

На правах рукописи



ДЕМЧЕНКО МАРИЯ ВЯЧЕСЛАВОВНА

**ИЗМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГИИ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ
СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ИЗ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ
(на примере нефтегазового оборудования)**

Специальность 05.16.09 – «Материаловедение»
(машиностроение в нефтегазовой отрасли)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2018

Работа выполнена на кафедре «Технологические машины и оборудование» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Кузеев Искандер Рустемович

Официальные оппоненты: **Панин Сергей Викторович**
доктор технических наук, профессор,
профессор РАН ФГБУН Институт физики
прочности и материаловедения СО РАН /
лаборатория механики полимерных
композиционных материалов, заведующий

Кусков Константин Викторович
кандидат технических наук,
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный
университет» / лабораторно-производственный
комплекс центра прикладных исследований и
инновационный разработок, начальник

Ведущая организация - Институт проблем машиностроения РАН,
филиал Федерального государственного
бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики Российской
академии наук» (г. Нижний Новгород).

Защита диссертации состоится «21» декабря 2018 г. в 14:00 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.289.05 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте <http://www.rusoil.net>.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Абуталипова Елена Мидхатовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Нефтегазовое оборудование работает в условиях существенного перепада температуры и давления технологических жидкостей, а также воздействия коррозионных сред различного состава. Одним из наиболее распространенных объектов нефтегазовой отрасли являются резервуары, структура металла которых при длительной эксплуатации подвержена деградации, что приводит к ускоренному истощению их ресурса работы. В связи с этим большое значение приобретает проведение мероприятий по продлению срока безопасной эксплуатации резервуара. Наиболее уязвимыми элементами конструкции резервуаров являются сварные соединения, поскольку они представляют собой геометрические и физические концентраторы механических напряжений, что обуславливает особенности адаптации структуры металла зон сварного соединения к воздействию внешних нагрузок. Существующие технологии изготовления резервуаров не лишены некоторых недостатков: неточность сборки, термомодеформационный процесс усадки металла сварных швов и др. Предельные значения параметров геометрии резервуара регламентируются отраслевой нормативной документацией. Тем не менее, при действии рабочих нагрузок развитие пластической деформации особенно характерно для зон смещения кромок и областей увода кромок вдоль сварных швов. В ходе многократных сливов и наливов продукта в металле резервуара развиваются процессы малоциклового усталости. Поскольку разрушение металла при малоциклового усталости обычно начинается с его приповерхностных слоев, особое значение приобретает мониторинг изменения рельефа поверхности сварных соединений резервуаров в процессе эксплуатации. Рекомендуемые нормативной документацией методы контроля деформационных дефектов поверхности металла не обеспечивают высокую точность диагностики их зарождения на ранних стадиях. В связи с тем, что в процессе длительной эксплуатации оборудования из углеродистых сталей имеет место их охрупчивание, образующиеся при этом микротрещины могут стать причиной внезапного хрупкого разрушения резервуара.

Широкое применение в трибологии при оценке качества подготовки поверхности получил метод профилографирования, который в последнее время активно разви-

вается с появлением приборов, имеющих опцию бесконтактной оптической 3D-профилометрии. В свете изложенного представляется актуальным применение подходов метода профилографирования для диагностики зарождения и появления поверхностных дефектов сварных соединений резервуаров в процессе их эксплуатации.

Степень разработанности темы

К моменту начала исследований оптическим двухмерным методом показано, что деформационный рельеф поверхности металла возникает с момента приложения нагрузки и развивается вплоть до разрушения, а параметры рельефа могут служить показателями усталостной поврежденности металла. Для сварных соединений выявлено, что процессы пластической деформации локализуются в зоне термического влияния. Одним из главных недостатков оптического двухмерного метода является невозможность прямого измерения глубины и высоты профиля рельефа поверхности.

Существовали публикации о возможностях трехмерного исследования профиля поверхности сталей и их изломов. Однако чувствительность трехмерных параметров к кинетике изменения рельефа поверхности сталей при воздействии нагрузки и коррозионной среды находится в процессе изучения. Для металла сварных соединений публикаций на данную тему обнаружить не удалось. Представляется, что исследование асимметрии и эксцесса профиля может повысить информативность анализа появления поверхностных деформационных дефектов и точность оценки состояния металла сварных соединений резервуаров для хранения нефтепродуктов.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют **пунктам 5 и 6** области исследований, определяемой паспортом специальности 05.16.09 – «Материаловедение» (машиностроение в нефтегазовой отрасли): «5. Установление закономерностей и критериев оценки разрушения материалов от действия механических нагрузок и внешней среды» и «6. Разработка и совершенствование методов исследования и контроля структуры, испытание и определение физико-механических и эксплуатационных свойств материалов на образцах и изделиях».

