

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
Институт электросварки им. Е. О. Патона

На правах рукописи

МАХНЕНКО
Олег Владимирович

УДК 621.791.052

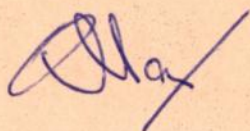
РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЩИХ ДЕФОРМАЦИЙ
КРУПНЫХ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
НА ОСНОВЕ ФУНКЦИИ УСАДКИ

05.03.06 —

технология и оборудование для сварки
и родственных процессов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев 1996



0 с.т. 491
Работа выполнена в Институте
НАН Украины

№ 36-271
ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00757290 (U)

Научный руководитель

Л. М. Лобанов

Официальные оппоненты

доктор технических наук
А. Я. Недосека

доктор технических наук,
профессор В. М. Прохоренко

Ведущее предприятие

Киевский государственный
университет им. Т. Г. Шевченко

Направляем Вам для ознакомления автореферат диссертации
инженера Махненко О. В. Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения
принять участие в заседании специализированного совета или прислать
свои отзывы (1 экз., заверенный печатью) по адресу: 252650,
Киев-5, ГСН, ул. Боженко 11, ученому секретарю спецсовета.

Защита состоится 25.12. 1996 г. на заседании специализиро-
ванного совета (К 50.02.02) при Институте Электросварки им. Е. О. Патона.
С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке
института.

Автореферат разослан 22.11. 1996 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
доктор технических наук

А. А. Бондарев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На протяжении всей истории развития сварочного производства одной из основных проблем было обеспечение точности изготовления сварных конструкций. Традиционные методы - увеличение толщин, удаление припусков, тщательная пренка - в настоящее время не являются оптимальными из соображений трудо-, энерго- и металлоемкости сварных конструкций. В этой связи возрастает интерес к эффективным средствам прогнозирования ожидаемых деформаций и разработке соответствующих технологических мероприятий по их предупреждению.

Большое количество экспериментальных и теоретических исследований за последние 60 лет позволили установить основные закономерности в образовании сварочных деформаций типовых сварных узлов, получить количественные зависимости для основных видов деформаций от различных конструктивных и технологических параметров.

Тем не менее вопрос количественного прогнозирования деформаций достаточно крупных узлов или секций с большим количеством сварных швов остается еще весьма сложным для инженерного применения. Получение этих данных экспериментальным путем требует больших материальных затрат и позволительно только при массовом производстве. Использование расчетных методов на основе общих моделей формирования сварочных деформаций (методы термопластичности) для крупных конструкций сопряжено с большими трудностями или неосуществимо даже при современном уровне вычислительной техники и численных методов решения.

В настоящей работе предпринята попытка дальнейшей проработки на современном уровне известной идеи функции усадки, состоящей в том, что усадочные явления при сварке конструкций формируются в достаточно локальной области и определяются ограниченным количеством конструктивных и технологических параметров, т. е. мало зависят от общих размеров и форм конструкций. Поэтому функцию усадки можно определить экспериментальным путем, либо соответствующими решениями задачи термопластичности на простых образцах сварных соединений. Затем определяются общие деформации рассматриваемой конструкции с учетом соответствующих функций усадки в зоне сварных швов. Обычно при этом используется аппарат теории упругости. Развитие вычислительной техники и методов решений задач теории упругости существенно расширяют возможности использования методов функции усадки для целого ряда сварных конструкций, представляющих большой практический интерес.

Целью диссертационной работы является разработка нового расчетного метода определения общих деформаций крупных сварных конструкций из тонколистовых элементов (до 20...25мм) на основе заданных функций усадки для каждого сварного шва.

В соответствии с целью в работе решаются следующие задачи:

- 1) выбор рациональной структуры функции усадки и банка данных для определения ее количественных характеристик с учетом особенностей и возможностей компьютерных методов;
- 2) создание расчетных алгоритмов и программного обеспечения для прогнозирования общих деформаций типовых сварных узлов: балочных конструкций, плоских секций, цилиндрических оболочек;
- 3) создание алгоритмов и программного обеспечения для оценки обеспеченности прогноза из-за вариации исходных данных по характеристикам функции усадки;
- 4) рассмотрение характерных примеров применения разработанного метода расчета общих деформаций сварных конструкций.

Научная новизна:

1. Разработан новый метод расчета общих деформаций крупных сварных конструкций из тонколистовых элементов на основе заданной функции усадки, которая является тензорной величиной. Показано, что функцию усадки определяют четыре традиционные характеристики - продольная усадка, поперечная усадка, продольная и поперечная угловые деформации.

2. Дано общее математическое описание задачи определения перемещений различных точек сварной конструкции, в основу которого положены общие подходы теории упругости с дополнительным тензором условных пластических деформаций, предельно сосредоточенных по оси сварного шва и кусочно-постоянных по его длине. Такая идеализация позволяет максимально формализовать поиск решения и использовать соответствующий аппарат теории упругости, что важно при большом количестве сварных швов и значительных размерах сварной конструкции.

3. На основе общей постановки разработаны расчетные алгоритмы и создано программное обеспечение для определения общих деформаций сварных балок, плоских секций и длинных цилиндрических оболочек. На основании сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными, установлено, что разработанный метод позволяет получать расчетные данные по перемещениям для различных сварных узлов с точностью в пределах $\pm 10-15\%$.

4. Разработан подход оценки вариации расчетных перемещений сварных конструкций с учетом определенной стохастичности исходных данных, связанной с определением функции усадки, позиционированием привариваемых элементов и т. д. На основании проведенного исследования остаточного деформируемого состояния крупных сварных плоских секций установлено, что эффективным способом повышения вероятности качественной стыковки продольного набора при стыковке секций между собой, а также вероятности качественной установки поперечного набора на плоскую секцию с продольным набором является компенсация сварочных деформаций на осно-

ве прогноза, позволявшего при разметке мест установки набора вводить коррекцию на ожидаемые перемещения.

