

M338300

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ
НА ДОН

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшее
техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

ГАННО Нина Афанасьевна

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ВОДОРОДА В МЕТАЛЛЕ ШВА
ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ЕГО ВЛИЯНИЯ
НА СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ХРУПКИМ
РАЗРУШЕНИЯМ

(Специальность 05.04.05 - Технология и машины
сварочного производства)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшее
техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

ГАННО Нина Афанасьевна

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ВОДОРОДА В МЕТАЛЛЕ ШВА
ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ЕГО ВЛИЯНИЯ
НА СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ХРУПКИМ
РАЗРУШЕНИЯМ

• (Специальность 05.04.05 – Технология и машины
сварочного производства)

Автореферат
• диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

М 338300 ф
НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1338300

Ганно Н.А. Исследование по

Работа выполнена в Иркутском политехническом институте.

Научные руководители: д.т.н., профессор ФРОЛОВ В.В.
к.т.н., доцент МАТХАНОВ В.К.

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор МАЗЕЛЬ А.Г.
к.т.н., доцент ФЕДОРОВ В.Г.

Ведущее предприятие – Государственный союзный монтажный
трест "Востоэнергомонтаж".

Защита диссертации состоится "14" июня 1979 г.
на заседании специализированного Совета Д053.15.07 по технологии
и машинам сварочного производства Московского ордена Ленина и
ордена Трудового Красного Знамени высшего технического училища
имени Н.Э.Баумана по адресу: Москва, 107005, 2-я Бауманская ул.,
д. 5.

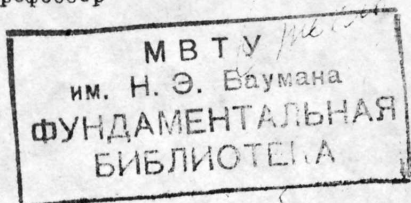
Ваши отзывы в 2 экземплярах, заверенные печатью, просьба
высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им.
Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан "14" мая 1979 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
специализированного Совета
д.т.н., профессор

СТЕКЛОВ О.И.



Подписано к печати 11.05.79

Объем I п.л. Л-77129

Тираж 100

Типография МВТУ им. Н.Э.Баумана, Заказ 667

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Осуществление программы капитального строительства в восточных районах страны, в частности, в районах, прилегающих к БАМу, связано с необходимостью изготавливать и эксплуатировать большое количество сварных конструкций в условиях естественных отрицательных температур, достигающих минус 50°C и ниже.

Практика показывает, что в указанных районах в зимнее время резко увеличивается число случаев хрупких разрушений, при этом большинство их имеет место в конструкциях, изготовленных или отремонтированных при отрицательных температурах воздуха с применением ручной электродуговой сварки.

Изучением природы хладостойкости сварных соединений в нашей стране занимаются с 30-х годов, однако до сих пор полностью не выяснен механизм этого явления. Поэтому установление факторов, вызывающих снижение уровня хладостойкости сварных конструкций, и разработка мероприятий, повышающих их хладостойкость, являются актуальными задачами, отвечающими насущным нуждам промышленности.

Исследования характера разрушений, времени и места их появления, условий проведения сварочных работ при отрицательных температурах воздуха, количества водорода в металле, наплавленном в этих условиях, позволили предположить, что одним из важных факторов, снижающих хладостойкость сварных соединений, выполненных при отрицательных температурах, является водород.

Целью настоящей работы является исследование влияния отрицательных температур на поведение водорода в наплавленном металле (в диапазоне естественных отрицательных температур, характерных для районов Сибири) и изучение воздействия водорода на хладостойкость сварных соединений, выполненных ручной дуговой сваркой, на основе абсолютного показателя хладостойкости - сопротивляемости металла распространению трещин.

Методы исследования. Основные задачи работы решались экспериментальным и расчетным путем с использованием метода "карандашных" проб и метода ЛПИ для определения диффузионного водорода, метода определения остаточного водорода вакуум-экстракцией при температуре $600-700^{\circ}\text{C}$, термоэлектрического метода для опре-

деления удельной работы разрушения, осциллографирования температурного поля в свариваемых образцах, металлографических исследований, а также статистических методов обработки результатов опытов.

Научная новизна работы

1. Установлено, что общее содержание водорода в металле, наплавленном при отрицательных температурах воздуха, возрастает, при этом увеличивается доля остаточного водорода, накопленного в дефектах неравновесных структур. Повышение количества остаточного водорода способствует развитию необратимой водородной хрупкости.