Цель работы

Повышение информативности и точности структурного анализа поверхности металла сварных соединений резервуаров из стали ВСтЗсп после их длительной эксплуатации путем выявления и использования структурно-чувствительных параметров морфологии деформационного рельефа и рельефа химического травления поверхностных слоев.

Для достижения поставленной цели решались следующие **основные задачи**:

1 Разработка методики 3D-сканирования поверхности металла сварного соединения с использованием бесконтактной конфокальной лазерной сканирующей микроскопии и количественного 3D-анализа морфологии рельефа на разных структурно-масштабных уровнях.

2 Исследование изменения 3D-параметров морфологии деформационного рельефа поверхности стали ВСтЗсп в состоянии поставки при статическом и малоцикловом нагружении.

3 Сравнительное исследование 3D-параметров морфологии деформационного рельефа и рельефа химического травления поверхности, механических свойств, структуры металла модельных сварных соединений и сварных соединений длительно эксплуатировавшегося в нефтегазовой отрасли резервуара.

4 Разработка рекомендаций по применению 3D-параметров морфологии рельефа для анализа появления микротрещин на поверхности основного металла и металла сварных соединений в процессе эксплуатации резервуаров.

Научная новизна

Научно обоснована возможность использования в качестве структурно-чувствительных 3D-параметров деформационного рельефа и рельефа химического травления поверхности металла сварного соединения арифметического отклонения от средней линии, асимметрии, эксцесса и фрактальной размерности профиля шероховатости рельефа.

Установлено, что среднеарифметическое отклонение и фрактальная размерность коррелируют с размером зерна металла, степенью его относительной деформации и циклической поврежденности на всех структурно-масштабных

уровнях. На участках поверхности сварного соединения, где появляются микро-трещины, на мезомасштабном уровне повышаются значения среднеарифметического отклонения, фрактальной размерности рельефа и нарушается их корреляция со средним размером зерна металла. Асимметрия отрицательна и ее значения, наряду со значениями эксцесса, превышают величины, характерные для нормального распределения. Выявлено, что превышение критических значений асимметрии и эксцесса наступает после достижения приблизительно 30 %-й циклической поврежденности углеродистой стали.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в научном обосновании возможности использования в качестве структурно-чувствительных 3D-параметров рельефа поверхности среднеарифметического отклонения, фрактальной размерности, асимметрии и эксцесса, что позволяет повысить информативность и точность контроля структуры поверхности металла.

Практическая значимость работы

1 Разработанная при участии автора методика 3D-анализа морфологии рельефа поверхности легла в основу ГОСТ Р 57223-2016 «Оценка состояния стальных трубопроводов по параметрам деформационного рельефа в процессе эксплуатации» и стандарта ФГБОУ ВО «УГНТУ» СТО РИ 8.5.2-2018 «Оценка состояния конструкционной стали технологического оборудования в процессе эксплуатации. Метод измерения параметров морфологии рельефа поверхности».

2 Основные результаты исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «УГНТУ» при проведении практических занятий по дисциплине «Физические основы разрушения конструкционных материалов» для бакалавров, обучающихся по направлению 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» профиля «Оборудование нефтегазопереработки. Проектирование технических и технологических комплексов».

Методология и методы исследований

Методология исследований заключалась в анализе изменения 3D-параметров рельефа поверхности стали ВСтЗсп в состоянии поставки при статическом и

циклическом нагружении и сравнительном анализе структуры и свойств модельного сварного соединения и сварного соединения длительно эксплуатировавшегося резервуара. Механические свойства металла сварного соединения определяли в соответствии с ГОСТ 6996-66, ГОСТ 9450-76 и ГОСТ 1497-84, а его микроструктуру исследовали в соответствии с РД 24.200.04-90. Морфологию поверхности сварных соединений изучали профильным методом по микрогеометрии деформационного рельефа и рельефа травления с применением бесконтактной конфокальной лазерной сканирующей микроскопии. Количественный 3D-анализ рельефа поверхности проводили путем определения фрактальной размерности рельефа методом box-counting, а также среднеарифметического отклонения, асимметрии, эксцесса профиля шероховатости рельефа в соответствии с ГОСТ Р ИСО 4287-2014.

