

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

На правах рукописи

ПОЗНЯКОВ
Валерий Дмитриевич

УДК 621.791.75.01:669.15.018.8 — 194.3

**ТЕХНОЛОГИЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ
КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ХЛАДОСТОЙКИХ
СТАЛЕЙ С $\sigma_{0.2} = 590 \dots 780$ МПа**

05.03.06 —

технология и оборудование для сварки и родственных
процессов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев 1996

АВ 34.937

Работа выполнена в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины

Научный руководитель: заведующий лабораторией доктор технических наук, Миходуй Л.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, Липодаев В.Н. кандидат технических наук, Прохоров В.И.

Ведущее предприятие - Никопольский краностроительный завод.

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

Защита состоится 26 июня 1996 г. на заседании специализированного ученого совета (К 50.02.02) при Институте электросварки им. Е.О.Патона.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке института.

Автореферат разослан 16 мая 1996 г.

Ученый секретарь специализированного ученого совета докт. техн. наук

А.А.Вондарев



ЛННБ України ім.В.Стефаніка
00754663 (M)



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы. Освоение топливноэнергетических и сырьевых месторождений требует создания надежной и долговечной добывающей и транспортной техники (карьерные и шагающие экскаваторы, машины большой грузоподъемности и др.), наиболее ответственные конструкции которой изготавливаются из низколегированных высокопрочных сталей. Технология сварки таких сталей должна обеспечить комплекс механических свойств металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ) на уровне основного металла, а также высокую сопротивляемость сварных соединений образованию холодных и усталостных трещин.

При обслуживании указанной техники значительный объем сварочных работ выполняется с использованием ручной электродуговой сварки (РДС). Сварка высокопрочных сталей типа 13ХГМРБ, 12ГН2МФАЮ и др. с $\sigma_{0.2} > 590$ МПа и ударной вязкостью КСЧ - 29...39 Дж/см² (при T = -40°C) наиболее часто используются универсальные электроды с покрытием основного вида марок АНП-2 (Э-70) и АНП-7 (тип Э-85). Они позволяют получать металл швов с комплексом механических свойств достаточным для эксплуатации при температурах до минус 40 °С. Общим недостатком этих электродов является неблагоприятная форма шва, обуславливающая наличие высоких концентраций напряжений в местах перехода от шва к основному металлу, что существенно снижает долговечность конструкций. Это предопределило необходимость создания специальных электродов, применение которых позволит обеспечить плавность перехода от шва к основному металлу.

С конца 80^х годов для изготовления мощной горнорудной и транспортной техники начали применяться стали марок 12ГН2МФАЮ-У, 14ХГН2МФАБ, 12ГН2МФАЮДР-СП с пределами текучести 600...700 МПа и более высокими показателями хладостойкости (КСЧ > 27 Дж/см² при T = -60 °С). Комплекс работ, выполненный в ИЭС им. Е.О.Патона в сотрудничестве с рядом предприятий России и Украины, позволил разработать материалы и основные положения механизированной сварки под флюсом и в защитных газах. Применительно к РДС окончательное решение подобных вопросов оставалось открытым, что требовало проведения дополнительных исследований.

Таким образом возникла научная задача - расширить технологические возможности РДС применительно как к традиционным сталям при температуре эксплуатации до минус 40 °С, так и новым сталям с более высокими показателями хладостойкости.

Настоящая работа выполнялась по программе 0.72.01 согласно поставлению ГКНТ Украины №32 от 11.02.92, а также по темам 05.04.03/002-92 и 04.08.02/044-95 согласно постановлениям ГКНТ Украины №15 от 01.03.93г. и № 43 от 31.03.95г.

Цель работы. На основе изучения закономерностей влияния легирования и микролегирования на структуру и хладостойкость металла швов, а также условий сварки на сопротивляемость сварных соединений замедленному и усталостному разрушениям разработать технологию ручной дуговой сварки металлоконструкций из высокопрочных сталей, эксплуатируемых при температурах до минус 60 °С.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- исследовать роль и эффективность легирования и модифицирования высокопрочного металла шва, направленных на повышение сопротивляемости сварных соединений хрупкому и замедленному разрушениям;
- установить необходимые и достаточные условия, определяющие интенсивную десорбцию водорода из легированного металла шва и обеспечивающие высокую сопротивляемость сварных соединений образованию холодных трещин;
- изучить влияние структуры и свойств металла ШВ в сочетании с формой шва на усталостную прочность сварных соединений;
- разработать и внедрить новые сварочные материалы и технологию ручной дуговой сварки конструкций из высокопрочных хладостойких сталей.

Методы исследований. Свойства металла шва оценивали с использованием стандартных методов механических испытаний (ГОСТ 6996-66), а также критериев механики разрушения. Стойкость против образования холодных трещин определялась с применением метода Implant и технологических проб Теккен. Для изучения структуры сварных соединений использованы современные методы оптической металлографии, электронной и растровой микроскопии, химического и спектрального анализов. Содержание диффузионного водорода в наплавленном металле оценивали хроматографическим методом.