2. Установлено, что коэффициент диффузии водорода при десорбции его из наплавленного металла в процесса вылеживания при отрицательной температуре на порядок ниже, чем при комнатной. Диффузионный водород, время пребывания которого в металле возрастает из-за уменьшения коэффициента диффузии, вызывает снижение пластичности металла.

3. Установлено, что сопротивляемость металла шва и околошовной зоны распространению трещин снижается под влиянием водорода. Величина работы разрушения металла зон сварного соединения изменяется во времени в процессе вылеживания конструкции вследствие перераспределения водорода в результате диффузии, однако для металла шва, полученного при отрицательных температурах, она остается на минимальном уровне в течение месяца после сварки.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, изложенных в диссертационной работе, подтверждается анализом аварий сварных конструкций при отрицательных температурах, результатами экспериментальных исследований с надежностью 95%, сходимостью полученных результатов с данными других исследований, а также результатами практического использования предложенных рекомендаций на Коршуновском горно-обогатительном комбинате и др.

Практическая ценность работы заключается в установлении направлений снижения содержания водорода в металле шва при сварке в условиях отрицательных температур и в разработке рекомен-

даций по выбору, хранению электродов и подготовке их к сварке.

Результаты работы внедрены на Коршуновском горно-обогатительном комбинате с фактическим годовым экономическим эффектом 20,4 тыс.рублей.

Апробация. Основные положения работы докладывались на:

- Всесоюзных научно-технических конференциях по проблемам хладостойкости материалов, г.Якутск, 1974, 1978 гг.;
- городском научном семинаре сварщиков, г. Москва, МВТУ им. Н.Э.Баумана, июнь, 1978 г.;
- техническом совете Коршуновского горно-обогатительного комбината, 1971 г.;
- конференциях НТО Машпром "Передовые способы сварки и наплавки", г. Иркутск, 1972, 1974 гг.;
- IV отраслевой научно-технической конференции "Прогрессивные методы сварки и резки при изготовлении и ремонте нефтехимического оборудования", г. Ангарск, 1978 г.;
- научно-технических конференциях Иркутского политехнического института, г. Иркутск, 1972-1978 гг.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и выводов по работе. Содержит 33 таблицы, 63 рисунка, 7 приложений и 129 наименований использованных литературных источников, изложена на 160 страницах машинописного текста.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава первая содержит анализ случаев хрупкого разрушения сварных соединений при отрицательных температурах, имевших место на Коршуновском горно-обогатительном комбинате и при строительстве Братского лесопромышленного комплекса. Все случаи хрупких разрушений можно разделить на две группы. К первой группе относятся разрушения, возникающие из-за конструктивного несовершенства узла или от заводского дефекта. Ко второй группе - разрушения, начинающиеся в местах, ранее отремонтированных сваркой, так называемые повторные поломки. Разрушения второй группы наиболее многочисленны.

Результаты обследования показали, что узлы, отремонтированные в помещении или при положительных температурах воздуха

на открытых площадках, разрушаются повторно значительно реже, чем узлы, отремонтированные при отрицательных температурах воздуха. Характерным для большинства случаев разрушений являлось зарождение трещин в металле шва с последующим распространением в зону термического влияния и в основной металл.

При изучении хрупких разрушений сварных конструкций по технической документации восстанавливались температура воздуха при сварке, технология сварки, состояние перед сваркой, отбирались пробы на металлографический анализ участков разрушения и на механические свойства металла в зоне разрушения, определялось содержание водорода в наплавленном металле. Исследование характера разрушений сварных конструкций (кристаллический излом, наличие микропор и микротрещин в металле шва, являющихся очагами зарождения разрушения), снижение пластических свойств металла и высокое содержание водорода в металле шва позволили высказать предположение о существенном влиянии водорода на хладостойкость сварных соединений, выполненных при отрицательных температурах.

Глава вторая посвящена обзору литературы по влиянию водорода и отрицательных температур при сварке на свойства сварного соединения, постановке цели и задач исследования.

Поведение водорода при сварке в условиях положительных температур и его влияние на свойства сварных соединений изучалось в работах Фролова В.В., Петрова Г.Л., Походни И.К., Козлова Р.А. и др.

