

M 261814

НА ДОМ  
НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
С С С Р

М о с к о в с к о е  
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшее  
техническое училище имени Н.Э.Баумана

---

ШУБЛАДЗЕ Тентиз Геронтьевич

На правах рукописи

МЕТОД ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ДВУХОСНЫХ СОБСТВЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ  
ПРИ СВАРКЕ

(05.04.05 - Технология и машины сварочного  
производства)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических  
наук

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

Научный руководитель - д.т.н., профессор ВИНУКОВ В.А.

Научный консультант - к.т.н., доцент ГРИГОРЬЯНЦ А.Г.

Официальные оппоненты: Д.т.н., профессор МАЛИНИН Н.Н.

К.т.н., ст. науч. сотр. СИМОНИК А.Г.

Ведущее предприятие: ЦНИИПроектстальконструкция.

Автореферат разослан " 14 " апреля 1975 г.

Защита диссертации состоится " " мая 1975 г.  
на заседании Совета Московского ордена  
Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшего технического  
училища им. Н.Э.Баумана по адресу: Москва, 107005, 2-я Бауман-  
ская улица, д. 5.

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

С д

иления.

учи

Типогра  
Тираж

М 261814

1,0 п.л.



1261814

Шубладзе Т.Г. Метод экспер

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Точность сварных конструкций и их эксплуатационные свойства во многом зависят от сварочных деформаций и напряжений.

Однако в настоящее время нет точного метода определения компонентов собственных деформаций и напряжений при сварке, который учитывал бы все реальные явления, сопровождающие процесс сварки и давал бы возможность их определения в каждом конкретном случае.

Цель исследования. Целью настоящей работы является разработка экспериментально-расчетного метода определения двухосных собственных деформаций и напряжений при сварке.

Методы исследования. Компоненты собственных временных напряжений определяются расчетным путем по замеряемым непосредственно во время сварки компонентам упруго-пластических деформаций, т.е. метод предусматривает экспериментальное определение собственных деформаций и последующее вычисление собственных напряжений с привлечением расчетного аппарата теории термопластичности. Это послужило основанием назвать метод экспериментально-расчетным.

Научная новизна. Впервые для целей экспериментального исследования сварочных деформаций и напряжений разработана физическая модель тела на основе математического аппарата теории течения, позволяющая создать новый метод определения временных двухосных собственных деформаций и напряжений в процессе сварки.

Практическая ценность. Разработанный метод открывает новые возможности для исследователей, изучающих деформации и перемещения в сварных конструкциях, технологическую прочность, коррозионную стойкость и другие эксплуатационные свойства сварных соединений, зависящие от сварочных деформаций и напряжений. Являясь практически единственным экспериментально-расчетным методом определения компонентов двухосных собственных деформаций и напряжений при сварке, разработанный метод позволит дать проверку существующих теоретических концепций в теории сварочных деформаций и напряжений.

Апробация работы. Метод использован для определения временных двухосных собственных деформаций и напряжений, возникающих при аргоно-дуговой сварке пластин встык.

Произведено опробование метода на пластинах из нержавеющей стали X18Ni9Ti, алюминиевого сплава АМг-6 и низкоуглеродистой стали Ст.3, обнаруживающих различное поведение при образовании сварочных деформаций и напряжений.

Разработан руководящий материал в виде инструкции по применению экспериментально-расчетного метода.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка цитируемой литературы. Всего страниц машинописного текста 162, в том числе рисунков 49, библиография из 104 названий.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Глава I. КРАТКИЙ ОБЗОР РАБОТ, ПОСВЯЩЕННЫХ РАСЧЕТНОМУ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМУ ОПРЕДЕЛЕНИЮ СОБСТВЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ СВАРКЕ

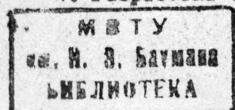
Закономерности образования сварочных деформаций и напряжений, а также методы их определения освещены в трудах советских ученых Г.А.Николаева, Е.О.Патона, Н.О.Окерблома, В.А.Винокурова, И.П.Трочуна, Г.Б.Талыпова, Н.Н.Прохорова, В.М.Сагалевича, А.А.Казимирова, Б.С.Касаткина, В.П.Вологдина, В.И.Махненко, В.С.Игнатьевой, С.А.Кузьминова, А.Я.Недосеки, К.М.Гатовского, И.М.Бданова, И.П.Байковой и других.

На основе анализа современного состояния вопросов по расчетному и экспериментальному определению собственных деформаций и напряжений при сварке установлено, что во многих существующих методах используются различные допущения, часто неправильно отражающие реальные процессы деформирования металла при сварке.

Создание точного метода определения компонентов собственных деформаций и напряжений при сварке в общей его постановке сопряжено с большими трудностями, которые обусловлены подвижным температурным полем и связанным с ним широким пределом изменения теплофизических и механических свойств материала, а также недостаточностью развития теории пластичности тел с переменным пределом текучести и модулем упругости металла в случае перемещающихся полей напряжений.