Практическая ценность.

Разработанный метод расчета общих деформаций сварных конструкций может быть эффективно использован при проектировании технологии производства сварных конструкций и позволяет существенно сократить объем пригоночных работ. В настоящее время новый метод используется в разработке системы "LaserSoft" в рамках сотрудничества с фирмой SLV-1 (ФРГ), а также при проектировании крупных судовых конструкций на судостроительном предприятии АО "Завод Ленинская Кузница" (Украина) и на судостроительном предприятии HDW Kiel (ФРГ).

На защиту выносятся:

1. Новый метод расчета общих деформаций крупных сварных конструкций из тонкостенных элементов на основе заданной функции усадки.
2. Расчетные алгоритмы для определения деформаций балочных конструкций, плоских секций, цилиндрических оболочек.
3. Подход для оценки обеспеченности расчета перемещений сварных конструкций, учитывающий стохастичность исходных данных.

Апробация работы.

Основные результаты исследования отражены в публикациях и доложены на научных конференциях и семинарах: научно-техническая конференция "Применение математических методов и САПР в сварке" (Ленинград, 1991), научно-технический семинар "Моделирование физико-химических процессов, создание баз данных, расчетно-информационных и экспертных систем в области сварки и родственных технологий" (Алушта, 1993), XVIII Конференция молодых ученых Института Механики НАНУ (Киев, 1993).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, общих выводов и списка литературы. Общий объем работы 129 страниц машинописного текста, 41 рисунок, 6 таблиц, список литературы включает 53 наименования.

Во введении обоснована актуальность разработки нового метода расчета общих деформаций крупных сварных конструкций. Сформулирована цель работы и доказана ее практическая ценность.

В первой главе рассмотрены существующие методы расчета сварочных деформаций, проанализированы и обобщены их достоинства и недостатки. Обоснована целесообразность выбора в основу нового метода расчета общих деформаций крупных сварных конструкций метода функции усадки. Сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе предложена структура функции усадки, представлено

ее описание как тензорной величины и даны рекомендации по определению количественных характеристик. Обоснована целесообразность создания банка данных для накопления количественных характеристик функции усадки и предложена его базовая структура.

В третьей главе дано описание общей постановки задачи определения деформаций на основе тензорной функции усадки. Описаны разработанные расчетные алгоритмы для балочных конструкций, плоских секций и цилиндрических оболочек. Приведены данные расчетных исследований деформаций различных сварных конструкций.

В общих выводах кратко сформулированы результаты работы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Традиционные методы обеспечения точности сварных конструкций требуют дальнейшего совершенствования в направлении снижения материальных, энергетических и трудовых затрат. Значительную роль в этом должны сыграть эффективные методы прогнозирования ожидаемых деформаций.

Аналитический обзор литературы в первой главе показывает, что с некоторой условностью существующие методы прогнозирования деформаций сварных конструкций можно разделить на две большие группы.

Первая группа объединяет расчетные методы, основанные на рассмотрении соответствующих задач термопластичности, обусловленных сверхочным нагревом конкретных сварных узлов.

В целом, трудоемкость решений, основанных на методах теории термопластичности достаточно велика, поэтому для крупных и сложных сварных конструкций не реально применение таких подходов. В определенной степени для крупных и сложных конструкций более перспективны методы второй группы, не требующие кропотливой процедуры прослеживания развития упруго-пластических деформаций.

Ко второй группе относятся расчетные методы, основанные на знании функции усадки от конкретного сварного шва и соответствующем расчетном аппарате (обычно на основе теории упругости) оценки общих деформаций для конкретного сварного узла от указанной функции усадки.

Одной из первых работ, где используется метод расчета остаточных сверхочных деформаций и напряжений на основе функции усадки, является работа Е. О. Петова с сотрудниками, опубликованная в 1936 году.

Естественно, что различные исследователи при расчете остаточных сверхочных напряжений и деформаций по разному подходят к описанию усадочных явлений, вызванных сваркой. Соответственно и названия их методик достаточно разные: метод фиктивной усадочной силы (А. Г. Николаев, И. П. Троцун, В. А. Винокуров), метод фиктивных температур (В. С. Иг-

натяже), метод условных дислокаций (В.М. Прохоренко, К. Мацубуши), метод условных пластических деформаций (Я.С. Подстригач, А.Я. Недосека), метод заданных зон равномерной усадки (Т.Б. Талыпов), метод заданных объемов укорочения при сварке (Н.О. Окерблом, С.А. Кузьминов, И.П. Байкова), inherent strain method (Y. Fujita, T. Nomoto) и т.д.

Основным преимуществом такого подхода является возможность аналитическим путем, используя математический аппарат теории упругости, находить решение достаточно сложной задачи. Однако достоверность решения зависит от удачного выбора функции усадки.

Анализ литературных источников показывает, что из сварочных усадочных явлений наиболее изучены простые случаи, связанные с продольной либо поперечной усадкой и угловыми деформациями. Однако, нет соответствующих обобщений, на основе которых можно использовать накопленные экспериментальные данные по элементарным характеристикам усадки для определения изменения формы достаточно сложных и крупных конструкций с большим количеством различных сварных швов. Также, отсутствует соответствующее проблемно-ориентированное программное обеспечение для инженерного применения.

В свете сказанного формулируются задачи исследования (см. стр. 2).

Вторая глава посвящена выбору структуры функции усадки и рекомендациям по определению ее количественных характеристик.

Наиболее общим из существующих методов функции усадки является метод условных пластических деформаций, в котором функция усадки является тензорной величиной. Если этот тензор ϵ_{ij}^p считать симметричным, сумму нормальных компонент равной нулю, а также если ось X совместить с продольным направлением сварного шва, а ось Y - с поперечным и считать их главными для тензора, то касательными компонентами можно пренебречь и представить тензор ϵ_{ij}^p в достаточно простом виде:

$$\epsilon_{ij}^p = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx}^p & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{yy}^p & 0 \\ 0 & 0 & -(\epsilon_{xx}^p + \epsilon_{yy}^p) \end{pmatrix} \quad (1)$$

(i, j = x, y, z)

В этом случае только две функции координат $\epsilon_{xx}^p(x, y, z)$ и $\epsilon_{yy}^p(x, y, z)$ определяют функцию усадки для каждого конкретного сварного шва.

