

Розанов Дмитрий Сергеевич

**Разработка методики расчета процесса перераспределения и десорбции
диффузионного водорода в многослойных сварных соединениях
низколегированных сталей**

Специальность 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана

Научный руководитель:

У1973810
Розанов Д.С.
Разработка методики расчета

Официя

1973810

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

Ведущие

Защита
Совета
им. Н.Э
105005,

ного
итете

Ваш от:
высыла:

ЮСИМ

С диссе

Телефон для справок: (499) 267-09-63

Автореферат разослан « ____ » _____ 2011 года.

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1973810

Розанов Д.С. Разработка мет

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент

Коновалов А.В.

Актуальность работы. Для изготовления ответственных сварных конструкций в настоящее время применяются высокопрочные низколегированные стали (НЛС). При производстве из них сварных конструкций наиболее частым дефектом являются холодные трещины в сварных соединениях. Одним из основных факторов, обуславливающих образование холодных трещин, является диффузионный водород, которым насыщается металл сварного соединения. Образование холодных трещин является проявлением «водородной хрупкости» металла. Наиболее известным и эффективным способом предотвращения водородной хрупкости металла при сварке является дополнительный подогрев для поддержания в сварном соединении повышенной температуры до момента снижения в нем максимальной концентрации водорода ниже критического уровня. Однако в настоящее время не имеется достаточно надёжных данных о распределении и кинетике десорбции диффузионного водорода в сварных соединениях. Это приводит к чрезмерной температуре и времени выдержки при послесварочном нагреве, что вызывает неоправданно большие энергозатраты.

Сложность или невозможность экспериментального определения кинетики перераспределения и десорбции водорода в сварных соединениях обуславливает необходимость расчета параметров процесса диффузии водорода в сварном соединении путем компьютерного моделирования процессов диффузии и десорбции водорода в условиях изменяющихся температур и структурного состояния металла при сварке.

Цель работы. Обеспечение стойкости многослойных сварных соединений из НЛС образованию холодных трещин путем разработки научно - обоснованных режимов сопутствующего подогрева и послесварочного нагрева.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) выполнить анализ методов оценки концентрации диффузионного водорода в сварном соединении и влияния диффузионного водорода в сварном соединении НЛС на склонность к образованию холодных трещин;

2) разработать методику расчетной оценки концентрации диффузионного водорода в многослойных сварных соединениях из НЛС с учетом зависимости растворимости и коэффициента диффузии водорода от температуры и фазового состава структуры.

3) реализовать методику в виде модуля решения диффузионной задачи в составе научно-исследовательского программного комплекса (НИПК) «Сварка», разработанного в МГТУ им. Н.Э.Баумана;

4) провести верификацию результатов решения диффузионной задачи, полученных с помощью НИПК «Сварка», по имеющимся экспериментальным данным;

5) определить температурный и концентрационный критерии содержания водорода для выбора режимов послесварочного нагрева, исключающего холодные трещины;

6) выполнить расчет параметров процесса перераспределения и десорбции диффузионного водорода в многослойных сварных соединениях на примере сварки кольцевого соединения корпуса атомного реактора ВВЭР-1000 по

типовой технологии и сформулировать предложения по рационализации режима послесварочного нагрева.

Методы исследования. Для решения температурной и диффузионной задач использован НИПК «Сварка». В основе программного комплекса заложен численный метод конечных элементов для моделирования физических процессов при сварке.

Научная новизна. Разработан методический подход и алгоритм расчета методом конечных элементов процессов диффузии и десорбции водорода при многослойной сварке в условиях многократных нагрева, охлаждения и изменений фазового состава структуры с учетом зависимости диффузионных свойств металла от температуры и структурного состояния металла.

На основе анализа теоретических представлений о физической природе водородной хрупкости металлов и результатов испытаний наводороженных образцов НЛС на замедленное разрушение предложены критерии выбора рациональных режимов послесварочного нагрева многослойных сварных соединений НЛС:

- температурный: температура нагрева не ниже 200 °С;
- концентрационный: концентрация диффузионного водорода не выше $1\text{ см}^3/100\text{ г}$ ме в металле околосварной зоны сварного соединения.

Практическая ценность. Разработан модуль расчёта процессов перераспределения и десорбции водорода в составе НИПК «Сварка», позволяющий в каждый момент времени определять концентрацию диффузионного водорода в любой зоне многослойного сварного соединения. НИПК с добавленным модулем позволяет определить параметры режима послесварочного нагрева для снижения концентрации диффузионного водорода ниже критической с целью предотвращения образования холодных трещин.

В результате численного анализа процесса перераспределения диффузионно-подвижного водорода в процессе сварки и послесварочного нагрева корпуса атомного реактора ВВЭР-1000 выявлено превышение необходимых температуры и продолжительности послесварочного нагрева в существующей технологии сварки. Рассчитаны минимально необходимые значения температуры и продолжительности послесварочного нагрева, которые позволят обеспечить снижение концентрации диффузионно-подвижного водорода до безопасного уровня при значительном сокращении энергозатрат.