Установлено, что при положительных температурах водород имеет высокую диффузионную подвижность, легко перемещается по металлу и постепенно удаляется в атмосферу. Отмечается решающая роль диффузионного водорода в охрупчивании сварных соединений (Петров Г.Л., Козлов Р.А.). Высказываются предположения о снижении диффузионной подвижности водорода при отрицательных температурах (Голодобов Б.А., Николаев К.Г.), однако в литературных источниках количественных данных о значениях коэффициента диффузии водорода в наплавленном металле при отрицательных температурах нет. Предполагаемое уменьшение диффузионной подвижности водорода в этих условиях может изменить характер перераспределения водорода между зонами сварного соединения и затормозить диффузию водорода из металла в атмосферу. Поэтому определение параметров диффузионной подвижности водорода в наплавленном

металле при отрицательной температуре позволит раскрыть механизм влияния водорода на снижение хладостойкости металла сварного соединения.

Влияние водорода на хладостойкость сварных соединений изучалось для конструкций, работающих при отрицательных температурах в наводороживающих средах, которые создают и постоянно поддерживают в металле закритическое содержание водорода (Суворин В.Я., Фролов В.В., Куркин С.А., Николаев А.Ф., Сильвестров Ю.Г.). Выявлено, что с увеличением содержания водорода происходит уменьшение величины работы зарождения хрупкой трещины в сварных соединениях.

Воздействие водорода на хладостойкость сварных конструкций, эксплуатируемых при обычных условиях, для которых характерно насыщение наплавленного металла водородом в процессе сварки с последующим перераспределением его между зонами сварного соединения и диффузией в атмосферу, не изучено.

Поэтому целью данной работы явилось определение параметров диффузионной подвижности водорода в наплавленном металле при естественных отрицательных температурах и исследование влияния водорода на сопротивляемость металла сварных соединений хрупким разрушениям в ненаводороживающих средах. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Выбор методики оценки содержания водорода в металле.
2. Исследование влияния условий хранения электродов и подготовки их к сварке на содержание водорода в наплавленном металле.
3. Определение параметров диффузионной подвижности водорода в наплавленном металле, полученном сваркой при отрицательных температурах.
4. Исследование влияния отрицательных температур при сварке на содержание водорода в наплавленном металле.
5. Разработка методики оценки влияния водорода на сопротивляемость распространению трещин металла зон сварного соединения.
6. Исследование влияния водорода и температур при сварке на сопротивляемость металла зон сварного соединения распространению трещин в процессе вылеживания.
7. Разработка практических рекомендаций по уменьшению со-

держания водорода в металле шва и повышению работоспособности сварных конструкций при отрицательных температурах (в условиях Сибири).

Глава третья посвящена оценке методов определения количества диффузионного водорода и исследованию факторов, влияющих на содержание водорода в наплавленном металле при ручной дуговой сварке.

Для определения содержания водорода в наплавленном металле в настоящее время применяются различные методики, которые отличаются в основном формой образца и способом сбора водорода. В работе проведена оценка двух методов, принятых в СССР: метода "карандашных" проб и метода ЛПИ. Оценка проводилась по трудоемкости изготовления образца, сложности аппаратуры, продолжительности анализа и воспроизводимости результатов. Выявлено, что метод "карандашных" проб целесообразно применять в массовых анализах контроля сварочных электродов, при изучении условий, влияющих на содержание водорода в наплавленном металле; метод ЛПИ, как более точный, но и более трудоемкий – при оценке новых сварочных электродов, при изучении влияния водорода на свойства сварного соединения.

С помощью метода "карандашных" проб в диссертации исследованы следующие факторы, влияющие на содержание водорода в наплавленном металле: условия хранения электродов (неотапливаемое помещение, помещение с контролируемой температурой и влажностью воздуха и герметичная тара-пенал), тип электродного покрытия, температура прокалки и диаметр электрода.

Установлено, что при хранении электродов в неотапливаемом помещении в течение 10–20 суток происходит увлажнение покрытий до 2%, что приводит к увеличению содержания водорода в наплавленном металле в 2–3 раза по сравнению с содержанием водорода при сварке прокаленными электродами. При хранении электродов в помещении с контролируемой температурой и влажностью воздуха увлажнение покрытия за этот период составило 0,2%, а содержание водорода в наплавленном металле увеличилось на 40%. В пенале увлажненность покрытия составила 0,1%, а содержание водорода в наплавленном металле увеличилось на 20%.