Для создания нового метода в работе намечены следующие основные задачи:

1. Выбор физической модели напряженно-деформированного состояния при сварке.
2. Разработка метода экспериментального определения всех величин, характеризующих деформированное состояние в свариваемом теле.
3. Разработка математического аппарата расчетного определения компонентов собственных напряжений при сварке.
4. Разработка средств реализации пунктов 2 и 3:



- б) алгоритма решения и программы для вычисления на ЭВМ.

тогда определения двухосных собственных деформаций и напряжений при сварке конструкционных материалов.

6. Разработка руководящего материала в виде инструкции по применению предложенного метода.

## Глава II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОГО

При сложном напряженном состоянии интенсивность деформирования в точке в направлении осей  $X, Y, Z$  характеризуется нормальными компонентами деформации  $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$  и сдвиговыми  $\delta_{xy}, \delta_{yz}, \delta_{zx}$ , которые соответственно вызывают нормальные напряжения  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  и касательные напряжения  $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ .

Одной из основных трудностей, возникающих при решении задачи о деформациях и напряжениях при сварочном нагреве является формулировка условий связи между компонентами напряженного состояния и деформациями, т.е. выбор физической модели деформируемой среды.

В разрабатываемом методе физическая модель принята на основе теории пластического течения, что позволяет проследить развитие упруго-пластических деформаций на всех стадиях деформирования.

Если в некоторой точке свариваемой пластины известно изменение деформаций  $\epsilon$  и температуры во времени, то очевидно, что при этом известны также в каждый момент времени приращения полных деформаций  $\Delta \epsilon$ , которые состоят из упругих  $\Delta \epsilon_{упр.}$  и пластических  $\Delta \epsilon_{пл.}$  составляющих

$$\left. \begin{aligned} \Delta \mathcal{E}_x^{n+1} &= \Delta \mathcal{E}_{xnp}^{n+1} + \Delta \mathcal{E}_{xnn}^{n+1}; \\ \Delta j_{zx}^{n+1} &= \Delta j_{zxnp}^{n+1} + \Delta j_{zxnn}^{n+1} \end{aligned} \right\} \quad (I)$$

Принимаем, что в пределах малого участка  $\Delta t$  от точки ( $n$ ) до точки ( $n + 1$ ) модули упругости  $E$ ,  $G$  и коэффициент Пуассона  $\mu$  изменяются линейно. Тогда приращение упругих деформаций  $\Delta \epsilon_{упр}$  можно представить как разность упругих деформаций в момент времени ( $n + 1$ ) и момент времени ( $n$ )

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varepsilon_{х упр.}^{n+1} &= \frac{1}{E^{n+1}} \left[ \bar{\sigma}_x^{n+1} - M^{n+1} (\bar{\sigma}_y^{n+1} + \bar{\sigma}_z^{n+1}) \right] - \frac{1}{E^n} \left[ \bar{\sigma}_x^n - M^n (\bar{\sigma}_y^n + \bar{\sigma}_z^n) \right]; \\ \Delta J_{\varepsilon х упр.}^{n+1} &= \frac{\tau_{\varepsilon х}^{n+1}}{G^{n+1}} - \frac{\tau_{\varepsilon х}^n}{G^n}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Приращение пластических деформаций согласно теории течения, если брать состояние для конца интервала  $(n+1)$ , будет

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varepsilon_{х пл.}^{n+1} &= \frac{1}{2} \frac{\bar{\Delta J}_{окт. пл.}^{n+1}}{\tau_{окт.}^{n+1}} (\bar{\sigma}_x^{n+1} - \bar{\sigma}_o^{n+1}); \\ \Delta J_{\varepsilon х пл.}^{n+1} &= \frac{\bar{\Delta J}_{окт. пл.}^{n+1}}{\tau_{окт.}^{n+1}} \tau_{\varepsilon х}^{n+1}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $\bar{\sigma}_o$  и  $\tau_{окт.}$  — среднее и октаэдрическое напряжения.

$\bar{\Delta J}_{окт. пл.}$  — октаэдрическое приращение пластических деформаций.

Если в выражение (1) подставить величины (2) и (3) и для плоского напряженного состояния положить  $\Delta J_{yz} = 0$ ;  $\Delta J_{\varepsilon х} = 0$ ;  $\tau_{yz} = 0$ ;  $\tau_{\varepsilon х} = 0$  и  $\bar{\sigma}_z = 0$  после преобразований получим компоненты напряжений в момент  $(n+1)$   $\bar{\sigma}_x^{n+1}$ ,  $\bar{\sigma}_y^{n+1}$  и  $\tau_{ху}^{n+1}$ , если известны напряжения  $\bar{\sigma}_x^n$ ,  $\bar{\sigma}_y^n$  и  $\tau_{ху}^n$  в предыдущий момент времени  $(n)$  и приращения полных деформаций  $\Delta \varepsilon_x^{n+1}$ ,  $\Delta \varepsilon_y^{n+1}$ ,  $\Delta J_{ху}^{n+1}$  на интервале от  $(n)$  до  $(n+1)$ .