Достоверность. Достоверность результатов расчетов подтверждается их согласованием с экспериментальными результатами.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на Всероссийских научно – технических конференциях «Сварка на рубеже веков», (2003, г. Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана), «Технология, оборудование и подготовка кадров в сварочном производстве» (2003, г. Москва, «МАТИ» – РГТУ им. К.Э.Циолковского), Сварка и контроль – 2004 (2004, г. Пермь, ПГТУ), «Будущее машиностроения России» (2008, г.Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана), «Машиностроительные технологии» (2008, г. Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана).

Публикации. Основное содержание и результаты диссертационной работы изложены в 3 - х статьях, тезисах 8-ми докладов на конференциях и 1 отчёте по НИР.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы (91 наименование). Изложена на 120 страницах машинописного текста, содержит 45 рисунков и 12 таблиц.

Глава 1. Проведён литературный обзор причин образования холодных трещин при сварке, роли структуры и водорода в их образовании, механизма водородной хрупкости стали. Рассмотрены источники насыщения водородом швов при сварке. Дан анализ существующих методов определения концентрации диффузионного водорода в сварных соединениях. Рассмотрены работы отечественных и зарубежных учёных, в которых исследовались причины образования холодных трещин и роли водорода в их образовании, в частности работы Н.Н. Прохорова, Г.Л. Петрова, В.В. Фролова, И.К. Походни, В.А. Кархина, Э.Л. Макарова, В.Г. Фёдорова, Р.А. Козлова, Б.С. Касаткина, А.В. Коновалова, Хансена, Коттрелла, Гривняка, Говарда, Гранжона, Сузуки, Такахаша, Инагаки, Т. Болингауса, Н.Вотанабе и др.

Согласно современным представлениям, склонность к образованию холодных трещин определяется структурным и водородным факторами, а также уровнем сварочных напряжений. Наибольшее количество работ в области холодных трещин посвящено определению структуры шва и околошовной зоны и сварочным напряжениям, в то время как водородному фактору уделено сравнительно мало внимания.

Изначально наиболее значимым фактором для образования холодных трещин при сварке сталей мартенситного и мартенситно-бейнитного классов считался структурный фактор. Это обусловило появление термина «закалочные трещины». Данной теории придерживались А.М.Макара и др. Для современных низколегированных сталей, в зоне термического влияния которых типична структура бейнитно-мартенситного и бейнитного типов, наиболее значимым фактором для образования холодных трещин считается диффузионный водород, что обусловило появление термина «водородные холодные трещины (Hydrogen Assisted Cold Cracking)», которого в настоящее время придерживаются большинство зарубежных ученых, в частности Т.Болингаус, Н.Вотанабе и др.

Представляется более правильным, что склонность сталей к образованию холодных трещин в околошовной зоне определяется критическим сочетанием структурного и водородного факторов в зависимости от химического состава стали (рис. 1). Критическая поверхность C-S-H₂ соответствует уровню сварочных напряжений, который может быть представлен безразмерным параметром $\sigma^* = \sigma_{св} / \sigma_{0.2}$ - отношением действующих напряжений к пределу текучести.

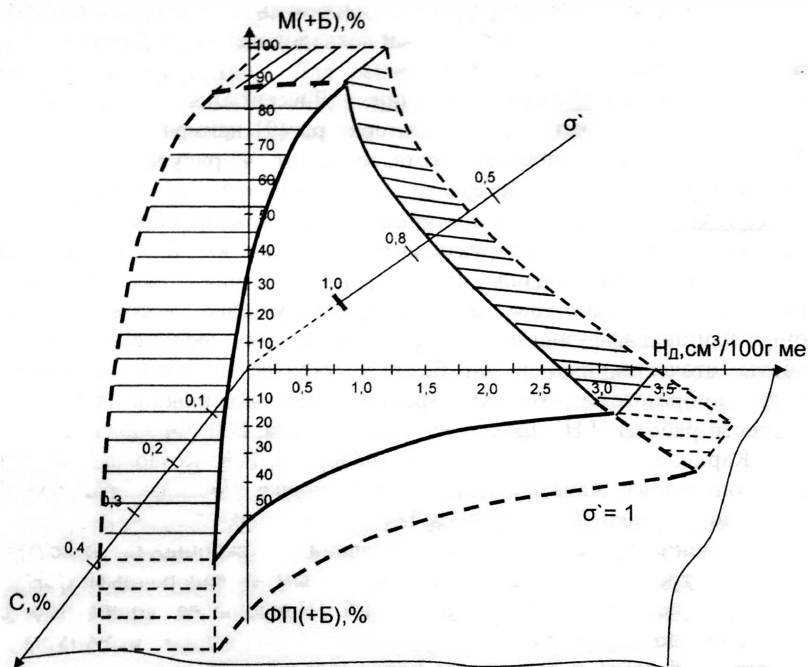


Рис. 1. Критическое сочетание факторов, обуславливающих потенциальную склонность стали к образованию холодных трещин при сварке. (по данным Э.Л.Макарова).

