, 2–2 и т.д.?

4. Развитие каких деформаций заканчивается раньше, пластических деформаций удлинения или пластических деформаций укорочения?

5. В каком продольном волокне полосы максимальны остаточные пластические деформации укорочения, остаточные напряжения сжатия?

6. Каков путь деформирования на плоскости $\sigma - \varepsilon$ продольных волокон, максимальная температура которых 200 °С, 300 °С, 400 °С, 500 °С?

7. Чем отличаются пути деформирования на плоскости $\sigma - \varepsilon$ продольных волокон нижней кромки, продольной оси полосы, вблизи границы упругой и пластической зон от пути деформирования волокна с $T_{\max} = 500$ °С?

8. Удлинилась или укоротилась полоса по продольной оси в момент окончания сварки и после остывания? Как найти ее длину?

9. Каково расстояние между точками полосы на свободной (нижней) кромке после полного остывания, если до наплавки оно было равно 10 мм? То же – на продольной оси $x_0 - x_0$?

10. Как определить форму продольной оси полосы и длину полосы в моменты времени $t = 1/2 t_w$, $t = t_w$, $t = \infty$?

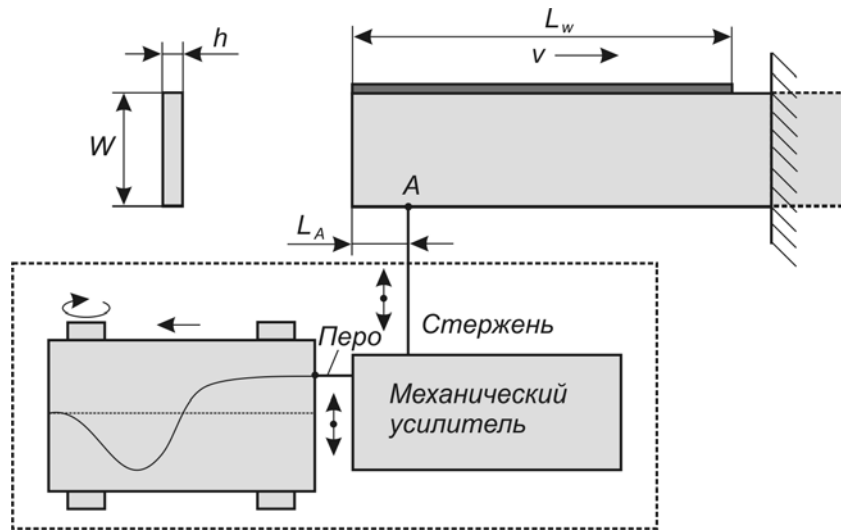


Рис. 2.1 Схема определения прогиба полосы в точке А.

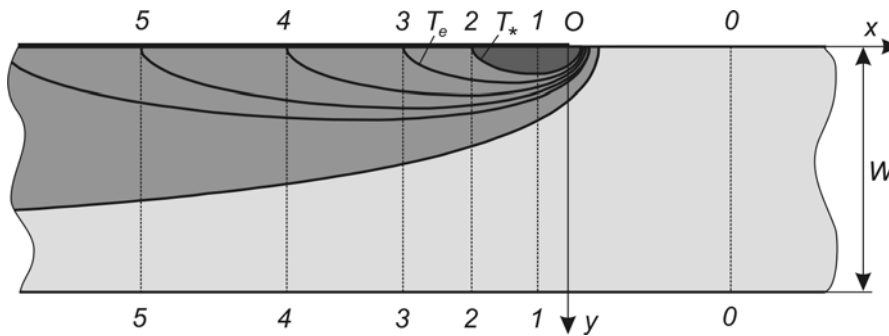


Рис. 2.2 Подвижное температурное поле в полосе при наплавке.

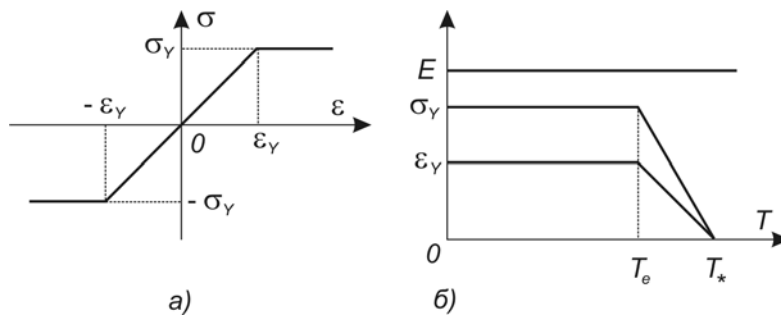


Рис. 2.3 Идеализированные свойства материала:
а – кривая деформирования; б – температурные зависимости.

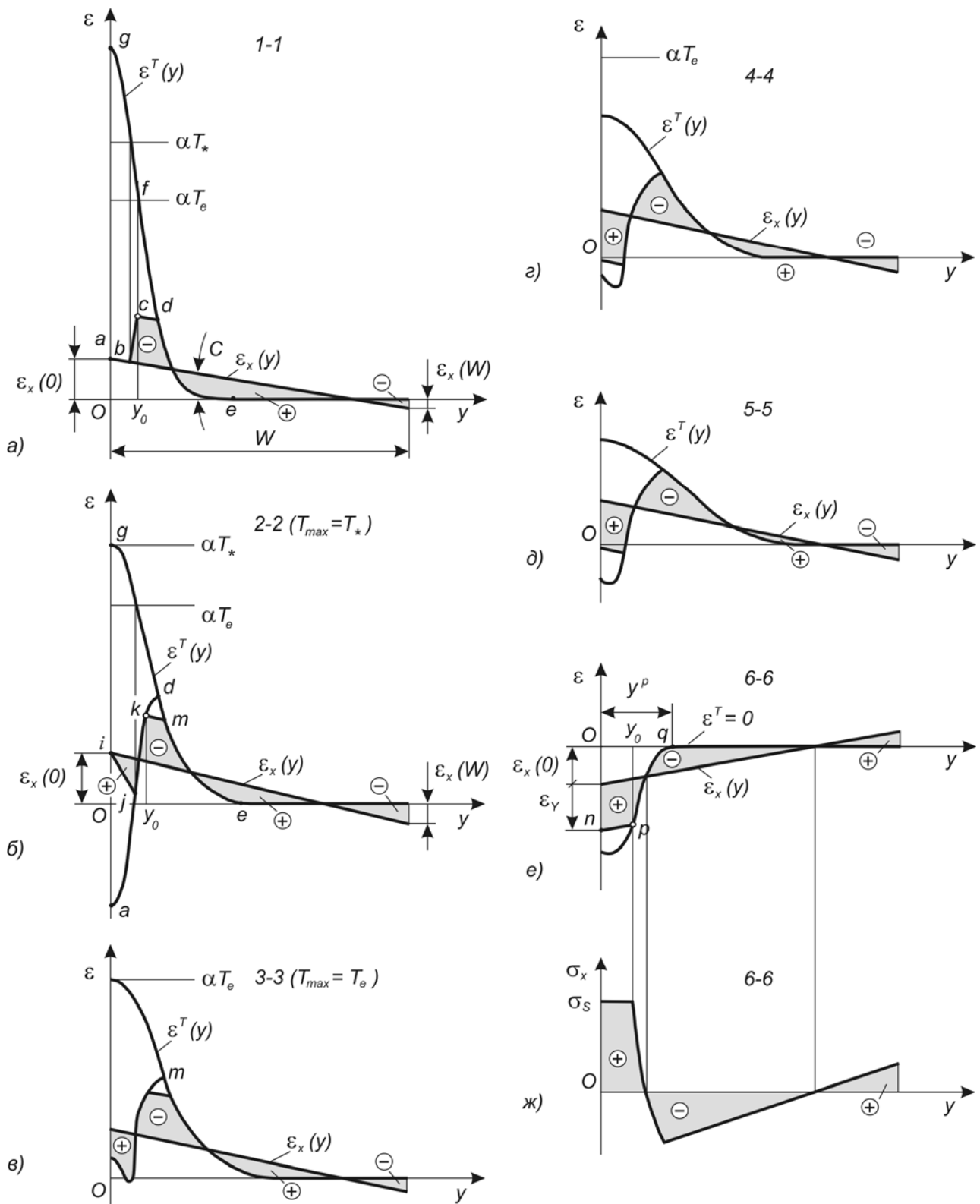


Рис. 2.4 Кинетика продольных деформаций и напряжений в поперечном сечении полосы при наплавке валика на ее продольную кромку.

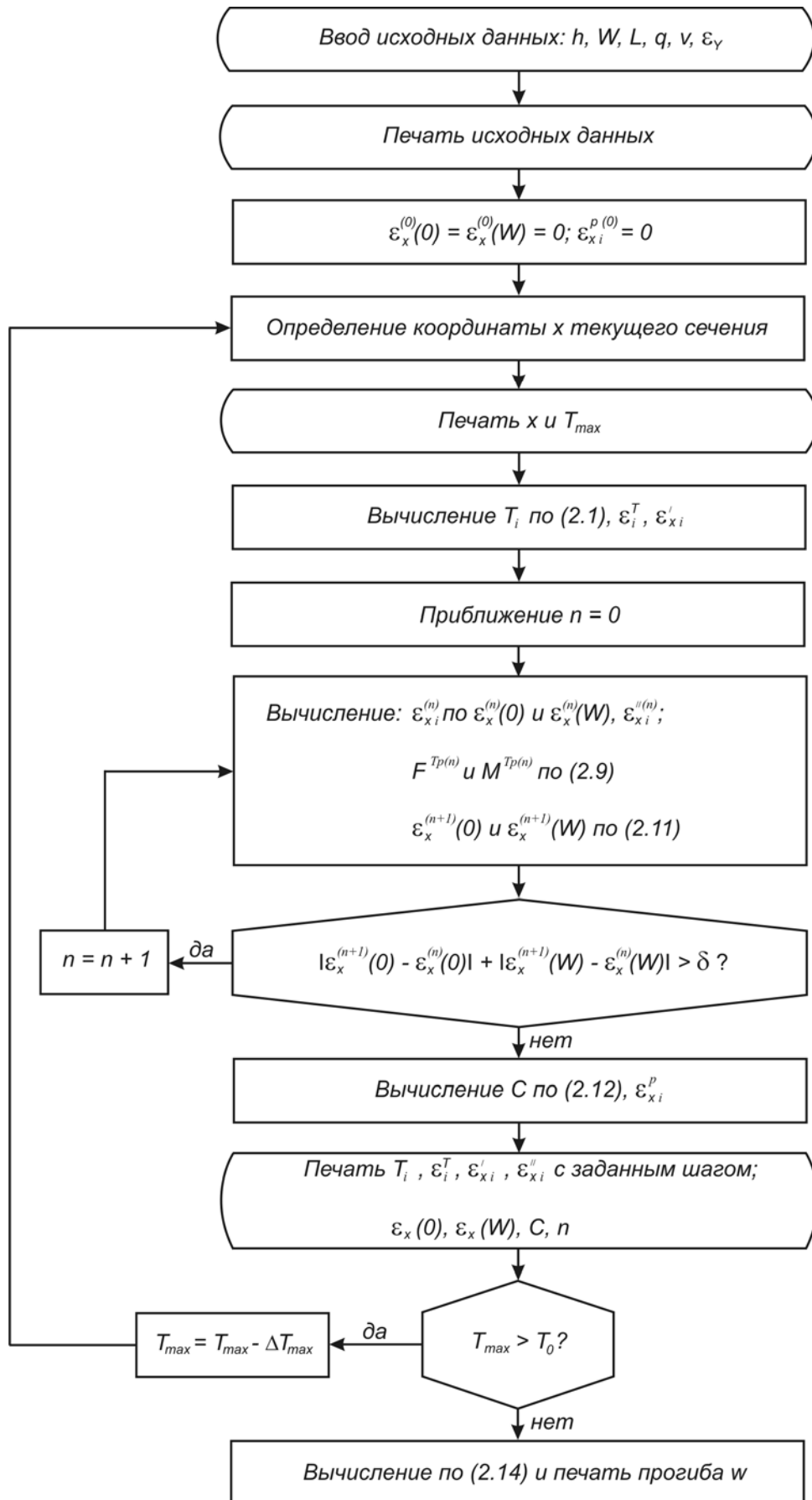


Рис. 2.5 Принципиальная блок-схема расчета продольных деформаций.

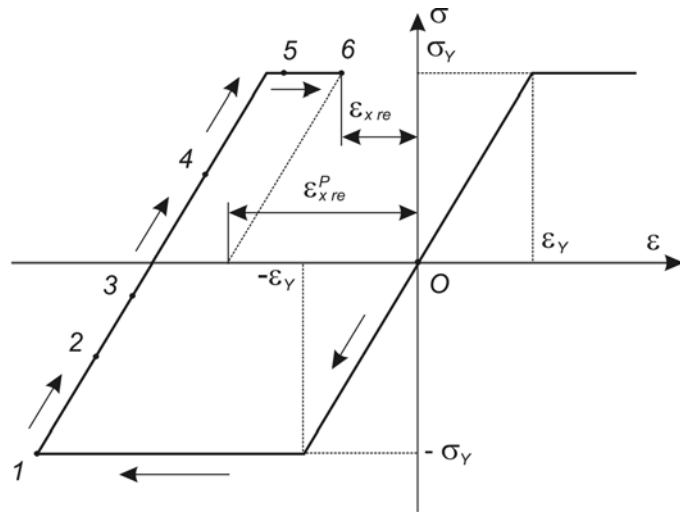


Рис. 2.6 Диаграмма деформирования волокна y_0 .

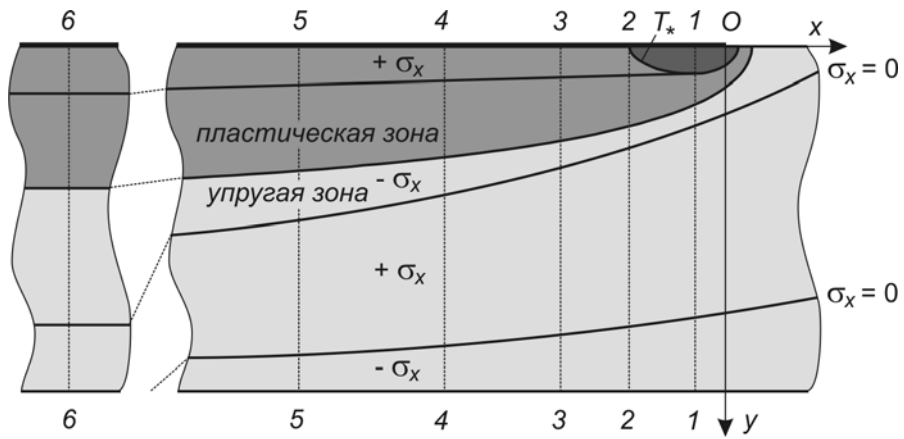


Рис. 2.7 Границы пластической и упругой зон, сжимающих и растягивающих напряжений.

