

БИ ВЭНЦЮНЬ

**ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ**

Специальность 05.26.03 – «Пожарная и промышленная безопасность»
(Нефтегазовая отрасль)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа - 2004

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Нефтегазопроводы являются опасными производственными объектами. В процессе их длительной эксплуатации происходит старение металла, коррозия наружной и внутренней поверхности труб и, как следствие, их разрушение с экономическими и экологическими последствиями.

В России эксплуатируются системы магистральных трубопроводов протяженностью более 240 тыс. км. В Китае функционируют 9700 км магистральных нефтепроводов и 10030 км газопроводов, а в следующее десятилетие планируется построить соответственно 7500 и 24570 км, в том числе с участием строительных фирм России.

Трубопроводы в силу своего функционального назначения в условиях эксплуатации подвергаются одновременному воздействию статических и повторно-статических (малоцикловых) нагрузок от колебаний давления перекачиваемого продукта, температуры и других силовых факторов при одновременном действии коррозионной среды, приводящих в совокупности к коррозионной усталости металла.

Фундаментальные и прикладные исследования, проводимые в последние десятилетия в области физико-химической механики материалов, убедительно показывают, что надежность и долговечность трубопроводов в реальных условиях эксплуатации определяются не только качеством металла, но и специфической самопроизвольных механоэлектрохимических процессов, которые возникают за счет формирования на их поверхности гетерогенности механических и электрохимических свойств металла при одновременном воздействии агрессивных сред различной степени активности и механических напряжений. Такое сочетание внешних факторов может значительно ускорить механохимические разрушения трубопроводов, долговечность которых в этом случае определяется механохимической стойкостью металла. В наибольшей степени разрушениям такого рода предрасположены участки поверхности труб, имеющие конструктивные элементы в виде концентраторов напряжений, среди которых, в первую

очередь, следует выделить сварные соединения. Они имеют высокую электрохимическую гетерогенность, связанную с макро- и микроструктурной неоднородностью отдельных зон (металл шва, зона термического влияния и основной металл), неравномерным распределением остаточных напряжений в этих зонах, физической и геометрической концентрацией напряжений, зависящей от формы и размеров шва и его дефектов. Поэтому, как показывает анализ аварийных разрушений металла труб, очагом зарождения трещин очень часто является сварной шов или зона термического влияния. Представляется, что отмеченная неоднородность свойств металла зон сварных соединений может быть существенно снижена за счет рационального выбора сварочных электродов, в том числе импортных поставок.

В связи с этим обеспечение промышленной безопасности линейной части трубопроводов нефтегазовой отрасли, продление срока их службы во многом связано с проблемой повышения коррозионно-механической прочности сварных соединений.

Цель работы

Повышение ресурса безопасной эксплуатации сварных соединений нефтегазопроводов за счет рационального выбора сварочных материалов производства России и Китая.

Основные задачи исследований:

1. Исследование микроструктуры, определение твердости, микротвердости сварных соединений из сталей 10, 20 и 17Г1С.
2. Исследование коррозионной стойкости зон сварных соединений в 3-х % растворе NaCl, выполненных электродами с рутиловым и основным видами покрытий производства России и КНР.
3. Изучение механохимической коррозии сварных швов при статическом растяжении.
4. Исследование циклической трещиностойкости и остаточного ресурса металла продольного сварного шва трубы, изготовленной из стали класса прочности X70.

Методы исследований

Поставленные задачи решались путем проведения экспериментальных исследований физико-механических и электрохимических характеристик металла и определения малоциклового коррозионно-усталостной долговечности сварных соединений. При этом были использованы стандартные методы определения механических свойств, микротвердости, макро– и микроструктуры металла, а также оригинальные методики изучения коррозионных и механохимических свойств сварных соединений.

На защиту выносятся результаты исследований механохимических свойств сварных соединений из стали 20, выполненных ручной электродуговой сваркой электродами производства России и Китая, а также характеристики циклической трещиностойкости сварного шва труб из стали X70.

Научная новизна:

1. Исследованы особенности механохимического поведения металла сварных швов, выполненных электродами с рутиловым и основным покрытием производства России и КНР, позволяющие определять их скорость коррозии и ресурс в реальных условиях эксплуатации трубопроводов.

2. Получена аналитическая зависимость скорости роста усталостной трещины в металле сварного шва от коэффициента интенсивности напряжений, объединяющая стадии ее замедленного и стабильного роста, позволяющая рассчитывать с большей точностью остаточный ресурс оборудования, эксплуатируемого в условиях малоциклового коррозионной усталости.

Практическая значимость и реализация результатов работы

Результаты исследований позволяют повысить стойкость сварных соединений нефтегазопроводов в условиях механохимической коррозии и, соответственно, безопасность их эксплуатации.

Апробация работы

Основные результаты и положения работы докладывались и обсуждались на: III конгрессе нефтегазопромышленников России (Уфа, 2001 г.); VI международной научно-технической конференции (Уфа, 2002 г.); Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и спе-

циалистов «Трубопроводный транспорт нефти и газа» (Уфа, 2002 г.); 53-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ (Уфа, 2002 г.); 54-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ (Уфа, 2003 г.); II Всероссийской учебно-научно-методической конференции «Реализации государственных образовательных стандартов при подготовке инженеров – механиков: проблемы и перспективы» (Уфа, 2003 г.); IV конгрессе нефтегазопромышленников России (Уфа, 2003 г.); II Международной научно технической конференции (Уфа, 2004 г.).

Публикации

По результатам выполненных исследований опубликовано 9 печатных работ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и основных выводов и рекомендаций, содержит 103 страниц машинописного текста, 15 таблиц, 30 рисунков, библиографический список использованной литературы из 104 наименований.

Автор выражает благодарность кандидату технических наук, доценту Худякову Михаилу Александровичу как научному консультанту.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации. Сформулированы цель и основные задачи исследования.

В первой главе на основе работ И.Г. Абдуллина, Э.М. Гутмана, А.Г. Гумерова, А.Г. Гареева, Р.С. Зайнуллина, О.М. Иванцова, О.И. Стеклова, М.Ф. Фокина и др. рассмотрены и проанализированы проблемы надежности и коррозионно-механической прочности сварных соединений трубопроводов, а также вопросы, связанные с аварийными разрушениями линейной части магистральных нефтепроводов. Данная проблема актуальна не только для России, но и для развивающихся трубопроводных систем Китая.

На сегодняшний день существуют несколько крупных совместных проектов строительства магистральных газонефтепроводов из России и Казахстана в КНР (нефтепровод от Ангарска до месторождения Дацин в Китае, протяженностью 3 тыс. км, планируемый объем транспортировки нефти более 20 млн т. в год; газопровод из Якутии в Китай до города Жичжао на берегу Желтого моря, протяженностью 3,5 тыс. км, объем транспортировки газа 200 млрд м³ в год; нефтепровод из города Атырау до западной границы Китая Арашанкон, протяженностью около 3,5 тыс. км).

