

М 261796 *сн*

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ им. Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

ФЛОРИНСКАЯ Татьяна Яковлевна

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДОРОДА В СВАРНЫХ
СОЕДИНЕНИЯХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПРИ СВАРКЕ И
ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ТЕРМООБРАБОТКЕ

Специальность 05.04.05

Технология и машины сварочного производства

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана и Ленинградском институте авиационного приборостроения.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор ФРОЛОВ В.В.

Научный консультант - кандидат физико-математических наук, доцент ФЕДЮШИН Б.К.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор ШОРШОРОВ М.Х.

кандидат технических наук НАЗАРОВ Г.В.

Ведущее предприятие - указано в решении Ученого Совета

Автореферат разослан " " 197 г.

Защита диссертации состоится " " 197 г.
на заседании Совета факультета "Автоматизации и механизации
процессов управления, 107005,
2-я

высш

учил

Зак

M 261496

, просьба

теке

12/III-75г.

п. МВТУ

Для успешного выполнения задач, намеченных XXIV съездом Коммунистической партии Советского Союза в области создания новейшей техники, первостепенное значение приобретают вопросы повышения эксплуатационной надежности создаваемых машин и улучшения их технико-экономических характеристик.

Среди материалов, получивших широкое применение в современном машиностроении, одно из ведущих мест занимают сплавы титана, которые в настоящее время широко используются в различных отраслях промышленности для изготовления наиболее ответственных сварных конструкций.

Из многих факторов, ограничивающих повышение конструктивной прочности сварных изделий из титановых сплавов наиболее существенным является наличие в металле сварного соединения примесей газов — кислорода, азота и, особенно, водорода.

Отрицательное влияние водорода на механические свойства титановых сварных соединений в значительной степени усиливается перераспределением его в процессе термического цикла сварки, приводящим к опасному локальному повышению концентрации в отдельных участках сварного соединения даже в случае сравнительно невысокого его содержания в исходном металле.

В связи с этим изучение перераспределения концентрации водорода при сварке титановых сплавов представляет несомненный теоретический интерес и имеет большое практическое значение.

Изучение распределения водорода в сварных соединениях из титановых сплавов началось сравнительно недавно в работах М.Х.Шоршорова, Г.В.Назарова, В.В.Фролова, Г.Л.Петрова, А.Е.Корчемкина, Б.А.Колачева, С.З.Бокштейна и др.

Целью настоящей работы является исследование перераспределения концентрации водорода в околошовной зоне сварных соединений титановых сплавов при сварке и последующей термообработке. При этом сделана попытка установить общие закономерности перераспределения водорода, влияния на него режимов сварки и термообработки, а также диффузионных характеристик исходных материалов.

Поставленная задача решается экспериментальными методами



и посредством математического анализа.

В качестве экспериментальных методов исследования применены: спектральный анализ содержания водорода, металлографический анализ и автордиографический метод. Изучено влияние неоднородности распределения водорода на механические свойства сварных соединений.

Диссертация состоит из четырех глав и является результатом научно-исследовательской работы, выполненной в Ленинградском институте авиационного приборостроения и Московском высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана.

1. Состояние вопроса и постановка задачи исследования

Химическая и физическая неоднородность металла сварного соединения связана как с процессом плавления и кристаллизации сварочной ванны, так и с диффузионными процессами в околошовной зоне, развивающимися в период термического цикла сварки. В процессах диффузии особая роль принадлежит водороду в виду его высокой диффузионной подвижности и большой растворимости в титане, связанной с гидридообразованием.

Вопросы взаимодействия водорода газовой фазы с жидким металлом при сварке, а также влияние условий сварки и кристаллизации сварочной ванны на конечное содержание водорода в металле шва рассмотрено в работах В.В.Фролова, Г.Л.Петрова, А.Е.Корчемкина.