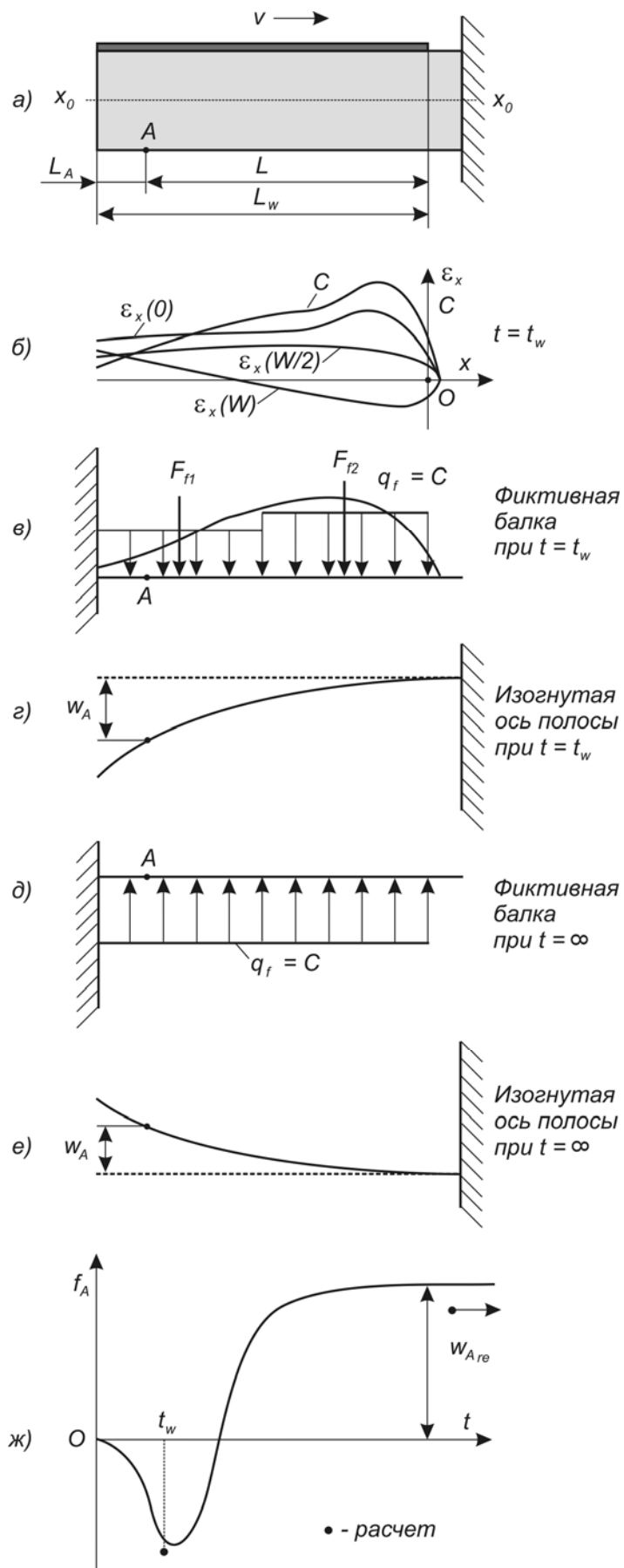


Рис. 2.8 Деформации полосы при наплавке валика.

Размеры полосы

Таблица 2.1

h , мм	W , мм	L_A , мм	L_w , мм	L , мм

Режим наплавки

Таблица 2.2

I , А	U , В	t_w , с	L_w , мм	v , мм/с	q , Вт	q_1 , Дж/мм

Временная зависимость прогиба полосы

Таблица 2.3

t , с	0	15	30	45	60	75	90	105	120	150	180	210
w' , мм												
w_A , мм												

Лабораторная работа № 3
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО ПРОГИБА
ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ШВА НА ПОЛОСЕ
В СВОБОДНОМ СОСТОЯНИИ И С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ИЗГИБОМ**

Цель работы

Экспериментальное и расчетное определение влияния начального напряженного состояния конструкции на остаточные деформации и напряжения.

Содержание работы

Экспериментальное и расчетное определение остаточного прогиба и продольного укорочения при выполнении швов:

- 1) у продольной кромки полосы в свободном состоянии;
- 2) у продольной кромки полосы, получившей предварительный изгиб в приспособлении;
- 3) у продольной кромки полосы, в которой действуют напряжения растяжения, созданные предыдущим швом.

Продольные деформации и напряжения возникают в результате неравномерного нагрева металла поперечного сечения полосы ([1]: с. 27 – 36).

Предположим, что начальные деформации и напряжения в полосе отсутствуют (рис. 3.1). Выберем, например, продольное волокно, максимальная температура которого за весь термический цикл равна $T_e = 500$ °С (при этой температуре сталь еще не разупрочнена), и проследим за изменением деформаций и напряжений в нем ([2]: с. 309 – 314). Перед выполнением шва 1 напряжения в нем отсутствуют и состояние волокна характеризуется на кривой деформирования точкой O (рис. 3.2 а). В момент нагрева это волокно расширяется, но его полные продольные деформации удлинения меньше, чем температурные деформации $\alpha\Delta T$, так как более удаленные от шва и менее нагретые участки полосы препятствуют свободному продольному расширению (удлинению) волокна. В результате в металле образуются напряжения сжатия и упругие деформации укорочения, его состояние на диаграмме может характеризоваться точкой A_1 .

При температуре $T_e = 500$ °С деформации укорочения превышают максимальные упругие деформации ε_y , т.е. образуются пластические деформации укорочения, равные отрезку A_2A_3 . При остывании упругие деформации укорочения и, следовательно, напряжения сжатия постепенно снижаются (точка A_4), затем возникают упругие деформации удлинения и напряжения растяжения (точка A_5), а при достижении предела текучести σ_y (точка A_6) возникают пластические деформации удлинения, которые при полном остывании равны отрезку A_6A_7 . Пластическая деформация удлинения A_6A_7 меньше пластических деформаций укорочения A_2A_3 , возникающих при нагреве, поэтому после полного остывания в волокне имеются остаточные пластические деформации укорочения $\varepsilon_{x\text{ }re}^p$, равные отрезку OB , $OB = A_2A_3 - A_6A_7$. (Пластические деформации легко определить, разгрузив волокно от упругих деформаций по прямой

A_7B , параллельной упругому участку кривой деформирования материала DO). В этом волокне останутся напряжения растяжения $\sigma_x = + \sigma_Y$ и упругие деформации удлинения $\varepsilon_x^e = + \varepsilon_Y$. Волокно получит остаточные деформации укорочения A_7C_1 , равные сумме упругих и пластических деформаций (по определению $\varepsilon_x = \varepsilon_x^e + \varepsilon_x^p + \varepsilon^T$, а $\varepsilon^T = 0$).

После полного остывания полоса получит укорочение по линии центров тяжести поперечных сечений x и дополнительно изгиб, так как шов не совпадает с осью x (рис. 3.3, а и 3.4). Эти деформации можно определить, пользуясь понятием усадочной силы F_s ([3]: с. 55 – 57, 83, 84). При этом влияние шва можно заменить влиянием внешних сжимающих сил F_{s1} , приложенных по краям шва и направленных вдоль его оси (рис. 3.1). Таким образом, от шва 1 полоса укоротится и станет выгнутой (рис. 3.3, а и 3.4).

Одним из распространенных способов уменьшения прогибов является изгиб балок в приспособлении перед сваркой и в процессе сварки в сторону, противоположную ожидаемому изгибу от сварки.

Рассмотрим развитие деформаций и напряжений в таком же волокне другой полосы, которая находится в жестком закреплении в нагруженном состоянии ([1] – с. 66; [2] – с. 323 – 325; [11] – с. 382 – 389). Пусть шов выполняется металле, в котором имеются начальные деформации удлинения ε_0 (начальные напряжения растяжения σ_0 , см. рис. 3.3, б), причем эти полные деформации сохраняются в процессе всего нагрева и охлаждения. Начальное напряженное состояние металла характеризуется точкой A_0 , на диаграмме деформирования (рис. 3.2, б). Нагрев волокна приводит сначала к снятию упругих деформаций удлинения (точка O) и лишь затем к появлению упругих ($\varepsilon_x^e = - \varepsilon_Y$) и пластических деформаций укорочения $\varepsilon_x^p = A_2A_3$. При остывании возникают пластические деформации удлинения $\varepsilon_x^p = A_6A_7$, которые частично компенсируют пластические деформации укорочения A_2A_3 . После полного остывания конечное состояние рассматриваемого волокна характеризуется точкой A_7 , т.е. в волокне имеются напряжения растяжения, равные пределу текучести σ_Y , полные деформации удлинения C_1A_7 , равные начальным ε_0 , остаточные пластические деформации укорочения $\varepsilon_x^p_{re}$, равные отрезку OB . Из рис. 3.2, б можно заметить, что с увеличением начальных деформаций остаточные пластические деформации уменьшаются, а при $\varepsilon_0 = \varepsilon_Y$ остаточные пластические деформации отсутствуют.

После снятия жесткого закрепления (снятия внешних сил) напряжения в полосе перераспределяются и окончательное состояние рассматриваемого волокна характеризуется точкой A_8 . Остаточные напряжения в волокне, равные OC_2 , меньше предела текучести σ_Y , а остаточные деформации укорочения A_8C_2 меньше, чем в случае отсутствия начального растяжения (отрезка A_7C_1 на рис. 3.2, а). Таким образом, предварительное растяжение металла возле шва приводит к уменьшению остаточных напряжений и деформаций.

Качественно такое же влияние оказывают начальные напряжения, созданные предшествующими сварными швами ([11]: с. 389 – 391). Перед выполнением шва 2 волокно с координатой y_{C2} (рис. 3.1) растянуто за счет шва 1. Поэтому при постоянстве режима сварки (погонная энергия $q_{11} = q_{12}$) и расстояния от

шва до центра тяжести ($|y_{C1}| = |y_{C2}|$) усадочные силы и моменты будут различны ($F_{s1} < F_{s2}$, $M_{s1} = F_{s1}y_{C1} < M_{s2} = F_{s2}y_{C2}$) и, следовательно, остаточный прогиб $w_{1,2} = w_1 + w_2 \neq 0$ и остаточное продольное укорочение $\Delta L_{1,2} = \Delta L_1 + \Delta L_2 < 2\Delta L_1$. При сварке листов небольшой толщины на сварочные деформации оказывает влияние поверхностная теплоотдача. В условиях естественной конвекции она понижает остаточные деформации на 10...20 % ([2] – с. 320, 321).

Если режим сварки докритический, когда $q_1/A < 0,6$ Дж/мм³ для низкоуглеродистой стали ($q_1 = q/v$ – погонная энергия, A – площадь поперечного сечения пластины), остаточные сварочные деформации и напряжения можно приближенно рассчитать аналитическим методом в зависимости от режима сварки, размеров сварной конструкции и свойств материала ([1]: с. 32 – 35; [2]: с. 346 – 354, 357 – 360; [11]: с. 291, 292; [10]: с. 46, 50 – 52).

Приборы и материалы

1. Две полосы из низкоуглеродистой стали толщиной $h = 2$ мм, шириной $W = 60$ мм и длиной $L = 500$ мм (рис. 3.1), одна из которых имеет два больших отверстия.
3. Приспособление для измерения изгиба полос (рис. 3.5 а).
4. Приспособление для создания и измерения изгиба полос (рис. 3.5 б).
5. Секундомер, линейка.

Порядок выполнения работы

1. Установить полосу 1 (полосу без отверстий) на призмы в приспособление (рис. 3.5, а) так чтобы надрез на полосе попал в левую призму и закрепить полосу, слегка прижимая ее к призмам рукой сверху. Показания индикатора занести в табл. 3.2. Установку полосы в приспособление и измерения провести трижды.

2. Вычислить средние значения по трем измерениям (табл. 3.2).

3. Вынуть полосу из приспособления и проварить полосу вольфрамовым электродом в среде Ar на расстоянии ≈ 5 мм от кромки, замеряя время сварки t_w , силу сварочного тока I и напряжение дуги U . Средние значения измерений занести в табл. 3.1.

4. После полного остывания полосы выполнить п. 1 и 2 (температура полосы не должна превышать начальную более чем на 15 °С).

5. Повторить п. 3 и 4 на полосе 1, выполняя шов 2 у непереплавленной кромки симметрично шву 1 и на том же режиме. Исключить возможность переплавки надреза на полосе при выполнении шва 2.

6. Выполнить п. 1 и 2 на полосе 2 (полоса с отверстиями).

7. Вычислить предварительный прогиб w_{np} , при котором в волокнах на расстоянии 5 мм от кромки возникают напряжения растяжения $\sigma_0 = 80...120$ МПа при условии, что полоса будет изогнута в приспособлении (рис. 3.5, б). Связь прогиба w и напряжения σ с изгибающим моментом M , постоянного на базе L , описывается формулой:

$$w_{np} = \frac{ML^2}{8EI_z}, \quad \sigma = \frac{M}{I_z} y$$

8. Закрепить на полосе упор (рис. 3.5, б), установить полосу в приспособлении и создать предварительный прогиб w_{np} так, чтобы реакция опор F была одинаковой и изгибающий момент M между опорами был постоянным. Значение прогиба w_{np} занести в табл. 3.1.

9. Проварить изогнутую полосу на расстоянии ≈ 5 мм от кромки на том же режиме, измеряя время сварки, ток и напряжение дуги. После полного остывания полосу вынуть из приспособления. Средние значения измерений занести в табл. 3.1.

10. Выполнить п. 1 и 2 для полосы 2.

11. Замерить длину швов на полосах L_w и расстояние от оси швов до ближайшей кромки y_K . Значения измерений занести в табл. 3.1.

