

На правах рукописи

Панченко Олег Владиславович



РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ
МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ДИФФУЗИОННОГО
ВОДОРОДА В НАПЛАВЛЕННОМ МЕТАЛЛЕ ВАКУУМНЫМ МЕТОДОМ

Специальность 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научные руководитель: доктор технических наук, профессор

Кархин Виктор Акимович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор

Шарапов Михаил Григорьевич,

кандидат технических наук

Артемьев Александр Яковлевич

Ведущая организация: ОАО «ЦНИИ Материалов»

Защита состоится «21» февраля 2012 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.26 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, 1-й учебный корпус, ауд. 41.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «18» января 2012 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Тисенко В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Диффузионный водород является одним из основных факторов образования холодных трещин в сварных соединениях. Вероятность появления холодной трещины водородного происхождения определить практически невозможно без анализа используемых сварочных материалов.

В связи с высокой опасностью влияния водорода на сварные соединения, разработка практических мер по снижению влияния диффузионного водорода на свойства металла сварных соединений, вероятно, не утратит актуальности никогда, особенно для высокопрочных марок сталей, используемых при строительстве опасных объектов. Большой вклад в исследовании поведения водорода в сварных соединениях внесли Г.Л. Петров, И.К. Походня, А.М. Левченко, Р.А. Козлов, В.В. Фролов, Н.Н. Прохоров, В.Г. Михайлов, N. Christensen, A. Million, T. Boellinghaus.

Меры, применяемые для снижения влияния диффузионного водорода на свойства сталей, можно разделить на два класса: 1-ый класс – это превентивные меры, направленные на снижение количества водорода, способного попасть в металл в ходе сварки, 2-ой класс – это меры обработки, направленные на удаление уже попавшего водорода в металл. Обработка сварного соединения представляет собой подогрев после сварочных работ и ограничивается конструкционными возможностями, а также влиянием температуры на структуру стали, что делает меры такой обработки не всегда возможными или иногда неэффективными. Превентивные меры заключаются в снижении количества источников водорода, в том числе снижение содержания водород в сварочных материалах. Такие меры применимы вне зависимости от конструкционных особенностей и структуры свариваемой стали, применение сварочных материалов со сниженным содержанием водород возможно практически всегда.

Во многих странах принята классификация сварочных материалов по содержанию диффузионного водорода, которая отражена в стандарте ISO 2560 «Welding consumables. Covered electrodes for manual metal arc welding of non-alloy and fine grain steels. Classification», и с 2009 года в России вступил в силу гармонизированный стандарт ГОСТ Р ИСО 2560 «Материалы сварочные. Электроды покрытые для ручной дуговой сварки нелегированных и мелкозернистых сталей. Классификация». Согласно обоим стандартам электроды для ручной дуговой сварки делятся на четыре группы. К первой группе относятся электроды, содержание водорода в наплавленном металле которых менее $5 \text{ см}^3 / 100 \text{ г}$, эти электроды имеют индекс Н5. Ко второй – электроды, содержание водорода в наплавленном металле которых находится в интервале от 5 до $10 \text{ см}^3 / 100 \text{ г}$, – имеют индекс

H10. К третьей группе относятся электроды, содержание водорода в наплавленном металле которых находится в интервале от 10 до 15 см³/100 г, – имеют индекс H15. Четвертая группа электродов, содержание водорода в наплавленном металле которых превышает 15 см³/100 г, не имеет индекса. Использование данной классификации основывается на определении содержания диффузионного водорода в наплавленном металле при помощи ртутной методики международного стандарта ISO 3690 «Welding and allied processes. Determination of hydrogen content in ferritic steel weld metal.»

В России действует ГОСТ 23338 «Сварка металлов. Методы определения содержания диффузионного водорода в наплавленном металле и металле шва», который регламентирует использование вакуумной методики для определения содержания диффузионного водорода в наплавленном металле. Вакуумная и ртутная методики показывают сопоставимые значения, что свидетельствует о высокой точности вакуумной методики. Данный факт обусловлен схожестью принципа измерения. Но в отличие от ртутной методики – вакуумная безопасна для здоровья и имеет большой запас в возможности усовершенствования. Вакуумная методика признана международными классификационными обществами «Det Norske Veritas», «Germanischen Lloyd», «English Lloyd».

Несмотря на все положительные качества вакуумной методики ГОСТ 23338, на данном этапе ее развития существует ряд недостатков, которые ограничивают возможность широкого применения методики в промышленности. Основным недостатком является сложность эксплуатации существующих установок для определения содержания диффузионного водорода, так как они изготовлены из стекла. Другим важным недостатком является длительность процедуры определения содержания диффузионного водорода. На основании вакуумной методики можно создать новую усовершенствованную методику определения содержания диффузионного водорода и пересмотреть стандарт ГОСТ 23338, который в последний раз редактировался в 1991 году.