Научная новизна. Показано, что условиями получения высокой хладостойкости ($KCV > 27 \text{ Дж/см}^2$ при $T = -60^\circ\text{C}$) и сопротивляемости замедленному разрушению металла шва низкоуглеродистых легированных сталей с $\sigma_{0,2} = 590 \dots 780 \text{ МПа}$ является обеспечение мелкодисперсной бейнито-мартенситной структуры. Указанная структура достигается за счет легирования металла шва марганцем, никелем, хромом, молибденом

(Mn-0,7...0,9%; Ni-2,6...2,8%; Cr-0,4...0,6%; Mo-0,4...0,6%) и микролегирования магнием и алюминием (Mg-0,020...0,045%; Al<0,02%).

Установлено, что микролегирование металла швов типа 08X17H3СМ магнием и алюминием проявляется в изменении морфологии и состава неметаллических оксидных и сульфидных включений с образованием многофазных третичных оксисульфидов и измельчении их в 2,5...3,0 раза. Это приводит к диспергированию аустенитных зерен в 1,5...2,0 раза при одновременном повышении их однородности и увеличению прочности металла шва на 20...30%, хладостойкости на 25...40 % и сопротивляемости сварных соединений замедленному разрушению на 20...30%.

Развиты представления о десорбции водорода из высокопрочного металла шва. Установлено, что увеличение продолжительности охлаждения сварных соединений в интервале температур 800 - 100 °С от 100 до 190 с и коэффициента формы шва с 5 до 7 в общей сложности способствует снижению концентрации диффузионного водорода ($[H]_{диф.100}$) в металле шва на 30...40% и повышению стойкости сварных соединений против образования холодных трещин.

Установлено, что использование электродов с покрытием рутил-основного вида (системы $SiO_2-MgO-TiO_2-CaF_2$) в отличие от электродов с покрытием основного вида (системы $SiO_2-CaCO_3-CaF_2$) обеспечивает уменьшение коэффициента концентрации напряжений в местах перехода от шва к основному металлу с 3,6 до 2,6. В сочетании со снижением твердости в металле ЗТВ на 10...15% это позволяет в 1,7...1,8 раза повысить усталостную прочность сварных соединений высокопрочных сталей.

Практическая ценность и реализация научных результатов работы. Проведенный комплекс исследований лег в основу разработки технологии РДС, позволяющей повысить на 70...80% долговечность сварных конструкций из легированных хладостойких сталей с 60,2-590...780 МПа.

Разработаны новые сварочные материалы: - никелеводородные универсальные электроды марки АНП-9 (тип Э-85 по ГОСТ 9467-75) для сварки сталей с 60,2 > 780 МПа и регламентированной температурой эксплуатации до минус 60 °С;

- высокопроизводительные электроды (σ_H - 12,5 г/А.ч) марки АНП-6П (тип Э-70), обеспечивающие плавность перехода от шва к основному металлу, предназначенные для сварки сталей с 60,2 > 590 МПа и регламентированной температурой эксплуатации до минус 40 °С;

Разработанные материалы и технология РДС внедрены при монтаже и ремонте металлоконструкций горнорудной и транспортной техники на

Полтавском и Костомукшском ГОКах, а также Сибиргинском угольном разрезе и Мариупольском заводе металлоконструкций.

На защиту выносятся:

- обоснование необходимости комплексного легирования и модифицирования для обеспечения высокой прочности ($\sigma_{0,2} > 780$ МПа, $\sigma_B > 850$ МПа) и хладостойкости ($KCV > 27$ КДж/см² при $T = -60$ °С) металла швов сварных соединений низкоуглеродистых легированных сталей;

- представления о факторах, влияющих на интенсивность десорбции водорода из легированного металла шва и обеспечивающих высокую сопротивляемость сварных соединений образованию холодных трещин;

- выявленные закономерности влияния структуры и свойств металла ШТВ и качества формирования швов на сопротивляемость сварных соединений усталостным разрушениям, и установленный на их основе подход к выбору технологии сварки;

- новые сварочные материалы и технология РДС конструкций из низкоуглеродистых легированных сталей повышенной хладостойкости.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на Всесоюзных конференциях по сварочным материалам (Одесса, 1987, Краснодар, 1990), и сварке конструкций из высокопрочных сталей (Екатеринбург, 1989); конференциях молодых ученых и специалистов ИЭС им. Е.О.Патона (Киев, 1987, 1988); Международном семинаре по сварке (Братислава, ЧССР, 1991); технологическом семинаре ИЭС им. Е.О.Патона (1996).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 12 работ, получено 2 авторских свидетельства на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка использованной литературы из 144 наименований и приложений. Текстовая часть содержит 111 страниц машинописного текста, 54 рисунка и 24 таблицы.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основе литературных данных рассмотрены особенности сварки металлоконструкций из высокопрочных легированных сталей, в том числе в условиях их монтажа и ремонта, а также особенности образования в них холодных трещин. Определены возможные пути повышения хладостойкости высокопрочного металла. Рассмотрены вопросы увеличения долговечности сварных конструкций, работающих в условиях циклического нагружения.

Во второй главе изложены методы и результаты

исследований влияния микролегирования высокопрочного металла шва активными элементами (Al, Mg) на его структуру и свойства. Показана их положительная роль в изменении природы, морфологии, формообразования и диспергирования неметаллических включений (НВ), а также измельчении аустенитных зерен. Установлена взаимосвязь между характером распределения включений, вторичной структурой и механическими свойствами металла шва. Изучено влияние микролегирования на трещиностойкость металла шва и сварного соединения.