Содержание отчета

1. Описание эксперимента с рисунками 3.1, 3.3 и таблицами 3.1, 3.2.
2. Расчет прогиба полосы 1 от швов 1 и 2, полосы 2 от шва 1. При расчете учитывать начальное напряжение и поверхностную теплоотдачу. Считать начальные деформации постоянными на базе измерения прогиба.
3. График распределения экспериментального и расчетного остаточного прогиба полосы 1 от шва 1, от швов 1 и 2, полосы 2 от шва 1.
4. Эпюры остаточных напряжений в полосах 1 и 2.
5. Анализ экспериментальных и расчетных данных.
6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Почему после сварки возникает изгиб полосы?
2. Будет ли отличаться изгиб, если шов 1 на пластине 1 выполнить не у кромки, а по линии центров тяжести поперечных сечений x ?
3. Как влияют сварочные напряжения от предыдущих швов на прогиб от последующих швов?
4. В каком случае прогиб полосы 1 больше: после шва 1 или после швов 1 и 2?
5. Как следует изменить погонную энергию шва 2, чтобы не было остаточного изгиба полосы 1 от швов 1 и 2?
6. Будут ли отличаться прогиб полосы 1, если швы 1 и 2 выполнить одновременно?
7. Как влияет предварительный изгиб полосы на остаточные деформации?
8. Какие остаточные напряжения в шве в пластине 2?
9. В какой пластине остаточные напряжения в шве 1 больше: в 1 или 2?
10. Будет ли отличаться прогиб полосы 2, если шов выполнить не у растянутой кромки, а по линии x ? у сжатой кромки?
11. Какова форма продольной оси полос x после сварки?

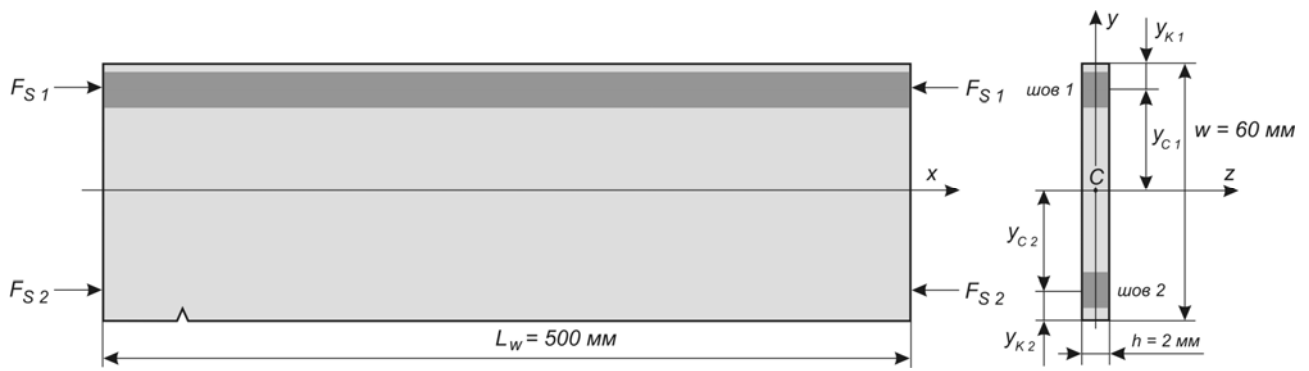


Рис. 3.1 Полоса для определения остаточного прогиба.

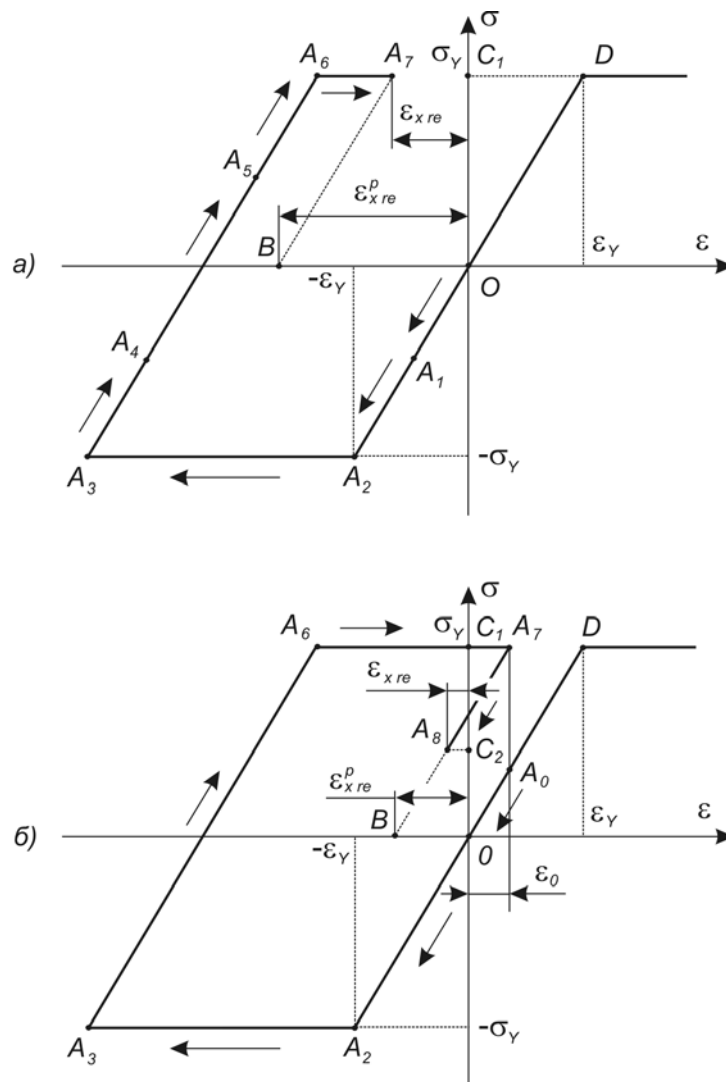


Рис. 3.2 Диаграмма деформирования волокна без начальных деформаций (а) и с начальными деформациями ϵ_0 (б).

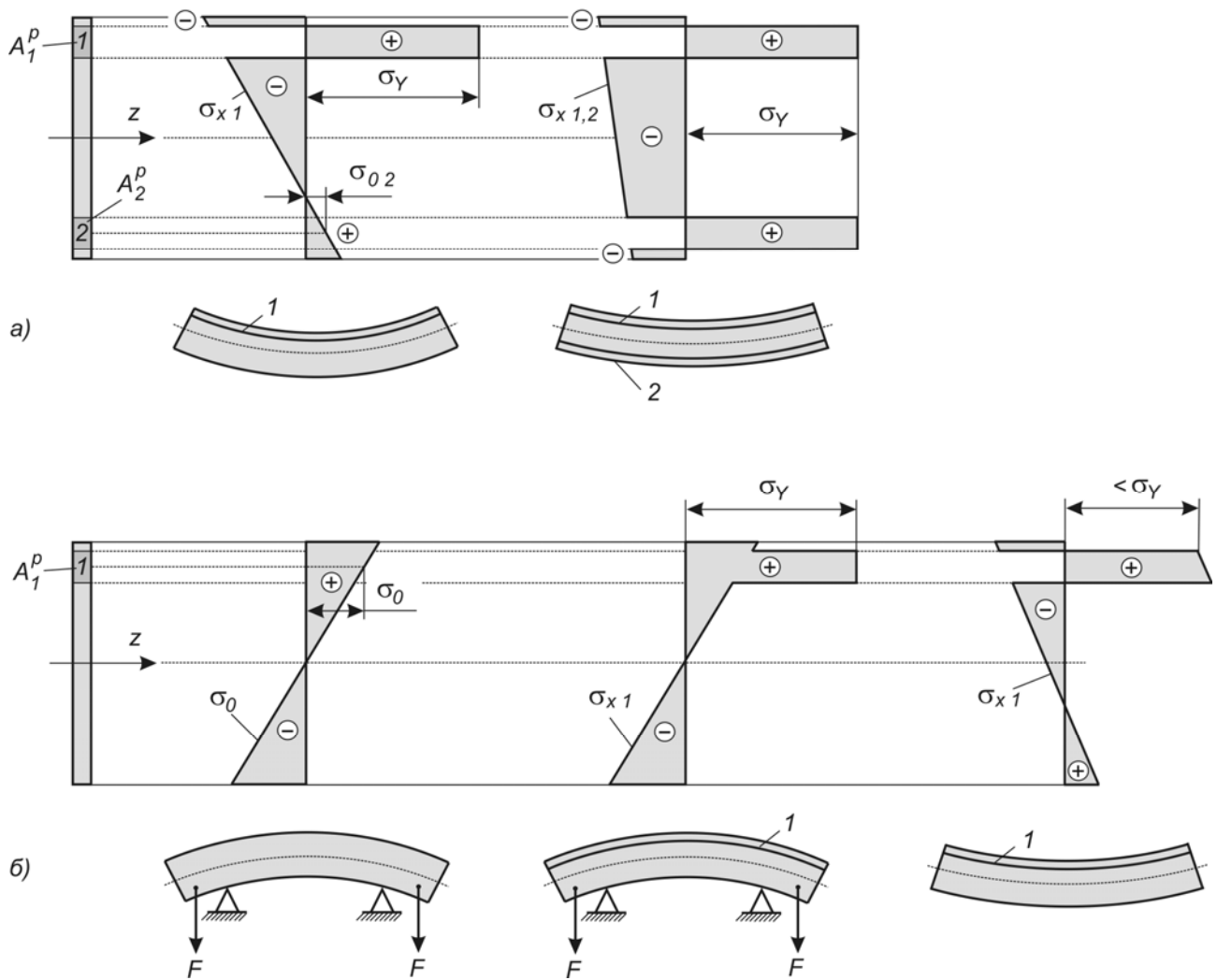


Рис. 3.3 Эпюры остаточных напряжений и форма пластин после сварки в свободном состоянии (а) и с предварительным изгибом (б).

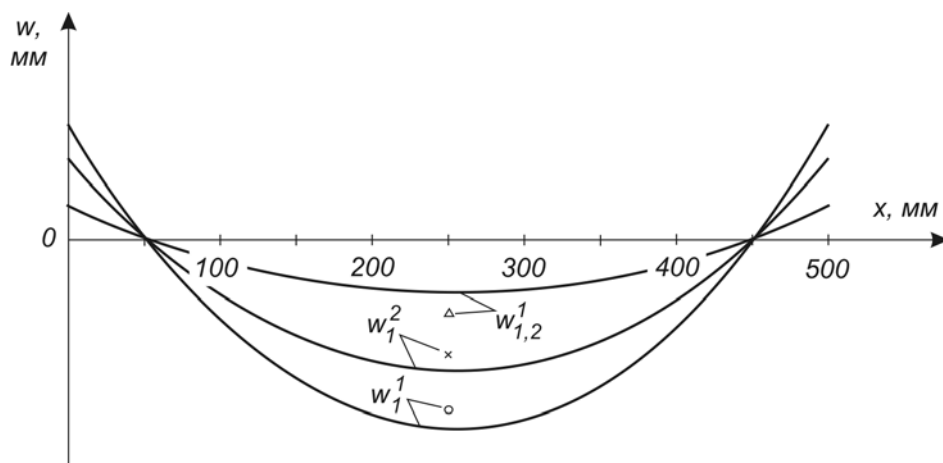


Рис. 3.4 Остаточный прогиб первой (w_1^1 , $w_1^{1,2}$) и второй (w_1^2) полос:
 Δ \times \circ – эксперимент
 сплошные линии – расчет.

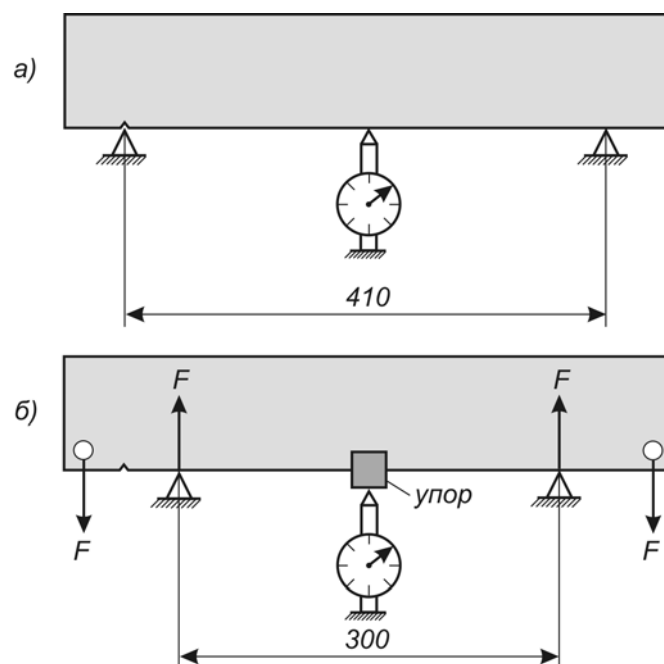


Рис. 3.5 Схема приспособлений для измерения остаточного прогиба в полосах 1 и 2 (а) и для создания предварительного изгиба в полосе 2 (б).

Параметры сварки и образцов

Таблица 3.1

Полоса	Шов	I, А	U, В	t _w , с	L _w , мм	v, мм/с	q ₁ , Дж/мм	q ₁ /A, Дж/мм ³	Координата шва, мм		w _{np} , мм
									у _к	у _с	
1	1										
	2										
2	1										

Экспериментальное определение прогиба полос

Таблица 3.2

Полоса		1	2
До сварки	1		
	2		
	3		
	ср		
После выпол- нения шва 1	1		
	2		
	3		
	ср		
Деформации от шва 1			
После выпол- нения шва 2	1		
	2		
	3		
	ср		
Деформации от шва 2			

Прогиб полос

Таблица 3.3

Полоса		1			2
Шов		1	2	1 + 2	1
Прогиб, мм	эксперимент				
	расчет				

Лабораторная работа № 4
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО ПРОГИБА И ПРОДОЛЬНОГО
УКОРОЧЕНИЯ ТАВРОВОЙ БАЛКИ**

Цель работы

Экспериментальное и расчетное определение остаточного прогиба и продольного укорочения сварной тавровой балки.

Содержание работы

Как и в случае наплавки валика на продольную кромку полосы (работа № 2), при сварке балки из уголков (рис. 4.1) образуются продольные остаточные деформации, приводящие к изгибу и укорочению балки по линии центров тяжести поперечных сечений (оси x) ([1]: с. 22 – 24, 32 – 35; [2]: с. 346 – 354; [10]: с. 50 – 54; [11]: с. 291 – 294, 389 – 393).

После выполнения шва 1 балка укоротится по оси x и станет вогнутой (рис. 4.2). Остаточные продольные полные деформации по всему сечению и остаточные продольные напряжения в упругой области можно получить, пользуясь понятием усадочной силы F_{s1} ([3]: с. 55 – 57, 83, 84), при этом влияние шва можно заменить влиянием внешней сжимающей силы F_{s1} , приложенной к краям шва и направленной вдоль линии центров тяжести пластической зоны A_1^p (рис. 4.1). Усадочная сила зависит от свойств материала и условий сварки ([3]: с. 55 – 57, 83, 84):

$$F_{s1} = \mu_x \frac{\alpha}{c\rho} q_{11} E \quad (4.1)$$

Если не учитывается влияние начальных напряжений, толщины и поверхностной теплоотдачи, то $\mu_x = 2^{1/2} \pi^{-1/2} e^{1/2} \ln 2 = -0,3354$.