Исследование типа электродного покрытия проведено для электродов, нашедших широкое распространение на предприятиях Сибири: УОНИ 13/45, УОНИ 13/55 (фтористо-кальциевое покрытие)

Показано, что электроды с первым типом покрытия в непрокаленном состоянии дают содержание водорода в наплавленном металле 7-9 см³/100 г, со вторым - 13-15 см³/100 г. Однако для электродов типа УОНИ прокатка при температуре 450-500°С позволяет снизить содержание водорода до 1-2 см³/100 г, а для электродов МР-3 максимально допустимая температура прокатки 200°С дает снижение количества водорода в наплавленном металле до 9-10 см³/100 г. Рекомендуемый заводом-изготовителем режим прокатки электродов типа УОНИ - температура 350-370°С, выдержка 1 час - обеспечивает снижение содержания водорода до 3,5 см³/100 г, которое может оказаться высоким для металла, работающего при отрицательных температурах.

Влияние диаметра электрода на содержание водорода в наплавленном металле изучалось для электродов УОНИ 13/55 диаметром 4 мм и 5 мм. Выявлено, что в непрокаленном состоянии электроды диаметром 5 мм дают содержание водорода на 2-3 см³/100 г больше, а в прокаленном состоянии на 0,5 см³/100 г.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что факторами, существенно влияющими на содержание водорода в наплавленном металле, являются: условия хранения электродов, тип электродного покрытия и подготовка электродов к сварке.

Глава четвертая посвящена исследованию влияния температурных условий сварки на диффузионную подвижность и содержание водорода в наплавленном металле.

Для определения параметров, характеризующих диффузионную подвижность водорода, а именно: коэффициента диффузии, энергии активации и коэффициента D_0 , исследовалась кинетика дегазации цилиндрических образцов, наплавленных электродами УОНИ 13/45, которые рекомендуются для сварки при отрицательных температурах. Сварку выполняли в естественных условиях при температурах воздуха от +20 до -35°С. Насыщение образцов водородом происходило в процессе сварки за счет влажности электродного покрытия и окружающего воздуха. Выделение газа из образцов изучалось для нескольких температурных вариантов, встречающихся при изготовлении сварных конструкций в условиях Сибири и Крайнего Севера: сварка при положительной температуре окружающего воздуха, выживание образца при положительной или отрицательной температуре;

сварки при отрицательной температуре окружающего воздуха, выделение при положительной или отрицательной температуре. Результаты экспериментов показали, что выделение водорода из образцов, сваренных и выдерживаемых при положительной температуре, происходит интенсивно в первые часы после сварки и заканчивается практически в течение суток, а из образцов, сваренных и выдерживаемых при отрицательных температурах, происходит с разной интенсивностью в течение двух-трех суток и заканчивается через пять - шесть суток (рис. 1).

Для определения коэффициента диффузии водорода использовано решение задачи о газонасыщении цилиндрических тел конечных размеров при линейных граничных условиях третьего рода:

$$C = C_0 \left[1 - \frac{32}{2405^2 \pi^2} \cdot \exp \left[- \left(\frac{2405^2}{R^2} + \frac{\pi^2}{4\ell^2} \right) \cdot D\tau \right] \right], \text{ см}^3/100 \text{ г.}$$

где C - средняя концентрация водорода в образце в данный момент времени, $\text{см}^3/100 \text{ г.}$; C_0 - равновесная концентрация водорода, соответствующая внешнему давлению при газонасыщении P_{H_2} , $\text{см}^3/100 \text{ г.}$; D - коэффициент диффузии, $\text{см}^2/\text{с.}$; R - радиус цилиндра, см. ; 2ℓ - длина цилиндра, см.

Данное уравнение решено для случая, когда исходная концентрация водорода в образце равна нулю. В наших экспериментах рассматривается процесс диффузии водорода из металла, то есть в начальный момент концентрация водорода в образце максимальная, а на поверхности равна нулю. В этом случае C_0 представляет собой максимальное количество водорода, выделившееся из образца, а C - количество водорода, выделившееся из образца за период времени τ . При принятых размерах образца $R = 0,5 \text{ см}$ и $2\ell = 5 \text{ см}$ вычисленные значения коэффициента диффузии водорода при температурах $+16^\circ\text{C}$ и -32°C соответственно равны $1,7 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с.}$ и $2,4 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с.}$, то есть отличаются на порядок.