Цель работы разработка автоматизированной методики определения содержания диффузионного водорода в наплавленном металле и создание нового прибора для его определения.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Сравнить методы определения содержания диффузионного водорода в наплавленном металле, используемые в мире.

2. Проанализировать влияние размеров образца, времени, затрачиваемого на наплавку и подготовку образца, режимов наплавки на потери диффузионного водорода при его определении.
3. Создать математическую модель диффузии водорода в образце, учитывающую неодновременность наплавки, форму проплавления, выделение водорода через все поверхности образца.
4. Создать расчетную методику ускоренного определения содержания диффузионного водорода в наплавленном металле.
5. Создать прибор для определения содержания диффузионного водорода, имеющий улучшенные эксплуатационные характеристики, а также повышенную точность.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Создана математическая модель диффузии водорода в образце формы параллелепипеда, учитывающая неодновременность наплавки, форму проплавления, выделение водорода через все поверхности образца, позволяющая оптимизировать размеры образца с целью минимизации потери диффузионного водорода до начала его измерения.
2. Создана автоматизированная методика ускоренного определения содержания диффузионного водорода в наплавленном металле, которая на основе решения обратной задачи моделирования позволяет рассчитывать конечный объем выделившегося водорода по результатам измерения на начальном этапе его выделения.

Объектами исследования являлись методики определения содержания диффузионного водорода, геометрические размеры образцов, стали различного химического состава, сварочные материалы, измерители давления.

Методы исследования. Для решения поставленных задач были использованы: вакуумный и термокондуктометрический методы определения содержания диффузионного водорода; метод решения прямой задачи массопереноса (метод источников и отражения); методы решения обратной задачи массопереноса.

Практическая ценность работы

1. Создан прибор для определения содержания диффузионного водорода в наплавленном металле с погрешностью измерения в 1,5 раза ниже,

чем при использовании прибора согласно существующему ГОСТ 23338 (Патент ПМ 82036).

2. Разработана методика автоматизированного определения содержания диффузионного водорода, позволяющая сократить время измерения в 3-5 раз по сравнению с существующей стандартной методикой.
3. Предложен проект стандарта на определение содержания диффузионного водорода взамен ГОСТ 23338.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Математическая модель диффузии водорода в образце формы параллелепипеда, учитывающая неодновременность наплавки, форму проплавления, выделение водорода через все поверхности образца, позволяющая минимизировать потери диффузионного водорода до начала его измерения.
2. Расчетная методика ускоренного определения содержания диффузионного водорода в наплавленном металле.
3. Результаты сравнения вакуумной и термокондуктометрической методик определения содержания диффузионного водорода.
4. Результаты анализа влияния размеров образца и времени от окончания наплавки до начала измерения на измеренный объем диффузионного водорода.

Апробация работы

Результаты работы были представлены научной общественности и обсуждались на следующих семинарах и конференциях:

1. Международная научно-техническая конференции «Сварочные материалы», ФГУП ЦНИИМ (г. Санкт-Петербург, 2009 г.).
2. 11-ая Международная научно-техническая конференция «Инженерия поверхности и реновация изделий» (г. Ялта, 2011 г.).
3. Международная конференция «Сварка и родственные технологии в современном судостроении, производстве морской техники и строительстве береговых объектов» (г. Санкт-Петербург, 2011 г.).
4. Научно-практическая конференция, посвященная 300-летию со дня рождения М.В. Ломоносова, «Севмашвтуз» (г. Северодвинск, 2011 г.).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 7 научных работах, из них 2 статьи в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ, один патент РФ на полезную модель.

Личный вклад автора. При выполнении работ по теме диссертации автором выполнен анализ проблемы, определена цель работы и осуществлена постановка задач исследования. Вклад автора заключается в применении математической модели для расчетов диффузии водорода из образца с наплавкой. Участие соавторов отражено в перечне публикаций, результаты совместных работ представлены в диссертации с согласия авторов. Автор самостоятельно планировал и проводил эксперименты, анализировал и излагал результаты. Автором был спроектирован и изготовлен опытный образец прибора для определения диффузионного водорода.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы и пяти приложений. Работа изложена на 203 машинописных листов, включая 32 рисунка, 21 таблицу и 100 наименований библиографических ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы исследований, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, показана научная новизна и практическая ценность, представлены основные положения работы, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены физические процессы обуславливающие проникновение водорода в металл: адсорбция молекул на поверхности металла, диссоциация молекул водорода на атомы, абсорбция атомов водорода поверхностным слоем. Описаны формы существования водорода в металле, приведено обоснование опасности отдельных форм.