Форму изогнутой продольной оси x (распределение поперечных перемещений или прогиба продольной оси) $w(x)$ можно приближенно найти по кривизне $C_z(x)$ из уравнения:

$$C_z(x) = \frac{d^2 w(x)}{dx^2} \quad (4.2)$$

Если принять кривизну C_z постоянной по оси x , то после интегрирования получим прогиб:

$$w(x) = \frac{1}{2} C_z x^2 + Ax + B \quad (4.3)$$

Постоянные интегрирования A и B можно найти, например, из условия, что прогиб в базовых точках 0 (рис. 4.1) равен нулю. Если шов выполнен не по всей длине балки (т.е. $C_z \neq \text{const}$), то для определения $w(x)$ можно воспользоваться фиктивной балкой на тех же опорах 0, загруженной фиктивной распределенной нагрузкой $C_z(x)$ (см. работу № 2).

Напряжения в пределах пластической зоны A^p (рис. 4.3) достигают предела текучести σ_y при докритических режимах сварки, когда $q_1/A < 0,6$ Дж/мм³ для низкоуглеродистой стали. Продольные напряжения в металле на продольной

оси x σ_{x0} всегда сжимающие (рис. 4.4), так как вне пластической зоны полные ε_{x0} , а, следовательно, и упругие деформации ε_{x0}^e всегда отрицательны (по закону Гука $\sigma_x = E\varepsilon_x^e$).

Величина площади пластических деформаций A_1^p , определяется геометрическими характеристиками балки (площадью поперечного сечения A и момента инерции I_y и I_z), свойствами материала ($\alpha/(c\rho)$, ε_Y), режимом сварки (q_{11}) и положением центра тяжести этой зоны y_{C1} и z_{C1} относительно главных осей y и z :

$$A_1^p = \frac{1}{\frac{1}{A} + \frac{y_{C1}^2}{I_z} + \frac{z_{C1}^2}{I_y} - \frac{\varepsilon_Y}{\mu_x \frac{\alpha}{c\rho} q_{11}}} \quad (4.4)$$

В рассматриваемом случае $z_{C1} = 0$. Непосредственно из формулы (4.4) величина A_1^p не может быть найдена, так как A_1^p зависит от y_{C1} , а y_{C1} в свою очередь – от A_1^p . Поэтому величина A_1^p находится методом последовательных приближений:

1. Задать начальное приближение $y_{C1}^{(0)} = 14,2$ мм;
2. Определить A_1^p по формуле (4.4);
3. Площадь A_1^p распределить по полке и стенке, принимая за центр распределения место введения теплоты и пренебрегая радиусами закруглениями (рис. 4.3);
4. Определить новое приближение $y_{C1}^{(1)}$;
5. Повторить п. 2, 3 и т.д. до тех пор, пока относительная разность между приближениями $y_{C1}^{(n)}$ и $y_{C1}^{(n+1)}$ составит менее 5 %.

Шов 2 создает противоположный изгиб, так как расстояние от центра тяжести пластической зоны y_{C2} (точки приложения усадочной силы F_{S2}) до оси z значительно больше y_{C1} (точки приложения усадочной силы F_{S1}), то балка может оказаться выпуклой даже при $q_{12} < q_{11}$ (рис. 4.2). Для устранения изгиба продольной оси от шва 1 достаточно местного концентрированного нагрева кромки стенки источником, погонная энергия q_{12} которого во столько раз меньше q_{11} , во сколько раз y_{C2} больше y_{C1} . В действительности эту погонную энергию следует несколько увеличить, чтобы скомпенсировать эффект уменьшения деформаций от шва 2 за счет начальных напряжений растяжения, которые существуют после шва 1 (рис. 4.4 а).

Балка в упругой области сжата швами и, если она после выполнения шва 2 выпуклая, то полка сжата меньше, чем стенка (рис. 4.4 б).

Приборы и материалы

1. Два отожженных равнополочных уголка из низкоуглеродистой стали Ст3 (ГОСТ 8509-73, профиль № 5) длиной 1000 мм, собранные на прихватках в тавр (рис. 4.1). Параметры сечения каждого уголка: толщина 5 мм, ширина 50 мм, площадь $A = 480$ мм², момент инерции $I_z = 112000$ мм⁴.
2. Приспособление для определения продольного укорочения оси балки.
3. Приспособление для определения изгиба балки.
4. Линейка, секундомер.

Порядок выполнения работы

1. Зачистить и разметить торцы стенки и измерительные поверхности полки, показанные на рис. 4.1 цифрами 0, 1, 2, 3, 4 (цифра 0 указывает базовые поверхности).

2. Балку установить в приспособление для определения продольного укорочения оси балки так, чтобы один торец упирался в боковую призму, а другой касался стержня индикатора по линии центров тяжести x . Провести отсчеты показаний индикатора (положение точки 1) и занести их в табл. 4.2. Установку тавра в приспособление и измерения провести трижды.

3. С помощью приспособления для определения изгиба балки замерить положение точек 2, 3, 4 на сторонах А и В (рис. 4.1) и показания занести в табл. 4.2. Измерения провести трижды.

4. Вычислить средние значения по трем измерениям.

5. Выполнить шов 1, замеряя время сварки, силу сварочного тока и напряжение дуги. Все измерительные площадки полки защитить от металлических брызг планками. Средние значения измерений занести в табл. 4.1.

6. После полного остывания балки повторить п. 2 – 4 (температура балки не должна превышать начальную более чем на $5\text{ }^{\circ}\text{C}$).

7. Выполнить шов 2, как указано в п. 5, при погонной энергии q_{12} в 1,5 – 2 раза меньшей q_{11} .

8. После полного остывания балки повторить п. 2 – 4.

Содержание отчета

1. Описание эксперимента с рис. 4.1 и табл. 4.1 и 4.2 для обоих швов.

2. Расчет продольного укорочения и прогиба продольной оси балки от шва 1, а также от шва 2 с учетом влияния начального напряженного состояния, создаваемого швом 1 (табл. 4.3). Расчет остаточных деформаций балки при обратной последовательности выполнения швов и тех же исходных данных (погонную энергию, приходящуюся на полку и стенку сохранить прежней, табл. 4.3). Сравнение расчета с экспериментом (табл. 4.3).

3. График прогибов продольной оси балки, полученных экспериментально и расчетным методом (рис. 4.2).

4. Расчет остаточных напряжений после шва 1 и после шва 2. Эпюры остаточных напряжений (рис. 4.4).

5. Анализ экспериментальных и расчетных данных.

6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Почему при сварке балок возникают деформации изгиба и продольного укорочения?

2. Почему после шва 1 балка вогнутая, а после шва 2 выпуклая?

3. При каких допущениях рассчитаны остаточные деформации и напряжения?

4. Можно ли, изменяя погонную энергию шва 2 q_{12} , компенсировать изгиб балки от шва 1? продольное укорочение балки от шва 1?

5. В какой последовательности и при каком режиме следует сваривать балку с целью получения минимального остаточного изгиба?

6. Как по эпюре остаточных продольных напряжений в упругой зоне балки определить форму изогнутой оси балки (выпуклость или вогнутость)?

7. Какие продольные волокна балки после выполнения шва 1 удлинились? Имеются ли такие волокна после выполнения шва 2?

8. Каковы методы уменьшения остаточных деформаций?

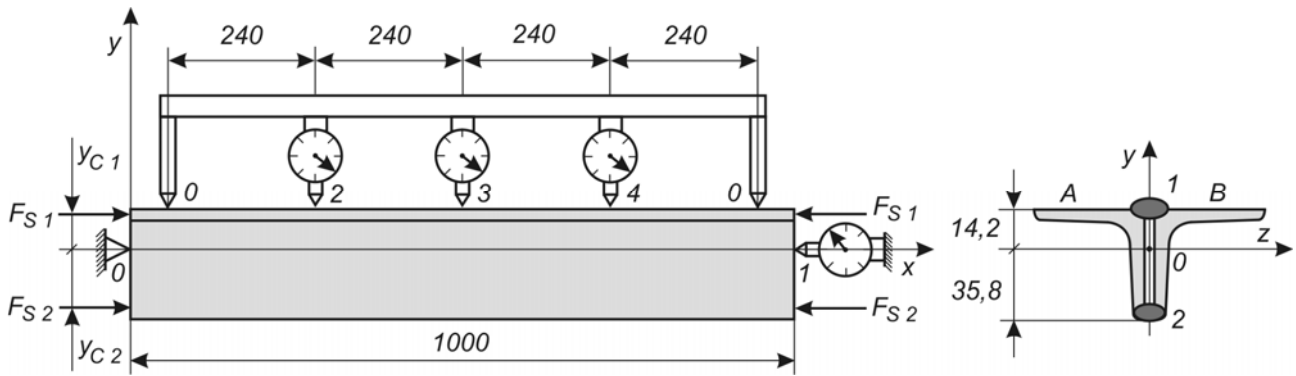


Рис. 4.1 Схема измерения остаточных сварочных перемещений.

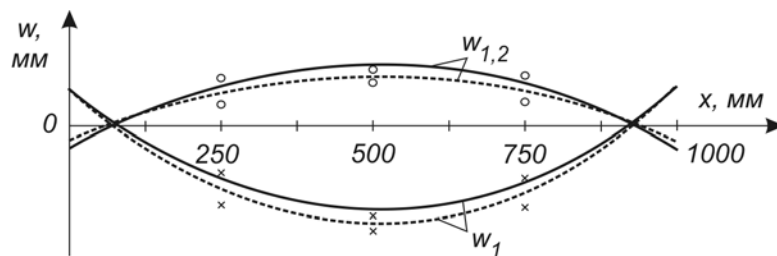


Рис. 4.2 Прогиб продольной оси балки от шва 1 (w_1) и швов 1 и 2 ($w_{1,2}$):

o x — эксперимент

— — расчет.

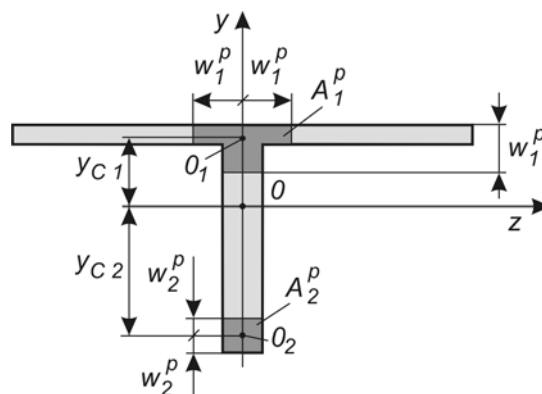


Рис. 4.3 Зона пластических деформаций поперечного сечения сварной балки.

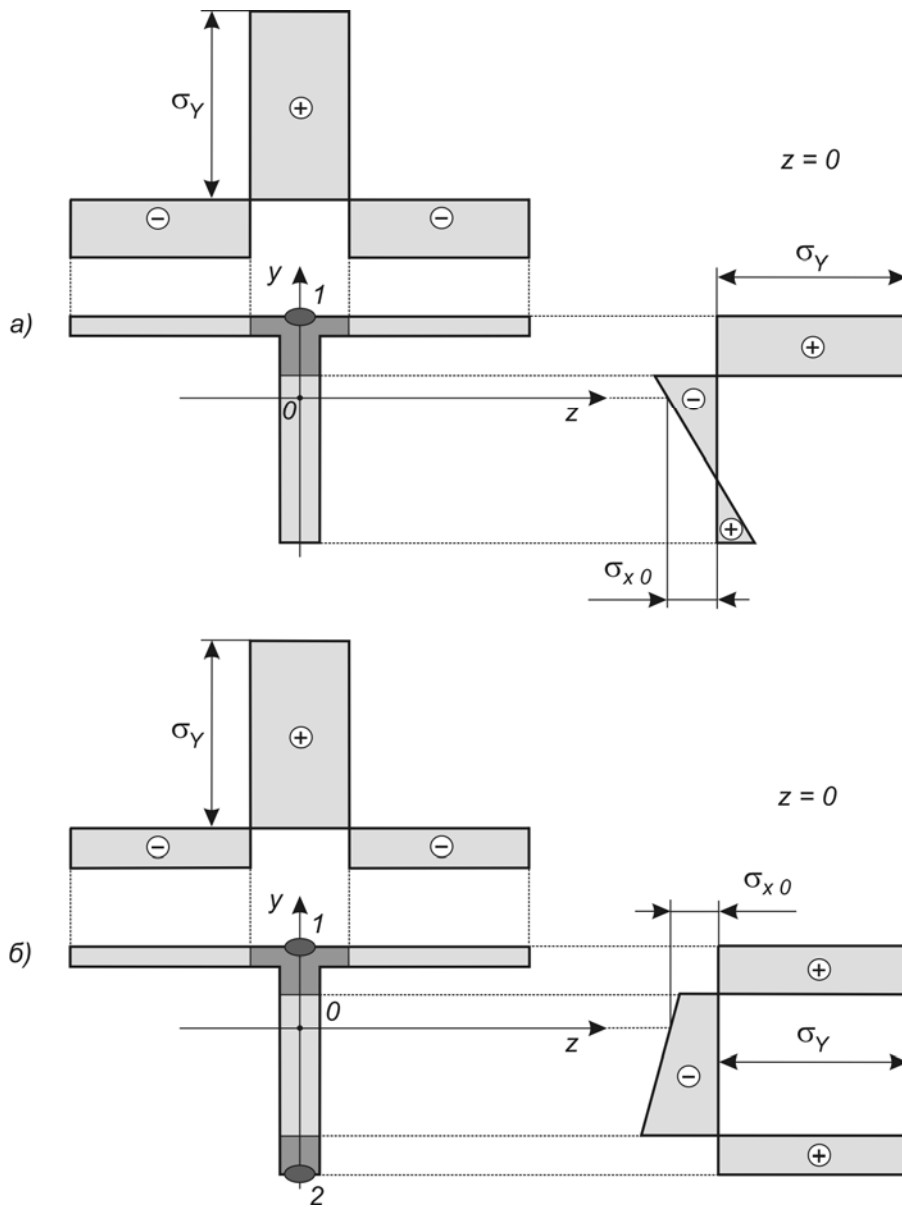


Рис. 4.4 Распределение остаточных продольных напряжений после выполнения шва 1 (а) и после выполнения шва 2 (б).