Однако взаимодействие водорода, растворенного в металле, с газовой фазой в пределах з.т.в. весьма ограничено. Это связано с кратковременностью термического цикла сварки, высокими значениями энергии активации процесса растворения газа в твердом металле, а также низким парциальным давлением водорода в газовой фазе. В связи с этим распределение водорода в околошовной зоне сварного соединения определяется в основном уровнем его концентрации в исходном металле, а также диффузионными процессами, интенсифицированными высокотемпературным полем в период термического цикла сварки.

Перераспределение водорода у границы сплавления изучалось в работах А.Е.Корчемкина и Г.Л.Петрова методами спектрально-

го анализа и автордиографии.

В работах Г.Л.Пзгрова с сотрудниками рассмотрен также вопрос гетеродиффузии на границе раздела α - и β - фаз в околосварной зоне титановых сварных соединений. Путем расчета показано, что диффузия этого вида не может привести к значительной неоднородности по водороду.

Локальное повышение концентрации водорода в околосварной зоне титановых сварных соединений установлено в работах В.В.Фролова, Б.А.Колачева, С.З.Бокштейна, И.И.Муравьева, а также в наших исследованиях. В работах А.С.Михайлова, Б.С.Крылова, М.Х.Шоршорова, Б.А.Матюшкина, А.И.Горшкова показано влияние водорода на замедленное разрушение титановых сварных соединений.

В настоящей работе были поставлены следующие задачи:

1. Изучение кинетики процесса диффузии водорода в околосварной зоне сварного соединения и влияния на него параметров термического цикла сварки аналитическим методом.

2. Экспериментальное изучение влияния режимов сварки и термообработки на распределение концентрации водорода в сварных соединениях титановых сплавов.

3. Изучение влияния неоднородности распределения концентрации водорода на механические свойства сварных соединений.

II. Аналитическое исследование диффузионного перераспределения водорода в околосварной зоне сварного соединения

В процессе аргоно-дуговой сварки титановых сплавов под воздействием температурного поля сварочной дуги происходит перераспределение водорода в результате протекания диффузионных процессов.

Поскольку для титана характерна высокая концентрация энергии вблизи оси перемещения источника, большие градиенты температур и более длительное (по сравнению с другими металлами) пребывание околосварной зоны при высоких температурах, то поэтому в титане процессы термодиффузии должны протекать особенно активно.

Среди других примесей водород отличается наибольшей диф-

фузионной подвижностью и следовательно более других элементов склонен к диффузионному перераспределению.

Движущей силой диффузии в общем случае являются: градиент концентрации, градиент температуры и градиент напряжений. Однако действием последнего фактора в условиях высоких температур ($T > 700^{\circ}\text{C}$) можно пренебречь.

В данной работе задача перераспределения водорода в околошовной зоне сварного соединения решалась на основе уравнения неизотермической диффузии (термодиффузии) в дифференциальной форме. При этом рассмотрены два случая температурного поля 1) непрерывно действующего источника тепла, выражающего процесс распространения тепла в околошовной зоне металла вблизи границы сварочной ванны, 2) мгновенного источника тепла, моделирующего процесс распространения тепла при сварке быстродвижущимся источником тепла.

Хотя температурное поле при сварке в общем случае не является одномерным, однако математическая модель теплового процесса по схеме мощного быстродвижущегося линейного источника тепла позволяет значительно упростить задачу и свести ее к одномерной.

Дифференциальное уравнение неизотермической диффузии, записанное относительно безразмерной концентрации, в этом случае имеет вид

$$\frac{\partial H(\chi, \tau)}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 H(\chi, \tau)}{\partial \chi^2} + Pn D \frac{\partial^2 T_1(\chi, \tau)}{\partial \chi^2}, \quad (I)$$

где χ — координата, τ — время, $H(\chi, \tau)$ — безразмерная концентрация, $T_1(\chi, \tau)$ — безразмерная температура, D — коэффициент диффузии, Pn — критерий Поснова.