Положения, выносимые на защиту:

1 Обоснование взаимосвязи 3D-параметров морфологии рельефа поверхности с размером зерна металла, степенью его относительной деформации и циклической поврежденности.

2 Доказательство чувствительности 3D-параметров морфологии рельефа к микротрещинам на поверхности сварного соединения после длительной эксплуатации резервуара.

3 Методика контроля структуры поверхности сварного соединения из стали ВСтЗсп по 3D-параметрам морфологии деформационного рельефа поверхности и рельефа травления.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов работы обеспечивалась путем применения широко апробированных, а также оригинальных методов и методик экспериментальных исследований, осуществленных на оборудовании, прошедшем государственную поверку. Перед построением графических зависимостей все экспериментальные данные обрабатывались с использованием подходов теории ошибок эксперимента и математической статистики.

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и

обсуждались на: 61-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ (г. Уфа, 2010 г.); XIV-й международной научно-технической конференции «Проблемы строительного комплекса России» (г. Уфа, 2010 г.); VII-й и VIII-й международной конференции «Фазовые превращения и прочность кристаллов» памяти акад. Курдюмова Г.В. (г. Черноголовка, 2012 г., 2014 г.). Работа неоднократно докладывалась на: всероссийской научно-практической конференции «Повышение уровня безопасности и операционной готовности оборудования нефтеперерабатывающего и нефтехимического комплекса»; XII-й международной научно-практической конференции «Промышленная безопасность на взрывопожароопасных и химически опасных производственных объектах»; международной научно-практической конференции «Экспертиза промышленной безопасности и диагностика опасных производственных объектов»; научно-техническом совете (секция «Материаловедение») ФГБОУ ВО «УГНТУ».

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 18 научных трудов, из них 12 опубликованы в рецензируемых научных изданиях, в том числе входящих в международные базы данных и системы цитирования WoS и Scopus, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка использованных источников из 203 наименований, содержит 126 страниц машинописного текста, 69 рисунков и 15 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлена общая характеристика диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и практическая ценность результатов работы.

В **первой главе** рассмотрены основные факторы, оказывающие влияние на изменение структуры и свойств металла резервуаров в процессе длительной эксплуатации, влияние структуры поверхности на прочность поликристаллов, стадии пластической деформации металлов и классификация образующихся при

этом характерных структур. Проанализированы работы по компьютерному моделированию рельефа поверхности и оценке напряженно-деформированного состояния основного металла и металла сварных соединений в процессе нагружения.

Исследования Засимчук Е.Э., Карускевича М.В. и Маслак Т.П. посвящены разработке датчиков деформации интегрального типа (ДДИТ) или сенсоров усталостного повреждения на основе алюминиевых фольг, наклеиваемых в потенциально опасных зонах конструкции. Показана возможность прогнозирования остаточного ресурса элементов авиационных конструкций по интенсивности и насыщенности полос скольжения деформационного рельефа поверхности. В исследованиях Буркова М.В., Любутина П.С. и Панина С.В. оценивалась возможность применения ДДИТ для анализа состояния циклически нагруженных композиционных материалов. Выявлены и обоснованы двумерные параметры деформационного рельефа, чувствительные к деградации композитов. Paget Ch. (Великобритания) описывает возможность использования датчиков на основе тонких металлических пленок для выявления трещин в металлических конструкциях. В работах Сызранцева В.Н. и Голофаства С.Л. с применением ДДИТ исследованы напряжения и деформации в сварных швах трубопроводов и критерии наступления предельного состояния материала. Романовой В.А. и Зиновьевой О.С. проведено компьютерное моделирование формирования деформационного рельефа поверхности металла в процессе нагружения, показана взаимосвязь рельефа со средним размером зерна. Севостьяновой И.Н. и Кульковым С.Н. исследовано изменение фрактальной размерности рельефа поверхности при пластической деформации металлов. Способы 3D-анализа особенностей поверхности твердого тела изучались в работах Игнатовича С.Р. и Сысоева Е.В. с применением интерференционного микроскопа-профилометра. Исследования Лычагина А.Д. и Алферовой Е.А. посвящены изучению методом конфокальной лазерной сканирующей микроскопии (КЛСМ) двумерных и трёхмерных параметров шероховатости рельефа, образовавшегося при сжатии монокристаллов никеля. Мерсон Д.Л. исследовал поверхность изломов стальных образцов с применением КЛСМ. Исхождановой И.В. методом КЛСМ исследованы деформационные и коррозионные процессы на поверхности алюминийлитиевых сплавов. Демченко А.А. и Кузеевым И.Р. с использованием КЛСМ

разработана методика оценки усталостной поврежденности стали ВСтЗсп по изменению 3D-параметров деформационного рельефа поверхности.