Режим сварки

Таблица 4.1

Шов	$I,$ А	$U,$ В	$t_{w2},$ с	$L_{w2},$ мм	$v,$ мм/с	$q_1,$ Дж/мм	$q_1/A,$ Дж/мм ³
1							
2							

Прогиб и продольное укорочение балки, мм

Таблица 4.2

Вид деформации		Продольное укорочение	Прогиб					
			сторона А			сторона В		
№ точек		1	2	3	4	2	3	4
До сварки	1							
	2							
	3							
	ср							
После выполнения шва 1	1							
	2							
	3							
	ср							
После выполнения шва 2	1							
	2							
	3							
	ср							
Деформация от шва 1								
Деформация от шва 2								
Деформация от швов 1 и 2								

Экспериментальные и расчетные значения прогиба и продольного укорочения балки, мм

Таблица 4.3

Вид деформации		Продольное укорочение	Прогиб		
			1	2	3
№ точек		1	2	3	4
Деформация от шва 1	эксперимент				
	расчет				
Деформация от шва 2	эксперимент				
	расчет				
Деформация от швов 1 и 2	эксперимент				
	расчет				
Деформация от двух швов при обратной последовательности	эксперимент				
	расчет				

Лабораторная работа № 5
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ
ПРИ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ ПОЛОС**

Цель работы

Экспериментальное и расчетное определение остаточных поперечных деформаций при стыковой сварке полос.

Теоретическая часть

Вследствие неравномерного нагрева при стыковой сварке полос возникают как продольные, так и поперечные сварочные деформации и напряжения ([1]: с. 44 – 47; [2]: с. 333 – 337; [11]: с. 327 – 338; [3]: с. 58, 59; [5]: с. 73 – 82).

Проследим за образованием поперечных деформаций в полосе, которая имитирует собранные на прихватках две одинаковые полосы без зазора (рис. 5.1 а). Пусть по оси полосы x наплавляется валик. Будем различать три области: область 1, нагретую выше температуры T^* (ограниченную изотермой T^*), в пределах которой металл находится в пластическом состоянии; область 2, температура которой изменяется от T^* до температуры T_1 , незначительно отличающейся от начальной температуры полосы; область 3, в которой нет заметного повышения температуры. Эта область охватывает нагретую область с трех сторон и создает для нее жесткий подковообразный контур.

Выделим поперечную полоску шириной dx , где ширина области 1 максимальна. До нагрева, когда эта полоска полностью находилась в области 3, она была постоянной толщины h , ширины dx и длины W (рис. 5.1 б). Вертикальными линиями показаны условные границы одинаковых по ширине участков металла.

Когда полоска оказывается в положении, показанном на рис. 5.1 а, происходят деформации по длине и толщине полоски. Очевидно, что увеличение длины полоски исключено, так как ее концевые участки принадлежат области 3 и жестко связаны между собой. Вместе с тем центральный участок полоски, принадлежащий области 1, находится в разупрочненном состоянии и практически не оказывает сопротивления сжимающему усилию (показано стрелками). Поэтому стремление нагретой полоски удлиниться реализуется путем перемещения нагретых участков металла к ее середине. При этом концевые сечения полоски (слева от сечения $k-k$ и справа от сечения $l-l$ на рис. 5.1 а) не смещаются. Средние участки нагретой зоны (участки $k-k\dots m-m$ и $n-n\dots l-l$) увеличивают свою ширину и перемещаются к центру оси. В частности, сечения $m-m$ и $n-n$, ограничивающие в полоске область 1, перемещаются в положение $m'-m'$ и $n'-n'$ (рис. 5.1 б и в). Обжатие центрального участка поперечной полоски происходит с образованием дополнительных поперечных пластических деформаций укорочения.

При остывании участки укорачиваются, вследствие чего они стремятся переместиться к центру. Ширина полосы после полного остывания уменьшается на величину ΔW .

Поперечное укорочение ΔW можно приближенно оценить, предполагая, что обжатие равно недопущенному температурному удлинению полосы с обратным знаком:

$$\Delta W = - \int_W \varepsilon^T dy = -\alpha \int_W \Delta T dy = -\frac{\alpha}{c\rho} \frac{q/v}{h} \quad (5.1)$$

При допущении одноосности напряженного состояния продольное укорочение рассчитывается по формуле (работа № 3):

$$\Delta L = -0,3354 \frac{\alpha}{c\rho} \frac{q/v}{A} \quad (5.2)$$

При выводе формулы (5.1) мы также предполагали, что напряжения не влияют и при остывании поперечные пластические деформации удлинения не образуются. В действительности в пластине формируется плоское напряженное состояние, рассчитать которое можно только с помощью численных методов решения соответствующей задачи теории термопластичности.

В случае сварки относительно коротких полос с относительно большой скоростью остаточные поперечные напряжения являются сжимающими по концам и растягивающими в середине полосы (рис. 5.2). Действительно, продольный шов, стремясь сократиться, изгибает каждую половину полосы в их плоскости, в результате чего они становятся выпуклыми наружу (рис. 5.3). С другой стороны, шов, связывая изогнутые в разные стороны половины, препятствует их отделению друг от друга, т.е. шов в средней части подвергается поперечному растяжению со стороны обеих половин полосы. Эти напряжения растяжения в середине шва уравниваются напряжениями сжатия по краям (рис. 5.2).

Приборы и материалы

1. Полоса из низкоуглеродистой стали размером 2x80x160 мм.
2. Приспособление для определения поперечных деформаций (рис. 5.4).
3. Секундомер, линейка.

Порядок выполнения работы

1. Установить полосу в приспособлении симметрично (рис. 5.4) и закрепить. Точки измерения показаны стрелками. Показания индикаторов занести в табл. 5.2.
2. Проварить полосу по оси x на автомате неплавящимся электродом в среде Ar, замеряя время сварки, ток и напряжение дуги. Средние значения замеров занести в табл. 5.1.
3. После полного остывания полосы в приспособлении показания индикаторов занести в табл. 5.2.

Содержание отчета

1. Описание эксперимента с рисунками и таблицами.
2. Расчет остаточных поперечных деформаций.
3. График остаточных поперечных деформаций по длине полосы с экспериментальными точками и расчетной кривой.

4. Расчет остаточного продольного укорочения полосы. Сравнение поперечного укорочения и продольного укорочения.
5. Анализ экспериментальных и расчетных данных.
6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Как возникают поперечные сварочные деформации?
2. Почему поперечные деформации переменны по длине?
3. При каких допущениях рассчитывают остаточные поперечные деформации?
4. Как объяснить расхождение экспериментальных и расчетных данных?
5. Изменяется ли продольное укорочение и поперечное укорочение, если длину полосы увеличить? Если ширину полосы увеличить?

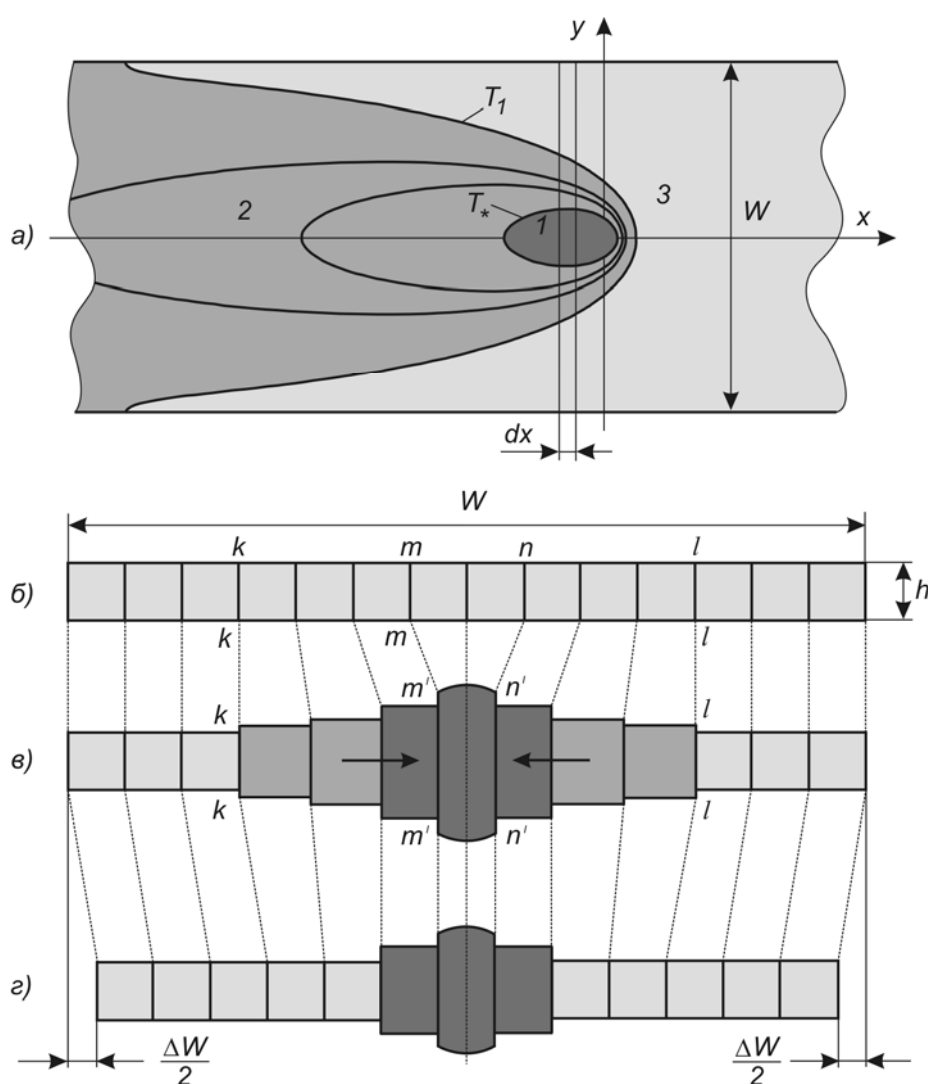


Рис.5.1. Схема образования поперечных деформаций:

- а – расчленение полосы на области;
- б – поперечное сечение полосы до прохождения дуги;
- в – поперечное сечение полосы вскоре после прохождения дуги;
- г – поперечное сечение после полного остывания полосы.

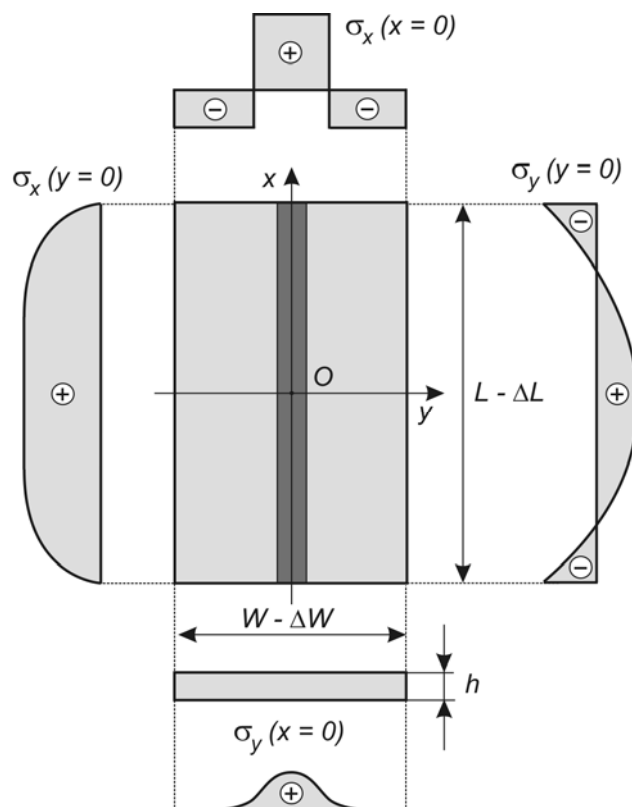


Рис.5.2 Остаточные продольные и поперечные напряжения после стыковой сварки полос.

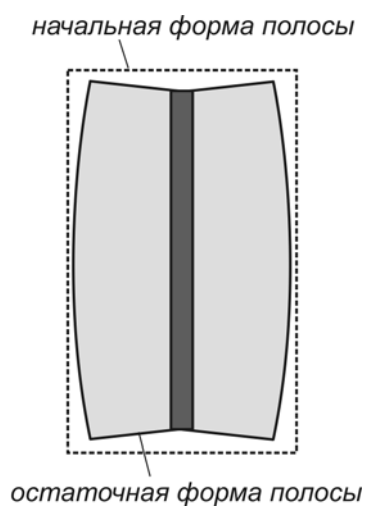


Рис.5.3. Схема остаточных деформаций полосы.

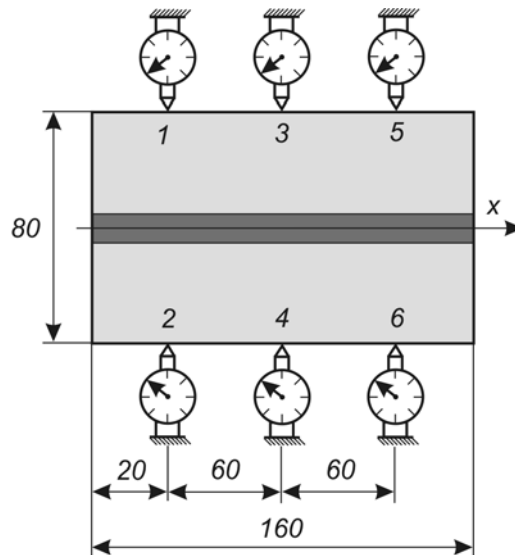


Рис.5.4. Схема приспособления для определения поперечных деформаций.

Режим сварки

Таблица 5.1

I, A	U, B	t_w, c	$L_w, мм$	$v, мм/с$	$q_1, Дж/мм$

Поперечные деформации по длине полосы, мм

Таблица 5.2

№№ точек	1	2	3	4	5	6
Положение точки до сварки						
Положение точки после сварки						
Перемещение точки						
Поперечная деформация						

УГЛОВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ СВАРКЕ ТАВРОВОГО СОЕДИНЕНИЯ**Цель работы**

Определение угловых деформаций от двустороннего шва при сварке таврового соединения.

Основные теоретические положения

Рассмотрим образование угловых деформаций при последовательном выполнении двухстороннего шва ([1]: с. 58 – 60; [2]: с. 346; [8]: с. 155 – 160; [2]: с. 464 – 469; [3]: с. 106 – 110; [4]: с. 118 – 120; [10]: с. 115 – 124; [12]: с. 130, 131; [15]: с. 188 – 190).