В третьей главе рассмотрены результаты исследований влияния особенностей физико-металлургических процессов при сварке универсальными и высокопроизводительными электродами на технологическую и эксплуатационную прочность сварных соединений высокопрочных сталей. Определены условия монтажной и ремонтной сварки, обеспечивающие повышение долговечности сварных соединений, работающих в условиях многоциклового нагружения.

Четвертая глава посвящена разработке универсальных электродов марки АНП-9 (тип Э-85) и высокопроизводительных электродов марки АНП-6П с улучшенными сварочно-технологическими свойствами, предназначенных для сварки высокопрочных сталей повышенной хладостойкости. Приведены основные положения технологии монтажной и ремонтной сварки конструкций из низкоуглеродистых высокопрочных сталей, а также результаты их опытно-промышленной проверки.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Основные трудности при сварке высокопрочных легированных сталей связаны с необходимостью обеспечить свойства металла шва на уровне основного металла, а также предотвратить замедленное, хрупкое и усталостное разрушения сварных соединений.

В решение проблемы свариваемости таких сталей внесли большой вклад отечественные и зарубежные ученые И.Гривияк, В.Н.Земан, В.С.Касаткин, Р.А.Ковлов, А.М.Макара, Э.Л.Макаров, В.Ф.Мусличенко, Ю.А.Стеренбоген и др. Разработанные на базе этих исследований рекомендации широко используются при изготовлении конструкций из высокопрочных сталей. Однако, они не могут быть полностью применены в случае монтажной и ремонтной сварки, из-за специфики этих работ. Особая роль в обеспечении комплекса свойств сварных соединений принадлежит выбору и разработке сварочных материалов. Большой вклад в создание электродов для сварки низколегированных сталей, преиму-

ственно с пределом прочности до 590 МПа, внесли представители школы, возглавляемой академиком И.К. Походней.

Наиболее важным моментом при изготовлении конструкций строительно-дорожной, горнорудной и транспортной техники является повышение их выносливости, чему посвящены работы И.В. Кудрявцева, В.И. Труфякова и др. При циклическом нагружении это достигается, в основном путем снижения концентраторов напряжений. Для этого используют специальную обработку швов, что в условиях работы горнорудной техники весьма трудно реализовать. Вместе с тем недостаточно изучена возможность повышения их выносливости за счет рационального выбора технологии сварки и сварочных материалов.

Отсутствие конкретных сведений об этом и обусловило основную задачу исследований, состоящую в изучении формирования структуры, свойств и склонности к замедленному разрушению высокопрочных швов с $\sigma_{0.2} = 590 \dots 780$ МПа, разработке новых сварочных материалов и эффективных технологий монтажной и ремонтной сварки горнорудной и транспортной техники применительно к эксплуатации при температурах до минус 60°C в условиях многоциклового нагружения.

Влияния легирования и микролегирования на структуру и свойства высокопрочного металла шва. Высокая хладостойкость высокопрочного металла шва может быть достигнута путем обеспечения мелкодисперсной бейнитно-мартенситной структуры, за счет легирования марганцем, хромом, молибденом, никелем. Влияние химического состава металла шва на механические свойства изучали с использованием регрессионных моделей разработанных О.Г. Касаткиным и Л.И. Миходуем.

При проведении расчетных и экспериментальных исследований металл шва имел постоянное количество основных легирующих элементов (%): Si 0,30...0,33; Mo 0,50...0,54; Cr 0,48...0,52. Содержание Mn и Ni изменялось от 0 до 2% и 3% соответственно. Установлено, что наиболее высоким комплексом механических свойств отличаются швы со следующим содержанием Mn и Ni: серия "Н" [Mn] = 0,7...0,9%; [Ni] = 2,6...2,8%, $\sigma_B = 890$ МПа, KCV = 45...55 Дж/см² при T = -40°C; серия "М" [Mn] = 1,6...1,8%, [Ni] = 0,6...0,8%. $\sigma_B = 850$ МПа, KCV = 35...40 Дж/см² при T = -40°C. При этом предпочтение следует отдавать системе легирования 08ХГ2СНМ (серия "М"), как более экономной. Однако, как показали исследования, ни один из приведенных составов, не обеспечивает требуемого уровня хладостойкости (KCV > 27 Дж/см²) при температуре минус 60°C ("Н" KCV = 23 Дж/см²; "М" KCV = 15 Дж/см²), что, по-видимому, обусловлено значительной разнородностью вторич-

ной структуры швов. Для стабилизации ее размеров представлялось целесообразным микролегировать эти швы алюминием и магнием.

Влияние микролегирования на структуру и свойства металла швов оценивали на соединениях из стали 14ХГН2МДАФБ выполненных опытными электродами с покрытием флюорит-карбонатного вида серии "Н" (система легирования 08ХГНЗСМ) и "М" (08ХГ2СНМ). Магний и алюминий вводились в состав электродного покрытия в виде алюминиево-магниевой лигатуры (ПАМ - состоящей из 50% Al и 50% Mg) в диапазоне от 0 до 7%. Содержание остальных лигатур (FeSi, FeMn, FeTi, FeMo, Cr, Ni) сохранялось постоянным. Это позволяло получать металл швов с концентрацией Mg от 0 до 0,06%. При этом содержание в металле швов Mn увеличивалось от 0,7 до 1,2% (система легирования 08ХГНЗСМ) и от 1,5 до 2,3 (08ХГ2СНМ), а кремния и титана соответственно от 0,07 до 0,4 и от 0,002 до 0,6%. Концентрация алюминия в них практически не изменялась, что свидетельствует о его активной раскисляющей функции при модифицирующем действии магния. Некоторое снижение содержания в металле швов S свидетельствует о десульфуривующей способности Mg.