Как правило, разрушения сварных конструкций, в том числе электросварных труб, начинаются с концентраторов напряжений и могут проходить по основному металлу (по рискам, вмятинам, царапинам) вдали от сварного шва вдоль образующей трубы, по шву или линии перехода от шва к основному металлу с распространением разрыва в тело трубы. Разрушение может распространяться и на соседнюю трубу, пересекая кольцевой монтажный сварной шов. Основным видом разрушения спиральношовной трубы является разрыв по линии перехода спирального шва к основному металлу. Пример разрушения прямошовной трубы по линии перехода от шва к основному металлу приведен на рисунке 1.



Рисунок 1 - Вид разрушения прямошовной электросварной трубы

К дефектам сварных соединений, часто встречающимся на трубопроводах, относятся непровары, смещения кромок, поры, неметаллические включе-

ние и трещины. На рисунке 2 приведена макроструктура кольцевого монтажно-го сварного шва с дефектами.



Рисунок 2 - Поры и смещение
кромки

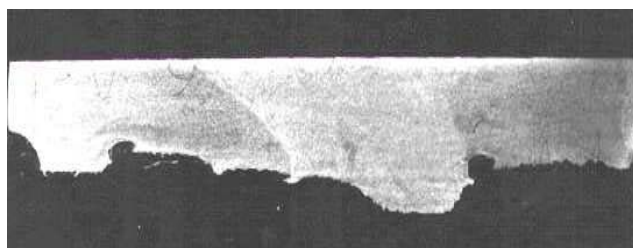


Рисунок 3 - Коррозия сварного
соединения

Виды и особенности коррозионных разрушений трубопроводов, сопротивляемость коррозии сварных соединений определяются свойствами основного металла и сварного шва, напряженным состоянием, агрессивностью коррозионной среды и условиями взаимодействия сварных соединений со средой.

Сварные соединения представляют собой сложную физико-химическую, механическую и электрохимическую макро- и микрогетерогенную систему со следующими характерными видами неоднородности: структурно-химическая макро- и микронеоднородность зон (основной металл, литой металл шва, зона термического влияния); неоднородность напряженного состояния - собственные (остаточные сварочные напряжения и пластические деформации) и от внешней нагрузки; геометрическая неоднородность, обусловленная наличием технологических концентраторов напряжений (граница шва и основного металла, дефекты формы шва - подрезы, непровары и др.) и конструктивных концентраторов напряжений, определяемых геометрическими параметрами шва.

В зависимости от характера распределения значений электродных потенциалов в сварном соединении возможны случаи, когда шов является катодом, коррозии в этом случае подвергается основной металл (рисунок 3). Второй случай, когда шов является анодом, наиболее опасный, так как приводит к локальному растворению шва и образованию концентратора напряжений. Управлять электрохимической неоднородностью, а, следовательно, стойкостью сварного

соединения можно путем рационального выбора режимов сварки и сварочных материалов, изменением напряженного состояния трубопровода.

В процессе эксплуатации нефтепроводов возможны технологические и аварийные отключения насосных агрегатов или изменение режима их работы. Вызываемые этим колебания давления в трубопроводе приводят к циклическому изменению напряжений в теле трубы. При одновременном действии коррозионной среды в зонах концентраторов напряжений возникают условия для малоциклового коррозионной усталости металл труб. Долговечность трубопроводных систем в этом случае будет определяться временем до зарождения усталостной трещины и скоростью ее роста. На первой стадии происходит накопление микроповреждений кристаллической решетки вследствие движения дислокаций и последующего зарождения трещины. На второй стадии трещина стабильно растет до критического размера и переходит в третью стадию механического разрыва. Продолжительность каждой стадии зависит от напряженного состояния металла труб, частоты изменения давления и температуры перекачиваемого продукта, действия коррозионных сред и поляризации металла при катодной защите магистральных нефтепроводов. Таким образом, для оценки истинного ресурса трубопровода необходимо учитывать циклический характер изменения напряженного состояния металла и особенности коррозионного разрушения сварных соединений.

Несмотря на достигнутые успехи в повышении промышленной безопасности трубопроводных систем, некоторые вопросы, касающиеся коррозионно-механической прочности сварных соединений, остаются открытыми и частично решаются в данной работе.

Результаты анализа, проведенного в первой главе, позволили сформулировать цель работы, задачи исследований и основные положения, выносимые на защиту.

Во второй главе приведены стандартные и оригинальные методики проведения исследований. К ним относятся методы определения основных механических свойств металлов при испытаниях на растяжение и ударный изгиб;

твердости и микротвердости; исследования малоциклового коррозионной усталости; макро- и микроструктурного анализа; электрохимические и механохимические исследования.

В частности, механохимические исследования проводились на образцах сварных соединений из стали 20, выполненных электродами производства России марок УОНИ 13/55(Б), МР-3(Р) и Китая марок Е4303, Е5015, в условиях одновременного воздействия на них активных сред и механических растягивающих напряжений, создаваемых разрывной машиной Р-5. Запись кривой растяжения сварного шва велась с одновременной фиксацией значений электродных потенциалов металла или величины тока.

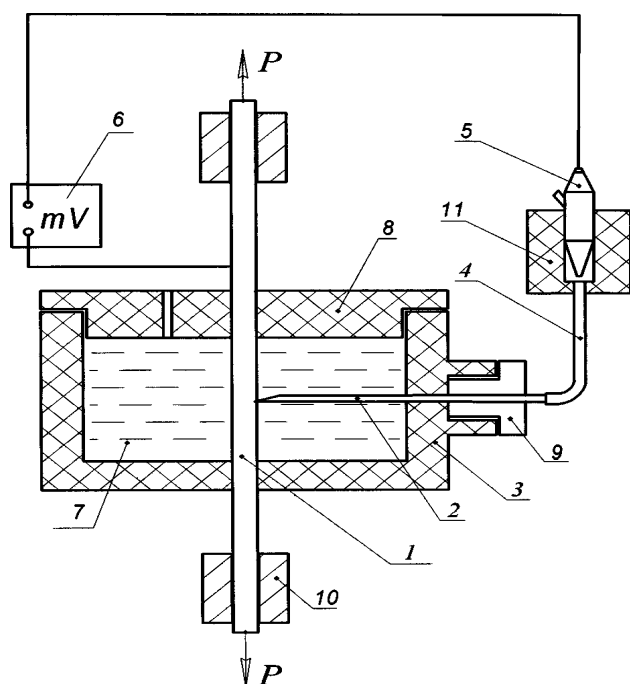
Испытания проводились на образцах типа XII, изготовленных согласно ГОСТ 9669-60, рабочая поверхность которых предварительно шлифовалась. Растяжение образцов осуществлялось в 3-х % среде NaCl (рН 7) в специально спроектированной и изготовленной электрохимической ячейке с постоянной скоростью деформации 0,1 мм/мин, что соответствует реальным скоростям нагружения. Кончик капилляра, заполненного агар-агаром, подводился к металлу сварного шва в центр галтели образца. Значение электродного потенциала определялось относительно хлорсеребряного электрода сравнения марки ЭВЛ-1МЗ.