В настоящее время оценка насыщения сварных соединений водородом проводится на основе данных только об исходном содержании диффузионного водорода, вводимого в сварной шов при сварке. Известно ограниченное количество тестовых экспериментальных исследований концентрации диффузионного водорода в металле шва и его перераспределения с течением времени после окончания сварки. Широко применяемых экспериментальных методов в исследовательской практике в настоящее время нет. Однако полученные единичные экспериментальные результаты могут служить для верификации (оценки достоверности) расчетных результатов.

В настоящее время практически отсутствуют данные о критической концентрации диффузионного водорода в ОШЗ, при которых происходит образование холодных трещин.

Анализ различных методов расчета процессов диффузии и десорбции водорода показывает, что метод конечных элементов является наиболее эффективным для моделирования этих процессов в многослойном сварном соединении.

Глава 2. В этой главе представлена разработанная методология расчёта перераспределения водорода при многослойной сварке.

В основе моделирования процесса диффузии при сварке лежит дифференциальное уравнение второго закона Фика, описывающее неизотермическую диффузию водорода с учетом термодиффузионных потоков.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \cdot k \cdot \frac{\partial \Pi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \cdot k \cdot \frac{\partial \Pi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D \cdot k \cdot \frac{\partial \Pi}{\partial z} \right), \quad (2.1)$$

где C – концентрация диффузионного водорода [$\text{см}^3/100 \text{ г ме}$]; D – коэффициент диффузии [$\text{см}^2/\text{с}$]; k – растворимость водорода в металле [$\text{см}^3/100 \text{ г ме}$], $\Pi = C/k$ – водородный потенциал. Характеристики материала D и k являются функциями его состава, структуры и температуры, поэтому уравнение (2.1) нелинейно.

Аналитическое решение уравнения второго закона Фика в нелинейной постановке является чрезвычайно трудной задачей, а в ряде случаев при расчете сложных крупногабаритных конструкций аналитическое решение является практически невозможным. По этой причине возникла необходимость разработки алгоритма численного решения уравнения диффузии. Численное решение уравнения диффузии проводится методом конечных элементов (МКЭ) совместно с решением температурной задачи и задачи о структурных превращениях в материале. Разработанная методика позволяет определять концентрацию диффузионного водорода в каждой точке многослойного сварного соединения из углеродистых и низколегированных сталей в любой момент времени в течение всего процесса сварки (включая сопутствующий подогрев и послесварочный нагрев). Решение основано на анализе кинетики перераспределения диффузионного водорода в металле сварного соединения, в объёме основного металла с учетом десорбции водорода с поверхности сварного соединения.

Основные положения, используемые при расчётах процессов диффузии.

1. Применяется схема дискретизации тела в виде сочетания водородосодержащих масс - центров конечных элементов (КЭ), и водородопроводящих стержней (границ КЭ) (рис. 2).
2. Каждому КЭ соответствует свой материал с собственным комплексом диффузионных свойств.
3. Состояние каждого КЭ характеризуется концентрацией водорода, температурой и соотношением структурных компонентов материала. Для расчета необходимо задать начальное распределение диффузионного водорода во всех КЭ.
4. Масса водорода, переходящая через границу с обеих сторон, одинакова, т.е. модель является консервативной (выполняется закон сохранения массы водорода).
5. Для расчета процессов диффузии водорода в сварном соединении требуется предварительно определить температурное поле.



Рис. 2. Взаимодействие между элементами и диффузия водорода через границу элементов.

Для практической реализации разработанной методики численного решения в виде модуля расчетов процессов диффузии и десорбции водорода используются следующие уравнения.

Масса диффундировавшего через границу КЭ водорода за промежуток времени Δt определяется уравнением

$$\Delta m = -D \cdot k \cdot \frac{\partial \Pi}{\partial x} \cdot S \cdot \Delta t, \quad (2.2)$$

где S – площадь границы.

Уравнение баланса массы водорода на границе двух элементов:

$$\Delta m_{12} = \Delta m_{21}, \quad (2.3)$$

где из (2.2) $\Delta m_{12} = -D_1 \cdot k_1 \frac{\Pi_1 - \Pi^*}{l} S \cdot \Delta t$, $\Delta m_{21} = -D_2 \cdot k_2 \frac{\Pi^* - \Pi_2}{l} S \cdot \Delta t$.

Из решения уравнения (2.3) определяется Π^* - значение потенциала границы между конечными элементами, через которую проходит поток диффузии водорода.

$$\Pi^* = \frac{\Pi_1 \cdot D_1 \cdot k_1 + \Pi_2 \cdot D_2 \cdot k_2}{D_2 \cdot k_2 + D_1 \cdot k_1}. \quad (2.4)$$

При этом граница рассматривается как звено, участвующее в процессе диффузии, которое на каждом шаге решения принимает от одного элемента и отдает в другой элемент равные объемы водорода. Сетка элементов построена так, что граница равноудалена от центров элементов (сетка Вороного).