Далее в работе приводится сравнение методик определения содержания диффузионного водорода, которое проводилось на основе литературных данных и собственных экспериментов. Приводятся корреляционные зависимости, позволяющие пересчитывать результаты измерений согласно стандартным методикам различных стран, таких как США – стандарт AWS A4.3 «Standard methods for determination of the diffusible hydrogen content of martensitic, bainitic, and ferritic steel weld metal produced by arc welding», Япония – стандарт JIS 3118 «Method for measurement of amount of hydrogen evolved from steel welds», Китай – стандарт GB-T 3965 «Method for determination of diffusible hydrogen in deposited metal», международный стандарт ISO 3690 «Welding and allied processes. Determination of hydrogen content in ferritic steel weld metal» и ГОСТ 23338 «Сварка металлов. Методы

определения содержания диффузионного водорода в наплавленном металле и металле шва».

Особое внимание было уделено международному стандарту ISO 3690:2000 и проекту стандарта на его основе Draft ISO 3690:2010, который должен будет вступить в силу в ближайшее время. Основываясь на литературных данных и собственных экспериментах, проведено сравнение вакуумной методики ГОСТ 23338-91 с ртутной методикой ISO 3690:2000 и с термокондуктометрической методикой Draft ISO 3690:2010. Сравнение показало сопоставимость измерений проводимых при помощи ртутной и вакуумной методик, что свидетельствует о высокой точности вакуумной методики, так как ртутная признана Международным институтом сварки эталонной. Сравнение термокондуктометрической и вакуумной методики показало более высокую точность вакуумной методики (рис. 1).

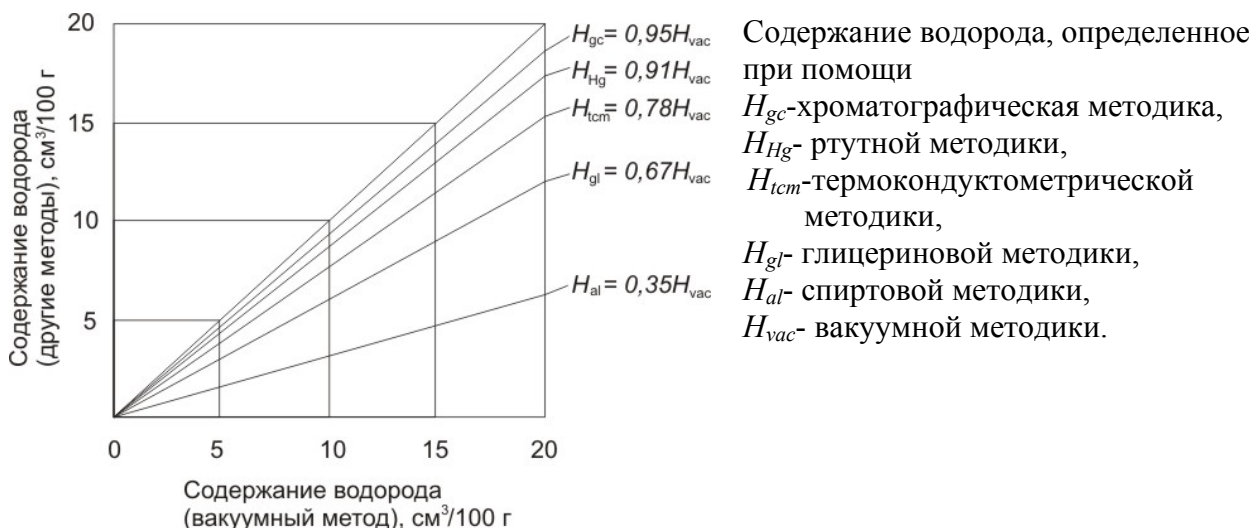


Рис. 1. Сравнение результатов определения содержания диффузионного водорода, полученных при помощи вакуумной и термокондуктометрической методик.

Следует отметить, что коэффициенты, приведенные на рис.1 справедливы лишь для тех условий, при которых они получены. На соотношения могут влиять чистота и количество запирающих жидкостей, размеры образцов, факторы внешних условий.

По результатам первой главы сформулированы цель работы и задачи исследования.

Во второй главе описана разработка математической модели диффузии водорода из образца с наплавкой. Модель образца представлена в виде правильного параллелепипеда, а расчетный шов имеет плоскую поверхность рис. 2. Высота расчетного шва в продольных сечениях равна высоте реального шва h . Площади поперечного сечения реального и расчетного

швов равны, площадь поперечного сечения расчетного шва представляется в виде набора M прямоугольников. Поверхность реального шва описывается параболой S . Наплавка производится короткими участками заданной длины l_k', l_k'' . K - общее количество участков. Водород вносится в тело через жидкий металл и мгновенно распределяется по длине наплавки. Концентрация водорода в образце до наплавки равна нулю. Коэффициент диффузии в горячем и холодном образце постоянны.