В металле исследуемых швов НВ представлены сульфидами, оксидами, оксисульфидами, нитридами и силикатами. Общее их количество ($I_{\text{общ}}$) существенно не изменялось и находилось в пределах от $17,8 \times 10^{-3}$ до $21,6 \times 10^{-3}$. По мере возрастания количества микролегирующих добавок, в металле исследуемых швов происходит снижение доли сульфидных и оксидных включений и повышение оксисульфидных при практически неизменном содержании НВ остальных морфологий. Установлено, что при данных системах легирования швов, введение в их состав Mg, в количестве до 0,045% (ПАМ до 5%), способствует уменьшению размеров НВ всех морфологических групп в 2,5...3,0 раза, а аустенитных зерен в 1,5...2,0 раза при одновременном повышении их однородности. При более высоком содержании Mg - 0,06% (ПАМ-7%), наряду с некоторым увеличением общей загрязненности швов неметаллическими включениями ($I_{\text{общ}} - 21,6 \times 10^{-3}$) повышаются их размеры, а также происходит увеличение размеров и снижение размерной однородности аустенитных зерен (рис.1).

Исследования показали, что с увеличением содержания в металле шва Mg, его структура изменяется от феррито-бейнитной (бавовый вариант) до бейнито-мартенситной (60% В + 40% М) при концентрации магния равной 0,06%.

Такая трансформация структуры металла швов, микролегируемый магнием в количестве 0,01...0,06% (ПАМ- 1...7%), приводит к увели-

чению их прочностных показателей на 20...30% (рис.1) при сохранении пластичности ($\delta_5 = 16...17\%$; $\psi = 58...60\%$). Хладостойкость металла швов на 25...40% повышается лишь при определенном содержании в них магния (0,02...0,045%). При этом также снижается на 10...15 °С температура перехода из вязкого в квазивязкое состояние.

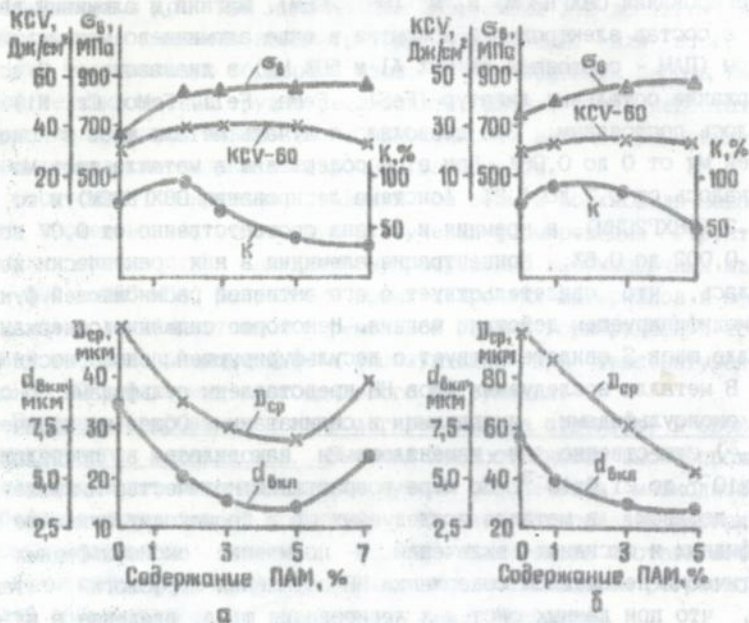


Рис.1. Влияние ПАМ на параметры структуры, показатели механических свойств, а также отделимость шлака с поверхности корневого валика (к) металла швов системы легирования 08ХГ2СНМ (а), 08ХГ3СНМ (б),

На основании проведенных исследований установлено, что требуемая хладостойкость высокопрочного металла шва ($KCV > 27$ Дж/см²) достигается за счет рационального его легирования никелем и марганцем ($Ni = 2,6...2,8\%$; $Mn = 0,7...0,9\%$), а также микролегирования магнием и алюминием ($Mg = 0,02...0,045\%$; $Al < 0,02\%$).

Несмотря на увеличение прочностных показателей металла швов их сопротивляемость образованию холодных трещин практически не изменяется. По-видимому, это обусловлено измельчением зеренной структуры,

а также увеличением протяженности межфазных границ в металле шва, что затрудняет приток $[H]_{диф.}$ к очагу разрушения.

Высокая дисперсность структуры и пластичность металла швов предопределяет необходимую их стойкость образованию усталостных трещин. Они чаще всего возникает в местах перехода от металла шва к основному металлу. Повысить усталостную прочность сварных соединений возможно за счет обеспечения плавных сопряжений между указанными зонами. В исследованиях использован известный из практики сварки сталей общего назначения факт, что это достигается путем применения электродов с особо толстым покрытием рутил-основного (РО) вида, в состав которых входит до 50% железного порошка. Поэтому они были приняты в качестве базы для последующих исследований. Однако металл, наплавленный такими электродами, содержит более высокие концентрации $[H]_{диф.}$ в сравнении со швами, выполненными электродами с покрытием основного (О) вида. Это обстоятельство потребовало специальных исследований по снижению концентрации $[H]_{диф.}$ в металле шва.