Скорость анодного растворения определяли путем регистрации силы тока между деформируемым и аналогичным ему недеформируемым образцом, играющим роль катода в модели коррозионной пары.

Схемы электрохимических ячеек с образцом, в зависимости от условий испытаний, приведены на рисунках 4 и 5.

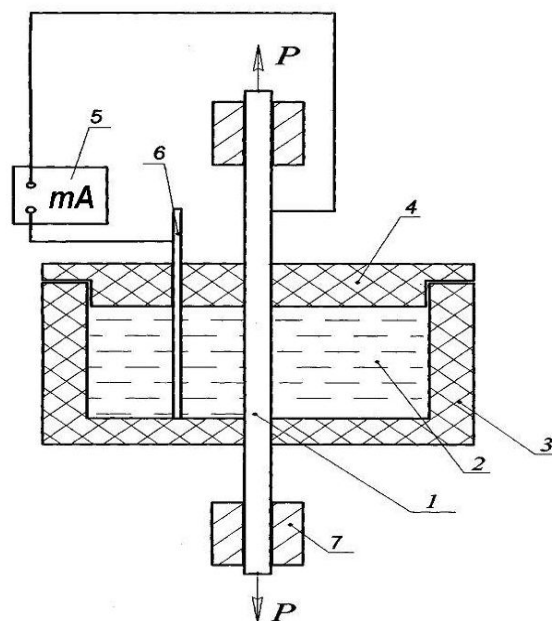
Испытания на малоцикловую коррозионную усталость сварных соединений проводились на плоских образцах размером 480x38x11 мм на усталостной машине (рисунок 6) по схеме чистого изгиба. В основу принципа действия испытательной машины для изучения малоциклового усталости положен жесткий вид нагружения - контролируемым параметром циклического нагружения является амплитуда деформаций.

В работе применялся отнулевой цикл нагружения с частотой 50 циклов в



1 – образец; 2 – капилляр; 3 – корпус; 4 – трубка; 5 – электрод сравнения (ЭВЛ); 6 – мультиметр; 7 – раствор 3% NaCl; 8 – крышка; 9 – пробка; 10 – захваты разрывной машины Р-5; 11 – стакан.

Рисунок 4 - Схема электрохимической ячейки для измерения электродного потенциала



1 – образец; 2 – раствор 3% NaCl; 3 – корпус; 4 – крышка; 5 – мультиметр; 6 – вспомогательный электрод; 7 – захваты разрывной машины Р-5.

Рисунок 5 - Схема электрохимической ячейки для измерения тока



Рисунок 6 - Машина для испытания образцов на малоцикловую коррозионную усталость

минуту. Величина деформации $\epsilon = 0,24\%$ устанавливалась рычажным деформометром Гугенберга и соответствовала реальным величинам штатных заво-

дских сварных соединений электросварных труб. Исследования проводились на воздухе и в водном растворе 3 % NaCl. Длина трещины измерялась при помощи микроскопа МБС-9 при десятикратном увеличении.

В третьей главе приведены результаты исследований макро- и микроструктуры, механических свойств, макро- и микротвердости сварных соединений, а также определены значения скорости коррозии сварных соединений, выполненных электродами марок УОНИ 13/55(Б), МР-3(Р), Е4303, Е5015.

Для сооружения и ремонта трубопроводов широко используются углеродистые конструкционные качественные стали марок сталь 10, сталь 20, низколегированная 17Г1С производства России и сталь класса прочности Х70 производства Китая. Они обладают высокой вязкостью, свариваемостью и малой склонностью к старению, что дает возможность получать сварные соединения с высокими механическими свойствами.

Образцы для испытаний, выполненные различными электродами, отбирались из металлоконструкций производства России и Китая, изготовленных по стандартным технологиям.

Исследования макроструктуры сварных соединений показали отсутствие дефектов металлургического происхождения.

Сварка в производственных условиях проводилась за три прохода. Наружный слой шва, полученный за третий проход, имеет дендритную структуру. Металл первого и второго слоев подвергался термическому воздействию от выполнения последующего слоя. Поэтому в макроструктуре шва дендриты в этих слоях не наблюдаются.

Исследуемые стали являются доэвтектоидными и имеют ферритно-перлитную структуру (рисунок 7). Микроструктура стали 10 имеет равноосные зерна, что характерно для горячедеформированного металла.

В сталях 20 и 17Г1С наблюдается ярко выраженная строчечность, направление которой совпадает с направлением прокатки листа.

Микроструктура швов имеет дендритное строение, причем швы, выполненные электродами марок УОНИ 13/45 и МР-3, имеют более крупные дендриты, чем после сварки электродами Е 4303 и Е 5015.