С учетом (2.4), масса диффундировавшего через границу КЭ водорода за единичный отрезок времени определяется уравнением:

$$\Delta m_{12} = \Delta m_{21} = \frac{D_1 \cdot D_2 \cdot k_1 \cdot k_2}{D_1 \cdot k_1 + D_2 \cdot k_2} \cdot \frac{\Pi_1 - \Pi_2}{l} \cdot S \cdot \Delta t. \quad (2.5)$$

В значениях концентрации уравнение будет иметь следующий вид:

$$\Delta m_{12} = \Delta m_{21} = \frac{D_1 \cdot D_2 \cdot k_1 \cdot k_2}{D_1 \cdot k_1 \cdot l + D_2 \cdot k_2 \cdot l} \cdot \left(\frac{C_1}{k_1} - \frac{C_2}{k_2} \right) S \cdot \Delta t. \quad (2.6)$$

Расчет приращения концентрации в элементе от диффузии через одну границу Δc производится по массе диффундировавшего через границу водорода и объему элемента $V_{\text{эле}}$

$$\Delta c = \frac{D_1 \cdot D_2 (C_2 k_1 - C_1 k_2)}{(D_1 \cdot k_1 + D_2 \cdot k_2) \cdot l \cdot S \cdot \Delta t \cdot \rho_H \cdot \rho_{\text{мет}} \cdot V_{\text{эле}}}, \quad (2.7)$$

где ρ_H - плотность водорода, $\rho_{\text{мет}}$ - плотность металла.

После определения приращения концентрации за счет диффузии через границы двух элементов производится аналогичный расчет (по уравнениям (2.1 - 2.7) для всех остальных КЭ. После того, как проведён расчёт для всех КЭ на текущем шаге решения, производится определение новых значений концентрации водорода в КЭ путем суммирования исходной концентрации и приращений концентрации от диффузии через каждую границу (n – количество границ в элементе)

$$c_{\text{нов}} = c_{\text{исх}} + \sum_{i=1}^n \Delta c_i. \quad (2.8)$$

На следующих шагах по времени ($i \dots i+n$) повторяются решения уравнений 2.1-2.8, определяются новые приращения концентрации диффузионного водорода (Δc , см³/100 г ме) в каждом элементе и новые концентрации (рис. 3).

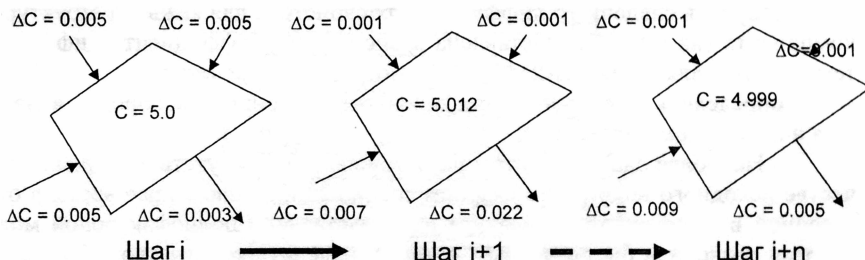


Рис. 3 Изменение концентрации диффузионного водорода в элементе на каждом шаге решения

Граничные условия для диффузионной задачи аналогичны граничным условиям для температурной задачи.

Принимается граничное условие первого рода, определяющее закон изменения концентрации водорода в точках на поверхности сварного соединения.

Частным случаем этого условия является нулевая концентрация водорода на поверхности соединения, когда принимается, что водород, пришедший в граничные элементы соединения, мгновенно десорбируется из них.

В НИПК «Сварка» все свободные поверхности принимаются границами 1-го рода с постоянной нулевой концентрацией диффузионного водорода, что обеспечивает его удаление из изделия.

Глава 3. В главе 3 описывается модуль расчета процессов диффузии и десорбции водорода в НИПК «Сварка» (рис. 5).

В МГТУ им. Н.Э.Баумана разработан НИПК «Сварка». Однако в нем отсутствует модуль анализа диффузионного перераспределения водорода по сварному соединению, что ограничивает его возможности для анализа свариваемости низколегированных сталей. Этот модуль был разработан в результате выполненной диссертационной работы и добавлен в НИПК «Сварка».

При решении диффузионной задачи учитывалось наличие в сварном соединении зон с различными теплофизическими и диффузионными свойствами. При расчете НДС используется сетка из квадратичных 8-узловых конечных элементов. Для решения тепловой и диффузионных задач используется специализированная сетка, которая строится автоматически на базе сетки для расчета НДС. Элементы этой сетки, обеспечивающей максимальную точность для задачи теплопереноса, имеют вид ячеек Вороного. Граница двух смежных ячеек перпендикулярна к отрезку, соединяющему центры ячеек и делит этот отрезок пополам. Общими у двух построенных сеток КЭ являются точки в центрах квадратичных элементов и точки в узлах на контуре модели. Эти точки совпадают с центрами ячеек Вороного.