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_x^{n+1} &= \frac{\Delta \varepsilon_x^{n+1} + \Delta \varepsilon_y^{n+1} + \frac{1-M^n}{E^n} (\bar{\sigma}_x^n + \bar{\sigma}_y^n)}{\frac{2(1-M^{n+1})}{E^{n+1}} + \frac{1}{3} \frac{\bar{\Delta J}_{окт. пл.}^{n+1}}{\tau_{окт.}^{n+1}}} + \frac{\Delta \varepsilon_x^{n+1} - \Delta \varepsilon_y^{n+1} + \frac{1+M^n}{E^n} (\bar{\sigma}_x^n - \bar{\sigma}_y^n)}{\frac{2(1+M^{n+1})}{E^{n+1}} + \frac{\bar{\Delta J}_{окт. пл.}^{n+1}}{\tau_{окт.}^{n+1}}}; \\ \bar{\sigma}_y^{n+1} &= \frac{\Delta \varepsilon_x^{n+1} + \Delta \varepsilon_y^{n+1} + \frac{1-M^n}{E^n} (\bar{\sigma}_x^n + \bar{\sigma}_y^n)}{\frac{2(1-M^{n+1})}{E^{n+1}} + \frac{1}{3} \frac{\bar{\Delta J}_{окт. пл.}^{n+1}}{\tau_{окт.}^{n+1}}} - \frac{\Delta \varepsilon_x^{n+1} - \Delta \varepsilon_y^{n+1} + \frac{1+M^n}{E^n} (\bar{\sigma}_x^n - \bar{\sigma}_y^n)}{\frac{2(1+M^{n+1})}{E^{n+1}} + \frac{\bar{\Delta J}_{окт. пл.}^{n+1}}{\tau_{окт.}^{n+1}}}; \\ \tau_{ху}^{n+1} &= \frac{\Delta J_{ху}^{n+1} + \frac{\tau_{ху}^n}{G^n}}{\frac{1}{G^{n+1}} + \frac{\bar{\Delta J}_{окт. пл.}^{n+1}}{\tau_{окт.}^{n+1}}}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

В теории течения величина октаэдрического напряжения  $\tau_{окт.}$  зависит от интеграла  $\Delta \bar{\epsilon}_{окт.пл.}$  и характеризует сопротивляемость материала пластическим деформациям

$$\tau_{окт.} = \Phi \left( \int \Delta \bar{\epsilon}_{окт.пл.} \right) \quad (5)$$

Из формул (4) видно, что для вычисления компонентов временных собственных напряжений следует:

- 1) разработать способ экспериментального определения компонентов собственных деформаций  $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_{xy}$  при сварке;
  - 2) иметь зависимости упругих характеристик  $E, G, \mu$  свариваемого материала от температуры;
  - 3) разработать методику определения зависимости (5).
- Рассмотрим указанные этапы.

Для квазистационарного температурного поля при сварке на трех различно ориентированных базах  $B_x, B_1, B_2$ , величиной 5 мм, расположенных вдоль направления сварки, под углом  $45^\circ$  и под углом  $135^\circ$  к направлению сварки в продольном сечении А-А (рис. 1), измеряются изменения величин баз и определяются относительные деформации формоизменения  $\epsilon_{x\phi}, \epsilon_{1\phi}$  и  $\epsilon_{2\phi}$ .

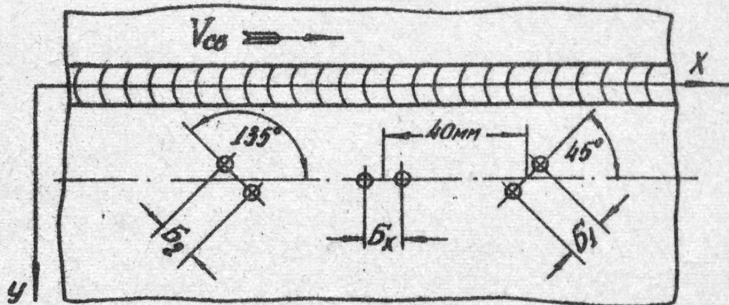


Рис. 1. Схема расположения измерительных баз.

Как видно, продольная деформация замеряется непосредственно во время эксперимента, а поперечный и сдвиговый компоненты  $\epsilon_{y\phi}$  и  $\epsilon_{xy\phi}$  вычисляются по экспериментально определенным деформациям формоизменения.

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{y\phi} &= \epsilon_{1\phi} + \epsilon_{2\phi} - \epsilon_{x\phi} ; \\ \epsilon_{xy\phi} &= \epsilon_{1\phi} - \epsilon_{2\phi} . \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Упруго-пластические собственные деформации металла при сварке определяются в виде разности между мгновенными значениями деформаций формоизменения и свободной температурной деформацией:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \epsilon_{x\phi} - \epsilon_{св} ; \\ \epsilon_y &= \epsilon_{y\phi} - \epsilon_{св} ; \\ \gamma_{xy} &= \gamma_{xy\phi} . \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Числовые значения  $\epsilon_{св}$  следует определить dilatометрическими измерениями, которые производятся на быстродайствующем dilatометре при сварочных термических циклах.