Таким образом, в настоящее время с помощью метода профилографирования можно проводить исследование изменения рельефа поверхности сталей при воздействии нагрузки и коррозионной среды, что создает определенные предпосылки для диагностики появления поверхностных деформационных дефектов в процессе эксплуатации резервуаров.

Во **второй главе** приведено описание стандартных и оригинальных методов исследования структуры, свойств основного металла и металла сварных соединений, микрогеометрии поверхности, а также оборудования для их практического осуществления.

В качестве объекта исследований использовали углеродистую сталь обыкновенного качества ВСтЗсп, поскольку данная сталь применялась ранее при изготовлении резервуаров для хранения нефтепродуктов. Были изготовлены серии образцов без сварного соединения, с модельным сварным соединением и сварным соединением из вертикальных стыков нижнего пояса эксплуатировавшегося в течение 35 лет резервуара. Качество подготовки поверхности всех образцов оценивали путем определения среднеарифметического отклонения от средней линии $RS_a = 0,2-0,4$ мкм. Механические свойства металла сварных соединений определяли в соответствии с ГОСТ 6696-66 с использованием разрывной машины Инстрон-5982, посредством измерения микротвердости по Виккерсу с использованием микротвердомерной приставки МНТ-10 на базе микроскопа Axiovert (Carl Zeiss, Германия) при оптическом увеличении $\times 500$. Кроме того, образцы без сварного соединения подвергали малоцикловому нагружению по схемам симметричного (с заданной деформацией) и консольного (с заданной нагрузкой) изгибов при одновременном построении кривых усталости, отражающих зависимости параметров рельефа поверхности от степени поврежденности N_i/N_p (N_i – текущее число циклов, N_p – число циклов, при котором произошло разрушение).

Морфологию поверхности сварных соединений исследовали по микрогеометрии профиля рельефа с помощью контактного портативного измерителя шероховатости TR 200 (TIME Group Inc., Китай) на базовой длине 0,8 мм и

бесконтактного микроскопа на принципе КЛСМ LSM-5-Exciter (Carl Zeiss, Германия). Методика исследования поверхности с помощью КЛСМ заключалась в трехмерном сканировании основных зон площадью (250×250) мкм на разных структурно-масштабных уровнях и панорамы вдоль сварного соединения площадью (8000×12) мкм. Масштабные уровни классифицировали в соответствии с разрешающей способностью объективов микроскопа по осям X и Y, и диапазоном фокуса объективов по оси Z, которые влияют на детализацию поверхности. Таким образом, размер структур, разрешаемых объективом 5^x , отнесли к макромасштабу, 20^x – мезомасштабу, 100^x – микромасштабу. Диагностику появления поверхностных деформационных дефектов осуществляли по деформационному рельефу поверхности, а также по рельефу ее химического травления. Реактивы и режимы травления выбирали согласно РД 24.200.04-90.

На Рисунке 1 представлены схемы интегрального (сварного соединения в целом) и локального (основных зон) сканирования на КЛСМ.