Для расчета концентрации диффузионного водорода во всех точках сварного соединения в каждый момент времени, необходимо:

- предварительно решить методом конечных элементов температурную задачу, в результате которой рассчитываются температурные поля во все моменты времени и структурный состав материала;
- получить сведения о диффузионных свойствах для каждого структурного компонента (на рис. 4 представлена зависимость коэффициента диффузии от температуры для стали 15Х2МФА, рассмотренной в расчетах);
- определить количество исходного диффузионного водорода в металле шва и в основном металле.

Наиболее слабым местом расчетов является отсутствие данных о количестве исходного водорода в сварном соединении. В настоящее время в отечественной и зарубежной литературе не представлено полнофакторной модели, которая позволила бы расчетным путем определить количество исходного водорода в сварном соединении с учетом всех возможных путей проникновения водорода в сварное соединение. В данной работе используются статистические данные, полученные экспериментальными методами (хроматографическим, вакуумным).

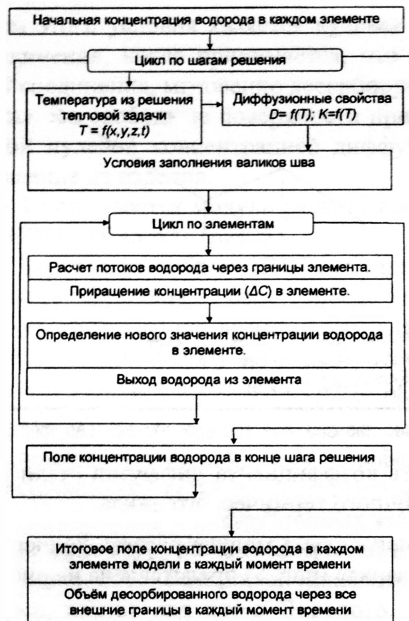


Рис. 6. Блок - схема модуля расчёта концентрации диффузионного водорода НИПК «Сварка»

Выполнено сопоставление полученных с помощью разработанной программы расчётных результатов с экспериментальными данными, полученными из литературных источников, в частности, с экспериментальными данными Е. Такахаши о распределении водорода вдоль вертикальной оси многослойного шва (рис.7), а также с экспериментальными данными, полученными в лаборатории «Свариваемость» Э.Л.Макаровым и Н.И.Егоровым (рис. 8).



Рис.7. Сравнение экспериментальных данных Е.Takahashi и результатов расчёта. Точками обозначены экспериментальные данные, линией – расчётные

Экспериментальные данные Е. Такахаши получены для шва, сваренного в щелевую разделку, экспериментальные данные Э.Л.Макарова и Н.И.Егорова получены для шва, сваренного в Х – образную разделку.

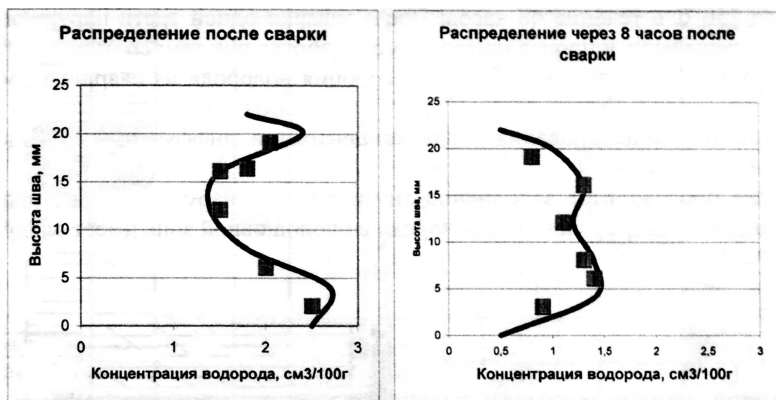


Рис.8. Сравнение экспериментальных данных Э.Л. Макарова и Н.И.Егорова и результатов расчета. Точками обозначены экспериментальные данные, линией – расчётные

На основании сопоставления сделан вывод о том, что программа позволяет получать достоверные расчётные результаты, и может быть рекомендована для практического применения.

Глава 4. Представлены проведённые расчёты по оценке влияния различных технологических параметров на процесс перераспределения и десорбции диффузионного водорода. Показано влияние на концентрацию диффузионного водорода начальной концентрации диффузионного водорода и влияние режимов термообработки на скорость выхода водорода из сварных соединений больших толщин (до 240 мм). С помощью программного комплекса «Сварка» проведен анализ технологии сварки корпусов реакторов типа ВВЭР-1000.

Диаметр свариваемых обечаек корпуса равен 5000 мм, толщина 235 мм.