Технологические пути снижения насыщенности металла швов диффузионным водородом при ручной дуговой сварке. Как было установлено, использование традиционных решений позволяет обеспечить содержание $[H]_{диф.}$ в закристаллизовавшемся металле не более 5,0 мл/100г при сварке электродами с покрытием основного вида и 7,5 мл/100г - с особо толстым покрытием РО вида. Однако известно, что определяющее значение в процессе замедленного разрушения сварных соединений оказывает содержание диффузионного водорода в металле шва к моменту зарождения холодных трещин при $T = 100$ °С ($[H]_{диф.100}$). Поэтому в настоящих исследованиях изучалась возможность дополнительного снижения концентрации $[H]_{диф.100}$ в швах за счет облегчения десорбции водорода из металла в процессе охлаждения сварного соединения: увеличения времени охлаждения в интервале температур 800-100 °С ($\tau_{8/1}$) и ширины швов (b).

Исследования проводились с использованием опытных электродов ПИ-55 с особо толстым покрытием содержащим 50% железного порошка в сравнении с известными электродами АНП-2. Время охлаждения образцов в интервале температур 800 - 100 °С регулировали, изменяя температуру их подогрева от 20 до 90 °С. При этом $\tau_{8/1}$ увеличивалось от 100 до 600 с. Установлено, что при прочих равных условиях ($Q_{св}$, $[H]_{диф.}$, $E_{шва} = const$), такое увеличение $\tau_{8/1}$ способствует снижению $[H]_{диф.100}$ в металле шва в 2,5...3,0 раза. Вероятно это является одним из факторов положительного влияния подогрева на сопротивляе-

мость сварных соединений замедленному разрушению. Подобное влияние на десорбцию водорода оказывает и изменение ширины шва. Установлено, что ее увеличение в 1,4...1,5 раза (при сопоставимых значениях коэффициентов усиления ϕ и проплавления Φ , а также $\tau_{\text{в/1}}$) приводит к снижению $[H]_{\text{диф.100}}$ на 10...15%. По-видимому, это объясняется увеличением поверхности, через которую происходит десорбция водорода.

Такие условия легко реализуются при сварке электродами ПШ-55. диаметром 4,0 мм на режимах: $I_{\text{св}} = 190 - 210 \text{ А}$; $U_{\text{д}} = 30 - 32 \text{ В}$; $V_{\text{св}} = 12 \text{ м/ч}$. При этом обеспечиваются следующие параметры шва: $v = 21...22 \text{ мм}$; $a = 3...3,5 \text{ мм}$; $h = 2,5...3,0 \text{ мм}$ и $\tau_{\text{в/1}} = 190...200 \text{ с}$. При

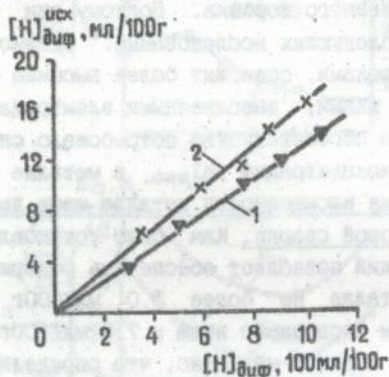


Рис. 2. Влияние исходной насыщенности наплавленного металла диффузионным водородом на концентрацию $[H]_{\text{диф.100}}$ в металле шва при сварке электродами АНП-2 (1) и ПШ-55 (2)

сварке электродами АНП-2, аналогичного диаметра на характерных для них режимах: $I_{\text{св}} = 160 - 180 \text{ А}$; $U_{\text{д}} = 24 - 25 \text{ В}$; $V_{\text{св}} = 9 \text{ м/ч}$ эти показатели соответственно равны: $v = 14...15 \text{ мм}$; $a = 3...3,5 \text{ мм}$; $h = 2,0...2,5 \text{ мм}$ и $\tau_{\text{в/1}} = 100...110 \text{ с}$.

Изменение геометрии швов и условий охлаждения сварных соединений, выполненных электродами ПШ-55, способствует более активному, по сравнению с АНП-2, снижению концентрации $[H]_{\text{диф.100}}$ в наплавленном металле. Об этом свидетельствуют приведенные на рис. 2

зависимости между исходным содержанием диффузионного водорода в закристаллизованном металле и концентрацией $[H]_{\text{диф.100}}$.

Оценка влияния насыщенности металла шва водородом на сопротивляемость отдельных участков (шов, ЗТВ) и сварного соединения в целом образованию холодных трещин показала, что во всех случаях когда сварка выполнялась электродами ПШ-55, их трещиностойкость была на 30...40 % выше, чем при сварке электродами АНП-2.

Наблюдаемая закономерность, по-видимому, объясняется более интенсивным процессом десорбции водорода из металла шва и формированием в металле ЗТВ более пластичной структуры в результате замедле-

ния скорости охлаждения в интервале наименьшей устойчивости аустенита ($W_{6/5}$). Поэтому даже при содержании $[N]_{\text{диф}}$ в наплавленном металле до 8 мл/100г сохраняется высокая сопротивляемость сварных соединений, выполненных электродами ПП-55, образованию холодных трещин.