Энергия активации, вычисленная по нашим данным графическим методом, составила 21700 Дж/моль , а коэффициент $D_0 = 1,58 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с.}$ Основываясь на рассчитанных и усредненных значениях параметров диффузионной подвижности водорода, можно записать уравнение для коэффициента диффузии водорода в наплавленном металле малоуглеродистой стали для низкотемпературной области в следующем виде:

$$D_{H^{A-Fe}} = 1,6 \cdot 10^{-2} \exp(-21700/RT), \text{ см}^2/\text{с.}$$

Сопоставление полученных значений коэффициентов диффузии водорода при температуре $+20^{\circ}\text{C}$ с литературными данными показывают удовлетворительную сходимость результатов.

Влияние отрицательных температур окружающего воздуха при сварке на содержание водорода в наплавленном металле проявляется в увеличении количества суммарного водорода, причем возрастает как диффузионный, так и остаточный водород. Однако интенсивность возрастания для них различна: при изменении температуры от $+15^{\circ}\text{C}$ до -20°C количество остаточного водорода увеличилось в 2 раза, диффузионного — незначительно.

Повышению количества остаточного водорода способствует более развитая неравновесность структуры металла швов, выполненных на морозе. Действие остаточного водорода проявляется в развитии необратимой водородной хрупкости. Увеличение длительности пребывания диффузионного водорода в металле, обусловленное уменьшением скорости диффузии, снижает пластичность металла. Совместное воздействие диффузионного и остаточного водорода, создавая напряженное состояние в металле, способствует уменьшению сопротивляемости металла хрупким разрушениям.

Глава пятая посвящена исследованию влияния водорода на сопротивляемость металла сварного соединения, выполненного и эксплуатируемого при отрицательных температурах, распространению трещин. С этой целью была разработана и опробована методика, учитывающая требования, диктуемые высокой диффузионной подвижностью водорода в металле. Сопротивляемость металла распространению трещин исследовалась с помощью термоэлектрического метода (ТЭМ), разработанного в МВТУ им. Н.Э.Баумана и ИПИ Винокуровым В.А. и Черкасовым В.К.

За основу была взята валиковая проба МВТУ, в которой изменены размеры образцов и форма разделки. Размеры образцов соответствуют применяемым в методе ТЭМ, а V -образная разделка с односторонним скосом кромки позволяет исследовать в плоскости разрушения более однородный по свойствам металл. Сопротивляемость распространению трещин оценивалась для металла шва, наплавленного электродами УОНИ 13/55, и металла околосшовной зоны на расстоянии 0,5–1 мм от линии сплавления. Все эксперименты проведены на стали 10Г2С1, которая рекомендуется для металлоконструкций северного исполнения.

Опробование методики показало возможность оценки влияния водорода на сопротивляемость распространению трещин во времени при различных температурах.

При положительных температурах установлено, что характер изменения величины работы разрушения металла шва и околошовной зоны во времени различен. На графике зависимости работы разрушения металла околошовной зоны от времени вылеживания имеется минимум в интервале 6-12 часов. Работа разрушения металла шва возрастает при вылеживании. Увеличение содержания водорода в металле шва вызывает уменьшение абсолютных значений величины работы разрушения металла шва и околошовной зоны. Характер изменения величины работы разрушения во времени остается прежним.

Отрицательные температуры окружающей среды при сварке и вылеживании образцов уменьшают в несколько раз величину работы разрушения металла шва и околошовной зоны и изменяют характер временной зависимости работы разрушения (рис. 2). Минимальное значение величины работы разрушения металла шва имеет место в интервале времени 1,5 - 2 часа после сварки, а минимальное значение величины работы разрушения металла околошовной зоны приходится на интервал времени 6 - 12 часов. В процессе месячного вылеживания работа разрушения металла околошовной зоны возрастает, а металла шва остается на уровне трехсуточного вылеживания.

Такой характер изменения величины работы разрушения металла шва и металла околошовной зоны при отрицательных температурах объясняется повышением содержания остаточного водорода и замедлением диффузионных процессов, способствующих фиксации водорода в металле сварного соединения.