Химический состав основного металла (сталь 15Х2МФА):

C = 0.17%; Si = 0.25 %; Mn = 0.52 %; Cr = 1.8 %; Ni = 0.25; Mo = 0.68 %; W = 0; V = 0.31 %; S = 0.015 %; P = 0.011 %.

Исходное состояние основного металла – закалка + высокий отпуск. Содержание остаточного металлургического водорода – $2 \text{ см}^3/100 \text{ г ме}$.

Сварка ведётся одновременно двумя автоматами под слоем флюса по внутренней и внешней разделкам. Разделка щелевая, ширина разделки 36 мм. Параметры режима сварки: сварочный ток 800 А, напряжение 40 В, скорость сварки 18 м/ч, диаметр сварочной проволоки 5 мм, исходное содержание диффузионного водорода в шве $5 \text{ см}^3/100 \text{ г ме}$, погонная энергия 57600 Дж/см.

Химический состав сварочной проволоки (Св-08ХМ): C=0.1 %; Si=0.3 %; Mn=0.6 %; Cr=1.2 %; Ni=0.25 %; Mo=0.6 %; S=0.015 %; P=0.011 %; Al=0.02 %.

Параметры подогрева при сварке и послесварочного нагрева: предварительный подогрев до 250°C, сопутствующий подогрев 200 °С, послесварочный нагрев до 250°C в течение 48 часов. После заварки одной трети наружного шва сварку прерывают, и производится термообработка при температуре 650 °С.

При термообработке происходит десорбция водорода из сварного соединения.

Результаты моделирования (поле концентрации диффузионного водорода) представлены на рис. 9.

Затем производится заполнение внутреннего и наружного шва, при этом распределение диффузионного водорода в околошовной зоне имеет следующий вид (рис. 10).

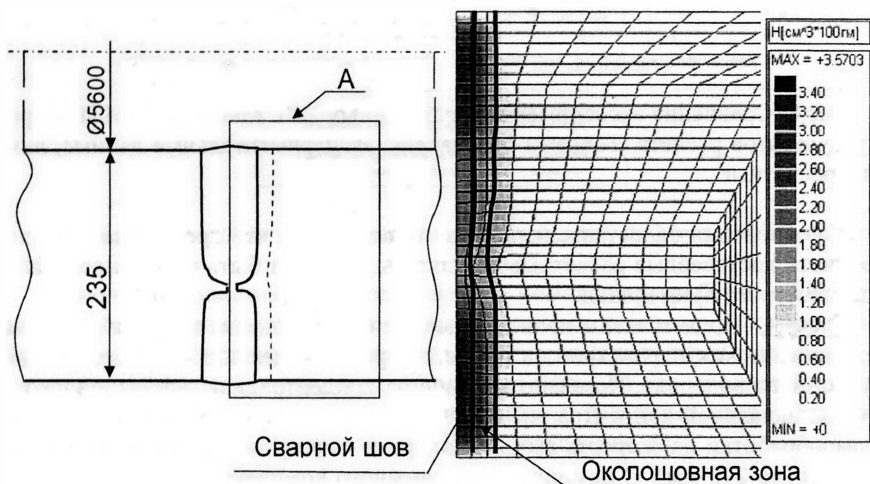


Рис.9. Результаты моделирования диффузии водорода в НИПК «Сварка». Распределение концентрации водорода в сечении после сварки

После сварки, послесварочного нагрева и термообработки производится антикоррозионная аустенитная наплавка на внутреннюю поверхность обечайки. Применяется автоматическая наплавка ленточным электродом (07Х25Н13). Показано, что после аустенитной наплавки в поднаплавочном слое металла наблюдается повышенная концентрация диффузионного водорода (до 2.5 см³/100 г ме) вследствие задержки десорбции водорода с поверхности аустенитного слоя. В результате последующей термообработки и перераспределения водорода в основной металл его концентрация в поднаплавочном слое снижается до значений менее 1 см³/100 г ме.