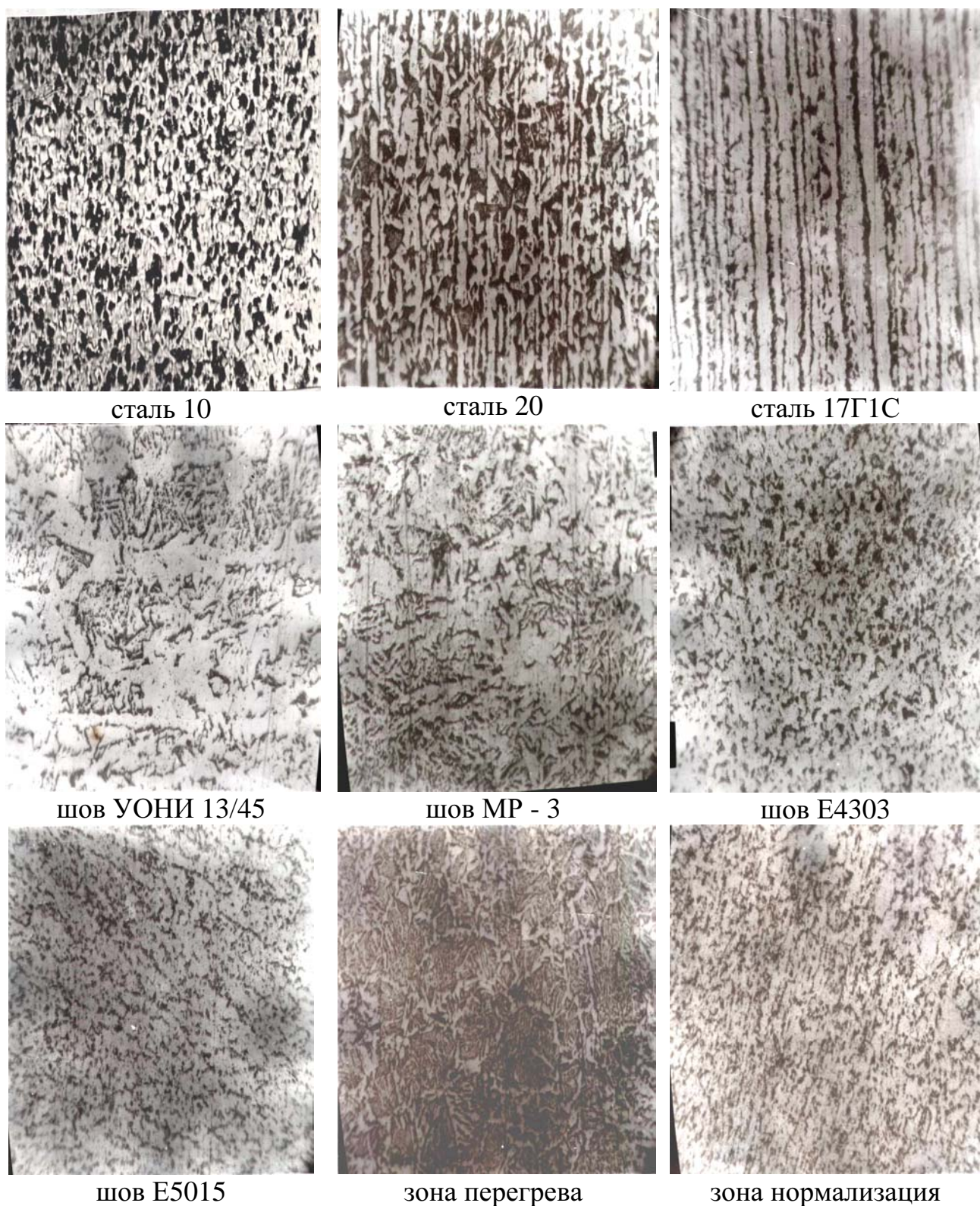


Рисунок 7 - Микроструктура сварных соединений (X 200)

Зона перегрева имеет крупнозернистую видманштеттовую структуру, а зона нормализации, где прошла полная фазовая перекристаллизация, мелкозернистую.

В диссертационной работе проводилось измерение твердости по зонам сварных соединений, полученных различными марками электродов. Результаты измерений твердости приведены в таблице 1.

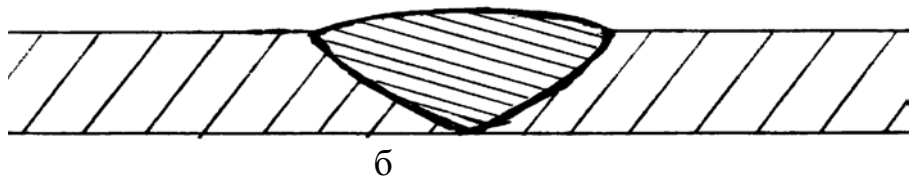
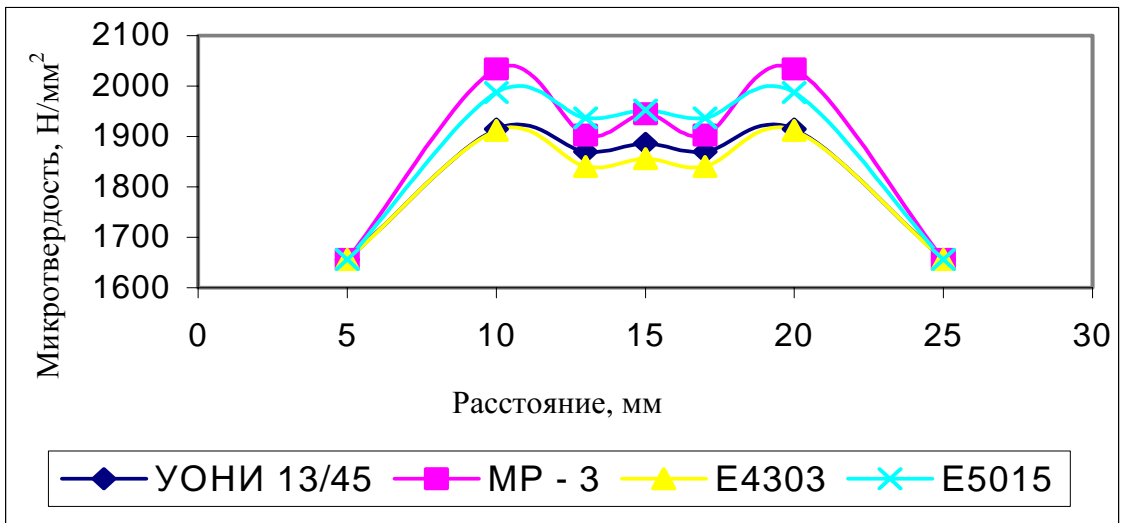
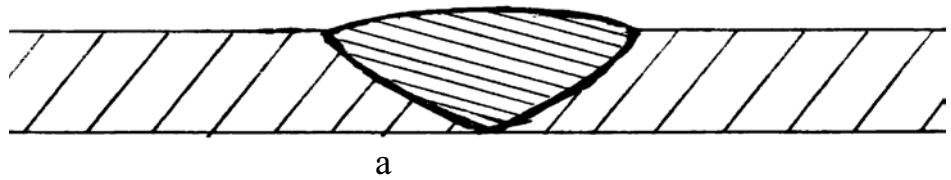
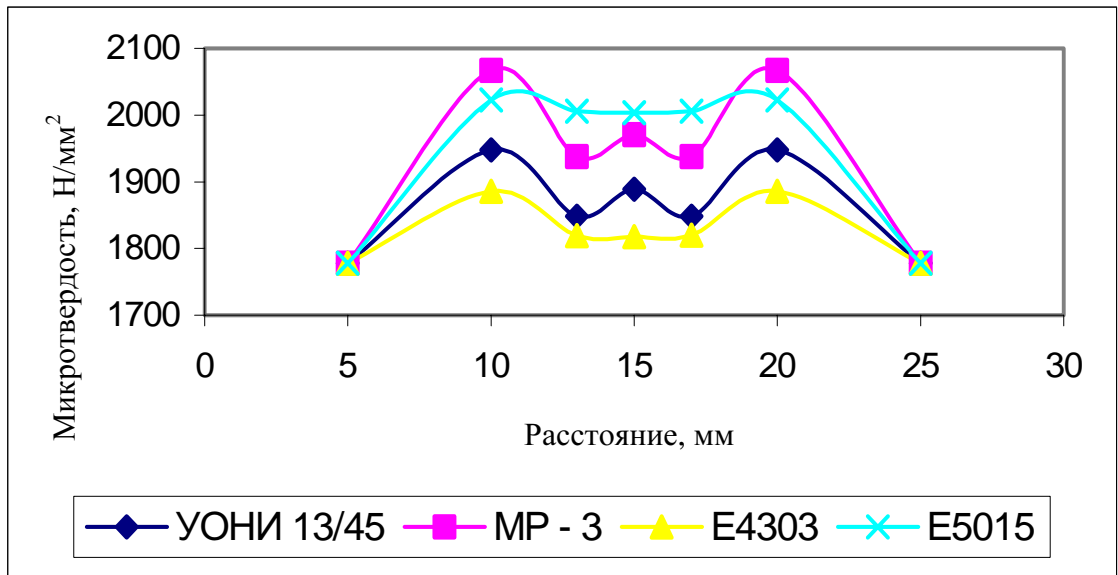
Таблица 1 - Твердость по зонам сварного соединения, НВ