Выявленный механизм снижения хладостойкости металла сварных соединений, выполненных и эксплуатируемых при отрицательных температурах, позволил разработать комплекс мероприятий, которые способствуют уменьшению содержания водорода в металле сварных соединений и повышению уровня хладостойкости сварных конструкций. Результаты внедрения этих мероприятий отражены в общих выводах.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Анализ случаев хрупких разрушений сварных конструкций в зимнее время показал, что значительная их часть приходится на

конструкции, изготовленные или отремонтированные с применением сварки в условиях отрицательных температур. Хрупким разрушениям сопутствовали кристаллический излом, наличие микропор и микротрещин в металле шва, снижение пластических свойств металла и высокое содержание водорода в металле шва.

2. Насыщению металла шва водородом способствует ряд факторов, из которых наиболее существенными являются: тип электрода, условия хранения электродов и подготовка их к сварке, а также температурные условия процесса сварки.

3. Отрицательные температуры воздуха при сварке способствуют повышению содержания водорода в наплавленном металле. По сравнению с положительными температурами в 2-3 раза возрастает количество остаточного водорода.

4. Отрицательные температуры воздуха при сварке уменьшают диффузионную подвижность водорода в стали. На основании экспериментальных исследований предложено уравнение диффузии водорода в металле шва из малоуглеродистой стали для низкотемпературной области. Установлено, что коэффициент диффузии водорода при температуре минус 30°C на порядок ниже, чем при комнатной температуре.

5. Увеличение количества остаточного водорода, способствующего развитию необратимой водородной хрупкости, и увеличение длительности пребывания диффузионно-подвижного водорода в металле шва вызывают снижение хладостойкости сварных соединений, выполненных при отрицательных температурах.

6. Сопротивляемость распространению трещин, определенная термоэлектрическим методом, у металла шва, полученного при сварке в условиях положительных температур, снижается при увеличении содержания водорода. Однако после суточного вылеживания она возрастает в 2 раза, что связано с интенсивной десорбцией водорода из металла.

Для металла шва, полученного при отрицательных температурах, сопротивляемость распространению трещин снижается в 2,5-3 раза и не восстанавливается при вылеживании в течение месяца, что обусловлено увеличением количества остаточного водорода.

7. Для металла околошовной зоны сопротивляемость распространению трещин также снижается в зависимости от содержания водорода, имея минимальное значение при 6-12 часах после сварки.

Работа разрушения в образцах, полученных при отрицательной температуре, снижается по сравнению с нормальными условиями в 3-6 раз.

8. Разработаны практические рекомендации по уменьшению содержания водорода в сварных соединениях, как фактора, снижающего хладостойкость сварных конструкций, выполненных при отрицательных температурах:

а) условия хранения электродов: в помещениях с контролируемой температурой не ниже $+20^{\circ}\text{C}$ и относительной влажностью не более 40%;

б) подготовка электродов к сварке. Для электродов УОНИ температура прокалики $450-500^{\circ}\text{C}$, выдержка I час;

в) использование герметичной тары - пеналов для хранения электродов на рабочем месте сварщика при сварке на открытых площадках;

г) термостатирование зон сварного соединения после сварки при температуре $150-200^{\circ}\text{C}$ в течение 3-6 часов.

9. Внедрение результатов исследования на Коршуковском горно-обогатительном комбинате дало фактический экономический эффект 20,4 тыс.рублей в год.

Содержание диссертации отражено в работах:

1. Матханов В.Н., Хрюкин Ю.А., Ганно Н.А. Сварка при ремонте оборудования в зимнее время. Информ.листок № 360, Иркутск, ЦНТИ, 1970, 3 с.
2. Матханов В.Н., Хрюкин Ю.А., Ганно Н.А. Сварка зимой при ремонте трещин на напорной плите стрелы экскаваторов ЭКГ-4, ЭКГ-6. Информ.листок № 373, Иркутск, ЦНТИ, 1970, 4 с.
3. Матханов В.Н., Ганно Н.А., Хрюкин Ю.А. Хранение и подготовка сварочных материалов при сварке в зимнее время. Информ.листок № 311, Иркутск, ЦНТИ, 1970, 3 с.
4. Матханов В.Н., Ганно Н.А., Нецветаев В.А., Хрюкин Ю.А. Влияние отрицательных температур на содержание водорода в наплавленном металле. В кн.: Доклады Всесоюзной научно-технической конференции "Работоспособность машин и конструкций в условиях низких температур. Хладостойкость материалов", Ч. П. Якутск, 1974, с. 226-231.
5. Хрюкин Ю.А., Ганно Н.А., Матханов В.Н. О выборе электродов для сварки ответственных строительных конструкций при низких