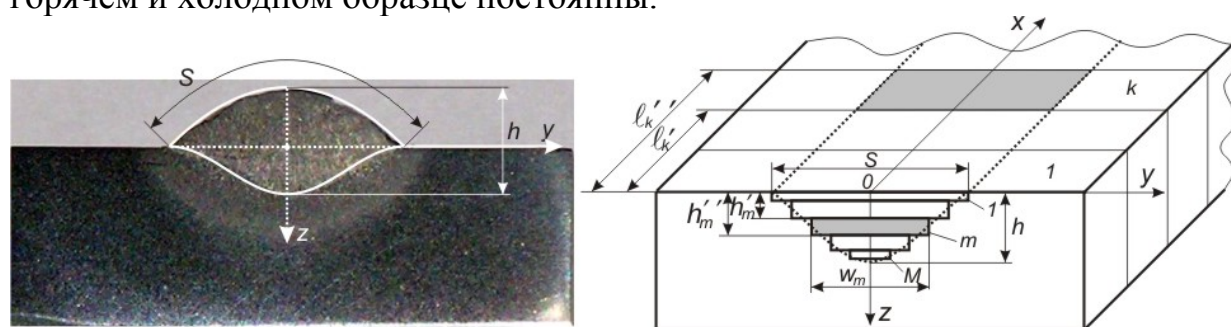


Рис. 2 Поперечное сечение реального образца и математическая модель образца. w_m, h_m', h_m'' – геометрические параметры слоев шва.

Для определения количества выделившегося водорода решались задачи массопереноса. Выделялись две задачи: прямая - по известным коэффициентам диффузии и концентрации водорода определялось количество водорода, выделившегося в различные моменты времени, обратная - коэффициенты диффузии и концентрация водорода в действительности неизвестны, но при условии, что известно количество водорода, выделившегося в определенный момент времени, коэффициенты диффузии и концентрацию можно найти.

Постановка прямой задачи:

1. Уравнение диффузии:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) + f(x, y, z, t),$$

где член f учитывает ввод водорода через жидкий металл шва.

2. Начальное условие ($t = 0$):

$$C(x, y, z, 0) = 0.$$

3. Граничные условия:

$$C(0, y, z, t) = C(L, y, z, t) = C(x, -W/2, z, t) = \\ = C(x, W/2, z, t) = C(x, y, 0, t) = C(x, y, H, t) = 0,$$

где C – концентрация водорода, x, y, z – координаты в декартовой системе, t – время, D – коэффициент диффузии, W, H, L – ширина, толщина, длина образца.

Решение прямой задачи:

$$C(x, y, z, t) = \frac{C_0}{8} \sum_{k=1}^K \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{r=-1,1} r \sum_{s=-1,1} s \Phi \left(\frac{x - E_{kirs}}{\sqrt{4D(t-t_k)}} \right) * \\ * \sum_{m=1}^M \sum_{i=-\infty}^{\infty} (-1)^{|i|} \sum_{r=-1,1} r \Phi \left(\frac{y - G_{mir}}{\sqrt{4D(t-t_k)}} \right) * \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{r=-1,1} r \sum_{s=-1,1} s \Phi \left(\frac{z - P_{mirs}}{\sqrt{4D(t-t_k)}} \right); \\ E_{kirs} = 2iL - (r+1)(l'_k + l''_k)/2 - (s+1)(l'_k - l''_k)/2 + l'_k; G_{mir} = iW - rw_m/2; \\ P_{mirs} = 2iH - (r+1)(h'_m + h''_m)/2 - (s+1)(h'_m - h''_m)/2 + h'_m,$$

где Φ – интеграл ошибок, t_k – момент выполнения k -ого участка шва. C_0 – начальная концентрация водорода в наплавленном металле, i, r, s – переменные суммирования.

Путем интегрирования можно определить количество выделившегося водорода в заданный момент.

Решение обратной задачи

Решение обратной задачи заключалось в оптимизации:

$F(C_0, D, D_h) = \sum_{n=1}^N [\Delta Q_n - \Delta Q(C_0, D, D_h, \Delta t_n)]^2 \rightarrow \min$, где Δt_n ($n = 1, \dots, N$) – время измерения, то есть моменты времени в которые известен объем выделившегося водорода ΔQ_n (рис. 3). Для определения минимума необходимо найти такие значения C_0 , коэффициента диффузии в холодном образце D и коэффициента диффузии в горячем образце D_h , которые соответствуют оптимальному положению расчетной кривой $Q(t)$ относительно экспериментальных точек.