Марка электрода	Марка стали, класс прочности	Шов	ЗТВ	Основной металл
УОНИ 13/55	Сталь 10	192	213	168
	Сталь 17Г1С	192	210	192
	Сталь 20	186	201	171
MP-3	Сталь 17Г1С	213	217	192
	Сталь 20	197	213	171
E4303	Сталь 17Г1С	197	208	192
	Сталь 20	192	197	171
E5015	Сталь 17Г1С	222	255	192
	Сталь 20	208	228	171
-	X70	226	221	225

Значения твердости зон для всех сварных соединений стали 17Г1С выше, чем стали 20. Наибольшая твердость наблюдается в зоне термического влияния, при этом сварной шов имеет более высокую твердость, чем основной металл. ЗТВ и сварной шов, выполненный электродом марки E5015, являются более твердыми по сравнению с твердостью других сварных соединений.

Распределения микротвердости по зонам сварных соединений приведены на рисунке 8.

Анализ полученных результатов показывает, что наименьшую разность микротвердости по зонам сварного соединения (шов – ЗТВ) дает электрод марки E5015, а по зонам (шов – ЗТВ – основной металл) дает электрод E4303.



а - сталь 17Г1С; б - сталь 20

Рисунок 8 - Распределение микротвердости в сварных соединениях

Исследование коррозионного поведения сварных соединений в условиях, имитирующих эксплуатационные, проводили с помощью общепринятого электрохимического метода поляризации. Метод основан на определении скорости коррозии в единицах плотности тока, получаемых при снятии анодных и катодных поляризационных потенциостатических кривых с последующей тафелевской экстраполяцией. Исследования при комнатной температуре проводили в специально разработанной трехэлектродной электрохимической ячейке прижимного типа, имитирующей узкий зазор с затрудненным доступом кислорода воздуха. В качестве исследуемого электрода использовали швы и основной металл, в качестве вспомогательного электрода - платиновую пластину или платиновый электрод ЭТПЛ-1МЗ. Потенциал измерялся относительно хлорсеребряного электрода сравнения ЭВЛ-1МЗ через капилляр Лuggина, заполненного агар-агаром с 1Н раствором КСl. В качестве модельной среды использовали 3 % раствор NaCl. Результаты этих исследований приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Скорость коррозии сварных соединений в 3% NaCl, мм/год

Марка стали	Основной металл	Сварной шов			
		УОНИ 13/55	MP - 3	E4303	E5015
Сталь 10	0,17	0,19	-		
Сталь 20	0,25	0,34	0,21	0,21	0,36
Сталь 17Г1С	0,33	0,36	0,31	0,21	0,33

Результаты проведенных исследований показали, что с увеличением содержания углерода в сталях 10, 20 и легирующих элементов в стали 17Г1С скорость коррозии основного металла увеличивается и составляет соответственно 0,17, 0,25 и 0,33 мм/год, а наименьшую скорость коррозии имеют сварные швы, выполненные электродами E4303 и MP-3.

В четвертой главе приведены результаты исследований – кривые растяжения сварных швов, значения электродных потенциалов и плотности тока (рисунк 9).

При деформации образцов в упругой области (до 0,2 %) значения плотностей тока и электродных потенциалов практически не изменяются. На стадии

деформационного упрочнения идет резкое увеличение плотности тока и разблагороживание электродных потенциалов.

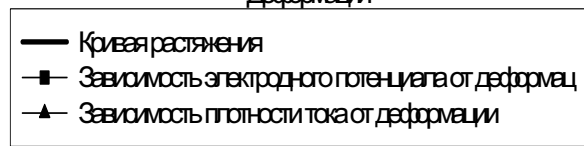
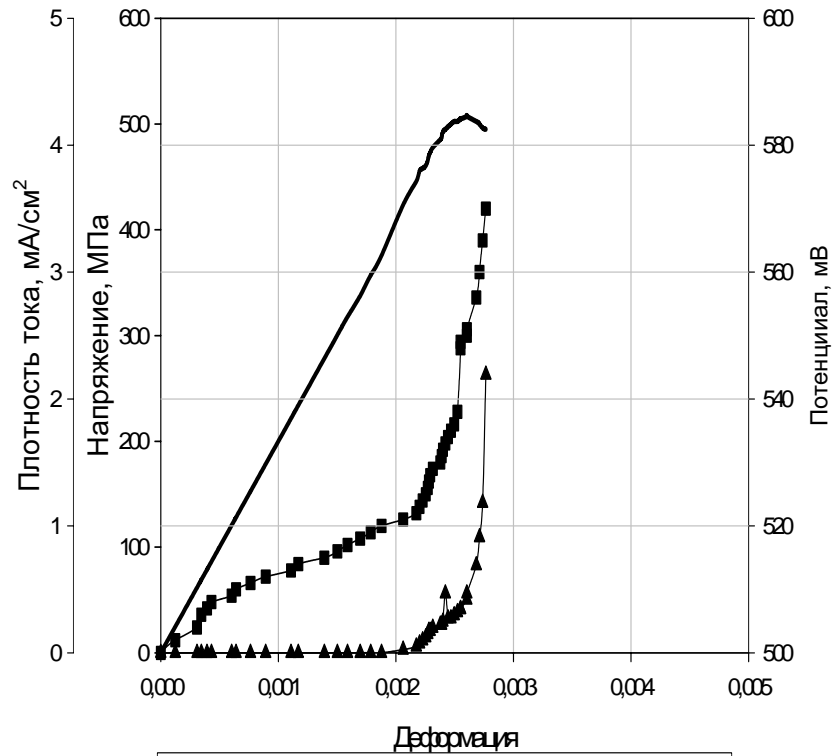
Это объясняется тем, что на стадии легкого скольжения основной вклад в деформацию дают дислокации, вышедшие на поверхность металла. На стадии деформационного упрочнения деформация осуществляется путем микросдвигов по линиям скольжения с образованием развитого микрорельефа на деформированной поверхности. Происходит почти линейное увеличение плотности дислокаций от степени пластической деформации с интенсивным возрастанием механохимического эффекта, что приводит к ускорению анодного растворения металла. Поскольку пластическая деформация металла при комнатной температуре осуществляется путем микросдвигов, то нет различия в течение локальных процессов при растяжении, сжатии, кручении, т.е. при различных видах деформации.

Сварные швы, выполненные электродами марок E4303 и МР-3, являются более стойкими против коррозионно-механического разрушения в условиях динамического нагружения, чем сварные швы, выполненные электродами марок E5015 и УОНИ 13/55. Один и тот же ток анодного растворения в первом случае фиксировали при значительно больших значениях пластической деформации.