- температурах. В кн.: Передовые методы сварки. Иркутск, 1974, с. 33-34.
6. Ганно Н.А. К анализу методик определения диффузионного водорода в сварных швах. В кн.: Передовые способы сварки и наплавки. Иркутск, 1976, с. 18-23.
 7. Фролов В.В., Ганно Н.А. Влияние отрицательных температур при сварке на диффузионную подвижность водорода. "Известия вузов. Машиностроение", 1978, № I, с.145-149.
 8. Ганно Н.А., Фролов В.В., Матханов В.Н. Поведение водорода в сварных швах и его влияние на сопротивляемость хрупким разрушениям. В кн.: Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. Разрушение металлов и сварных конструкций при низких температурах. Ч. III, Якутск, 1978, с. 32.

Ганно

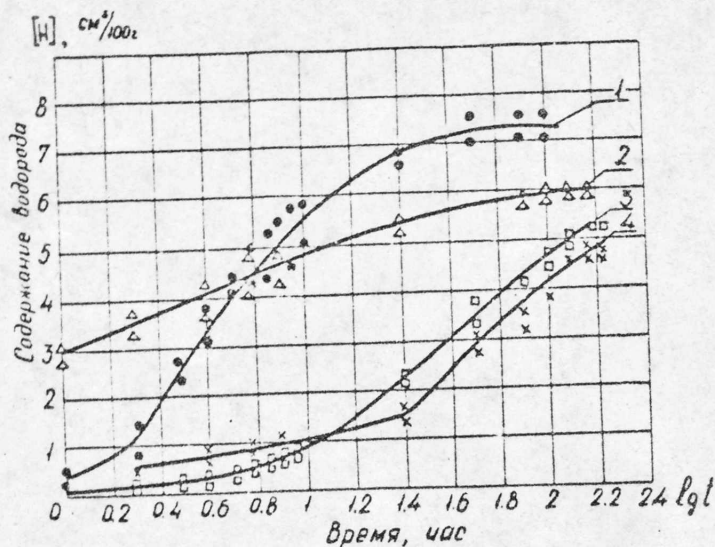


Рис. 1. Кинетика выделения водорода в зависимости от времени при различных температурах сварки и вылеживания

1 - $T_{\text{св.}} = -32^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{в.}} = +20^{\circ}\text{C}$; 2 - $T_{\text{св.}} = +16^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{в.}} = +18^{\circ}\text{C}$;
 3 - $T_{\text{св.}} = -32^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{в.}} = -32^{\circ}\text{C}$; 4 - $T_{\text{св.}} = +16^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{в.}} = -30^{\circ}\text{C}$

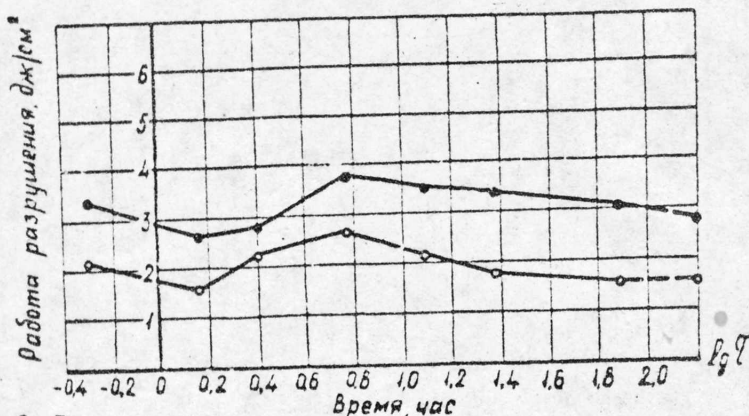


Рис. 2. Влияние водорода на работу разрушения металла околошовной зоны при отрицательной температуре

● $H_{\text{диф.}} = 3,7 \text{ см}^3/100 \text{ г}$; $H_{\text{ост.}} = 2,0 \text{ см}^3/100 \text{ г}$;
 ○ $H_{\text{диф.}} = 9,3 \text{ см}^3/100 \text{ г}$; $H_{\text{ост.}} = 3,8 \text{ см}^3/100 \text{ г}$