При помощи расчетной модели были найдены оптимальные размеры образца, которые составляют длина: 30 мм, ширина 25 мм, толщина 8 мм. Критерием выбора оптимума были минимальные потери водорода до начала измерений – минимальное значение Q_0 (рис. 3), которые определялись при помощи разработанной модели. Далее на основе экспериментальных данных была подтверждена целесообразность применения размеров образцов, определенных при помощи расчета.

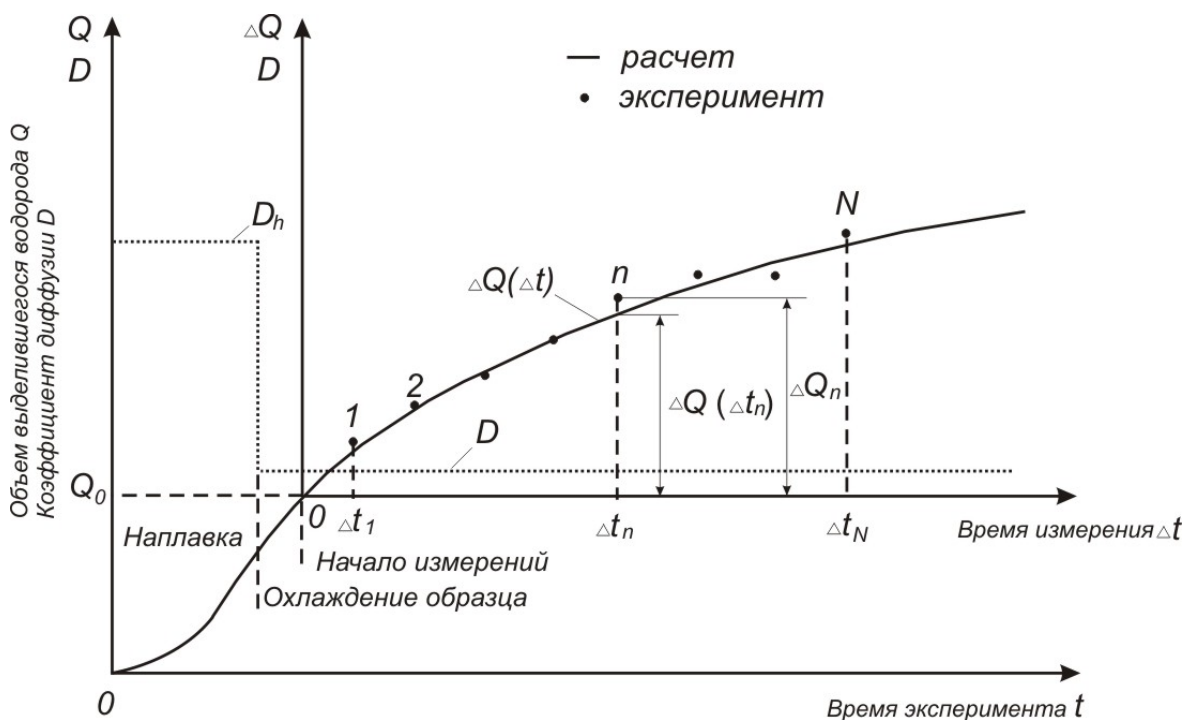


Рис. 3 Схема выделение водорода из образца

При помощи расчетной модели были определены потери водорода до начала измерений, которые в зависимости от времени проходящего от окончания сварки до начала измерений могут составлять до 30%. Данный факт был подтвержден проведенными экспериментами (рис.4), где за 100% принят объем водорода выделившегося после окончания наплавки.

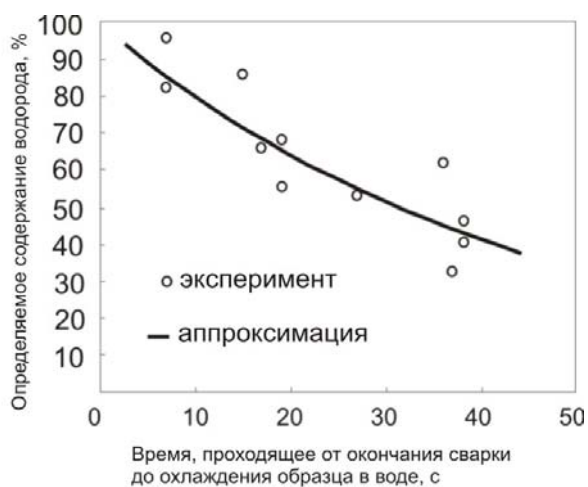


Рис. 4 Определяемое содержание водорода в зависимости от времени, проходящего от окончания сварки до охлаждения образца в воде.

На основе математической модели создана расчетная методика ускоренного определения содержания диффузионного водорода, которая заключается в расчетном определении параметров диффузии водорода по первым 14-24 часам выделения водорода, и расчете окончательного содержания диффузионного водорода по этим параметрам диффузии (рис. 5).