Усталостная прочность сварных соединений. Важными условиями повышения циклической прочности сварных соединений является снижение концентрации напряжений, обусловленной формой шва, и формирование в металле ЗТВ структур с минимальным содержанием мартенсита. Исследования показали (рис.3), что выносливость крестообразных соединений из стали 13ХГМРБ, сваренных электродами с особо толстым покрытием Р0 вида (ПП-55), в 1,8... 2,0 выше по сравнению с выполненными электродами УОНИ 13/45 и АНП-2 с покрытием 0 вида. Такое повышение усталостной прочности объясняется уменьшением коэффициен-

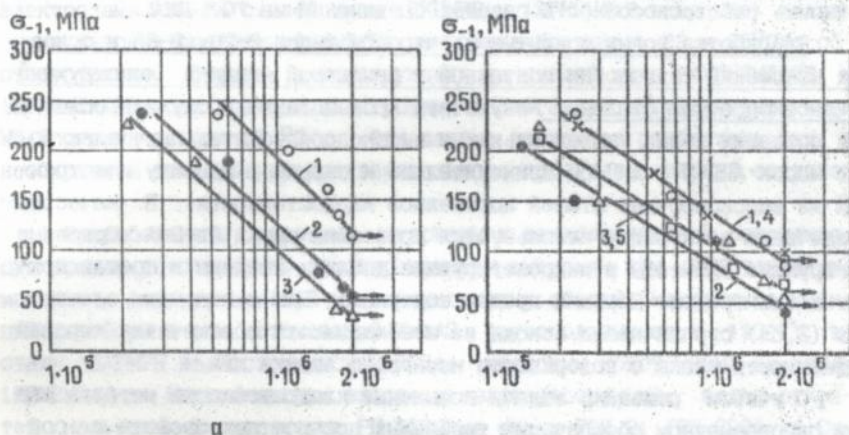


Рис.3. Долговечность тавровых соединений стали 13ХГМРБ после сварки (а) и ремонта (б), выполненных электродами: 1- ПП-55; 2- АНП-2; 3- УОНИ 13/45; 4- комбинировано Н-3 и ПП-55; 5- Н-3

та концентрации напряжений с 3,6 до 2,6, а также снижением твердос- та металла ЗТВ с 450 до 400 (HV10).

Подобная закономерность наблюдается и при ремонтной сварке. Восстановление с использованием электродов ПИ-55, в равной степени как и при ремонте, выполненном комбинированной сваркой, в процессе которой "сердцевина" шва заполнялась опытными электродами И-3 обеспечивающими хладостойкость при T до минус 60°C , а верхние валики электродами ПИ-55, повышают усталостную прочность сварных соединений на 50...60%.

Показано, что одним из эффективных способов повышения выносливости сварных соединений может быть также улучшение их структуры за счет изменения техники сварки. Так например, выполнение последних слоев шва за три прохода, вместо одного, с предварительным наложением валиков на кромки соединения, способствует снижению твердости металла ЗТВ на 10...15%, что позволяет увеличить долговечность стыковых соединений на 20...25%.

В целом проведенные исследования показали, что использование при ремонте новых материалов и технологических подходов позволяет повысить работоспособность сварных соединений на 70...80%.

Разработка новых покрытых электродов типов Э-70, Э-85 и основных положений технологии монтажной и ремонтной сварки конструкций из высокопрочных сталей. Результаты исследований послужили основой для создания новых универсальных и высокопроизводительных электродов марок АНП-9 и АНП-6П применительно к сварке и ремонту конструкций из высокопрочных сталей повышенной хладостойкости. В качестве сердечника электродов используется проволока марки Св-03А. Основные легирующие элементы и микролегирующие добавки введены в состав покрытия электродов. Верхний предел содержания ПАМ в покрытии электродов (2,5%) ограничивали исходя из необходимости обеспечения хорошей отделимости шлака с поверхности корневого валика шва.

С учетом решения задачи повышения хладостойкости металла шва при одновременном обеспечении требуемых прочностных свойств и сопротивляемости сварных соединений замедленному разрушению разработаны электроды АНП-9 (тип Э-85). Высокоосновное покрытие электродов АНП-9, отличающееся повышенной окислительной способностью после высокотемпературной прокалки ($T = 450 + 20^{\circ}\text{C}$, $t = 2$ ч) обеспечивает низкое содержание водорода в наплавленном металле ($[H]_{\text{диф.}} < 5,0 \text{ мл}/100\text{г}$.) Металл швов, выполненный электродами АНП-9, содержит 0,7...0,9% Mn, 2,6...2,8% Ni и обеспечивает требуемый комплекс механических свойств: $\sigma_{0,2} = 780...810 \text{ МПа}$, $\sigma_b = 860...985 \text{ МПа}$, $\delta_5 = 16...18\%$, $\phi = 58...64\%$, $KCV = 35...58 \text{ Дж}/\text{см}^2$ ($T = -60^{\circ}\text{C}$), а также

высокую его сопротивляемость зарождению и развитию вязкого разрушения ($\delta_c = 0,16 \dots 0,18\%$).

С целью повышения циклической прочности сварных соединений высокопрочных сталей созданы высокопроизводительные электроды АНП-6П (а.с. 1821319). При их разработке использована шлаковая система $SiO_2-MnO-TiO_2-CaF_2$. Введение в состав покрытия железного порошка и определенного количества остальных компонентов позволяет обеспечить плавное сопряжение между швом и основным металлом, а также более высокую, по сравнению с электродами АНП-2, производительность сварки (в 1,6...1,8 раза) при сохранении необходимого уровня прочности и хладостойкости металла шва: $\sigma_{0,2} = 600 \dots 650$ МПа; $\sigma_B = 710 \dots 760$ МПа; $\delta_5 = 16 \dots 20\%$; $\psi = 60 \dots 62\%$; $KCV = 34 \dots 40$ Дж/см² ($T = -40^\circ C$). Содержанием $[H]_{диф.}$ в наплавленном электродами АНП-6П металле не превышает 7,5 мл/100г.