Поскольку функция ϵ_{ij}^p достаточно локальная, то при определении общих деформаций сварных узлов и секций можно в соответствии с принципом Сен-Венана сделать определенные допущения в распределении $\epsilon_{xx}^p(x, y, z)$ и $\epsilon_{yy}^p(x, y, z)$.

Так, например, применительно к сварке стыковых швов в листовых конструкциях по данной технологии на конкретном материале данные

относительно функций поперечной и продольной усадок возможно получить, используя прямоугольный листовый образец (Рис. 1) такой же толщины и из того же материала. Для описания ϵ_{1j}^P можно применить обычные гипотезы кинематики тонких пластин:

$$\epsilon_{1j}^P(x, y, z) = \epsilon_{1j}^{P0}(x, y) + \kappa_{1j}^P(x, y) z, \quad (2)$$

где $\epsilon_{1j}^{P0}(x, y)$ — деформации по срединной плоскости пластины ($z=0$), $\kappa_{1j}^P(x, y)$ — соответствующие кривизны.

В общем случае $\epsilon_{1j}^{P0}(x, y)$ и $\kappa_{1j}^P(x, y)$ являются функциями только координат x, y . Однако получение этих функций достаточно кропотливая задача, усложняющая в дальнейшем и получение искомого решения по общим деформациям. Поэтому заслуживает внимания некоторая идеализация указанного распределения при условии сохранения неизменными основных интегральных характеристик, получить которые экспериментальным путем гораздо проще.

В работе предложена следующая идеализация: величины ϵ_{1j}^{P0} и κ_{1j}^P кусочно-постоянные по длине сварного шва и предельно сосредоточены поперек сварного шва по его оси ($y=y_w$). Соответственно:

$$\epsilon_{1j}^P(x, y, z) = H(y - y_w) \left[\Delta_{1j} + \alpha_{1j} z \right], \quad (3)$$

где $H(y - y_w)$ — функция Дирака, постоянные Δ_{1j} , α_{1j} находим из условия сохранения интегральных характеристик распределения деформаций ϵ_{1j}^P в поперечном сечении шва.

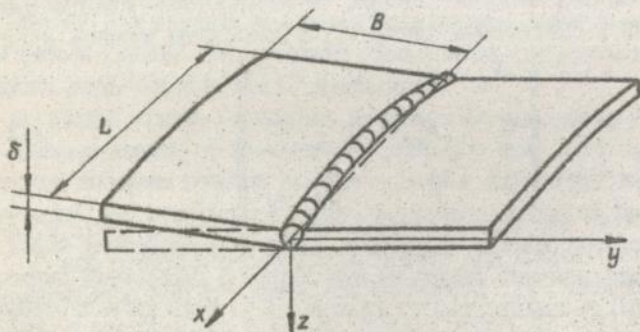


Рис. 1. Прямоугольный листовый образец.

Очевидно, что $\Delta_{yy} = \Delta_{\text{поп}}$ представляет собой среднее значение поперечного укорочения образца, $\alpha_{yy} = \alpha_{\text{поп}}$ — значение поперечной угловой деформации, $\Delta_{xx} = \Delta_{\text{прод}} = V_{xx}/\delta$ — объем продольного укорочения на единицу толщины δ , $\alpha_{xx} = \alpha_{\text{прод}}$ — продольная кривизна.

Следует отметить, что по продольной и поперечной усадкам, угловым деформациям при сварке за прошедшие годы накоплено много результатов экспериментальных и теоретических исследований в виде графиков или параметрических зависимостей от различных геометрических и технологических параметров, и это в определенной степени облегчает нахождение их количественных значений.

Также для определения количественных характеристик функции усадки могут быть использованы соответствующие решения задач термопластичности для небольших по размерам и простых по форме сварных образцов.

Для оперативного получения данных относительно количественных характеристик функции усадки в зависимости от различных физических, геометрических и технологических параметров заслуживает внимания создание соответствующего банка данных для персональных компьютеров. Этот банк должен быть открытой системой, которая может пополняться по мере накопления данных. В работе предложена структура этого банка.

Третья глава посвящена разработке соответствующих расчетных алгоритмов на основе теории упругости для получения искомым перемещений характерных точек типовых сварных конструкций.

В соответствии с методом условных пластических деформаций тензор общих деформаций сварной конструкции представляется суммой:

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^p, \quad (i, j = x, y, z), \quad (4)$$

где ϵ_{ij}^e — тензор упругих деформаций, связанный с тензором напряжений законом Гука. Тензор общих деформаций ϵ_{ij} связан с вектором перемещений U_{ij} соотношениями Коши.

Известные соотношения теории упругости и граничные условия определяют общую постановку задачи. Для характерных типовых случаев эта постановка более конкретизируется. Кроме того, поскольку при упругих решениях справедливо применение принципа суперпозиции решений, то это позволяет строить решение для одного сварного шва (участка шва), а затем путем суперпозиции решений находить общие перемещения от всех швов (участков шва) в данном узле.