Определение напряжений можно производить двумя путями. Первый - вычислить напряжения по схеме идеально упруго-пластического тела, не принимая во внимание историю процесса пластической деформации металла при сварке. Тогда для вычисления напряжений  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  достаточно взять (5) знать зависимости предела текучести  $\tau_{окт.т}$ , модуля упругости и коэффициента Пуассона от температуры.

На каждом шаге, полагая вначале  $\Delta \gamma_{окт.пл}^{n+1} = 0$ , по формулам (4) определяем собственные напряжения.

По компонентам собственных напряжений, полученным после упругого решения, вычисляется эквивалентное октаэдрическое напряжение

$$\tau_{окт.}^{n+1} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_x^{n+1} - \sigma_y^{n+1})^2 + (\sigma_x^{n+1})^2 + (\sigma_y^{n+1})^2 + 6(\tau_{xy}^{n+1})^2} \quad (8)$$

Если  $\tau_{окт.}^{n+1} < \tau_{окт.т}^{n+1}$ , то это означает, что пластической деформации на этом участке действительно не было и найденные напряжения окончательные. Если оказалось, что  $\tau_{окт.}^{n+1} \geq \tau_{окт.т}^{n+1}$ , то принимаем  $\tau_{окт.}^{n+1} = \tau_{окт.т}^{n+1}$ , т.к. для идеально упруго-пластического металла всегда  $\tau_{окт.} \leq \tau_{окт.т}$ . Зная  $\tau_{окт.}^{n+1} = \tau_{окт.т}^{n+1}$ , находим  $\Delta \gamma_{окт.пл}^{n+1}$ , решая уравнение (9), полученное подстановкой в формулу (8) зависимостей (4)

$$\left[ \frac{\Delta \epsilon_x^{n+1} - \Delta \epsilon_y^{n+1} + \frac{1+\mu^n}{E^n} (\sigma_x^n - \sigma_y^n)}{\frac{2(1+\mu^{n+1})}{E^{n+1}} + \frac{\Delta \gamma_{окт.пл}^{n+1}}{\tau_{окт.}^{n+1}}} \right]^2 + \frac{1}{3} \left[ \frac{\Delta \epsilon_x^{n+1} + \Delta \epsilon_y^{n+1} + \frac{1-\mu^n}{E^n} (\sigma_x^n + \sigma_y^n)}{\frac{2(1-\mu^{n+1})}{E^{n+1}} + \frac{1}{3} \frac{\Delta \gamma_{окт.пл}^{n+1}}{\tau_{окт.}^{n+1}}} \right]^2$$

$$+ \left[ \frac{\Delta \gamma_{xy}^{n+1} + \frac{\tau_{xy}^n}{G^n}}{\frac{1}{G^{n+1}} + \frac{\Delta \gamma_{окт\,пл}^{n+1}}{\epsilon^{n+1}_{окт}}} \right]^2 - 1,5 (\tau_{окт}^{n+1})^2 = 0 \quad (9)$$

а затем по формуле (4) вычисляем истинные значения напряжений.

Однако для более точного определения напряжений надо идти по второму пути, устанавливая зависимость (5) экспериментально по термомодеформограмме, полученной имитацией на тонкостенном трубчатом образце по схеме чистого сдвига сварочного деформационного цикла при одновременном воспроизведении сварочного термического цикла. В качестве деформационного цикла приняты эквивалентные компонентам собственных деформаций октаэдрические деформации, представленные в виде:

$$\gamma_{окт}^{n+1} = \gamma_{окт\,упр}^{n+1} + \sum_{i=1}^{n+1} \Delta \gamma_{окт\,пл}^i = \frac{\tau_{окт}^{n+1}}{G^{n+1}} + \sum_{i=1}^{n+1} \Delta \gamma_{окт\,пл}^i \quad (10)$$

где  $\gamma_{окт\,упр}^{n+1}$  — упругая октаэдрическая деформация, которая является мерой накопленной энергии изменения формы и отражает поведение материала в отношении наступления пластических деформаций и изменения напряжений при разгрузке;  $\sum_{i=1}^{n+1} \Delta \gamma_{окт\,пл}^i$  — сумма октаэдрических приращений пластических деформаций, которая дает представление о величине пластических деформаций.

Для определения напряжений с использованием термомодеформограмм разработан метод последовательных пластических приближений. В первом приближении принимается допущение, что имеем идеально упруго-пластический материал, т.е. материал без упрочнения, с известными пределом текучести и модулем упругости, зависящими от температуры. Проводится расчет, как описано выше, и находятся  $\tau_{окт}$  и  $\Delta \gamma_{окт\,пл}$  для каждого участка. Они служат для вычисления  $\gamma_{окт}(t)$  по формуле (10).