При выполнении первого шва деформации полки относительно неподвижной стенки можно схематично представить как сумму деформации двух видов: деформации поворота полки на угол ω_1 в результате укорочения волокон шва, параллельных гипотенузе (рис. 6.1 а), и деформации изгиба полки вследствие проплавления ее на некоторую глубину с поворотом на угол α_1 одной половины полки относительно другой (рис. 6.1 б). После выполнения шва № 1 полка перейдет из начального положения 0-0-0 в положение 1-0-1 (рис. 6.1 в).

В процессе охлаждения металл шва свободно укорачивается без образования напряжений, гипотенуза шва длиной L_h укорачивается на величину ΔL_h , при этом одна сторона равнобедренного треугольника относительно другой поворачивается на ω_1 , который легко найти из геометрических соображений (рис. 6.1 г). Так как угол ω_1 мал, то

$$\omega_1 = \frac{\Delta L_h}{h} = \frac{\alpha \Delta T L_h}{h} = 2\alpha \Delta T, \quad (6.1)$$

где $\alpha \Delta T$ – относительное температурное укорочение металла шва при остывании. Как видно, угол ω_1 не зависит от катета шва. Для низкоуглеродистой стали $\alpha \Delta T \approx 0,012$ и тогда $\omega_1 = 2 \cdot 0,012 = 0,024 \text{ рад} = 1^\circ 22'$.

Угол изгиба полки α_1 может быть найден так же, как и в случае наплавки на поверхность листа с учетом доли теплоты, приходящейся на полку ([1]: с. 55, 56; [10]: с. 98 – 112; [11]: с. 444 – 457; [12]: с. 125 – 129). Без значительной погрешности величину угла α_1 можно найти, исходя из предположения, что угол α_1 является результатом укорочения металла шва, и считая, что деформации окружающего основного металла, возникающие при нагреве и при последующем остывании, взаимно компенсируются и не оказывают заметного влияния на величину угла α_1 ([10]: с. 99).

Если длина полки относительно мала, то угол α_1 зависит в основном от относительной глубины и формы зоны проплавления полки. Например, при полном проплавлении и прямоугольной форме зоны проплавления угловые деформации отсутствуют, так как поперечное укорочение металла шва по толщине постоянно. В свою очередь зона проплавления определяется той частью погонной энергии q_1 , которая расходуется на расплавление основного металла полки:

$$q_{1m} = \frac{2h_{fl}}{2h_{fl} + h_{wb}} \cdot \eta_{BM} \cdot q_1, \quad (6.2)$$

где η_{BM} – коэффициент, учитывающий долю теплоты, идущей на расплавление основного металла, $\eta_{BM} = 0,25 - 0,43$ ([10]: с. 116; [11]: с. 467; [12]: с. 129).

В случае выполнения сварки на режимах, при которых глубина проплавления h_m не превосходит $0,6h_{fl}$, ширина валика не превышает полуторократной толщины полки h_{fl} и линия сплавления близка к параболе, значение угловой деформации выражается приближенной линейной зависимостью ([10]: с. 109):

$$\alpha_0 = 2,5 \cdot 10^{-9} \frac{q_{1m}}{h_{fl}^2} \quad (6.3)$$

где q_{1m} принимается в Дж/мм, а h в мм.

При $h_m > 0,6h_{fl}$ деформация меньше, так как это соответствует более равномерному нагреву полки по толщине.

Зависимость (6.3) получена для случая, когда шов наплавляется одновременно по всей длине листа, что справедливо, если длина листа L не превышает длину L^* изотермы T^* . При большей длине листа L угловые деформации больше и могут быть определены по приближенной формуле ([10]: с. 111, 112; [11]: с. 447, 448):

$$\alpha_1 = \begin{cases} 0,25(L/L^* + 3)\alpha_0 & \text{при } L^* < L < 9L^* \\ 3\alpha_0 & \text{при } L \geq 9L^* \end{cases} \quad (6.4)$$

Длину L^* изотермы T^* можно найти, приняв схему распространения теплоты линейного быстродвижущегося источника в пластине ([1]: с. 45). Для низкоуглеродистой стали длина изотермы $T^* = 600$ °С равна:

$$L^* = \frac{1}{\pi\lambda c\rho(T^* - T_0)^2} \left(\frac{q}{2h_{fl} + h_{wb}} \right)^2 \frac{1}{v} \quad (6.5)$$

Таким образом, по формулам (6.3, 6.4, 6.5) можно приближенно рассчитать угловую деформацию полки (грибовидность) при выполнении первого шва:

$$\beta_1 = \alpha_1.$$

При выполнении второго шва из-за некоторого проплавления полки правая половина полки повернется на угол α_2 (рис. 6.1 е) и полка займет положение 1-0-2. Центр поворота теперь смещен ко шву 2, тогда как центр поворота был вблизи шва 1 (рис. 6.1 б, д). Если вследствие укорочения шва 2 в направлении гипотенузы правая половина должна была бы повернуться на больший угол ω_2 , то этому повороту стало бы препятствовать закрепление полки швом 1. В связи с этим в шве 2 возникли бы растягивающие усилия, которые стали бы изгибать полку и растягивать шов 1. Под действием растягивающих усилий шов должен будет удлиниться, в следствие чего полка сможет повернуться вокруг точки 0 на угол θ_w и занять положение 3-0-3. Кроме того, под действием тех же усилий в шве 2 полка изогнется на некоторый угол θ_{fl} , в результате полка займет положение 3-0-4, при котором швы 1 и 2 будут растянуты на одну и ту же величину.

Таким образом, дополнительный изгиб полки в результате выполнения шва 2 составит ([10] – с. 119, 120):

$$\beta_2 = \alpha_2 + \theta_{fl}. \quad (6.6)$$

Угол α_2 можно определить по изложенной методике расчета угла α_1 .

Ранее мы полагали, что угол поворота ω_2 , определяемый укорочением углового шва 2 при остывании, больше угла поворота α_2 , определяемого укорочением зоны проплавления полки. Если наоборот, $\omega_2 < \alpha_2$, то шов после остывания будет сжат, за счет чего полка получит дополнительный обратный выгиб θ_{fl} и ее угол изгиба от шва 2 составит:

$$\beta_2 = \alpha_2 - \theta_{fl}. \quad (6.7)$$

Рассматривая напряженное состояние швов и полки, можно определить угол θ_{fl} ([2]: с. 346; [4]: с. 119 – 120; [10]: с. 120 – 124). Результаты расчета и экспериментов показывают, что при сварке тавровых соединений выбранных в этой работе размеров $\theta_{fl} \ll \alpha_2$ и

$$\beta_2 \approx \alpha_2.$$

Поэтому для приближенного определения грибовидности полки достаточно знать угол изгиба ее в результате проплавления при выполнении обоих угловых швов ([11] – с. 466):

$$\beta_{1,2} = \beta_1 + \beta_2 = \alpha_1 + \alpha_2.$$

При экспериментальной проверке расчетных данных следует иметь в виду, что в настоящее время теория сварочных деформаций не учитывает большое число факторов, влияющих на угловые деформации, поэтому приведенные зависимости, как и все другие имеющие формулы, следует рассматривать как ориентировочные. Более точные результаты могут быть получены решая трехмерную задачу теории термопластичности численным методом конечных элементов.

Приборы и материалы

1. Собранное на прихватах тавровое соединение (рис. 6.2) с углублением и нанесенными рисками на полке.
2. Шлифованная плита, стол и штатив с индикатором для измерения перемещения точек образца (рис. 6.3).
3. Штангенциркуль, секундомер.

Порядок выполнения работы

1. Установить образец на стол так, чтобы углубление в полке от керна попало на острие штифта II приспособления. При этом стрелка на приспособлении должна находиться против продольной риски на полке.
2. Произвести измерение индикатором на штативе в точках 1 – 7 образца (рис. 6.3). Результаты занести в табл. 6.1. Измерения произвести трижды.
3. Вычислить среднее значение по трем измерениям.

4. Выполнить шов вручную катетом 5 – 8 мм, со стороны, противоположной углублению в полке, измеряя время сварки, ток и напряжение дуги. Значения замеров занести в табл. 6.2.

5. После полного остывания произвести измерение образца в приспособлении. Результаты занести в табл. 6.1.

6. Замерить катет шва 1, значение катета занести в табл. 6.2.

7. Выполнить шов 2 катетом шва 1 со стороны углубления в полке, измеряя время сварки, ток и напряжение дуги.

8. После остывания произвести измерения образца. Результаты занести в табл. 6.1 и 6.2.

Содержание отчета

1. Описание эксперимента с рисунками и таблицами.

2. График распределения поперечных перемещений поверхности полки w_1 , w_2 и $w_{1,2}$.

3. Пример расчета угловых деформаций β_1 или β_2 по экспериментальным данным w_1 или w_2 .

4. Расчет угловых деформаций по режиму сварки.

5. Анализ экспериментальных и расчетных данных.

6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Как возникают угловые деформации от шва 1, шва 2?

2. Почему возникают угловые деформации β_1 , β_2 ?

3. Какова форма поверхности полки вдали от швов?

4. Можно ли по графику перемещений w_1 , w_2 определить положение шва 1, шва 2?

5. Как можно предотвратить или устранить угловые деформации?

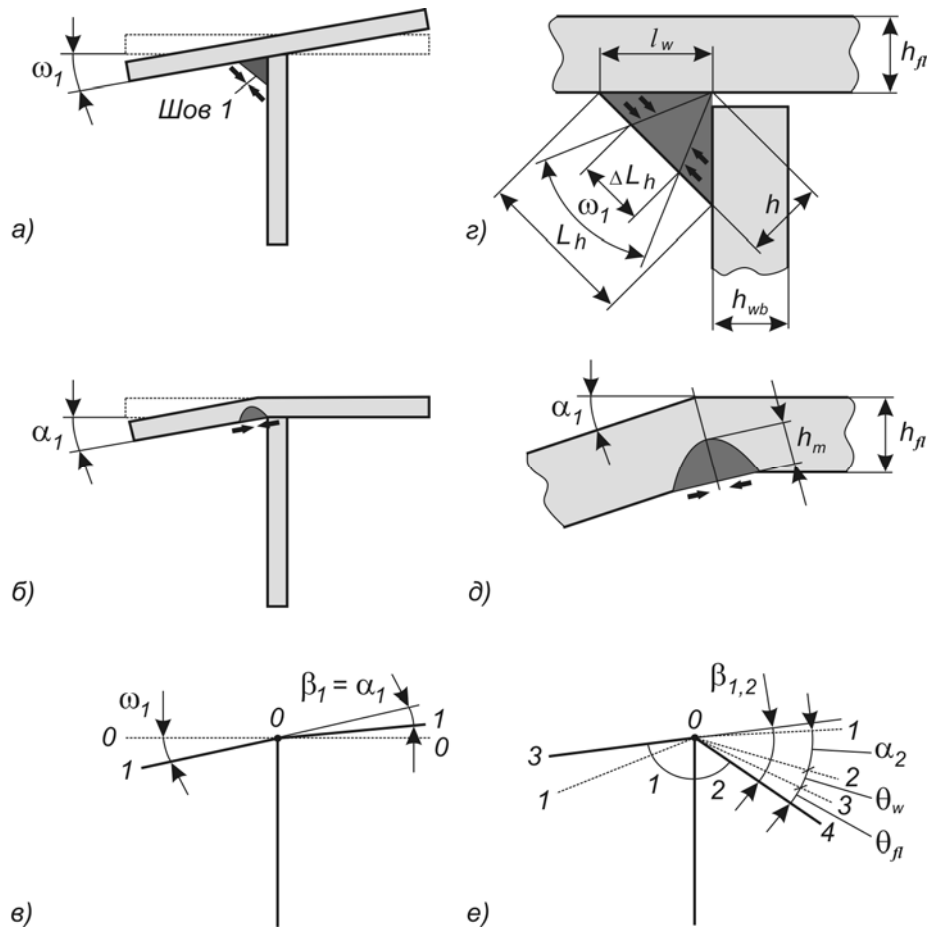


Рис. 6.1 Схема образования угловых деформаций в тавровом соединении.

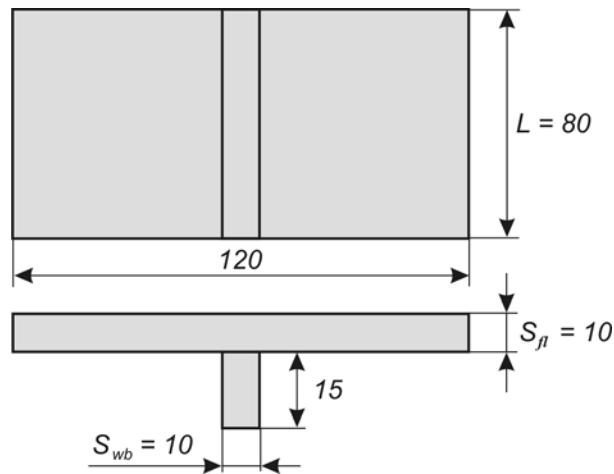


Рис. 6.2 Образец для определения угловых деформаций.

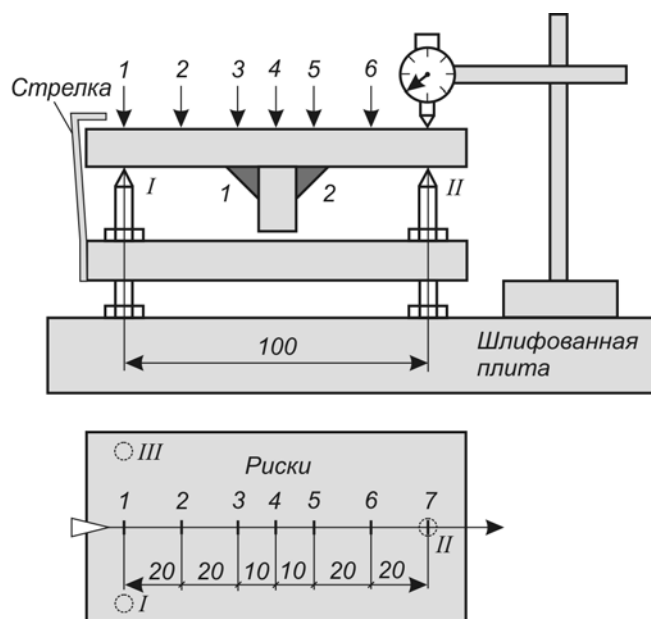


Рис. 6.3 Приспособление для измерения перемещений точек образца.