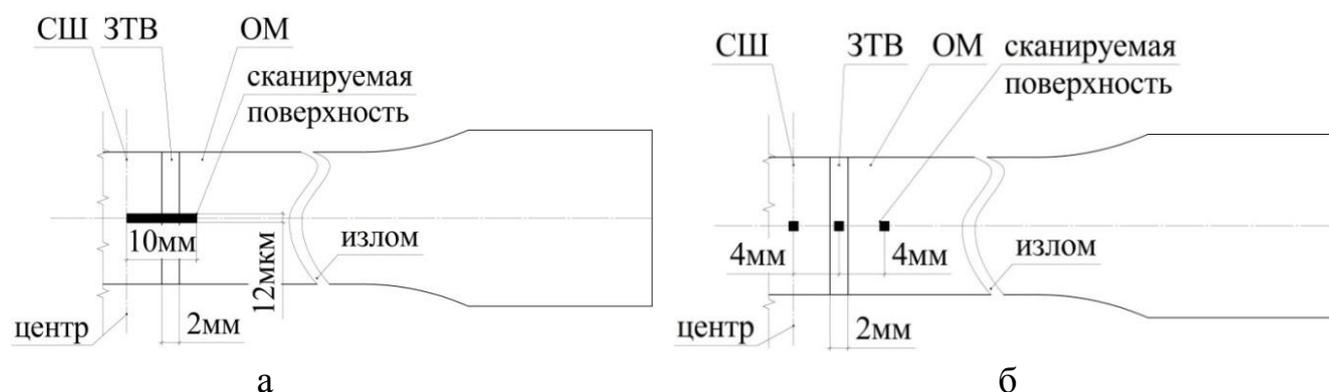


Рисунок 1 – Интегральная (а) и локальная (б) схемы сканирования

Количественный анализ рельефа проводили по профилю шероховатости в соответствии с ГОСТ Р ИСО 4287-2014. Для контактного метода (TR 200) вычисляли двухмерные параметры профиля, для бесконтактного оптического (КЛСМ) – трехмерные по сканируемой площади (относительная погрешность – в пределах 5 %). Рассматривали следующие параметры: двухмерные – среднеарифметическое отклонение R_a , асимметрию R_{sk} и эксцесс R_{ku} и трехмерные по площади S – RS_a , RS_{sk} и RS_{ku} . Безразмерные параметры – асимметрию и эксцесс – применяли для оценки выборки на нормальность распределения. Асимметрия указывает преимущественное положение координат

рельефа относительно оси абсцисс (выше или ниже средней линии). Эксцесс указывает на преимущественное положение координат рельефа относительно оси ординат (то есть отражает, является ли рельеф пологим или резким). Согласно ГОСТ Р ИСО 5479-2002 критерием асимметрии для выборки $n = 500$ значений и значения p -квантиля 0,95 является $|R_{sk}| = 0,18$, эксцесса – $R_{ku} = 3,37$. Поскольку на значения асимметрии и эксцесса существенно влияют изолированные пики и впадины в профиле рельефа, эти параметры могут отражать появление микротрещин. Параметры рельефа рассчитывали в автоматическом режиме (с помощью прибора TR 200) и программном комплексе Zeiss Efficient Navigation (Carl Zeiss, Германия) оптического микроскопа-профилометра.

Фрактальную размерность деформационного рельефа поверхности сварного соединения вычисляли, используя программный комплекс Image J (National Institutes of Health, США), при помощи плагина Map Fractal Count, основанного на алгоритме Shifting Differential Box-Counting (Тайвань).

В **третьей главе** приведены установленные закономерности изменения 3D-параметров деформационного рельефа поверхности стали ВСтЗсп при циклическом нагружении, а также рельефа поверхности модельных и эксплуатировавшихся сварных соединений из стали ВСтЗсп при статическом нагружении.

Показано, что значение RS_a деформационного рельефа возрастает с увеличением степени циклической поврежденности металла на всех структурно-масштабных уровнях. На Рисунке 2 а приведена зависимость RS_a от степени циклической поврежденности металла на мезомасштабном уровне. Кроме того, установлено, что значения RS_{ku} также возрастают с увеличением циклической нагрузки (рисунок 2 б).

Исследование значений RS_{sk} рельефа с применением контактного (TR200) и бесконтактного (КЛСМ) приборов и использованием разных схем циклического нагружения показало, что асимметрия становится отрицательной (что характеризует появление микротрещин на поверхности) по достижении приблизительно 30 %-й циклической поврежденности металла (рисунок 3). На Рисунке 4 показано распределение значений RS_a профиля деформационного рельефа поверхности вдоль образца со сварным соединением после статического растяжения.