Кривая  $\gamma_{окт} = \gamma_{окт}(t)$  совместно с термическим циклом  $T = T(t)$  используется в качестве задающей программы для моделирующей установки. Во время опыта замеряются величины касательных напряжений и подсчитываются  $\tau_{окт} = \tau_{окт}(\gamma_{окт}, T, t)$ . Эта зависимость называется термомодеформограммой. Она характеризует сопротивление металла деформированию в условиях сварочного термического и деформационного циклов и отражает совокупное воздействие всех явлений, сопровождающих процесс сварки.

Второе приближение состоит в том, что, применяя реальное значение  $\tau_{окт}$  из термомодеформограммы, повторно решаем уравнение (9) и определяем истинное значение  $\Delta \gamma_{окт\,пл}$ .

Компоненты собственных деформаций  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$ ,  $\gamma_{xy}$ , по-

лученные экспериментально при сварке, октаэдрическое напряжение  $\sigma_{окт}$ , полученное после снятия термодеоформграммы и октаэдрическое приращение пластических деформаций  $\Delta \epsilon_{окт}$ , полученное расчетным путем после второго приближения, служат исходными данными для окончательного вычисления компонентов собственных напряжений по формулам (4) (рис. 2).

### Глава III. РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ РЕАЛИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДВУХОСНЫХ СОБСТВЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ

При разработке экспериментально-расчетного метода важное место отводилось созданию надежного экспериментального метода определения временных деформаций при сварке. Так как существующие до настоящего времени разнообразные приборы и установки, предназначенные для регистрации временных деформаций, имеют недостатки, на кафедре сварки МВТУ им. Баумана был разработан и изготовлен комплекс деформометров для регистрации деформаций формоизменения металла при сварке с двухкоординатной системой записи.

Разработаны два типа рычажных деформометров с индуктивными датчиками, предназначенные для измерений на базе 5 мм и обеспечивающие точность измерения по напряжениям  $1,2 \text{ кг/мм}^2$ .

Горизонтальный деформометр предназначен для проведения измерений в высокотемпературной околошовной зоне, вертикальный деформометр — для проведения измерений с нижней стороны свариваемой пластины, в зоне корня шва. В качестве измерительного устройства применены малогабаритные, высокочувствительные индуктивные датчики. Сигнал датчика регистрируется и усиливается с помощью электронной измерительной системы и записывается на высокочувствительном быстродействующем двухкоординатном самопишущем модели ПДС-021М в виде  $\epsilon = \epsilon(T)$ . Измерение температуры производится хромель-алюмелевой термопарой в середине измеряемой базы.

Для тарирования деформометров было разработано и изготовлено специальное устройство.

В качестве быстродействующего dilatометра использовалась установка для воспроизведения сварочного термического цикла.

Dilatометрический образец представляет собой тонкостенную трубу, нагреваемую проходящим током промышленной частоты.

Разработано и изготовлено специальное устройство для регистрации свободных температурных деформаций на базе 20 мм с малогабаритным индуктивным датчиком осевого действия, включенным в электронную измерительную систему, обеспечивающую непрерывную запись.

Для определения свойств металла при термодеоформационном свароч-

ном цикле на кафедре сварки МВТУ им. Баумана создана специальная установка для воспроизведения сварочных деформационных и термических циклов.

Установка позволяет определять сопротивляемость металла деформированию при воспроизведении на образце термического и деформационного сварочных циклов одновременно, что отражает основные физические процессы, происходящие в металле в процессе сварки.

Установка также была использована для определения модуля сдвига -  $G$  и предела текучести -  $\sigma_T$  свариваемого материала при различных температурах.

Экспериментальные исследования проводились на пластинах  $\delta = 10$  мм из трех наиболее распространенных конструкционных материалов: нержавеющей стали X18H10T - размеры пластины в плане 400x400 мм; малоуглеродистой стали Ст.3 - 500x400 мм и алюминиевого сплава АМг-6 - 600x500 мм. Пластины перед сваркой подвергались термообработке. Для проведения экспериментов была оборудована специальная установка.

Для обработки экспериментальных данных и определения временных двухосных собственных деформаций и напряжений составлены алгоритмы решения задач и программы для вычисления в системе инженерного автокода (АКИ-400) применительно к ЭВМ "Минск-22".

#### Глава IV. РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДВУХОСНЫХ СОБСТВЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ СВАРКЕ ПЛАСТИНЫ

При сварке нержавеющей стали X18H10T деформирование начинается впереди движущегося источника тепла, в ненагретом металле. Это свидетельствует о наличии создаваемых источником сварочного нагрева высоких временных напряжений; область действия которых значительно превосходит зону нагретого металла. На стадии нагрева в высокотемпературной околосшовной зоне (ВТ ОШЗ) нарастает продольная собственная деформация укорочения -  $\epsilon_x$ . При максимальных температурах продольные собственные деформации достигают максимальных значений, а затем меняют знак приращений. На стадии охлаждения вследствие выравнивания температур деформации  $\epsilon_x$  изменяются до определенных значений и в дальнейшем, примерно ниже 150+100°C меняются незначительно.