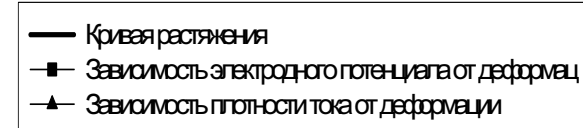
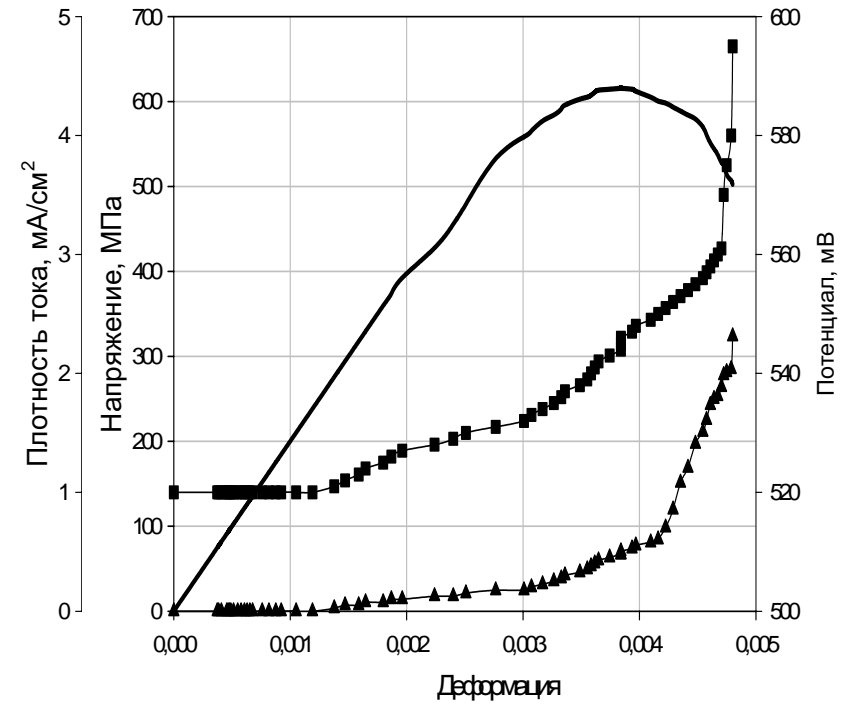
Таким образом, полученные экспериментальные кривые зависимости плотности тока и электродного потенциала от степени деформации согласуются с теоретическими представлениями о механохимических процессах на границе металл – электролит и дают возможность прогнозирования скорости коррозии деформированного металла по данным экспрессного определения величины механохимического эффекта в динамическом режиме нагружения.

Прогнозирование коррозионно-усталостной долговечности магистральных нефтепроводов осуществляется с использованием эмпирических зависимостей. Накопление повреждений до зарождения трещины описывается зависимостью Коффина-Мэнсона. На стадии стабильного роста трещины скорость ее

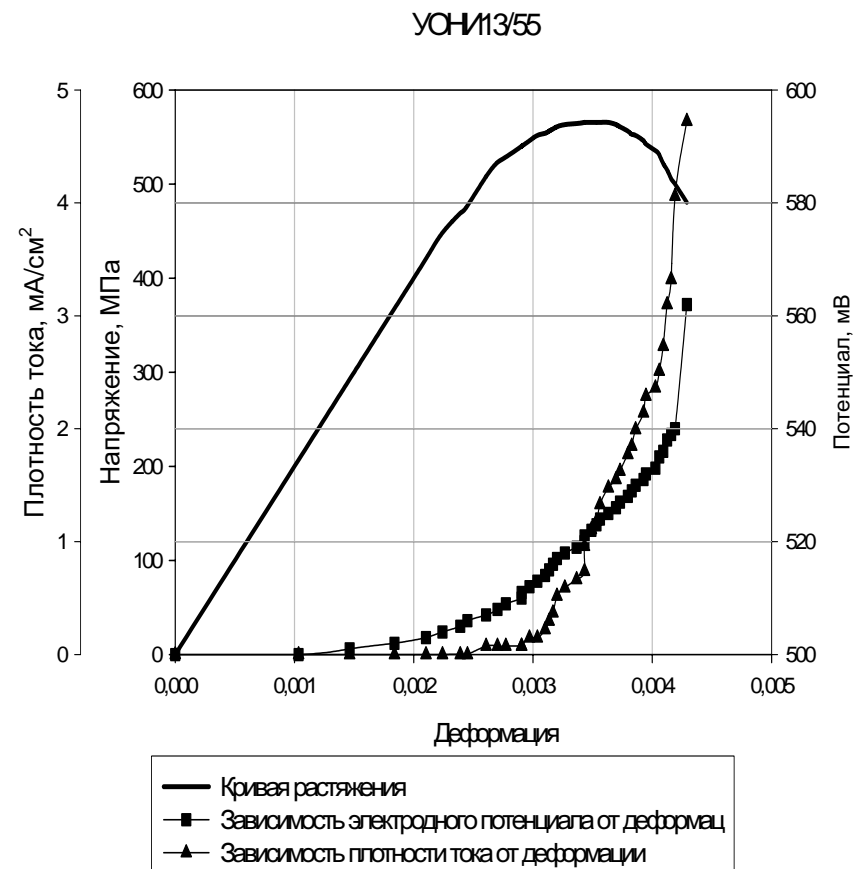
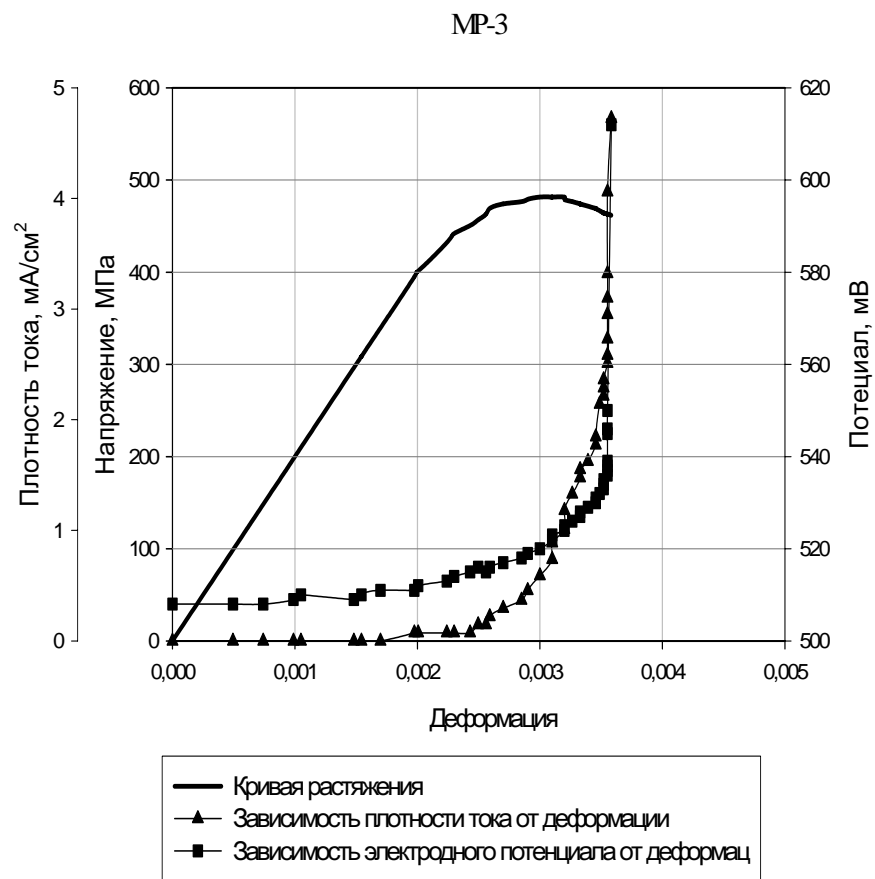
E4303