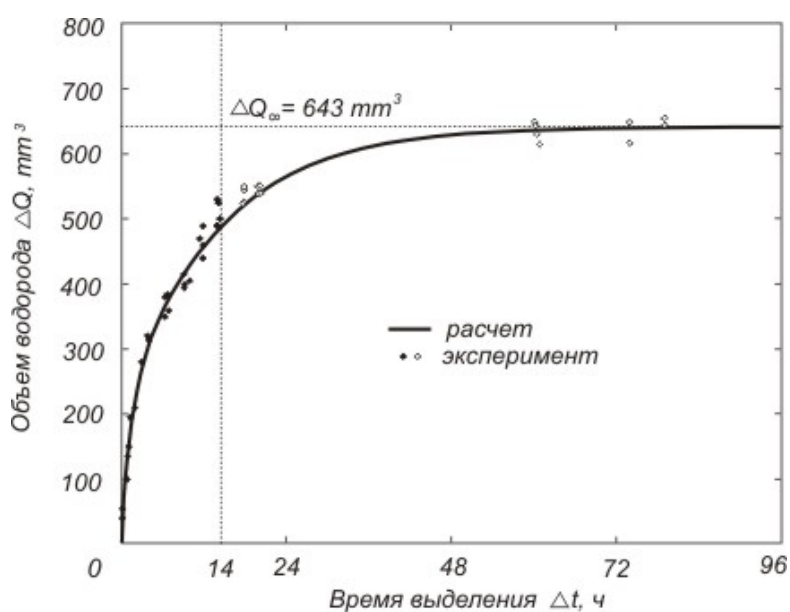


Рис. 5. Кривая выделения водорода.

В третьей главе рассмотрено влияние химического состава стали, из которой изготовлен образец на выделение водорода. Экспериментально определено, что химический состав стали не имеет заметного влияния на выделение водорода, так как практически весь водород выделяется через поверхность наплавки.

Рассмотрено влияние свойств сварочных материалов на содержание диффузионного водорода в наплавленном металле. Экспериментально показано, что для электродов с рутиловым покрытием высокая влажность воздуха при проведении сварки может значительно увеличить содержание водорода в наплавленном металле (рис. 6).

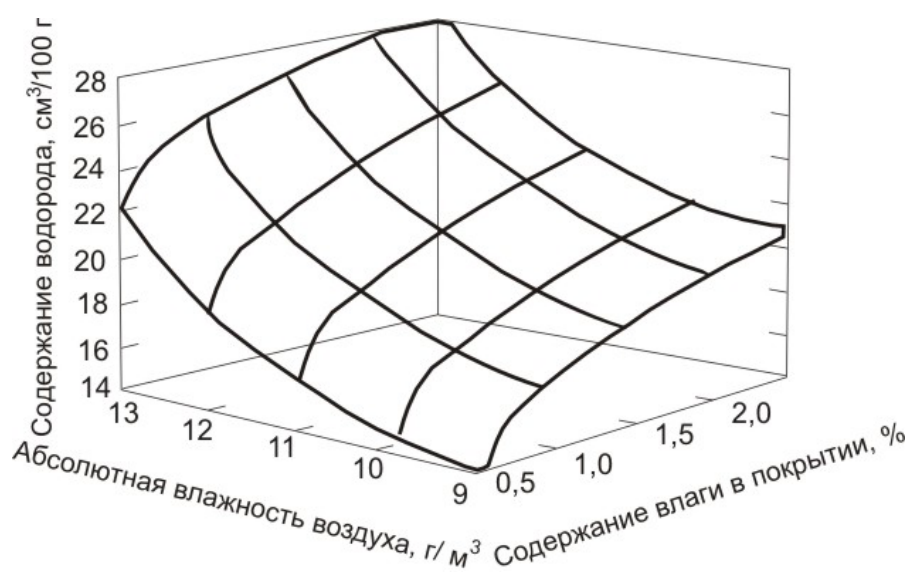


Рис. 6. Содержание водорода в зависимости от содержания влаги в покрытии при различной абсолютной влажности воздуха.

Экспериментальное определение влияния режима сварки на содержание диффузионного водорода для электродов с основным типом покрытия показало, что при совместном изменении силы сварочного тока, скорости сварки и напряжения дуги, наиболее важную роль имеет напряжение дуги, изменения которого наиболее сильно отражаются на содержании диффузионного водорода в наплавленном металле. При увеличении напряжения от 21 В до 27 В происходит увеличение содержания диффузионного водорода на $1,6 \text{ см}^3/100 \text{ г}$, тогда как увеличение сварочного тока от 150 А до 240 А приводит к уменьшению содержания диффузионного водорода на $0,6 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ (рис. 7).