Разработаны рекомендации по технологии сварки металлоконструкций из высокопрочных низколегированных сталей новыми материалами, обеспечивающими повышенную трещиностойкость соединений. При сварке электродами АНП-6П сталей типа 13ХГМРБ и 12ГН2МФАЮ скорость охлаждения сварных соединений ($W_6/5$) не должна превышать 22 и 25 $^\circ C/s$ соответственно. Трещины в конструкциях из сталей типа 14ХГН2МДАФБ и 12ГН2МФАЮДР при сварке электродами АНП-9 будут отсутствовать если $W_6/5$ ограничить до 17 $^\circ C/s$. Эти данные позволяют рассчитать $Q_{св}$ и необходимую температуру предварительного подогрева сварных соединений.

Разработанные сварочные материалы и технологические рекомендации прошли всестороннее апробирование и внедрены при изготовлении, монтаже и ремонте изделий из высокопрочных сталей: металлоконструкций платформ и рам автомобилей БелАЗ грузоподъемностью 110 т из стали 13ХГМРБ на Костомукшском ГОКе; мостовых конструкций из стали 12ГН2МФАЮ на Мариупольском заводе металлоконструкций; балок-рукоятей карьерных экскаваторов РН-2300 из стали РОК 81 (РН 999) на Сибиргинском разрезе; рукоятей экскаваторов ЭКТ-10 и 12,5 на Полтавском ГОКе.

Общие выводы.

1. Высокая сопротивляемость замедленному и хрупкому ($KCV > 27$ Дж/см² при $T = -60^\circ C$) разрушениям бейнито-мартенситных швов низкоуглеродистых легированных сталей с $\sigma_{0,2} = 590 \dots 780$ МПа может быть

обеспечена при условии формирования мелкодисперсной структуры, что достигается за счет легирования металла шва марганцем, никелем, хромом, молибденом ($Mn-0,7...0,9\%$; $Ni-2,6...2,8\%$; $Cr-0,4...0,6\%$; $Mo-0,4...0,6\%$) и микролегирования магнием и алюминием ($Mg-0,025...0,05\%$; $Al<0,02\%$).

2. Микролегирование металла шва типа 08ХГНЗМ магнием и алюминием проявляется в изменении морфологии оксидных и сульфидных включений с образованием многофазных третичных оксисульфидов и уменьшении их размеров в 2,5...3,0 раза. Это приводит к диспергированию аустенитных зерен металла шва в 1,5...2,0 раза при одновременном повышении однородности последних и увеличению прочности металла шва на 20...30%, хладостойкости на 25...40% и сопротивляемости сварных соединений замедленному разрушению на 20...30%.

3. Увеличение продолжительности охлаждения сварных соединений в интервале температур 800 - 100 °С от 100 до 190 с и коэффициента формы шва с 5 до 7 при сварке электродами с особо толстым покрытием рутил-основного вида содержащим железный порошок способствует снижению концентрации диффузионного водорода ($[H]_{диф.100}$) в металле шва на 30...40% и повышению стойкости сварных соединений против образования холодных трещин.

4. Установлено, что использование электродов с покрытием рутил-основного вида (системы $SiO_2-MgO-TiO_2-CaF_2$) в отличие от электродов с покрытием основного вида (системы $SiO_2-CaCO_3-CaF_2$) обеспечивает уменьшение коэффициента концентрации напряжений в местах перехода от шва к основному металлу с 3,6 до 2,6. В сочетании со снижением твердости в металле ЗТВ на 10...15% это позволяет в 1,7...1,8 раза повысить усталостную прочность сварных соединений высокопрочных сталей.

5. Разработаны и внедрены в производстве новые электроды и технология ручной дуговой сварки конструкций из высокопрочных хладостойких сталей с $\sigma_{0,2} - 590...780$ МПа. Низководородные универсальные электроды марки АНП-9 (тип Э-85 ТУ ИЭС 836-92) и высокопроизводительные электроды АНП-6П (тип Э-70 ТУ ИЭС 574-86) апробированы при монтаже и восстановлении металлоконструкций горнорудной и дорожной техники и введены в руководящий документ по выбору материалов для изготовления и ремонта сварных стальных конструкций грузоподъемных кранов РД 22-16-93.

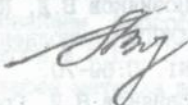
Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