E5015



а



б

Рисунок 9 (а, б) - Зависимости растягивающих напряжений, электродных потенциалов и плотности тока от деформации сварных швов, выполненных электродами производства КНР (а) и России (б)

роста, в соответствии с положениями механики разрушения, описывается выражением:

$$\frac{dl}{dN} = f(\Delta K), \quad (1)$$

где dl – приращение длины трещины за количество циклов dN ;

ΔK – изменение коэффициента интенсивности напряжений.

Для сварного шва трубной стали класса прочности X70 экспериментально получены зависимости длины трещины от числа циклов нагружения (рисунок 10). Топография усталостной трещины, которая развивалась от концентратора напряжений в виде v – образного надреза, приведена на рисунке 11.

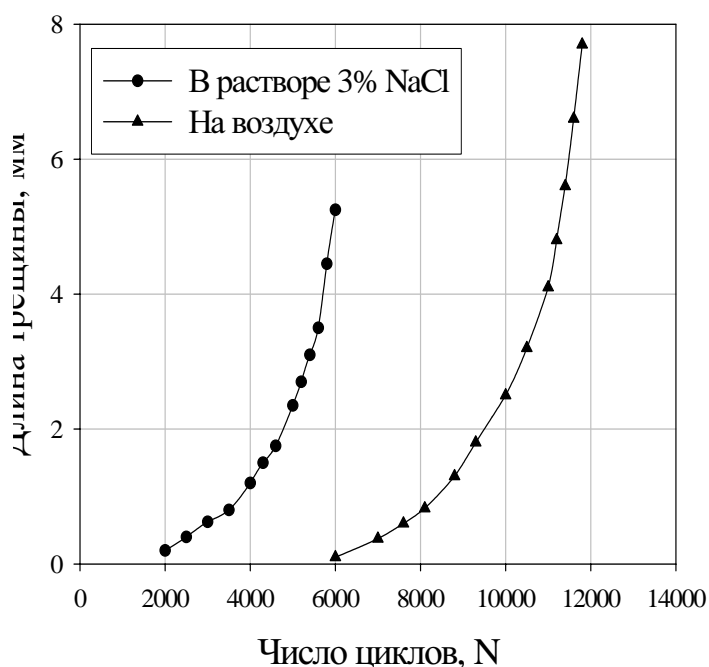


Рисунок 10 - Зависимость длины трещины от числа циклов

Рисунок 11 - Внешний вид трещины, X 20

Обработка экспериментальных данных, приведенных на рисунке 10, позволила получить зависимости скорости роста усталостных трещин от коэффициента интенсивности напряжений (рисунок 12).

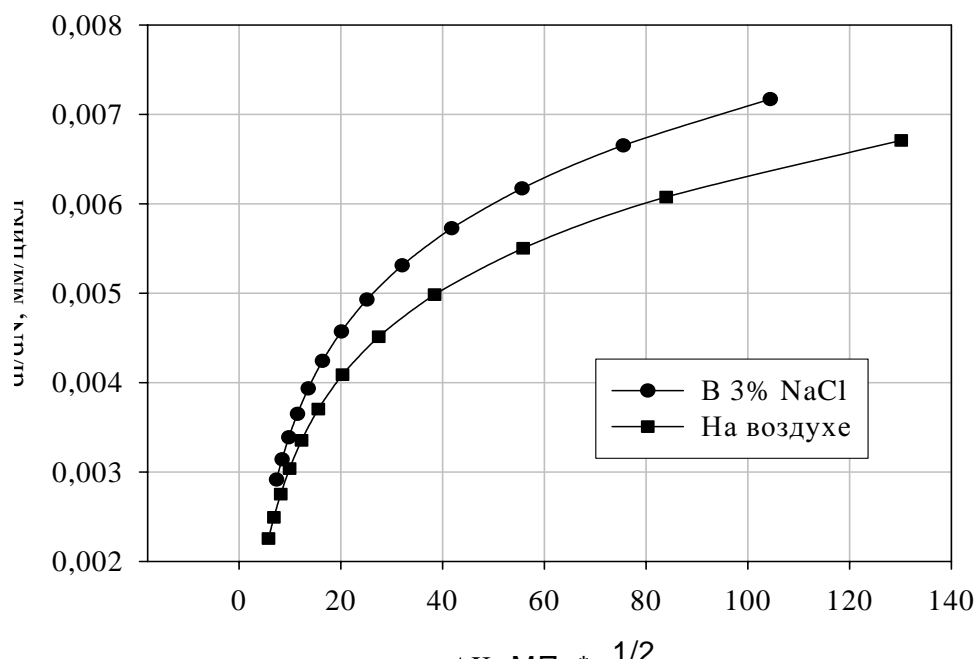


Рисунок 12 - Зависимости скорости роста трещин от коэффициента интенсивности напряжений