Обоснована технология подготовки образца к измерению содержания водорода. В качестве средства первичной очистки образца от шлака следует применять механические щетки с волокном из синтетических материалов. Промывку образца перед помещением в вакуумную камеру следует проводить в ацетоне.

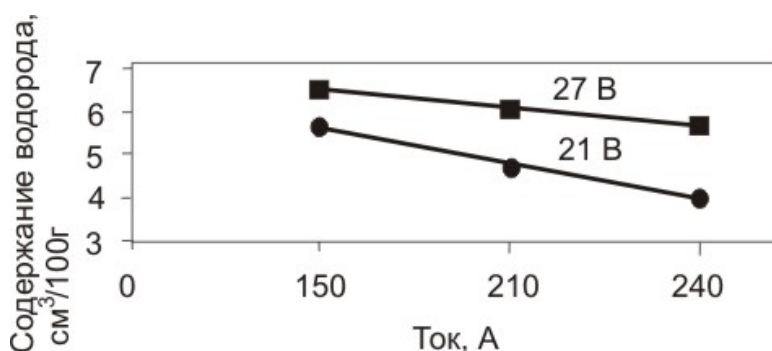


Рис. 7. Содержание водорода в зависимости от тока и напряжения при сварке.

В четвертой главе описана разработка прибора определения содержания диффузионного водорода. Описан принцип работы разрабатываемого прибора, отражена его блок-схема. На основе литературных данных обосновано применение нержавеющей стали в качестве конструкционного материала для изготовления деталей и узлов проектируемого прибора.

Исходя из возможных потерь водорода на взаимодействие с кислородом, рассчитана глубина откачки вакуумной камеры. Для снижения потерь водорода на взаимодействие с кислородом до 0,5% от общего выделившегося водорода необходимая глубина откачки составляет 0,03 мм.рт.ст.

Для измерения давления в разрабатываемом приборе было решено использовать терморезисторный датчик давления. Так как теплопроводность водорода при комнатной температуре в несколько раз превышает теплопроводность воздуха, то использование датчика давления, измерения

которого основываются на определении теплопроводности, позволяет иметь селективность по отношению к водороду.

Тарировка датчиков давления по давлению водорода показала, что погрешность измерений составляет 7,5% для сварочных материалов с содержанием менее 9 см³/100 г. Стандартная установка при определении того же содержания водорода имеет погрешность 11%. Для значений содержания водорода от 9 до 30 см³/100 г точность разработанного прибора – 1,8 %, стандартной установки – 3,3%. Внешний вид прибора показан на рис. 8.

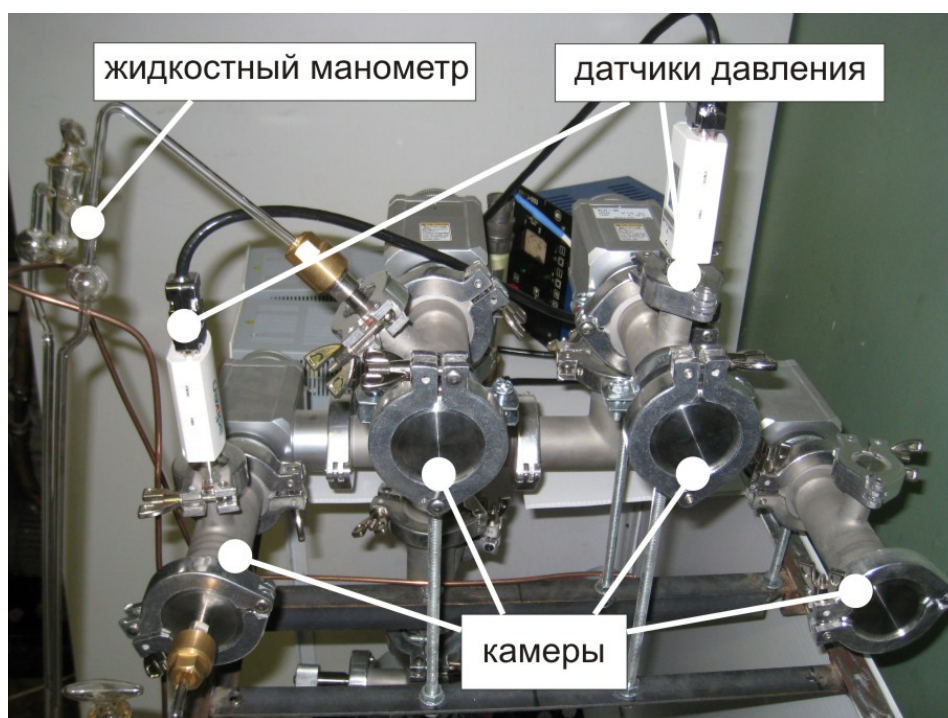


Рис.8 Прибор для определения диффузионного водорода в наплавленном металле.