Было получено аналитическое решение уравнения (I) при постоянных (средних) значениях коэффициентов D и Pn в рассматриваемом температурном интервале. Функция безразмерной концентрации, являющаяся решением этого уравнения, имеет максимум вблизи плоскости с максимальной температурой, равной температуре плавления. При этом решение для случая непрерывно действующего источника тепла характеризует распределение концентраций в околошовной зоне сварного соединения

лишь в пределах времени существования сварочной ванны и не содержит параметров режима сварки. Частное решение уравнения (1), полученное для случая температурного поля мгновенного источника тепла, имеет следующий вид:

$$H(y, \tau) = H_0 \operatorname{erfc} \frac{y}{2\sqrt{Dt}} + \frac{p_n L u B}{1 - Lu} \sqrt{\frac{e}{8\sigma t}} \left[e^{-\frac{(y+B/2)^2}{4\sigma t}} - e^{-\frac{(y+B\sqrt{Lu}/2)^2}{4\sigma t}} \right] \quad (2)$$

$$B = \sqrt{\frac{2}{\pi}} e \frac{q}{u_a \delta c \gamma T_{na}}; \quad Lu = \frac{D}{a},$$

где D — коэффициент температуропроводности
 H_0 — граничное значение функции $H(y, \tau)$
 B — ширина зоны проплавления.

Функция распределения концентрации водорода (2) позволяет связать особенности перераспределения водорода с параметрами термического цикла, однако это решение не может быть использовано при больших значениях τ (времени).

Более точной математической моделью процесса диффузии при сварке является уравнение, учитывающее температурную зависимость коэффициента диффузии, т.к. в металле околошовной зоны сварного соединения диффузионные процессы протекают в условиях непрерывного изменения температуры, что приводит к быстрому уменьшению коэффициента диффузии со временем. На основе уравнения непрерывности при использовании аналитической зависимости коэффициента диффузии водорода от температуры получено неоднородное дифференциальное уравнение неизотермической диффузии с переменными коэффициентами, которое для одномерной задачи имеет следующий вид:

$$\frac{\partial H(y, \tau)}{\partial \tau} = D(y, \tau) \frac{\partial^2 H(y, \tau)}{\partial y^2} + G(y, \tau) \frac{\partial H(y, \tau)}{\partial y} + F(y, \tau) \quad (3)$$

Анализ решения уравнения (3), полученного методом конечных разностей на ЭЦМ, позволяет установить связь между функцией распределения водорода и параметрами режима сварки. При этом показано, что положение пика концентрации, также как его ширина зависят от погонной энергии, отнесенной к единичной тол-

дине металла ($\frac{q}{1,8}$). Уменьшению пика концентрации водорода способствуют повышенные скорости охлаждения металла в процессе сварки и более низкие значения коэффициента диффузии водорода. Однако относительное приращение концентрации водорода в максимуме не зависит от режима сварки. Расчет максимальных температур показывает, что абсцисса пика концентрации на кинетических кривых совпадает с местоположением плоскости максимальной температуры, равной температуре $\alpha \rightleftharpoons \beta$ превращения. Характерные кинетические кривые распределения безразмерной концентрации водорода, полученные в результате решения уравнения (3) на ЭЦВМ, приведены на рис.1, где за начало отсчета координаты принята плоскость с максимальной температурой, равной температуре плавления (линия сплавления).

На рис.2 показано схематическое распределение концентрации водорода в сварном соединении в соответствии с полученным решением уравнения (3).

Следует отметить, что принятая математическая модель процесса перераспределения водорода не учитывает гетеродиффузии на границе раздела α - и β - фаз, которая будет способствовать увеличению пика концентрации на границе з.т.в. с основным металлом.

III. Экспериментальное исследование распределения водорода в сварных соединениях титановых сплавов

Исследование выполнялось в основном на сплаве OT4-I и сплаве системы Ti-Al-Zr. Сварные соединения образцов из листового сплава OT4-I толщиной 1,25 мм, а также трубчатых образцов Ø18 мм с толщиной стенки 2,5 мм из сплава системы Ti-Al-Zr получены посредством автоматической аргонодуговой сварки (точка росы в аргоне - 40°C - 60°C). Для трубчатых образцов производилась V - образная разделка кромок под сварку, причем чистота обработки кромок соответствовала V 5. Образцы из металла толщиной 1,25 мм сваривались без присадочной проволоки, а трубчатые образцы - с присадочной проволокой, содержание водорода в которой не превышало 0,002% вес.