Для сварных конструкций, общие деформации которых можно при определенной идеализации рассматривать в рамках балочных гипотез, получе-

на определяющая система для каждого сечения ($x=\text{const}$) относительно

функций $\frac{\partial U_x}{\partial x}$, $\frac{\partial^2 U_z}{\partial x^2}$, $\frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2}$:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{11} \frac{\partial U_x}{\partial x} - I_{1z} \frac{\partial^2 U_z}{\partial x^2} - I_{1y} \frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2} = P(x) + \Phi_1; \\ I_{1z} \frac{\partial U_x}{\partial x} - I_{zz} \frac{\partial^2 U_z}{\partial x^2} - I_{zy} \frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2} = M_z(x) + \Phi_z; \\ I_{1y} \frac{\partial U_x}{\partial x} - I_{zy} \frac{\partial^2 U_z}{\partial x^2} - I_{yy} \frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2} = M_y(x) + \Phi_y, \end{array} \right. \quad (5)$$

где $I_{ij} = \int_F B_{ij} dF$ ($i=1, z, y, j=1, z, y$), F - площадь сечения,

$$\Phi_i = \int_F B_{ix} \epsilon_{xx}^p dF \quad (i=1, z, y), \quad B - \text{модуль Юнга.}$$

Описанное представление фактически формализует известные подходы С. А. Кузьмина, К. М. Гатовского для балочных конструкций, что важно с точки зрения компьютеризации расчетов при необходимости рассматривать большое количество сечений по длине конструкции из-за различий геометрических размеров и сварных швов.

В работе рассмотрены плоские сварные сечения, к которым привариваются различные элементы насыщения (набор и др.). Решалась плоская задача теории упругости с дополнительным тензором условных пластических деформаций. Во многих случаях изгибные деформации независимы от деформаций в плоскости пластины, и соответственно решение ведется отдельно для перемещений в плоскости пластины и для изгибных деформаций.

Разработаны три алгоритма для оценки перемещений в плоскости сечения (в порядке повышения трудоемкости поиска решения): 1) случай бесконечной пластины, т.е. когда рассматриваются перемещения от сварного шва вдали от свободных кромок сечения больших размеров; 2) случай полубесконечной пластины, т.е. когда рассматриваются перемещения от сварного шва у одной из свободных кромок сечения больших размеров; 3) когда рассматриваются перемещения прямоугольной сечения ограниченных размеров со свободными кромками.

Для отдельных характерных случаев получены аналитические решения. В качестве примера ниже приведено одно из таких решений (случай полубесконечной пластины) для перемещений свободной кромки от сварного шва, перпендикулярного этой кромке.

$$\begin{aligned}
 U_x(0, y) &= -\frac{4}{\pi^2} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{(\Delta_{\text{ноп}} p^2 + \Delta_{\text{прод}} q^2) q}{(p^2 + q^2) p} (\sin(px_0) - \sin(ph)) \times \\
 &\quad \times \cos(qy) dp dq; \\
 U_y(0, y) &= \frac{2}{\pi^2} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} (1-\nu) \frac{(\Delta_{\text{ноп}} p^2 + \Delta_{\text{прод}} q^2) q}{(p^2 + q^2) p} (\sin(px_0) - \sin(ph)) \times \\
 &\quad \times \sin(qy) dp dq.
 \end{aligned} \tag{6}$$

где h - удаление сварного шва от кромки; $(x_0 - h)$ - длина сварного шва; p и q - параметры интегрирования.

Задача плоской теории упругости в случае прямоугольной пластины со свободными кромками считается достаточно сложной из-за необходимости удовлетворения граничных условий на всех кромках пластины. В работе рассмотрен случай, когда прямолинейный сварной шов расположен по центру пластины симметрично относительно осей координат X и Y . Ниже приведены решения (7) и (8) для компонент перемещений U_x и U_y .

$$\begin{aligned}
 U_x(x, y) &= \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \sum_{m=1,3,5}^{\infty} \left\{ \frac{\left[\nu \frac{n}{a} - \left(\frac{m}{b} \right)^2 \frac{a}{n} \right] \frac{16}{\pi D \pi^2} \left[\left(\frac{m}{b} \right)^2 \Delta_{\text{прод}} + \left(\frac{n}{a} \right)^2 \Delta_{\text{ноп}} \right]}{\left[\left(\frac{n}{a} \right)^2 + \left(\frac{m}{b} \right)^2 \right]^2} \times \right. \\
 &\quad \times \left. \sin\left(\frac{\pi n x}{2a}\right) \cos\left(\frac{\pi m y}{2b}\right) \sin\left(\frac{\pi n x}{2a}\right) \cos\left(\frac{\pi m y}{2b}\right) \right\} + \\
 &+ \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \left\{ \left[C_n \operatorname{ch}\left(\frac{\pi n y}{2a}\right) + D_n y \operatorname{sh}\left(\frac{\pi n y}{2a}\right) \right] \frac{\pi n}{2a} \sin\left(\frac{\pi n x}{2a}\right) (1+\nu) + \right. \\
 &\quad + 2D_n \operatorname{ch}\left(\frac{\pi n y}{2a}\right) \sin\left(\frac{\pi n x}{2a}\right) + B_n \operatorname{sh}\left(\frac{\pi n x}{2b}\right) \cos\left(\frac{\pi n y}{2b}\right) (1-\nu) - \\
 &\quad \left. - \left[A_n \operatorname{sh}\left(\frac{\pi n x}{2b}\right) + B_n x \operatorname{ch}\left(\frac{\pi n x}{2b}\right) \right] \frac{\pi n}{2b} \cos\left(\frac{\pi n y}{2b}\right) (1+\nu) \right\};
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
 U_y(x, y) &= \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \sum_{m=1,3,5}^{\infty} \left\{ \frac{\left[\nu \frac{m}{b} - \left(\frac{n}{a} \right)^2 \frac{b}{m} \right] \frac{16}{\pi D \pi^2} \left[\left(\frac{m}{b} \right)^2 \Delta_{\text{прод}} + \left(\frac{n}{a} \right)^2 \Delta_{\text{ноп}} \right]}{\left[\left(\frac{n}{a} \right)^2 + \left(\frac{m}{b} \right)^2 \right]^2} \times \right. \\
 &\quad \times \left. \sin\left(\frac{\pi n x}{2a}\right) \cos\left(\frac{\pi m y}{2b}\right) \cos\left(\frac{\pi n x}{2a}\right) \sin\left(\frac{\pi m y}{2b}\right) \right\} + \\
 &+ \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \left\{ \left[A_n \operatorname{ch}\left(\frac{\pi n x}{2b}\right) + B_n x \operatorname{sh}\left(\frac{\pi n x}{2b}\right) \right] \frac{\pi n}{2b} \sin\left(\frac{\pi n y}{2b}\right) (1+\nu) + \right. \\
 &\quad + 2B_n \operatorname{ch}\left(\frac{\pi n x}{2b}\right) \sin\left(\frac{\pi n y}{2b}\right) + D_n \operatorname{sh}\left(\frac{\pi n y}{2a}\right) \cos\left(\frac{\pi n x}{2a}\right) (1-\nu) - \\
 &\quad \left. - \left[C_n \operatorname{sh}\left(\frac{\pi n y}{2a}\right) + D_n y \operatorname{ch}\left(\frac{\pi n y}{2a}\right) \right] \frac{\pi n}{2a} \cos\left(\frac{\pi n x}{2a}\right) (1+\nu) \right\}
 \end{aligned} \tag{8}$$