В пятой главе приведены результаты внедрения результатов исследований. На предприятии ОАО «Центр Технологий Судостроения и Судоремонта» было проведено сравнение содержания диффузионного водорода определенного при помощи вакуумной и спиртовой методики. Было получено соотношение: $H_{vac} = 2,37 \cdot H_{al}$, где H_{vac} – содержание водорода, полученное при помощи вакуумной методики, H_{al} – содержание водорода, полученное при помощи спиртовой методики.

Создана автоматизированная методика расчетного ускоренного определения содержания диффузионного водорода и внедрена на ООО «Региональный Северо-Западный Межотраслевой Аттестационный Центр». Для автоматизации методики терморезисторный датчик был подключен к

компьютеру и в режиме реального времени данные с датчика обрабатывались с помощью разработанной программы. По результатам измерения за заданный промежуток времени определялось содержание водорода на момент истечения пяти суток.

По результатам поведенной работы предложен проект стандарта на определение содержания диффузионного водорода в наплавленном металле.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Создана математическая модель диффузии водорода в образце формы параллелепипеда, учитывающая неодновременность наплавки, форму проплавления, выделение водорода через все поверхности образца. И позволяющая рассматривать поле концентрации, объем оставшегося и выделившегося водорода в любой момент времени, мгновенные потоки водорода через поверхность образца.
2. Создана автоматизированная методика ускоренного определения содержания диффузионного водорода в наплавленном металле, которая на основе решения обратной задачи массопереноса позволяет рассчитывать конечный объем выделившегося водорода по результатам измерения на начальном этапе его измерения. Разработанная методика позволяет сократить время измерений в 3-5 раз по сравнению с существующей методикой.
3. Создан прибор для определения содержания диффузионного водорода в наплавленном металле с погрешностью измерения в 1,5 раза ниже, чем при использовании прибора согласно существующему ГОСТ 23338 (Патент ПМ 82036). При помощи созданного прибора возможно проведение классификационных испытаний по ГОСТ Р ИСО 2560.
4. Сравнение вакуумной методики (ГОСТ 23338) и термокондуктометрической методики (Draft ISO 3690) показало, что точность вакуумной методики выше на 28%.
5. Анализ влияния размеров образца и времени от окончания наплавки до начала измерения на измеренный объем диффузионного водорода показал, что при задержках потери могут составлять до 30% от измеряемого объема водорода. Так за 5 с, проходящих после окончания наплавки до охлаждения образца, потери измеренного объема водорода могут составлять 10%.
6. Предложен оптимальный размер образца для определения содержания диффузионного водорода 30*25*8 мм.
7. Анализ влияния силы тока, скорости наплавки и напряжения дуги на содержание диффузионного водорода показал, что наиболее сильное влияние оказывает напряжение дуги. Так при росте напряжения от 21

В до 27 В содержания диффузионного водорода увеличивается на 35% при использовании электродов с основным видом покрытия.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. **Панченко О.В. Сравнение методов определения диффузионного водорода// Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2011, № 3 (130), с. 162-167.**
2. **Панченко О.В. К вопросу о методах определения диффузионного водорода// Известия вузов. Машиностроение, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, № 9, с. 57-61.**
3. Панченко О.В., Левченко А.М., Кархин В.А. Методика определения диффузионного водорода при сварке покрытыми электродами// Сборник материалов международной научно-технической конференции «Сварочные материалы», СПбГПУ, Санкт-Петербург, 18-22 мая 2009, с. 50-54.
4. Панченко О.В. К вопросу об определении диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле// Сборник материалов 11-й международной научно-технической конференции «Инженерия поверхности и реновация изделий», Ассоциация технологов-машиностроителей Украины, Крым г. Ялта, 23-27 мая, 2011.
5. Панченко О.В., Левченко А.М. Создание прибора определения диффузионного водорода в наплавленном металле// Сборник тезисов международной конференции «Сварка и родственные технологии в современном судостроении, производстве морской техники и строительстве береговых объектов», Альянс сварщиков Санкт-Петербурга и Северо-западного региона, Санкт-Петербург, 20-23 сентября, с. 9.
6. Панченко О.В., Жабрев Л.А., Веретенников М.М. О методах определения диффузионного водорода// Мир сварки, 2011, № 3-4/18-10, с. 14-17.
7. Пат. ПМ 82036 РФ, МПК: G01F / Устройство для определения диффузионного водорода/ Левченко А.М., Кархин В.А., Панченко О.В. Патент - № 2008131019/22; Заявл. 28.07.2008; Оpubл. 10.04.2009; Бюл. № 10 – 3 с.