Перемещения точек образца, мм

Таблица 6.1

№ точки		1	2	3	4	5	6	7
Замеры до сварки	1							
	2							
	3							
	среднее							
Замеры после шва 1	1							
	2							
	3							
	среднее							
Замеры после шва 2	1							
	2							
	3							
	среднее							
Перемещения от шва 1 w_1								
Перемещения от шва 2 w_2								
Перемещения от швов 1 и 2 $w_{1,2}$								

Режим сварки и угловые деформации

Таблица 6.2

Шов	I , А	U , В	t_w , с	l_w , мм	v , мм/с	q_1 , Дж/мм	β_1, β_2 , рад		$\beta_{1,2}$, рад	
							экспер.	расчет	экспер.	расчет
1										
2										

УМЕНЬШЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ ПОСЛЕДУЮЩЕГО РАСТЯЖЕНИЯ

Цель работы

Уменьшение остаточных сварочных деформаций и напряжений в полосе со сварным швом путем растяжения после сварки.

Содержание работы

Для уменьшения остаточных сварочных деформаций и напряжений необходимо создать пластические деформации удлинения после сварки, либо в процессе сварки. Рассмотрим уменьшение деформаций и напряжений методом последующего растяжения ([1]: с. 66, 67; [2]: с. 411 – 413; [8]: с. 199 – 204; [11]: с. 418 – 419; [9]: с. 70 – 76; [14]: с. 95 – 98).

При выполнении шва по оси x в полосе образуются продольные деформации и напряжения (рис. 7.1). В продольном волокне вблизи шва (в точке A_1) происходят пластические деформации укорочения при нагреве и пластические деформации удлинения при остывании. После полного остывания (состояние I) это волокно на диаграмме деформирования характеризуется точкой A_1^I (рис. 7.1 г), то есть в волокне имеются напряжения σ_1^I , равные пределу текучести σ_Y , упругие деформации удлинения $\varepsilon_x^{el}{}_1$, равные ε_Y , остаточные деформации укорочения $\varepsilon_x^{pl}{}_1$ и полные деформации укорочения ε_x^I . Волокно упругой зоны (точки A_2) характеризуются точкой A_2^I , т.е. в этом волокне отсутствуют пластические деформации, напряжения равны $|\sigma_2^I| < \sigma_Y$, упругие деформации укорочения равны ε_x^{el} , полные деформации ε_x^I во всех волокнах постоянны, так как шов совпадает с продольной осью полосы x и, следовательно, кривизна равна 0.

Упрощенные эпюры остаточных напряжений и деформаций показаны на рис. 7.1 а. У буквенных обозначений цифры внизу указывают номер точки (A_1 или A_2), а цифры наверху – состояние (I, II или III). Вертикальной штриховой выделены пластические деформации ε_x^p .

Напряжения в упругой и пластической зонах определяются из условия равновесия полосы:

$$-\sigma_2^I(W - w^p) = \sigma_1^I w^p$$

или

$$\sigma_2^I = -\frac{w^p}{W - w^p} \sigma_1^I = -\frac{\alpha \sigma_Y}{1 - \alpha}, \quad (7.1)$$

где $\alpha = w^p / B$ – отношение ширины пластической зоны к ширине полосы.

Полные деформации всех волокон равны:

$$\varepsilon_x^I = \frac{\sigma_2^I}{E} = -\frac{\alpha}{1 - \alpha} \varepsilon_Y, \quad (7.2)$$

где $\varepsilon_Y = \sigma_Y / E$.

Пусть при первом нагружении полосы внешней силой вызываются средние напряжения растяжения:

$$\sigma_{\ell} = \beta_{\ell-1} \sigma_Y, \quad (7.3)$$

где $\beta_{\ell-1} < 1$ (состояние II, рис. 7.1 б). Пластическая зона шириной w^p не воспринимает нагрузку, так как в ней напряжения уже достигли предела текучести, поэтому:

$$\sigma_1^{\text{II}} = \sigma_1^{\text{I}} = \sigma_Y.$$

Всю нагрузку воспримет только упругая зона шириной $(1 - \alpha)W$. В ней напряжения увеличатся и будут равны:

$$\sigma_2^{\text{II}} = \sigma_2^{\text{I}} + \frac{\sigma_{\ell}}{1 - \alpha} = -\frac{\alpha}{1 - \alpha} \sigma_Y + \frac{\beta_{\ell-1} \sigma_Y}{1 - \alpha} = \frac{\beta_{\ell-1} - \alpha}{1 - \alpha} \sigma_Y. \quad (7.4)$$

При растяжении все волокна (в том числе расположенные в зоне шва) получают удлинения:

$$\varepsilon_{\ell} = \frac{\sigma_{\ell}}{1 - \alpha} \frac{1}{E} = \frac{\beta_{\ell-1} \sigma_Y}{1 - \alpha} \frac{1}{E} = \frac{\beta_{\ell-1}}{1 - \alpha} \varepsilon_Y. \quad (7.5)$$

Эти удлинения в пластической зоне (точка A_1^{II}) будут пластическими, а в упругой зоне (точка A_2^{II}) упругими.

В результате нагрузки точка A_1 из состояния A_1^{I} переходит в состояние A_1^{II} , а точка A_2 из A_2^{I} в A_2^{II} (рис. 7.1 г). Видно, что остаточные пластические деформации укорочения уменьшились $|\varepsilon_x^{\text{pl II}}| < |\varepsilon_x^{\text{pl I}}|$.

При снятии нагрузки все эти волокна полосы деформируются упруго $\varepsilon_x^{\text{pl II}} = \varepsilon_x^{\text{pl I}}$ и получают дополнительное укорочение пропорционально внешней нагрузке:

$$\varepsilon_x^{\text{III}} = \varepsilon_x^{\text{II}} - \beta_{\ell-1} \varepsilon_Y.$$

С учетом (7.1) – (7.4) напряжения и деформации при этом будут (рис. 7.1 в):

$$\sigma_1^{\text{III}} = \sigma_1^{\text{II}} - \sigma_{\ell} = \sigma_Y - \beta_{\ell-1} \sigma_Y = (1 - \beta_{\ell-1}) \sigma_Y = (1 - \beta_{\ell-1}) \sigma_1^{\text{I}};$$

$$\sigma_2^{\text{III}} = \sigma_2^{\text{II}} - \sigma_{\ell} = \frac{\beta_{\ell-1} - \alpha}{1 - \alpha} \sigma_Y - \beta_{\ell-1} \sigma_Y = -\frac{\alpha}{1 - \alpha} (1 - \beta_{\ell-1}) \sigma_Y = (1 - \beta_{\ell-1}) \sigma_2^{\text{I}};$$

$$\varepsilon_x^{\text{III}} = \frac{\sigma_2^{\text{III}}}{E} = (1 - \beta_{\ell-1}) \varepsilon_x^{\text{I}}. \quad (7.6)$$

После разгрузки точка A_1 из состояния A_1^{II} переходит в состояние A_1^{III} , а точка A_2 из A_2^{II} в A_2^{III} (рис. 7.1 г). Видно, что как напряжения σ_1^{III} и σ_2^{III} , так и полные деформации $\varepsilon_x^{\text{III}}$ уменьшились.

Таким образом, в результате нагрузки и разгрузки напряжения и полные деформации во всей полосе уменьшились до величины, равной $(1 - \beta_{\ell-1})$ от начальной величины (7.6). Это произошло за счет увеличения пластической деформации (уменьшения остаточных пластических деформаций укорочения) в зоне шва и вблизи него.

Если вторично растянуть полосу внешней нагрузкой, не превосходящей первую нагрузку ($\beta_{\ell-2} < \beta_{\ell-1}$), то полоса будет деформироваться упруго. Точка

A_1^{III} будет перемещаться к A_1^{II} , а A_2^{III} к A_2^{II} . Остаточные пластические деформации укорочения сохраняются, $\varepsilon_x^{p\text{III}} = \varepsilon_x^{p\text{II}}$ (рис. 7.1 г). При дальнейшем нагружении ($\beta_{\ell 2} > \beta_{\ell 1}$) в пластической зоне образуются новые пластические деформации удлинения (деформация волокна A_1 происходит в направлении точки D по прямой $A_1^{\text{II}}D$). Если потом полосу разгрузить, то остаточные сварочные деформации и напряжения в итоге уменьшатся до величины, равной $(1 - \beta_{\ell 2})$ от начальной.

Для полного снятия остаточных деформаций и напряжений необходимо создать во всем сечении напряжения, равные пределу текучести. Тогда состояние всех точек полосы будет определяться точкой D на диаграмме деформирования материала (рис. 7.1 г.).

Приборы и материалы

1. Полоса из низкоуглеродистой стали толщиной $h = 2$ мм, шириной $W = 60$ мм и длиной $L = 700$ мм (рис. 7.2).
2. Машина для растяжения образца.
3. Приспособление для придания полосе плоской формы.
4. Деформометр.
5. Секундомер, линейка.

Порядок выполнения работы

1. Зажать полосу в приспособление для придания ей плоской формы. С помощью деформометра измерить базы 1–1, 2–2, 1¹–1¹, 2¹–2¹, показания индикаторной головки деформометра занести в табл. 7.1. Установку полосы в приспособление и измерение провести трижды.

2. Для учета возможного изгиба в двух плоскостях определить среднюю величину измерений.

3. Проварить полосу вольфрамовым электродом в среде аргона по оси полосы, на длине ~ 500 мм, замеряя время сварки, ток и напряжение дуги. Средние значения занести в табл. 7.2.

4. Измерить длину шва и занести в табл. 7.2.

5. После полного остывания полосы повторить п. 1 и 2. Рассчитать остаточную деформацию полосы.

6. Вставить образец в растяжную машину и растянуть его силой 5 кН.

7. Снять нагрузку, вынуть образец и повторить п. 1 и 2.

8. Последовательно растянуть образец силой 10 кН, 15 кН, 20 кН, 25 кН, выполняя на каждом этапе нагружения п. 1 и 2.

Содержание отчета

1. Описание эксперимента с рисунками и таблицами.
2. Расчет продольных деформаций и напряжений после сварки (принять $\sigma_y = 250$ МПа; $E = 200$ ГПа).
3. Расчет остаточных деформаций и напряжений после нагружения силой $P = 15$ кН.

4. Эпюры напряжений и деформаций после сварки, при нагружении и после нагружения (разгрузки) силой $P = 15$ кН (рис. 7.1 а, б, в, в масштабе).

5. Диаграмма деформирования металла пластической зоны вблизи шва и упругой зоны при $P = 15$ кН (рис. 7.1 г, в масштабе). Принять, что максимальная температура металла $T_{\max} \leq T_e = 500$ °С ($\varepsilon_Y = \text{const}$), а максимальные упруго-пластические деформации укорочения приблизительно равны максимальным температурным.

6. График зависимости остаточных сварочных деформаций от величины нагрузки σ_l с экспериментальными и расчетными данными.

7. Анализ экспериментальных и расчетных данных.

8. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Почему происходит уменьшение остаточных напряжений и деформаций при растяжении полосы?

2. Как изменяются напряжения и деформации в упругой и пластической зонах при первом и повторном нагружении?

3. Как деформируется металл пластической зоны при первом растяжении, если напряжение в нем меньше σ_Y , например, за счет предварительного растяжения металла в зоне сварки (лабораторная работа № 3)?

4. При каких условиях можно полностью устранить деформации и снять напряжения в сварном соединении?

5. Можно ли полностью устранить напряжения при чистом изгибе полосы со швом на ее продольной оси?

6. Что энергетически выгоднее с точки зрения снятия остаточных напряжений в полосе с одним швом на кромке, растяжение или изгиб?

7. Изменяются ли остаточные напряжения и деформации после сжатия полосы силой $P = 10$ кН?

8. Являются ли остаточные напряжения в пластичном материале опасными для прочности конструкции при статическом нагружении?

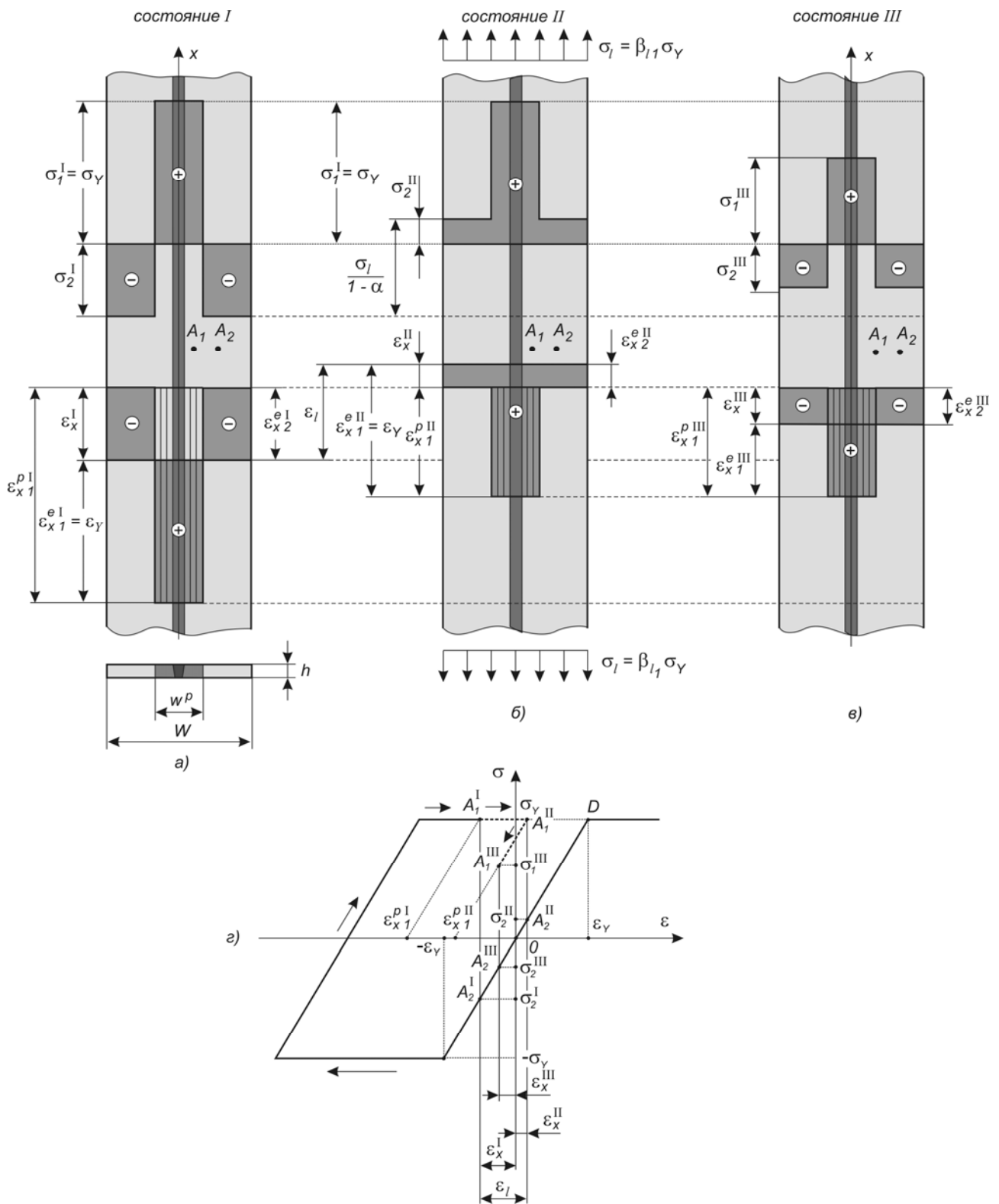


Рис. 7.1 Изменение остаточных деформаций и напряжений в полосе при ее растяжении.