Коэффициенты A_n, B_n, D_n, C_n определяются системой уравнений с бесконечным числом неизвестных, которая решается путем последовательного приближения.

Разработан алгоритм для определения изгибных деформаций (перемещений $U_x(x, y)$) плоской секции ограниченных размеров с шарнирно опертыми краями:

$$U_z(x, y) = \sum_{n=1, 3, 5}^{\infty} \sum_{m=1, 3, 5}^{\infty} \frac{\bar{w}_{xx, n, m}^p \left(\frac{\pi x}{2a}\right)^2 + \bar{w}_{yy, n, m}^p \left(\frac{\pi y}{2b}\right)^2}{\left[\left(\frac{\pi x}{2a}\right)^2 + \left(\frac{\pi y}{2b}\right)^2\right]^2} \cos\left(\frac{\pi x}{2a}\right) \cos\left(\frac{\pi y}{2b}\right). \quad (9)$$

где \bar{w}_{xx}^p и \bar{w}_{yy}^p - коэффициенты разложения в двойной ряд Фурье соответствующих угловых деформаций w_{xx}^p, w_{yy}^p .

В качестве примера рассмотрена квадратная пластина ($a=b$) с квадратным вварышем в ее центральной части. На рис. 2 приведены результаты расчета для случая, когда $a=1000$ мм, $\alpha_{\text{пол}}=0.05$ рад, $\alpha_{\text{прод}}=0.01$ рад и при различных размерах вварыша. Результаты представлены в виде зависимости перемещений U_z в сечении $y=0$ от координаты x . Видно, что максимальные перемещения имеют место по оси сварного шва.

В расчетном алгоритме для тонкостенных цилиндрических оболочек (рис. 3) используются методы теории упругости, основанные на гипотезах Кирхгофа-Лява. Для приведения определяющей системы дифференциальных уравнений к системе линейных алгебраических уравнений используется интегральное преобразование Фурье по координате β и разложение в ряд Фурье по α при наличии симметрии относительно плоскостей $\alpha=0, \beta=0$ и достаточно большой длине L оболочки ($L-\alpha_0 R < 3\sqrt{Rh}$).

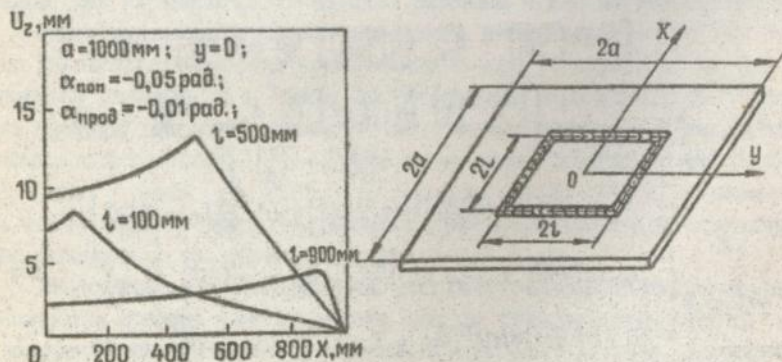


Рис. 2. Прогобы квадратной пластины с квадратным вварышем.

$$\begin{aligned}
 U(\alpha, \beta) &= \sum_{m=0, 2, 4, \dots}^{\infty} \int_0^{\infty} \bar{U}_m(q) \cos(m\beta) \sin(q\alpha) dq; \\
 V(\alpha, \beta) &= \sum_{m=0, 2, 4, \dots}^{\infty} \int_0^{\infty} \bar{V}_m(q) \sin(m\beta) \cos(q\alpha) dq; \\
 W(\alpha, \beta) &= \sum_{m=0, 2, 4, \dots}^{\infty} \int_0^{\infty} \bar{W}_m(q) \cos(m\beta) \cos(q\alpha) dq.
 \end{aligned} \quad (10)$$

Разработанный алгоритм позволяет определять остаточные перемещения длинных цилиндрических оболочек от неземкнутых кольцевых и продольных сварных швов. В качестве примера на рис. 3 представлены расчетные данные по остаточным перемещениям $W(x, y)$ алюминиевой цилиндрической оболочки при вварке прямоугольного вварыша.

С целью проверки достоверности разработанных расчетных алгоритмов было проведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных по общим сварочным деформациям типовых сварных конструкций. В частности, рассматривались: 1) перемещения свободной кромки ($x=150\text{мм}$) сваренной ($I=150\text{А}$, $U=24\text{В}$, $v_c=0.18\text{см/с}$) встык пластины из стали X10CrNi18.8 толщиной $\delta=6\text{мм}$ при различной ширине пластины $y=120, 160, 200\text{мм}$ (рис. 4а); 2) угловые деформации коротких пластин из стали Ст. 3 при дуговой наплавке под флюсом валика (режимы сверки и эскизы микрошлифов сечений на рис. 4б); 3) прогибы стальной цилиндрической оболочки диаметром $2R=75\text{мм}$ и толщиной $\delta=5\text{мм}$ от аргонодуговой сверки ($q_n=1162\text{ккал/см}$) кольцевого шва (рис. 4в). Удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных ($\pm 10-15\%$) позволяет утверждать о приемлемости разработанного метода для оценки общих деформаций сварных конструкций.