Измерение концентраций водорода в сварных соединениях осуществлялось эмиссионным спектральным методом с повышенной степенью локальности (диаметр пятна оплавления образца при воздействии импульсного разряда не превышал 0,5 - 0,8 мм).

Определение концентраций водорода производилось на спектральной установке, собранной на базе фотоэлектрического стилометра ФЭС-1.

Для измерения интенсивности спектральной линии водорода фотоэлектрическим методом на выходе установки использовались ФЭУ-22 и импульсный милливольтметр В4-6.

Изучение распределения концентрации водорода в сварных соединениях проводилось в направлении, перпендикулярном сварному шву, для трубчатых образцов - вдоль оси трубы на расстоянии 1 мм от поверхности, для плоских образцов - на расстоянии 0,2 мм. Кроме того, для некоторых образцов выполнялся послыйный спектральный анализ (в поперечном сечении образца), что позволило повысить точность измерений как за счет увеличения числа параллельных определений в одном слое, так и за счет возможности уменьшения интервала по координате между соседними слоями.

На рис.3 приведена характерная кривая распределения водорода в сварном соединении из сплава ОТ4-1, полученная спектральным методом.

Также было исследовано распределение водорода в сварных соединениях при электронно-лучевой сварке.

Изучение распределения концентрации водорода методом спектрального анализа показало, что в сварных соединениях сплавов ОТ4-1 и сплава системы Ti-Al-Zr водород распределен неравномерно. На границе з.т.в. с основным металлом имеется пик в распределении водорода, где концентрация обычно превосходит в 2-3 раза уровень водорода в основном металле.

Ширина пика концентрации зависит от режима сварки - наименьшая для ЭЛС и наибольшая для режима ручной сварки. Расстояние между пиком концентрации и границей сплавления обычно равно половине ширины сварного шва, что находится в согласии с решением уравнения диффузии численным методом.

Распределение концентрации водорода в сварных соединениях из сплавов OT4-I и α - сплава системы Ti-Al-Zr имеет практически одинаковый характер.

Наблюдающееся отсутствие влияния химического состава сплава на диффузионное распределение водорода по всей видимости связано с преобладающим влиянием структурного фактора (повышенной плотностью дефектов структуры) на коэффициент диффузии водорода вблизи температуры полиморфного превращения.

При дополнительном изучении распределения концентрации водорода в сварных соединениях методами металлографического анализа и автордиографии установлено наличие области, обогащенной водородом, на границе з.т.в. с основным металлом.

Изучение влияния термообработки на распределение концентрации водорода в сварных соединениях проводилось в двух направлениях: путем расчета, а также экспериментально. Проведенный расчет на основе решения уравнения изотермической диффузии позволил обосновать уменьшение пика концентрации со временем при термообработке сварных соединений.

Термообработка сварных соединений из сплава OT4-I и сплава системы Ti-Al-Zr производилась в муфельной печи при температуре 650 - 680°C. Установлено, что термообработка в течение 2 ч позволяет в значительной степени снизить величину пика концентрации водорода на границе околошовной зоны с основным металлом. Увеличение времени термообработки до 5 ч практически приводит к устранению пика.

IV. Влияние неоднородности распределения водорода на механические свойства сварных соединений из титановых сплавов

Механические свойства различных участков сварного соединения в основном оценивались с помощью методов динамических испытаний. В этой связи плоские образцы из исследуемых сплавов испытывались на ударную вязкость и ударное растяжение, а трубчатые образцы на подрыв с использованием энергии взрывчатых веществ.

Для испытаний на ударную вязкость были получены сварные соединения из титановых сплавов Ti-Al-Zr и Ti-Al-V при автоматической аргоно-дуговой сварке без охлаждения и с принудительным охлаждением со скоростью 120 - 200 град/с в интервале температур полиморфного превращения. Результаты испытаний показали, что участок зоны термического влияния, расположенный на границе с основным металлом, является наиболее слабым местом сварного соединения, где наблюдается значительное снижение ударной вязкости по сравнению с основным металлом. При увеличении скорости охлаждения ударная вязкость з.т.в. снижается в меньшей степени, что по-видимому, связано в основном с выделением гидридной фазы в виде мелкодисперсных включений.