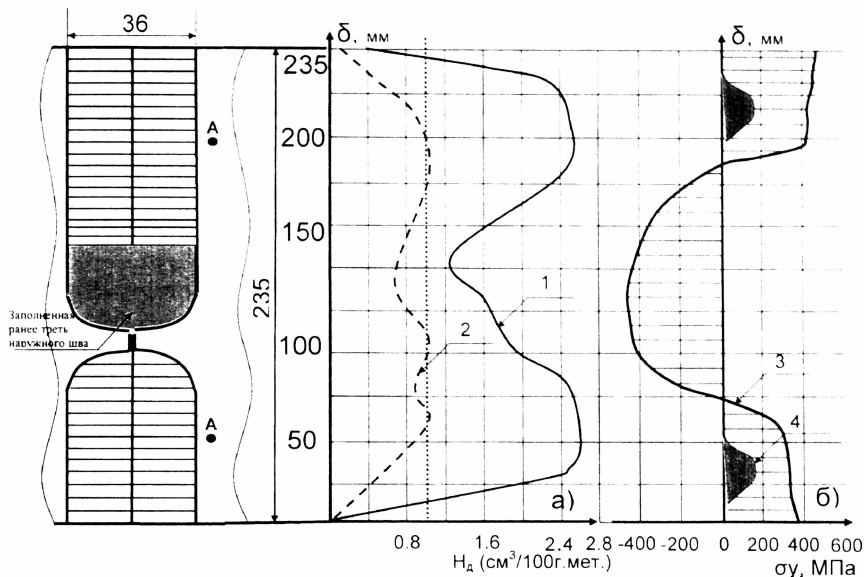


Рис.10. Распределение диффузионного водорода в ОШЗ после сварки и послесварочного нагрева, распределение остаточных сварочных напряжений. 1 – концентрация водорода после сварки, 2 – концентрация водорода после послесварочного нагрева, 3 – остаточные сварочные напряжения, 4 – вероятность образования холодных трещин (25%).

На рис.10 представлены эпюры распределения диффузионного водорода по толщине обечайки после окончания сварки (сплошная линия) и после завершения послесварочного нагрева до 230 °С в течение 28 часов (штриховая линия). Пунктирной линией показан критический уровень концентрации водорода – 1 $\text{см}^3/100 \text{ г ме.}$ Показано также распределение остаточных сварочных напряжений. Буквами А отмечены опасные точки сварного соединения. Причиной образования “двойного пика” концентрации является то, что водород активно десорбируется с поверхностей металла сварного соединения и диффундирует в металл в центре шва, где концентрация водорода снижена в результате промежуточной термообработки.

Как видно из рис.10, зоны наибольшей концентрации диффузионного водорода в околошовной зоне совпадают с зонами наибольших растягивающих напряжений. В околошовной зоне имеется мартенситно – бейнитная структура. Это сочетание факторов обуславливает вероятность образования холодных трещин после окончания сварки. Расчет сварочных напряжений выполнен с помощью НИПК «Сварка», структура и вероятность холодных трещин рассчитаны с помощью инженерного программного комплекса «Свариваемость», разработанного в МГТУ им. Н.Э.Баумана.

На рис. 11 представлен график изменения концентрации диффузионного водорода в опасных точках сварного соединения и показано, что после 28 часов послесварочного нагрева происходит снижение концентрации диффузионного водорода ниже критической концентрации в $1 \text{ см}^3/100 \text{ г.м.е.}$, а следовательно устраняется причина образования холодных трещин.

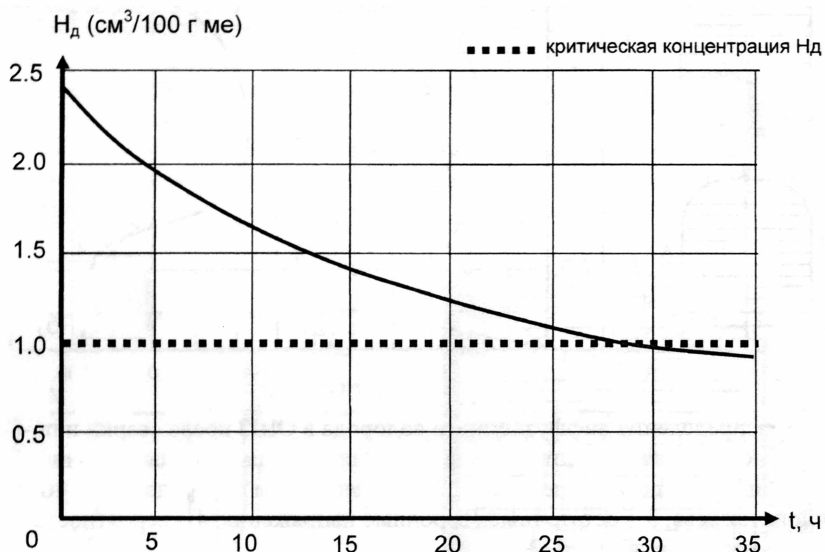


Рис. 11. Изменение концентрации диффузионного водорода в опасных точках сварного соединения (точки А на рис.10) в результате десорбции водорода с поверхностей сварного соединения

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Анализ литературных данных показывает, что диффузионный водород является одной из основных причин образования холодных трещин в сварном соединении НЛС. Существующие экспериментальные методы количественной оценки концентрации диффузионного водорода в различных зонах сварного соединения позволяют проводить только единичные эксперименты, носящие тестовый характер. Существующие в настоящее время упрощенные расчетные методы не позволяют получать результаты, пригодные для решения производственных технологических задач.
2. Анализ данных по диффузионным свойствам сталей показал, что они существенно зависят от температуры и в интервале $0 - 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ могут изменяться в несколько раз. Указанное обстоятельство определяет необходимость использования численного решения уравнения диффузии в неизотермической и нелинейной постановке для анализа процессов перераспределения и десорбции диффузионного водорода в сварных соединениях. В работе исполь-

зовано представление материала совокупностью его структурных составляющих, позволяющее прогнозировать свойства материала через их соотношение и свойства при различных температурах.