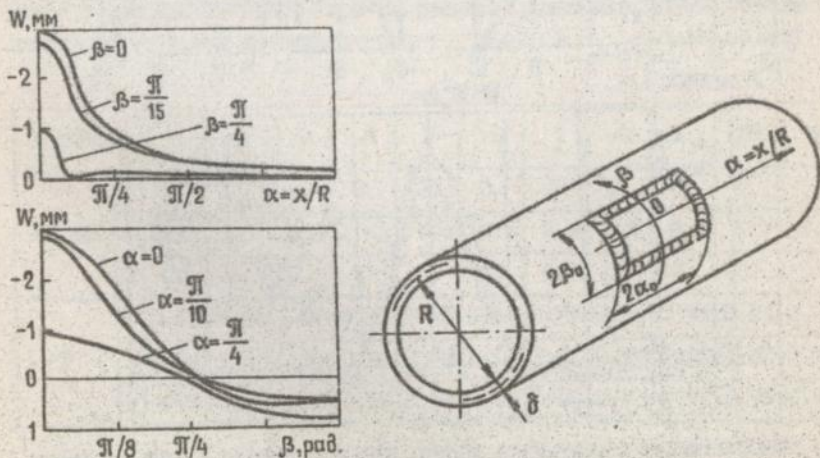


рис. 3. Прогибы алюминиевой цилиндрической оболочки ($R=250\text{мм}$, $\delta=4\text{мм}$) от вварки ($q_n=466\text{ккал/см}$) прямоугольного вварыша ($\alpha_0=\pi/10$, $\beta_0=\pi/15$).

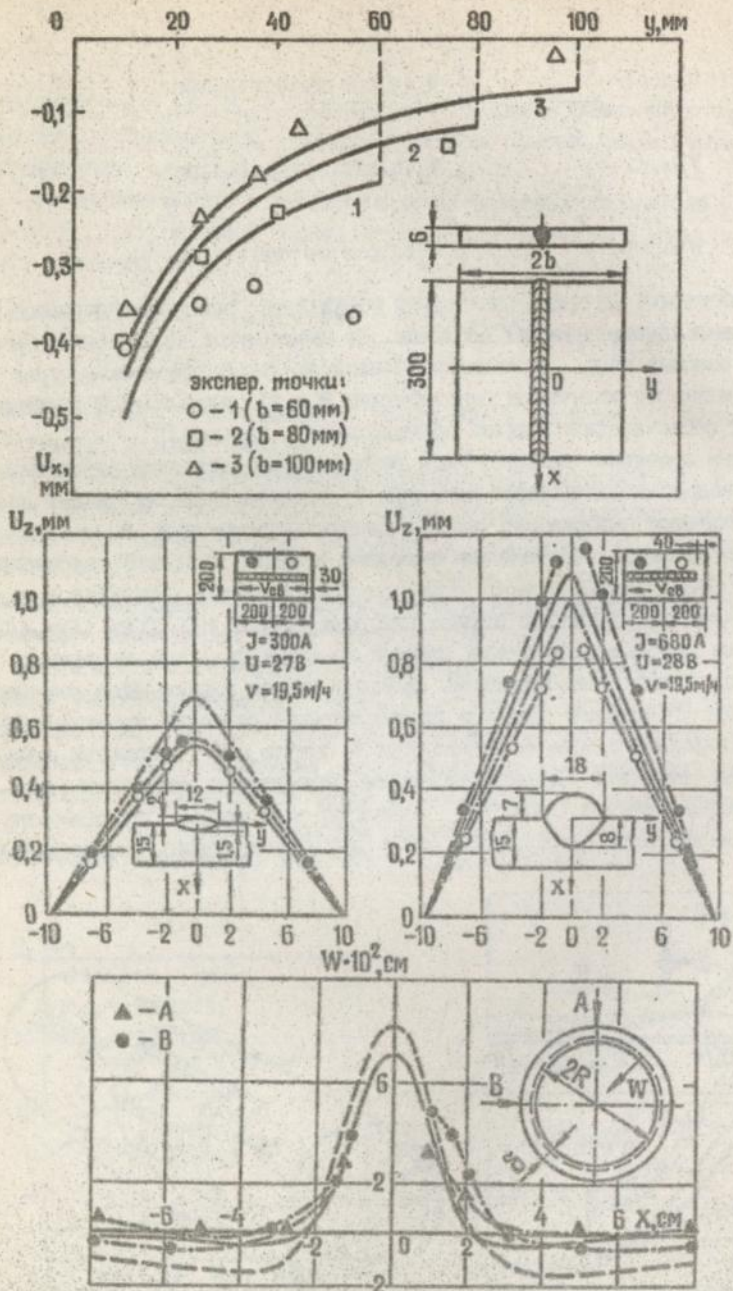


Рис. 4 Сопоставление расчетных и экспер. данных: сплошная линия - метод функции усадки; штриховая - экспер.; штрих-пунктирная - метод термопл.

Учитывая то, что целый ряд параметров, используемых в предложенном расчетном методе, имеют стохастический характер (например, количественные характеристики функции усадки, неточности при сборке под сварку и т. д.), в работе рассматривается возможность получения вероятностных оценок обеспеченности расчета. Разработан соответствующий алгоритм, использующий гипотезу малых отклонений и нормальный закон распределения.

Разработанный метод определения общих деформаций апробировался при решении ряда практических задач. В частности, при оценке вероятности качественной стыковки продольного набора при стыковке крупных судостроительных секций между собой, а также при оценке вероятности качественной установки поперечного набора на плоскую сквадину с продольным набором.