Распределение продольных остаточных пластических деформаций укорочения в поперечном сечении пластины пропорционально распределению максимальных температур.

На стадии нагрева начинают развиваться поперечные деформации уко-

рочения, в дальнейшем знак приращений поперечных деформаций меняется и происходит удлинение металла.

Впереди источника участки металла, прилегающие к оси шва, претерпевают значительный сдвиг. В начале процесса нагрева металл околшовной зоны смещается в направлении движения дуги, а при дальнейшем нагреве примерно с температуры  $T \approx 750^\circ\text{C}$  - в противоположном. При максимальных температурах сдвиги достигают максимума, а на стадии охлаждения изменяются незначительно.

Деформации по толщине идут в основном беспрепятственно. Поэтому в ВТ ОШЗ имеются значительные деформации по толщине -  $\epsilon_z$ , основная часть которых после сварки остается в виде остаточного утолщения пластины.

Продольные собственные напряжения -  $\sigma_x$  при нагреве являются сжимающими и резко достигают максимальных значений, близких к пределу текучести свариваемого материала. После достижения  $T_{\text{тек}}$  они резко падают и переходят в растягивающие. Максимальное значение растягивающих напряжений в ВТ ОШЗ больше предела текучести, но в высокотемпературном интервале ниже  $200^\circ\text{C}$  происходит некоторое уменьшение и в нашем конкретном случае остаточные продольные напряжения близки к пределу текучести в исходном состоянии, но всегда меньше его.

Поперечные собственные напряжения -  $\sigma_y$  на стадии нагрева сжимающие; при подходе к максимальным температурам они меняют знак на растягивающие и значительную часть периода охлаждения продолжают оставаться растягивающими.

Впереди источника возникают значительные касательные напряжения  $\tau_{xy}$ , вызванные сдвиговыми деформациями. В дальнейшем касательные напряжения уменьшаются по абсолютной величине, переходят через нулевые значения и величины остаточных касательных напряжений близки к нулю. Их роль в термомеханическом процессе образования поля остаточных сварочных напряжений незначительна.

При сварке алюминиевого сплава АМг-6 развиваются значительные упруго-пластические деформации. Например, для сечения  $y = 10$  мм максимальная величина поперечных -  $\epsilon_y$  и сдвиговых -  $\gamma_{xy}$  деформаций и деформаций по толщине -  $\epsilon_z$  приблизительно составляет 2%. Упруго-пластические собственные продольные деформации -  $\epsilon_x$  сохраняют свой обычный характер изменения.

Компоненты собственных деформаций достигают своего максимального значения на стадии нагрева, а при охлаждении меняются незначительно. В результате этого эквивалентные октаэдрические деформации  $\rho_{\text{окт}}$  на стадии охлаждения тоже меняются незначительно и пласти-

ческие деформации не развиваются. Поэтому остаточные напряжения при сварке алюминиевого сплава АМг-6 характеризуются незначительными величинами.

При сварке пластин из низкоуглеродистой стали Ст.3 имеет место неравномерность распределения пластических деформаций вдоль шва. Микроскопическая пластическая деформация развивается локально и образуются полосы текучести, что затрудняет применение метода для этого материала. Эксперименты показали, что поперечные полосы текучести образуются на стадии охлаждения при температурах 200-150°C когда компоненты главных напряжений имеют различные знаки и уменьшается способность основного металла сопротивляться пластическим деформациям. При этом продольные напряжения  $\sigma_x$  имеют свое максимальное значение.

Сравнение продольных собственных напряжений -  $\sigma_x$ , полученных по разработанному методу и в предположении одноосного напряженного состояния показало, что приближенными методами определения одноосных продольных напряжений в основном следует пользоваться при качественном анализе напряженно-деформированного состояния при сварке. Для низкоуглеродистых сталей, как показывает имеющийся опыт, могут быть получены и количественные данные. Более точные количественные анализы желательно производить с использованием схемы плоского напряженного состояния и с учетом всех физических явлений, сопровождающих процесс сварки.

Сопоставление собственных напряжений, полученных на основе теории упруго-пластических деформаций, с аналогичными, полученными на основе теории течения, при использовании тех же экспериментальных исходных данных, что и в первом случае, показало неприемлемость теории упруго-пластических деформаций для вычисления собственных напряжений при сварке.

По экспериментальным поперечным собственным деформациям установлено, что ширина зоны поперечной усадки меньше ширины зоны продольных пластических деформаций.

Анализ образования сдвиговых деформаций при сварке показал, что сдвиг металла в высокотемпературной околосшовной зоне происходит в результате неравномерного распределения температуры в поперечном сечении, а не от усадки.