1. Выбор сварочных материалов для выполнения угловых швов соеди-

- лений стали 13ХГМРБ / В.Ф. Мусияченко, Л.И. Миходуй, В.Д. Позняков и др. // Свароч. пр-во. -1987. -№9. -С. 29-31.
2. Свойства высокопрочной стали 12ГН2МФАЮ повышенной чистоты / Л.И. Миходуй, М.В. Мовчан, В.Д. Позняков и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. -1990. -№1. -С.99-106.
3. Миходуй Л.И., Касаткин С.В., Позняков В.Д. Повышение долговечности сварных соединений стали 14Х2ГМР выполненных ручной дуговой сваркой. // Автомат. сварка. -1990. -№1. -С.69-70.
4. Миходуй Л.И., Мельник И.С., Позняков В.Д. Сопротивляемость замедленному разрушению низколегированных швов при сварке высокопрочных сталей с пределом текучести свыше 600 МПа // Там же. -1990. -№2. -С.14-20.
5. Влияние содержания серы, фосфора и РЗМ на структуру и свойства высокопрочных швов / Л.И. Миходуй, М.В. Мовчан, И.С. Мельник, В.Д. Позняков // Там же. -1990. -№12. -С.11-16.
6. Сопротивление усталости сварных соединений высокопрочной стали 14Х2ГМР, выполненных ручной дуговой сваркой / Л.И. Миходуй, С.В. Касаткин, В.Д. Позняков и др. // Пробл. прочност. -1990. -№10. -С.19-22.
7. Высокопроизводительные электроды для сварки низколегированных сталей с пределом текучести 350 и 600 МПа /А.М. Бейниш, В.В. Юрлов, В.Д. Позняков и др. // Прогрессивные методы получения сварных соединений из конструкционных сталей и чугунов: Сб. науч. тр. -Киев: ИЭС чм. Е.О.Патона, 1990. -С.59-64.
8. Свариваемость высокопрочной стали 12ГН2МФАЮДР-СП / Л.И. Миходуй, А.К. Ющенко, В.Д. Позняков и др. // Автомат. сварка. -1991. -№11. -С.12-16
9. Миходуй Л.И., Позняков В.Д., Мельник И.С. Особенности замедленного разрушения сварных соединений стали 12ГН2МФАЮ с различным содержанием примесей // Там же. -1991. -№12. -С.16-20.
10. А.с. 1232442 СССР, МКИ В 23К 28/00. Способ испытания на склонность к образованию холодных трещин. / В.Ф. Мусияченко, С.Л. Жданов, Л.И. Миходуй, В.Д. Позняков. - Оpubл. 24.09.84. Бюл. N.
11. А.с. 1821319 СССР, МКИ В 23К 35/365. Сварочный электрод. / А.М. Бейниш, В.Д. Позняков, И.Р. Явдошин и др. - Оpubл. 15.06.93. Бюл. N22
12. Ус С.А., Миходуй Л.И., Позняков В.Д. Влияние содержания диффузионного водорода и скорости охлаждения на структуру и микромеханизм разрушения образцов стали 14Х2ГМР // Сб научных трудов: Трещи-

ны в сварных соединениях. - Братислава, 1991. - С. 55-59.

Личный вклад автора. В работах [1,3-7,9,11], выполненных в соавторстве, диссертанту принадлежит основной вклад в проведении экспериментов и обработке их результатов. В работах [2,8,10,12] диссертанту принадлежит основной вклад в постановке и проведении экспериментов.



АНОТАЦІЯ

Позняков В.Д. "Технологія ручного дугового зварювання конструкцій з високоміцних холодостійких сталей з $60,2-590...780$ МПа"; рукопис дисертації на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 "Технологія та устаткування для зварювання та споріднених процесів", Інститут електрозварювання ім.Є.О.Патона НАН України, Київ, 1996 р. Захищаються 12 наукових робіт, які містять теоретичні та експериментальні дані по впливу мікрولةгування на формування структури і механічних властивостей металу швів, а також опору уповільненому руйнуванню зварних з'єднань високоміцних низьколегованих сталей з границею текучості $590...780$ МПа, виконаних ручною дуговою зваркою. Розроблені метод оцінки довговічності зварних вузлів, принципи технології монтажної та ремонтної зварки конструкцій з низьковуглецевих легованих сталей

На підставі проведених досліджень розроблені нові зварювальні матеріали та технологія ручного дугового зварювання. Вони використані при монтажі та ремонті зварних конструкцій, що дозволило підвищити їх експлуатаційну надійність

Ключові слова: високоміцні низьколеговані сталі, зварні з'єднання, мікрولةгування, уповільнене руйнування, довговічність, ремонт, монтаж.

ABSTRACT

Poznyakov V.D. "The technology of manual arc welding of structures of high-strength cold-resistant steels with $60,2-590...780$ MPa; manuscript of thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences on the speciality 05.03.06 "Technology and equipment for welding and allied processes", the E.O.Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kiev, 1996. 12 research works are defended which include theoretical and practical studies of peculiarities of formation of structure and properties of weld metals, as well as the resistance to the delayed and fatigue fracture of the $590...780$ MPa yield strength high-strength alloyed steel welded joints, made by the manual arc welding. The method of evaluation of welded elements life and the principles of the technology of site and repair welding of structures of the low-carbon alloyed steels have been developed.

The new welding consumables and the technology of the manual arc welding have been developed on the basis of the carried out studies. They were used in erection and repair of the welded structures of the high-strength alloyed steels, thus permitting to increase their service reliability.

Keywords: high-strength alloyed steels, welded joints, delayed fracture, life, repair, erection.

Підл. до друку 12.05.96. Формат 60x84/16. Пап. офс. № 2. Офс. друк.
Ум. друк. арк. 0,93. Ум. фарбо-відб. I, I6. Обл.-вид. арк. 0,96.
Тираж 100 прим. Зам. 6-II40.

ІЕС Ім. Є.О.Патона, 252650 Київ 5, МСП, вул. П.Радомського, 69.
ВОО ІЕС Ім. Є.О.Патона, 252650 Київ 5, МСП, вул. П.Радомського, 69.

448074

AB 34.931

AB 34.931