На рис. 5 представлены результаты расчета перемещений кромок, по которым эти секции стыкуются. Для качественной стыковки набора необходимо, чтобы разница перемещений стыкуемых концов не превышала половины толщины δ_n стыкуемого набора. Определялись вероятности качественной стыковки каждого ребра для трех вариантов стыкуемых секций (рис. 5а).

В 1-ом варианте стыкуются две полностью одинаковые секции типа 1. Во 2-ом варианте стыкуются разные секции типа 1 и типа 2 и при установке набора не производится корректировка с учетом усадочных явлений от приварки ребра. В 3-ем варианте эта корректировка производится. В таблице 1 приведены результаты расчета величины ΔU_y^0 ожидаемой разницы перемещений стыкуемых концов и вероятности качественной стыковки P для каждого ребра при погрешности установки набора $\epsilon_y = 1 \text{ мм}$ и дисперсии величины функции усадки $\epsilon_{\Delta_{\text{пол}}} / \Delta_{\text{пол}} = \epsilon_{\Delta_{\text{прод}}} / \Delta_{\text{прод}} = 30\%$.

Таблица 3.1

№ ребра		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\Delta U_y^0, \text{ мм}$	1	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	2	0.27	0.9	1.2	1.45	1.5	2.2	2.4	2.7	2.7	2.7	2.7
	3	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
P	1	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91
	2	0.99	0.99	0.99	0.98	0.97	0.94	0.91	0.87	0.84	0.82	0.79
	3	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94

X ↑

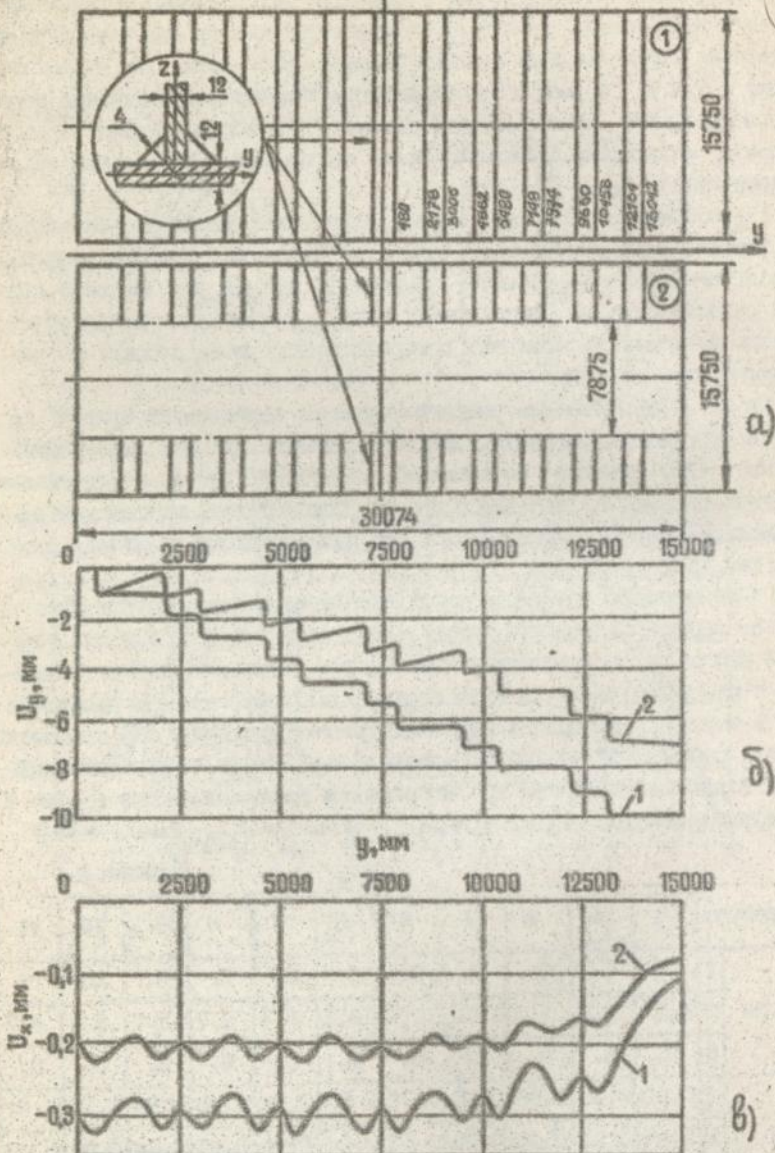


Рис. 5. Крупные плоские сечения с продольным набором: а) продольный набор приварен по всей длине сечения - тип 1; не по всей длине - тип 2; б) перемещения U_y кромки ($x = \text{const}$) от приварки набора; в) перемещения U_x .

На практике ребра, для которых вероятность качественной стыковки низкая, недоверяют до края полотнища, во время стыковки секций подгоняют неприваренные к полотнищу концы ребер друг под друга, а затем приваривают их к полотнищу. Это связано с дополнительным объемом работ.

Как демонстрируют результаты в таблице 1, эффективным способом повышения вероятности качественной стыковки является компенсация сворочных деформаций на основе прогноза, позволяющего при разметке мест установки набора вводить коррекцию на ожидаемые перемещения.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ:

1. Разработан новый метод расчета общих деформаций крупных сварных конструкций с большим количеством сварных швов. За основу выбран наиболее общий из существующих методов функции усадки - метод условных пластических деформаций, в котором функция усадки является тензорной величиной. Показано, что если главные направления тензора совпадают с продольным и поперечным направлениями сварного шва, а сварная конструкция является достаточно тонкостенной, то функцию усадки определяют только четыре традиционные характеристики - продольная усадка, поперечная усадка, продольная и поперечная угловые деформации.

2. Разработана экспериментальная методика получения количественных характеристик функции усадки на плоских образцах ограниченного размера при соответствующих физических, геометрических и технологических параметрах. В зависимости от указанных параметров разработана структура банка данных по сворочным деформациям. Показана возможность использования для расчета количественных характеристик функции усадки многочисленных литературных данных различных исследователей, а также численных решений, основанных на теории термопластичности.