При сварке алюминиевого сплава АМг-6 возникает значительное искажение плоских сечений. Поэтому использование гипотезы плоских сечений при расчете сварочных напряжений для этого сплава недопустимо.

## ВЫВОДЫ

1. На основе литературного анализа показано, что во многих существующих расчетных и экспериментальных методах определения собственных деформаций и напряжений при сварке используются различные допущения, часто неправильно отражающие реальные процессы деформирования при сварке, что вызывает необходимость разработки точного метода определения двухосных собственных деформаций и напряжений при сварке.

2. Установлено, что временные сварочные двухосные собственные напряжения должны вычисляться с использованием экспериментально определенных компонентов собственных деформаций при сварке и с учетом изменения свойств свариваемого материала в процессе сварки.

3. Для определения продольного, поперечного и сдвигового компонентов собственных деформаций предложено деформации формоизменения регистрировать на трех базах, расположенных вдоль направления сварки, под углом  $45^{\circ}$  и  $135^{\circ}$  к направлению сварки. Компоненты собственных деформаций должны вычисляться по дифференциальному способу определения собственных деформаций с использованием деформаций формоизменения металла, зарегистрированных при сварке, и свободных температурных деформаций, определенных дилатометрированием при сварочном термическом цикле.

Деформации формоизменения металла при сварке и свободные температурные деформации должны регистрироваться специальными быстродействующими высокочувствительными приборами; последние должны удовлетворять всем требованиям, предъявляемым в связи с их работой в условиях высоких температур, сварочных электромагнитных полей и т.д.

4. Предложено с целью учета истории деформирования материала физическую модель деформируемой среды построить на основе теории пластического течения. В первом приближении собственные напряжения и эквивалентные октаэдрические деформации следует вычислять с использованием модели идеально упруго-пластического материала, с изменяющимися от температуры значениями предела текучести, модуля упругости и коэффициента Пуассона.

5. Для точного определения собственных напряжений при сварке следует пользоваться характеристикой сопротивляемости свариваемого материала пластическим деформациям, определенной в условиях сварочного деформационного и термического циклов, что дает возможность учитывать все физические явления, сопровождающие процесс сварки.

Теоретически и экспериментально доказано, что в качестве сва-

рочного деформационного цикла следует использовать зависимость эквивалентных октаэдрических деформаций во времени, которые отражают одновременное изменение всех компонентов собственных деформаций.

6. В связи с трудностью измерения деформаций  $\epsilon_x$  по толщине и невозможности непосредственно вычислить октаэдрические деформации предложено собственные напряжения определять методом последовательных приближений. В качестве первого приближения используются результаты, полученные по схеме идеального упруго-пластического тела.

Во втором приближении собственные напряжения вычисляются с использованием термодеформограмм, снятых в условиях сварочного термического и деформационного циклов.

7. Разработанный экспериментально-расчетный метод определения двухосных собственных деформаций и напряжений при сварке используется для исследования временных двухосных собственных деформаций и напряжений при аргоно-дуговой сварке встык пластины из нержавеющей стали X18Ni9Ti, низкоуглеродистой стали Ст.3 и алюминиевого сплава АМг-6.

8. На основе проведенных исследований установлены закономерности формирования временных двухосных собственных деформаций и напряжений при сварке конструкционных материалов, отличающихся физико-механическими свойствами в широких пределах:

а) в высокотемпературной околосовной зоне, как правило, на стадии нагрева возникают сжимающие продольные напряжения, которые в области максимальных температур на стадии охлаждения переходят в растягивающие и в течение всего процесса охлаждения остаются растягивающими.

б) В нержавеющей стали X18Ni9Ti на стадии нагрева поперечные напряжения —  $\sigma_y$  сжимающие; при подходе к максимальным температурам они меняют знак на растягивающие и значительную часть периода охлаждения продолжают оставаться растягивающими.

В алюминиевом сплаве АМг-6 и низкоуглеродистой стали Ст.3 в зоне пластических деформаций поперечные напряжения на стадии нагрева также являются сжимающими, но вблизи максимальных температур становятся незначительными.

в) Касательные напряжения в начальной стадии нагрева вызывают сдвиговые деформации, обуславливающие перемещение металла в направлении сварки, а при дальнейшем нагреве в противоположном: максимальные сдвиговые деформации имеют место при максимальных температурах. На стадии охлаждения происходят незначительные сдвиговые деформации. Касательные напряжения по абсолютной величине близки к нулю.

г) На основе анализа экспериментальных данных изучен механизм образования сдвиговых деформаций при сварке. Показано, что причиной возникновения сдвиговых деформаций при сварке является неравномерное распределение температур в поперечном сечении, а не усадка металла.

д) Исследованиями установлено, что при сварке пластин из алюминиевого сплава АМг-6 на стадии охлаждения пластические деформации практически не происходят; остаточные собственные напряжения являются в основном результатом пластических деформаций, возникающих в процессе нагрева. Так как при сварке происходит сильное искривление плоского сечения и при нагреве возникают невысокие пластические деформации, то возникают относительно низкие остаточные напряжения.