Полученная эмпирическая зависимость, в отличие от зависимости Пэриса (2), являются логарифмическими и описываются выражением

$$\frac{dl}{dN} = a + b \cdot \ln(p \cdot \Delta K), \quad (2)$$

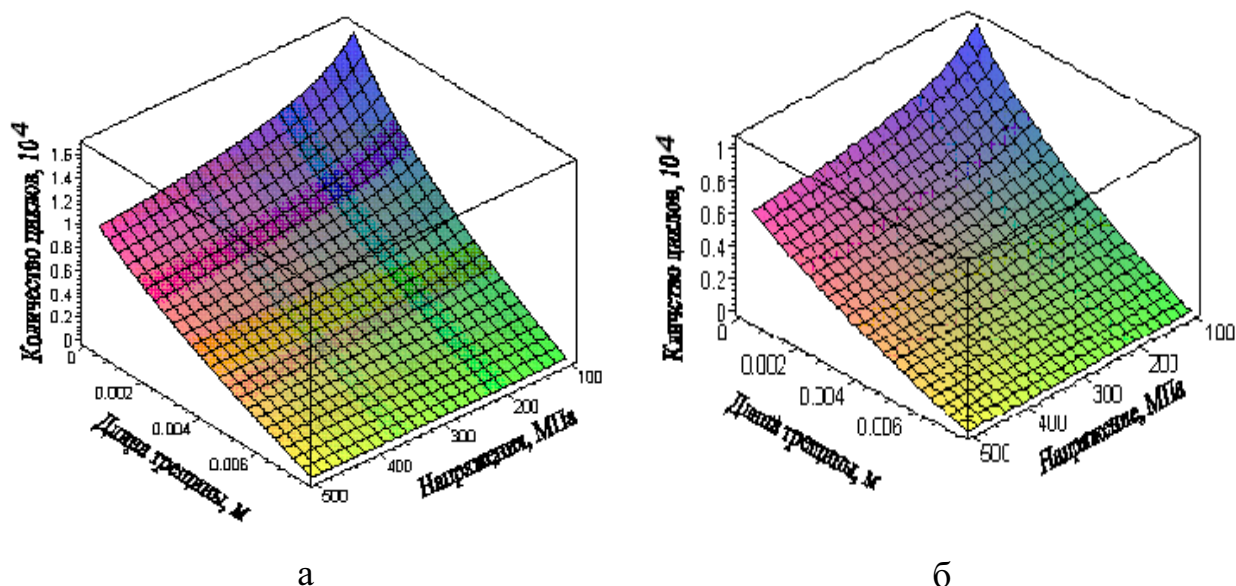
где p - единичный нормирующий множитель, $1/(\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2})$, a и b – эмпирические коэффициенты, полученные регрессионным анализом, значение которых приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Коэффициенты эмпирической модели, описывающей процесс роста усталостной трещины сварных швов из стали X70, м/цикл

Условия эксперимента	a	b
3% NaCl	-4,55E-08	2,56E-07
воздух	-2,16E-08	1,59E-07

Расчет остаточного ресурса проводили с использованием ЭВМ.

Полученные графические зависимости количества циклов нагружения от длины трещины и действующих напряжений на воздухе и в 3% NaCl приведены на рисунке 13.



а – на воздухе; б – в 3% NaCl
 Рисунок 13 – Остаточный ресурс металла трубы из стали X70

Использование найденной эмпирической зависимости и ее параметров позволяет рассчитать ресурс безопасной эксплуатации нефтегазопроводов из стали X70, имеющих различные дефекты в сварном шве.

ВЫВОДЫ

1. Выявлено распределение физико-механических свойств (микротвердость) и связанных с ними электрохимических свойств в сварных соединениях, полученных сварочными электродами производства РФ и КНР на сталях 10, 20 и 17Г1С, свидетельствующие о существенной гетерогенности контролируемых показателей по их зонам.

2. Установлено, что с увеличением в сталях содержания углерода и легирующих элементов наблюдается обоснованный с точки зрения механохимии металлов и сплавов рост скорости коррозии (сталь10 – 0,17 мм/год , сталь20 - 0.25 мм/год и сталь17Г1С - 0.33 мм/год), связанный с повышением прочности сталей и снижением их термодинамической устойчивости.

3. Наиболее высокую коррозионную стойкость имеют сварные швы, выполненные электродами производства КНР марки E4303, которая сравнима с коррозионной стойкостью швов, полученных электродами марки МР-3 производства России, что объясняется присутствием в составе покрытия, двуокиси

титана, соответствующим микролегированием металла шва и установленной в работе более однородной его микроструктурой.

4. Проведенными исследованиями установлено взаимосвязанное изменение растягивающих напряжений и электрохимических показателей в виде величин электродных потенциалов и плотностей анодного тока растворения в условиях одноосного механохимического нагружения в модельной среде 3% NaCl для сварных соединений, полученных различными сварочными материалами. При этом установлено, что по данным механохимических исследований электрод марки E4303 обеспечивает наибольшую коррозионную стойкость сварного шва по токовому показателю среди сравниваемых сварочных электродов.

5. Исследованиями циклической трещиностойкости металла сварного шва трубы из стали группы прочности X70 показано, что зависимость скорости роста трещины от коэффициента интенсивности напряжений подчиняется логарифмическому закону. Найденные эмпирические коэффициенты полученной в работе зависимости позволяют проводить расчет ресурса безопасной эксплуатации трубопроводов с различными дефектами в сварном шве.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Худяков М.А., Би Вэньцзюнь. Формирование физико-химической однородности сварных соединений трубопроводов. //III конгресс нефтегазовых промышленников России. Тезисы стендовых докладов (Уфа, 23-25 мая 2001 г.). – Уфа: ИПТЭР, 2001. - С. 4.

2. Худяков М.А., Би Вэньцзюнь. Повышение коррозионной стойкости сварных соединений металлоконструкций. // Проблемы строительного комплекса России: Материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. – Уфа: УГНТУ, 2002. - С. 108-109.

3. Худяков М.А., Би Вэньцзюнь. Влияние геометрических концентраторов напряжений на работоспособность нефтепроводов. // Трубопроводный транспорт нефти и газа: Материалы Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов. – Уфа: УГНТУ, 2002. - С. 167-168.

4. Худяков М.А., Би Вэньцзюнь. Коррозия сварных соединений из сталей 20 и 17Г1С. // Тезисы докладов 53-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Уфа: УГНТУ, 2002. - С. 73.

5. Би Вэньцзюнь, Худяков М.А. Влияние радиуса перехода от шва к основному металлу на долговечность сварных соединений трубопроводов. // Трубопроводный транспорт – сегодня и завтра: Материалы междунар. науч.-техн. конф.. – Уфа: УГНТУ, 2002. – С. 274 – 275.

6. Би Вэньцзюнь, Худяков М.А., Абдуллин И.Г. Коррозия сварных соединений трубопроводов из сталей 20 и 17Г1С. // Материалы IV конгресса нефтегазопромышленников России. – Уфа: РИА Центра «РИД», 2003. - С. 190 – 192.

7. Би Вэньцзюнь, Худяков М.А., Абдуллин И.Г. Коррозионно-механическая прочность сварных соединений из сталей 20 и 17Г1С. // Реализация государственных образовательных стандартов при подготовке инженеров – механиков: проблемы и перспективы: II Всерос. учеб.-науч.-метод. конф. – Уфа: УГНТУ, 2003. – С. 275 – 280.

8. Би Вэньцзюнь. Анализ микроструктуры и распределения твердости по зонам сварных соединений. // Материалы 54-й науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Уфа: УГНТУ, 2003. - С. 321 – 322.

9. Гареев А.Г., Худяков М.А., Би Вэньцзюнь. Определение остаточного ресурса стали X70 в условиях малоциклового усталости. // Новоселовские чтения: Материалы 2-й Междунар. науч. техн. конф. - Уфа: Изд-во УГНТУ, 2004. - С. 101.