3. Разработан алгоритм численного решения методом конечных элементов диффузионной задачи для неизотермического случая с учётом изменения коэффициента диффузии водорода, растворимости и фазового состава структуры в зависимости от температуры.
4. Разработанная модель реализована в виде модуля расчёта процессов диффузии и десорбции водорода, интегрированного в программный комплекс «Сварка», разработанный в МГТУ им. Н.Э.Баумана.
5. Верификация полученных результатов расчёта путём сопоставления с тестовыми экспериментальными данными позволила сделать вывод о достоверности расчётных результатов.
6. Выбраны температурный и концентрационный критерии водородной хрупкости, при которых исключается образование холодных трещин при сварке низколегированных сталей (соответственно нагрев выше 200 °С и концентрации диффузионного водорода ниже 1 см³/100 г мет), при которых прекращается действие дислокационного переноса атомарного водорода к границам бывших аустенитных зерен в околосварочной зоне, являющихся местом зарождения очагов холодных трещин. Приведённые критерии рекомендовано использовать для выбора рациональных режимов предварительного, сопутствующего подогрева и послесварочного нагрева.
7. В результате проведённых расчётов определены рациональные режимы послесварочного нагрева, применяемого при сварке корпуса атомного реактора ВВЭР-1000, и показана возможность обеспечения снижения концентрации диффузионного водорода до безопасного уровня, исключающего возможность образования холодных трещин при сокращении послесварочного нагрева с 250 °С в течение 48 часов, рекомендуемых руководящими документами до температуры 230 °С в течение 28 часов. Ожидаемая экономия на затраты электроэнергии при сварке одного корпуса реактора составляет 40 млн. рублей.
8. Показано, что после аустенитной наплавки в поднаплавочном слое металла наблюдается повышенная концентрация диффузионного водорода (до 2,5 см³/100 г ме) вследствие задержки десорбции водорода с поверхности аустенитного слоя. В результате термообработки и перераспределения водорода в основной металл его концентрация в поднаплавочном слое снижается до значений менее 1 см³/100 г ме.

1. Оценка конструктивно – технологической прочности станины прессы средствами программного комплекса «Сварка»/ Э.Л. Макаров [и др]. // Сварочное производство.- 2003. -№ 1.- С. 14-16.
2. Пути обеспечения и методы оценки надёжности и ресурса сварных конструкций / Э.Л. Макаров [и др]. // Тезисы докладов ВНТК Сварка на рубеже веков. Москва. 2003. С. 7-8.
3. Программное обеспечение для моделирования комплекса физико – металлургических процессов при сварке / А.С. Куркин [и др]. // Тезисы докладов ВНТК Сварка на рубеже веков. Москва. 2003. С.9 – 10.
4. Розанов Д.С. Оценка НДС станины прессы средствами программного комплекса “Сварка”// Тезисы докладов ВНТК Сварка на рубеже веков. Москва. 2003. С. 10 -11.
5. Розанов Д.С. Оценка напряженно – деформированного и водородного состояния сварного соединения крупногабаритной конструкции методом конечных элементов // Технология, оборудование и подготовка кадров в сварочном производстве: Сб. докл. ВНТК МАТИ – Сварка XXI века. Москва. 2003. С.315 – 318.
6. Розанов Д.С. Методика расчёта концентрации диффузионного водорода в сварном соединении методом конечных элементов // Сварка и контроль – 2004: Сб. докл. ВНТК, посв. 150-летию Н.Г.Славянова.- Пермь. 2004. С. 119 – 121.
7. Розанов Д.С. Моделирование процесса перераспределения и десорбции диффузионного водорода при сварке// Будущее машиностроения России: Сб. трудов ВНТК молодых ученых и специалистов. Москва. 2008. С. 120 – 121.
8. Розанов Д.С. Применение метода конечных элементов для моделирования диффузии водорода при сварке // Машиностроительные технологии: Сб.тезисов докладов ВНТК, посв. 140 – летию высшего технологического образования в МГТУ им. Н.Э.Баумана. Москва. 2008. С. 160 – 161.
9. Макаров Э.Л., Розанов Д.С. Моделирование процесса перераспределения и десорбции диффузионного водорода при сварке// Сварка и Диагностика. -2009. -№2. -С. 58-59
10. Розанов Д.С. Методика расчета концентрации диффузионного водорода в сварном соединении // Будущее машиностроения России: Сб. трудов ВНТК молодых ученых и специалистов. Москва. 2010. С. 109 – 110.
11. Розанов Д.С. Расчетное обоснование режимов послесварочного нагрева при сварке крупногабаритных оболочковых сварных конструкций в энергетическом машиностроении // Сварка и Диагностика. -2011. -№3. -С. 47-49.

Подписано к печати 29.09.11. Заказ № 674
Объем 1,0 печ.л. Тираж 100 экз.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5
(499) 263-62-01