Влияние водорода на механические свойства з.т.в. тонколистового сплава OT4-I толщиной 1,25 мм изучалось при испытаниях на ударное растяжение. Содержание водорода в образцах изменялось в пределах от 0,002 до 0,02% вес. Для участка околошовной зоны сварного соединения из сплава OT4-I также характерны пониженные механические свойства по сравнению с другими участками сварного соединения. Так, например, при испытаниях на ударное растяжение удельная работа разрушения этого участка снижается на 25 - 28% по сравнению с основным металлом.

Сопротивляемость подрыву нетермообработанных сварных трубчатых образцов из титанового α - сплава системы Ti-Al-Zr исследовалась на специальной установке, в которой динамическая нагрузка создавалась путем подрыва ВВ в воде. Проведенные динамические испытания показали, что при увеличении содержания водорода от 0,005 до 0,01% вес. предельная относительная деформация сварных трубчатых образцов в значительной степени снижается и составляет в этом случае соответственно 28 и 14%. Трещины при динамическом нагружении главным образом распространяются по участкам, которые обогащены гидридными включениями.

Термообработка сварных трубчатых образцов из титанового α - сплава системы Ti-Al-Zr при температуре 650 - 700°C в течение 5 ч позволяет повысить их сопротивляемость подрыву при использовании энергии взрывчатых веществ, если содержание водорода в основном металле не превышает 0,01% вес.

Основные выводы

1. Получено аналитическое решение дифференциального уравнения неизотермической диффузии с постоянными коэффициентами, позволявшее объяснить возникновение пика концентрации водорода в околошовной зоне сварных соединений титановых сплавов в процессе сварки.

2. Получено уравнение неизотермической диффузии с учетом зависимости коэффициента диффузии от температуры, которое уточняет математическую модель процесса массопереноса водорода в околошовной зоне при сварке.

3. В результате решения уравнения диффузии с переменными коэффициентами, выполненного численным методом на ЭЦМ, установлено, что положение пика концентрации водорода, а также его ширина зависят от погонной энергии, отнесенной к единичной толщине металла. Абсцисса пика концентрации, отсчитанная от линии сплавления, равна половине ширины зоны проплавления. Снижению пика способствуют повышенные скорости охлаждения металла и низкие значения коэффициента диффузии водорода.

4. Экспериментальное исследование распределения водорода в сварных соединениях образцов из сплава ОТ4-1 и сплава системы $Ti-Al-Zr$, выполненное методом локального спектрального анализа, показало, что на границе зоны термического влияния с основным металлом имеется участок с повышенной концентрацией водорода, обычно превосходящей в 2-3 раза содержание его в основном металле. Относительное приращение концентрации водорода в области пика не зависит от его исходного содержания в металле (в пределах от 0,005 до 0,02% вес) при аргоно-дуговой сварке.

5. Экспериментально установлена зависимость распределения концентрации водорода в зоне термического влияния от режима сварки: увеличение скорости охлаждения сварных соединений способствует снижению пика концентрации в распределении водорода.

6. Установлена хорошая корреляция между экспериментальными кривыми распределения концентрации водорода в околошовной зоне сварных соединений из сплава ОТ4-1 и сплава системы $Ti-Al-Zr$ и функцией распределения безразмерной концентрации, полученной численным методом решения уравнения неизотермической диффузии.

7. Металлографическим и автордиографическим методами исследования также подтверждено наличие зоны, обогащенной водородом, на границе в.т.в. с основным металлом.

8. Результаты экспериментального изучения распределения

концентрации водорода после термообработки показали, что термообработка сварных соединений исследованных сплавов при $T = 650 - 700^{\circ}\text{C}$ в течение 5 ч практически приводит к устранению пика в распределении водорода.