3. Дано общее математическое описание задачи определения перемещений различных точек сварной конструкции на основании заданной функции усадки. В основу описания положены общие подходы теории упругости с дополнительным тензором условных пластических деформаций, предельно сосредоточенных по оси сварного шва и кусочно-постоянных по его длине. Такая идеализация позволяет максимально формализовать поиск решения и использовать соответствующий аппарат теории упругости, что важно при большом количестве сварных швов и значительных размерах секции (угла).

4. На основе общей постановки разработаны расчетные алгоритмы и создано программное обеспечение для определения общих деформаций характерных сварных узлов. Для сварных балочных конструкций разработан-

ный алгоритм фактически формализует известные подходы, что важно с точки зрения компьютеризации расчетов балочных конструкций переменного сечения с большим количеством сварных швов различного направления. Для сварных плоских секций и длинных цилиндрических оболочек созданы оригинальные алгоритмы, учитывающие геометрические размеры сварных узлов, свойства материала и технологические условия сварки.

5. На основании сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными, а также с результатами расчетов, выполненных с помощью методов теории термопластичности, установлено, что разработанный метод позволяет получать расчетные данные по перемещениям для различных сварных узлов с точностью в пределах $\pm 10-15\%$.

6. Выявлены определенные закономерности в характере общих деформаций при сварке балочных конструкций, плоских секций, цилиндрических оболочек. В частности, установлено, что варка вварыша прямоугольной формы в цилиндрическую оболочку вызывает корочность поперечных сечений в районе вварыша, которая возрастает при увеличении погонной энергии.

7. Разработан подход оценки вариации расчетных перемещений плоских секций с учетом определенной стохастичности исходных данных, связанной с определением функции усадки, позиционированием привариваемых элементов и т.д.. На основании проведенного исследования остаточного деформируемого состояния крупных сварных плоских секций установлено, что эффективным способом повышения вероятности качественной стыковки продольного набора при стыковке секций между собой, а также вероятности качественной установки поперечного набора на плоскую секцию с продольным набором является компенсация сварочных деформаций на основе прогноза, позволяющего при разметке мест установки набора вводить коррекцию на ожидаемые перемещения.

Основные результаты диссертации освещены в работах:

1. Создание экспертной системы "Точность сварных конструкций" / В. И. Махненко, Е. А. Великоиваненко, А. В. Коротынский, О. В. Махненко // Сборник научных трудов "Проблемы сварки и спец. электрометаллургии", посвящ. 120-летию со дня рождения Е. О. Патона - Киев 1990. - С. 33-40.
2. Прогнозирование общих деформаций сварных узлов на основе базиса данных по поперечной, продольной усадке и угловым деформациям / Л. М. Лобанов, О. В. Махненко // Ж. "Автоматическая Сварка" - 1991 - №10 - С. 9-13.
3. Сварные конструкции с минимальными припусками и пригонкой / О. В. Махненко // XVIII Конференция молодых ученых Института Механики НАН Украины: Тезисы докладов, Киев, 1993. - С. 43-45.
4. Вопросы изготовления сварных конструкций при минимальных при-

пусках и пригонке/ Л. М. Лобанов, О. В. Махненко, М. Байер//Ж. "Автоматич. Сварка"-1994. -N2-С. 3-8.

5. Расчетное прогнозирование сварочных деформаций при изготовлении плоских секций с целью снижения объема пригоночных работ/Л. М. Лобанов, Махненко О. В., Зайферт П. // Ж. "Автоматич. сварка", в печати.

Личный вклад автора: В /1/ предложены идеализация распределения функции усадки и расчетный алгоритм для определения общих деформаций цилиндрических оболочек от различных сварных швов. В /2/ – алгоритмы для расчета общих деформаций балочных конструкций и изгибных деформаций прямоугольных пластин с шарнирно опертыми кромками. В /3, 4/ – алгоритмы для расчета общих деформаций плоских сварных секций, подход для оценки обеспеченности прогноза при вариации исходных данных.

АНОТАЦІЯ

Махненко О. В. Рукопис дисертації на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06. "Технологія та устаткування для зварювання та споріднених процесів" на тему "Розрахунковий метод визначення загальних деформацій зварних конструкцій на основі функції усадки". Інститут електрозварювання ім. С. О. Пятон НАН України, Київ, 1996р. Захищається новий метод розрахунку загальних деформацій зварних конструкцій із тонких елементів на основі функції усадки від кожного зварного шва, а також оригінальні розрахункові алгоритми для визначення деформацій балочних конструкцій, плоских секцій, циліндричних оболонок та алгоритм для оцінки забезпеченості розрахунку при варіації початкових даних.

Ключові слова: розрахунковий метод, зварні конструкції, загальні деформації.

ABSTRACT

"A Prediction Method of Residual Deformation in Welded Structures Based on the Characteristics of Inherent Strains" by Makhnenko O.V. The dissertation of a Candidate of Technical Sciences on the Speciality 05.03.06. - Technology and Equipment for Welding and Related Processes. Paton's Institute of Electric Welding, Ukraine, Kiev, 1996.

A new prediction method of residual deformation in welded thin-walled structures using inherent strains is developed. Also, original algorithms to calculate residual deformation in welded girder, plate structures, cylindrical shells and algorithm to estimate probability of obtained results due to variation of initial data are proposed.

Key Words: Prediction Method, Welded Structures, Welding Deformation

437796

АВ 36.271

Подл. в печ. 18.11.96. Формат 70x108/16. Бум.офс. № 2.
Офс.печ. Усл.печ.л. 1,75. Усл.кр.отт. 1,98. Уч.-изд.л. 1,86.

Тираж 100 экз. Зак.6-275.

ИЭС им.Е.О.Патона. 252650, Киев-5, ГСП, ул. Боженко, 11.
ООП ИЭС им.Е.О.Патона. 252650, Киев-5, ГСП, ул.Горького, 69.