9. Установлено, что вычисление собственных напряжений для случая сварки пластин из нержавеющей стали Х18Н10Т и низкоуглеродистой стали Ст.3 можно производить по схеме идеально упруго-пластического материала и пользоваться значениями зависимости предела текучести от температуры; второе пластическое приближение незначительно меняет величину временных собственных напряжений.

Применение модели идеально упруго-пластического материала при определении компонентов собственных напряжений для алюминиевого сплава АМг-6 без последующего использования термодеформограмм приводит к значительным погрешностям.

10. Разработанный метод экспериментально-расчетного определения двухосных собственных деформаций и напряжений при сварке изложен в выпущенной кафедрой сварки МВТУ им.Баумана инструкция "Использование в расчетах сварочных деформаций и напряжений свойств металлов, определенных при сварочных термических и деформационных циклах", предназначенной для координационного центра по сварке СЭВ.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Григорьянц А.Г., Винокуров В.А., Королев О.Д., Шубладзе Т.Г. Расчетно-экспериментальное исследование сварочных деформаций и напряжений. Информационные материалы координационного центра по сварке СЭВ. Выпуск 2, К., 1973.
2. Винокуров В.А., Григорьянц А.Г., Шубладзе Т.Г. Экспериментально-расчетное определение собственных деформаций и напряжений при сварке. Труды МВТУ № 182 "Исследование свойств сварных соединений и элементов конструкций". М., 1974.

7/8/18/4

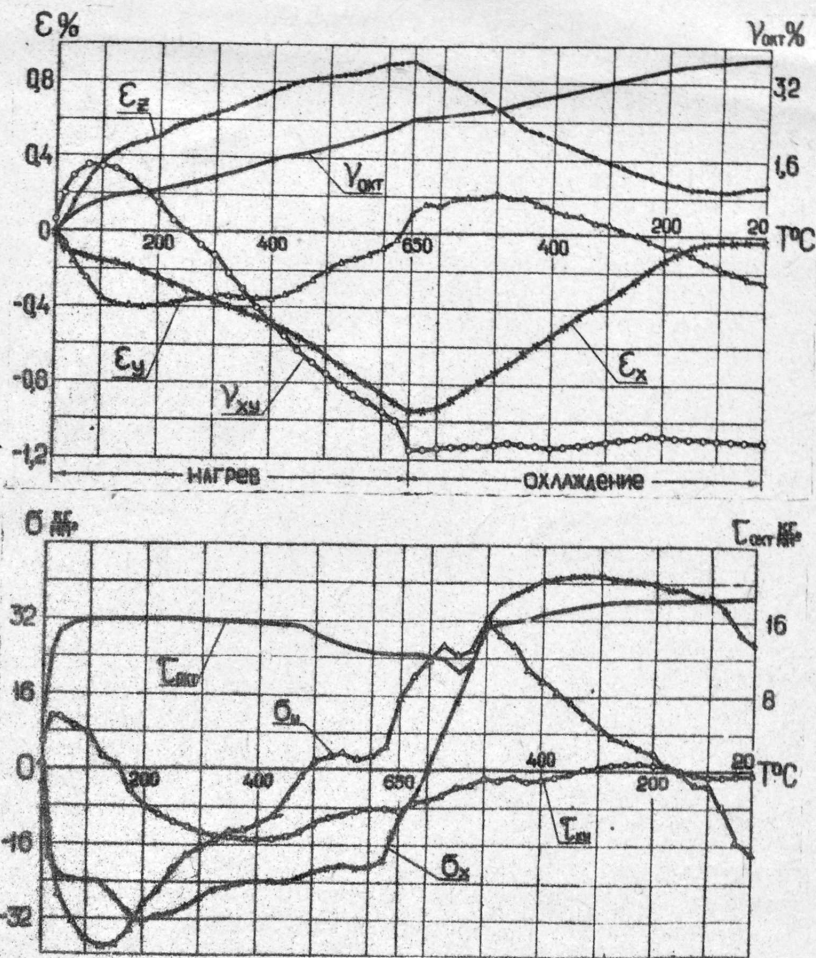


Рис. 2. Результаты экспериментально-расчетного определения двухосных собственных деформаций и напряжений при сварке пластин из нержавеющей стали Х18Н10Т ( $l = 15$  мм,  $T_{\text{max}} = 650^{\circ}\text{C}$ ). Продольные -  $\epsilon_x$ , поперечные -  $\epsilon_y$ , сдвиговые -  $\gamma_{xy}$  деформации, деформации по толщине -  $\epsilon_z$  (расчетные данные) и эквивалентные им октаэдрические деформации -  $\gamma_{\text{окт}}$ . Продольные -  $\sigma_x$ , поперечные -  $\sigma_y$ , касательные -  $\tau_{xy}$  напряжения и эквивалентные им октаэдрические напряжения -  $\tau_{\text{окт}}$ .