9. Механические испытания сварных образцов показали, что зона термического влияния на границе с основным металлом является наиболее ослабленным участком сварного соединения, для которого характерно резкое снижение ударной вязкости по сравнению с основным металлом (в 3 раза для сплава Ti-Al-Zr).

10. Удельная работа разрушения з.т.в. сплава OT4-I при ударном растяжении снижается на 25 - 28% по сравнению с основным металлом с исходным содержанием водорода от 0,002 до 0,02% вес.

11. Предельная относительная деформация сварных соединений трубчатых образцов из титанового α - сплава системы Ti-Al-Zr при динамических испытаниях методом взрыва снижается от 28 до 14% с увеличением содержания водорода от 0,005 до 0,01% в исходном металле.

Термообработка при температуре 680 - 700 $^{\circ}\text{C}$ в течение 5 ч повышает их предельную относительную деформацию до 23%, если содержание водорода в исходном металле не превышает 0,01%.

12. На основе проведенных исследований даны рекомендации по выбору режимов сварки и термообработки, способствующих уменьшению неоднородности в распределении водорода в околошовной зоне сварных соединений и повышению работоспособности сварных конструкций из титановых сплавов.

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Флоринская Т.Я. Влияние термической и концентрационной диффузии на распределение водорода в гидридообразующих металлах. Труды Ленинградского института авиационного приборостроения, в.75, Л-д, 1972.

2. Фролов В.В., Флоринская Т.Я., Муркин Ю.А., Похваленский Д.Е. Распределение водорода в зоне термического

влияния сварного соединения α - сплава титана с учетом явления термодиффузии. ФизХМ № 4, 1973.

З. Флоринская Т.Я., Похваленский Д.Е., Фролов В.В. Влияние термообработки на распределение водорода в околошовной зоне сварных соединений сплава BT5-I. Известия вузов Машиностроение, № I, 1974.

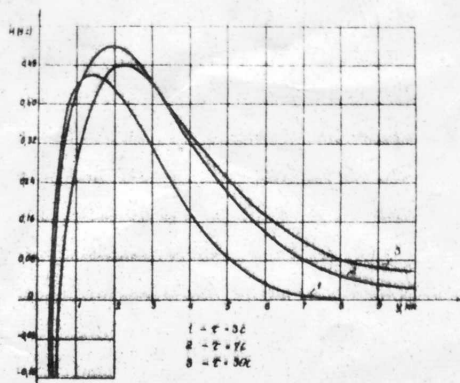


Рис.1. Распределение безразмерной концентрации водорода в стержне для титана (решение уравнения (3) численным методом при $\frac{D}{a^2} = 4,2 \cdot 10^{-7} \text{ Дж/м}^2$)

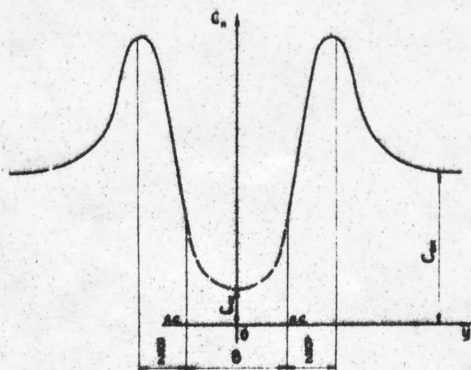


Рис.2. Схема распределения водорода в сварном соединении в соответствии с функцией безразмерной концентрации.

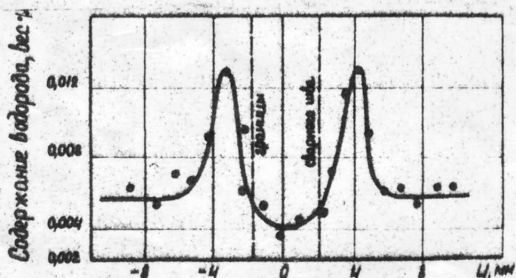


Рис.3. Распределение водорода в поперечном сечении сварного соединения из сплава СТ4-Г (спектральный анализ)