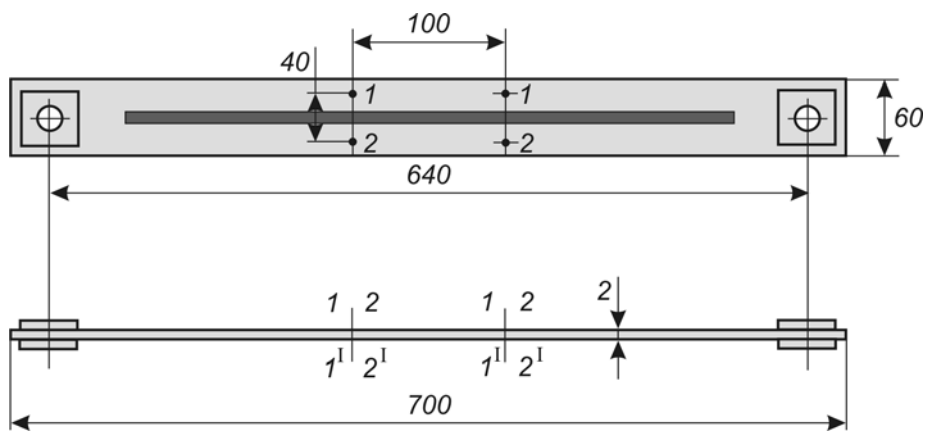


Рис. 7.2 Образец для испытаний.

Вид деформации		База				Остаточные сварочные деформации, мм	
		1-1	1 ¹ -1 ¹	2-2	2 ¹ -2 ¹	экспер.	расчет
До сварки	1						
	2						
	3						
	ср.						
После сварки	1						
	2						
	3						
	ср.						
После растяжения силой 5 кН ($\sigma_\ell = 41,7$ МПа)	1						
	2						
	3						
	ср.						
После растяжения силой 10 кН ($\sigma_\ell = 83,3$ МПа)	1						
	2						
	3						
	ср.						
После растяжения силой 15 кН ($\sigma_\ell = 125$ МПа)	1						
	2						
	3						
	ср.						

Продолжение таблицы 7.1

Вид деформации		База				Остаточные сварочные деформации, мм	
		1-1	1 ¹ -1 ¹	2-2	2 ¹ -2 ¹	экспер.	расчет
После растяжения силой 20 кН ($\sigma_\ell = 166,7$ МПа)	1						
	2						
	3						
	ср.						
После растяжения силой 25 кН ($\sigma_\ell = 208,3$ МПа)	1						
	2						
	3						
	ср.						

ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ НАЛИЧИИ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Цель работы

Показ зависимости прочности металла шва от его пластических свойств путем имитации накапливания деформации в корне многослойного шва стыкового соединения.

Содержание работы

Степень влияния сварочных напряжений на прочность при статической нагрузке в основном зависит от исходных пластических свойств и от степени исчерпания пластичности металла в процессе изготовления конструкции.

При выполнении одностороннего многослойного шва большой толщины (рис. 8.1) в результате поперечного укорочения металла верхних слоев происходит поворот одной половины соединения относительно другой и в нижней части шва накапливаются пластические деформации удлинения. Если эти деформации вследствие концентрации напряжений сосредотачиваются на малой базе (непровар в корне шва, резкий переход металла подварочного шва к основному металлу), то из-за исчерпания пластичности металла возможно образование трещин. Если трещина не появилась при сварке, то не исключена возможность образования ее при нагружении конструкции. В этом случае рабочие напряжения, складываясь с остаточными, вызывают дополнительные пластические деформации в тех местах концентрации напряжений, где пластичность израсходована в наибольшей степени.

Установка имитирует условия деформирования металла шва при сварке стыкового соединения с V-образной разделкой кромок (рис. 8.2). В нижние захваты (1) помещают испытуемый образец с надрезом (рис. 8.3), в верхние захваты (2) вставляют гладкий стержень из жаропрочной стали, нагретой до 600 °С. Стержень имитирует верхние слои шва, образец – нижние. Свободному укорочению стержня при остывании препятствует испытуемый образец, в результате чего в нем возникают напряжения растяжения и значительные пластические деформации удлинения.

Разрушение образца возможно в следующих случаях:

1. Материал хрупкий и разрушение происходит при малом сокращении гладкого стержня.
2. Материал пластичный, но образец имеет концентратор в виде надреза. Все деформации концентрируются на малой базе, и относительно малое сокращение гладкого стержня вызывает разрушение образца подобно тому, как если бы он был изготовлен из хрупкого материала.
3. Материал пластичный, но подвергнут значительной предварительной пластической деформации (образец изготовлен из холоднокатаного прутка). В этом случае значительная часть пластичности металла уже исчерпана ранее и разрушение с образованием шейки возникает при сравнительно малых средних деформациях.

Если подобному испытанию подвергнуть образец из холоднокатаного прутка, но предварительно отожженного, то благодаря восстановлению пластических свойств разрушение не происходит.

Приборы и материалы

1. Четыре цилиндрических образца для испытания (рис. 8.2):
 - № 1 образец из чугуна;
 - № 2 образец из холоднокатаного стального прутка;
 - № 3 образец с надрезом из холоднокатаного стального прутка, подвергнутого отжигу;
 - № 4 образец из холоднокатаного стального прутка, подвергнутого отжигу.
2. Установка для испытания образцов.
3. Приспособление для измерения длины образца.
4. Штангенциркуль.

Порядок выполнения работы

1. Нанести продольную риску по образующей рабочей части образца № 1.
2. Измерить длину образца в приспособлении. Измерение провести трижды. Среднее значение занести в табл. 8.1.
3. Установить образец в захваты приспособления.
4. Нагреть стержень в электропечи до температуры 600 °С.
5. Вынуть стержень из печи и установить его в верхние захваты рычагов приспособления.
6. Наблюдать за образованием шейки образца до разрушения образца или полного остывания стержня.
7. После испытания измерить полную длину образца в приспособлении, совместив риски на обеих половинах образца. Результаты занести в табл. 8.1.
8. Повторить п. 1 – 7 на образцах № 2, 3 и 4.

Содержание отчета

1. Описание эксперимента с рисунками и таблицей 8.1.
2. Расчет температуры стержня при разрушении образца. Принять рычажную систему абсолютно жесткой; расстояние от стержня и образца до оси вращения рычагов равно соответственно 120 мм и 200 мм; коэффициент линейного расширения для жаропрочной стали равен $18 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, площадь поперечного сечения гладкого стержня во много раз больше сечения образца.
3. Анализ экспериментальных данных.
4. Выводы.

Контрольные вопросы

1. В каких случаях остаточные напряжения могут быть опасны для сварных конструкций?
2. При каких условиях в процессе изготовления сварного соединения возможно накопление значительных пластических деформаций удлинения.

3. Может ли высокий отпуск, применяемый для снятия остаточных напряжений, восстановить пластические свойства металла в зоне концентратора?

4. Какие деформации (удлинения или укорочения) и напряжения (растяжения или сжатия) возникают в образце и нагружающем стержне?

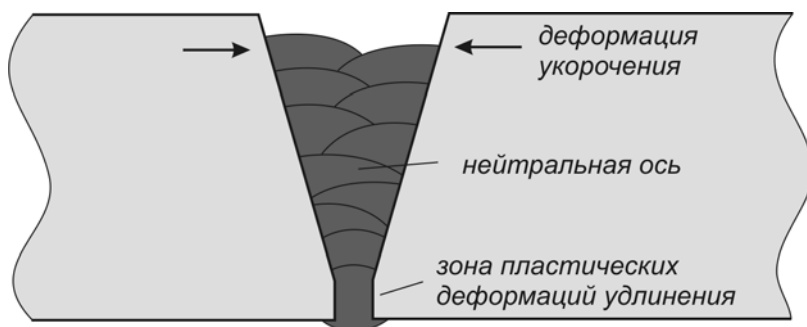


Рис. 8.1 Схема образования деформаций при выполнении многослойного шва с V-образной разделкой.

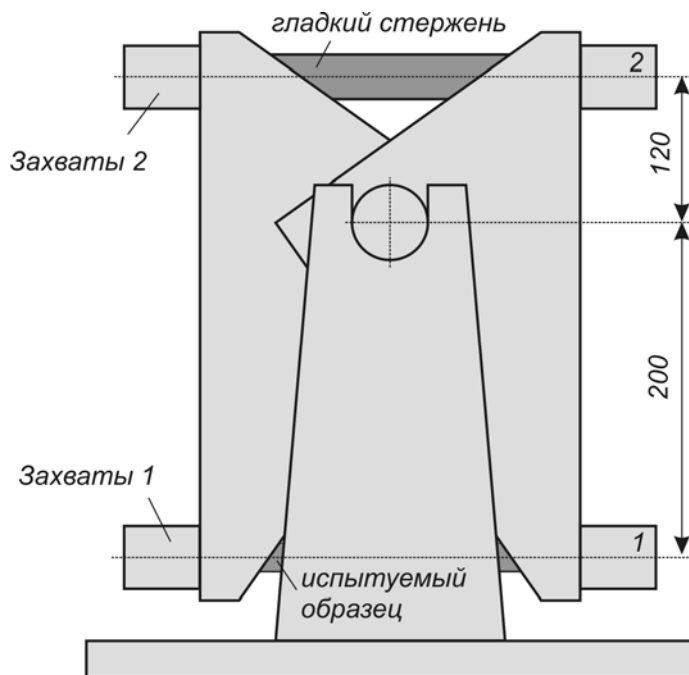


Рис. 8.2 Установка, имитирующая V-образную разделку кромок.

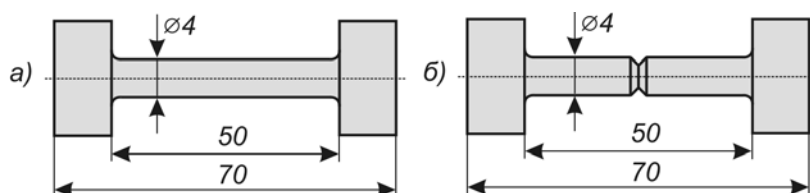


Рис. 8.3 Образцы для испытаний: а – гладкий; б – с надрезом.

Удлинение образцов после испытания, мм

Таблица 8.1

№ образца	Характеристика образца	Длина образца		Деформация	Температура стержня при разрушении образца
		до испытания	после испытания		
1					
2					
3					
4					

ЛИТЕРАТУРА

1. Байкова И.П. Основы теории сварочных деформаций и напряжений. Л.: Изд. ЛПИ, 1976.
2. Бельчук Г.А., Гатовский К.М., Кох В.А., Макевич В.Д. Сварка судовых конструкций. Л.: «Судостроение», 1971.
3. Винокуров В.А. Сварочные деформации и напряжения. М.: «Машиностроение», 1968.
4. Гатовский К.М., Кархин В.А. Теория сварочных деформаций и напряжений. Учебно-методическое пособие (ротапринт). Л.: ЛПИ, 1980.
5. Казимиров А.А., Недосека А.Я., Лобанов А.И., Радченко И.О. Расчет температурных полей в пластинах при электросварке плавлением. Справочник. Киев: «Наукова думка», 1969.
6. Кархин В.А. Тепловые основы сварки. – Л.: Ленинград. гос. техн. ун-т, 1990.
7. Кузьминов С.А. Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. Л.: «Судостроение», 1974.
8. Махненко В.И. Расчетные исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. Киев: «Наукова думка», 1976.
9. Николаев Г.А. Расчет сварных соединений и прочность сварных конструкций. М.: «Высшая школа», 1965.
10. Николаев Г.А. Куркин С.А. Винокуров В.А. Расчет, проектирование и изготовление сварных конструкций. М.: «Высшая школа», 1971.
11. Окерблом Н.О. Сварочные деформации и напряжения. Л.: Машгиз, 1948.
12. Окерблом Н.О. Сварочные напряжения в металлоконструкциях. Л.: Машгиз, 1950.
13. Окерблом Н.О. Расчет деформаций металлоконструкций при сварке. Л.: Машгиз, 1955.
14. Окерблом Н.О. Демянцевич В.П. Байкова И.П. Проектирование технологии изготовления сварных конструкций. Л.: Судпромгаз, 1963.
15. Окерблом Н.О. Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций. Л.: «Машиностроение», 1964.
16. Прохоров Н.Н. Физические процессы в металлах при сварке. Т.2. М.: «Металлургия», 1976.
17. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. М.: Машгиз, 1951.
18. Сагалевиц В.М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений. М.: «Машиностроение», 1974.
19. Трочун И.П. Внутренние усилия и деформации при сварке. М.: Машгиз, 1964.
20. Талыпов Г.Б. Сварочные деформации и напряжения. Л.: Машиностроение, 1973.

ПРОЛОЖЕНИЕ 1

Свойства низкоуглеродистой стали:

температуропроводность

$$a = 8,5 \text{ мм}^2/\text{с}$$

объемная теплоемкость

$$c\rho = 0,0047 \text{ Дж}/(\text{мм}^3 \text{ }^\circ\text{C})$$

модуль упругости

$$E = 200 \text{ ГПа}$$

температура начала разупрочнения

$$T_e = 500 \text{ }^\circ\text{C} (77 \text{ К})$$

температура полного разупрочнения

$$T_* = 600 \text{ }^\circ\text{C} (873 \text{ К})$$

коэффициент линейного расширения

$$\alpha = 0,12 \cdot 10^{-4} \text{ 1}/^\circ\text{C}$$

максимальная упругая деформация

$$\varepsilon_Y = 0,0012$$

теплопроводность

$$\lambda = 0,04 \text{ Вт}/(\text{мм } ^\circ\text{C})$$

предел текучести

$$\sigma_Y = 240 \text{ МПа}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Эффективный КПД процесса нагрева металла дугой при сварке:

ручная дуговая сварка покрытым электродом: $\eta = 0,7$

ручная аргонодуговая сварка неплавящимся электродом: $\eta = 0,5$