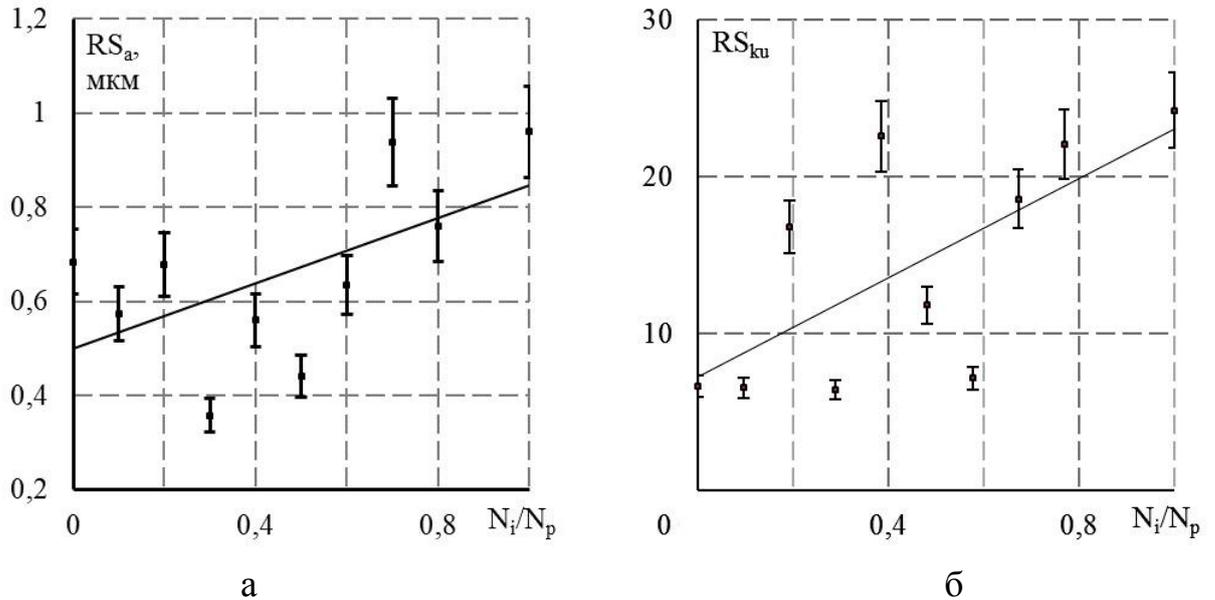


Рисунок 2 – Зависимость RS_a (а) и RS_{ku} (б) профиля рельефа от степени циклической поврежденности N_i/N_p на мезомасштабном уровне

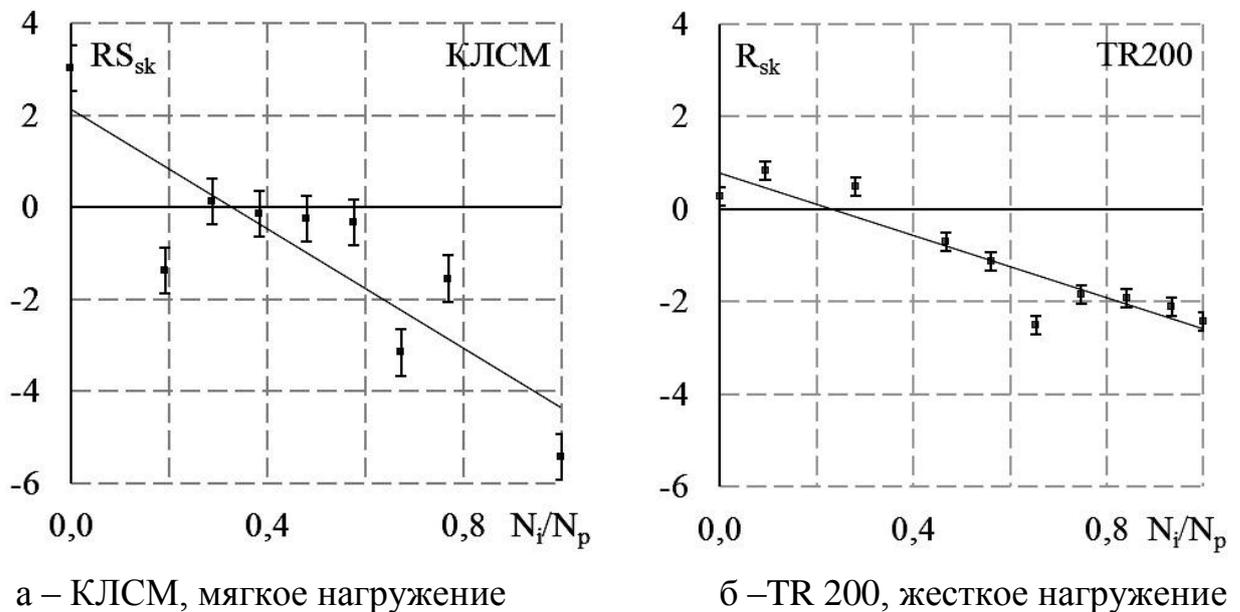


Рисунок 3 – Зависимость RS_{sk} профиля от степени циклической поврежденности N_i/N_p при разных методах ее измерения на мезомасштабном уровне

Данные, представленные на Рисунке 4, позволяют утверждать, что в сварном соединении значения RS_a коррелируют с размером зерна металла, принимая повышенное значение в области СШ с большим, а наименьшее – в ЗТВ с наименьшим средним размером зерна. Кроме того, по мере приближения к шейке установлен рост RS_a , что позволяет утверждать о корреляции этого параметра со степенью относительной деформации.

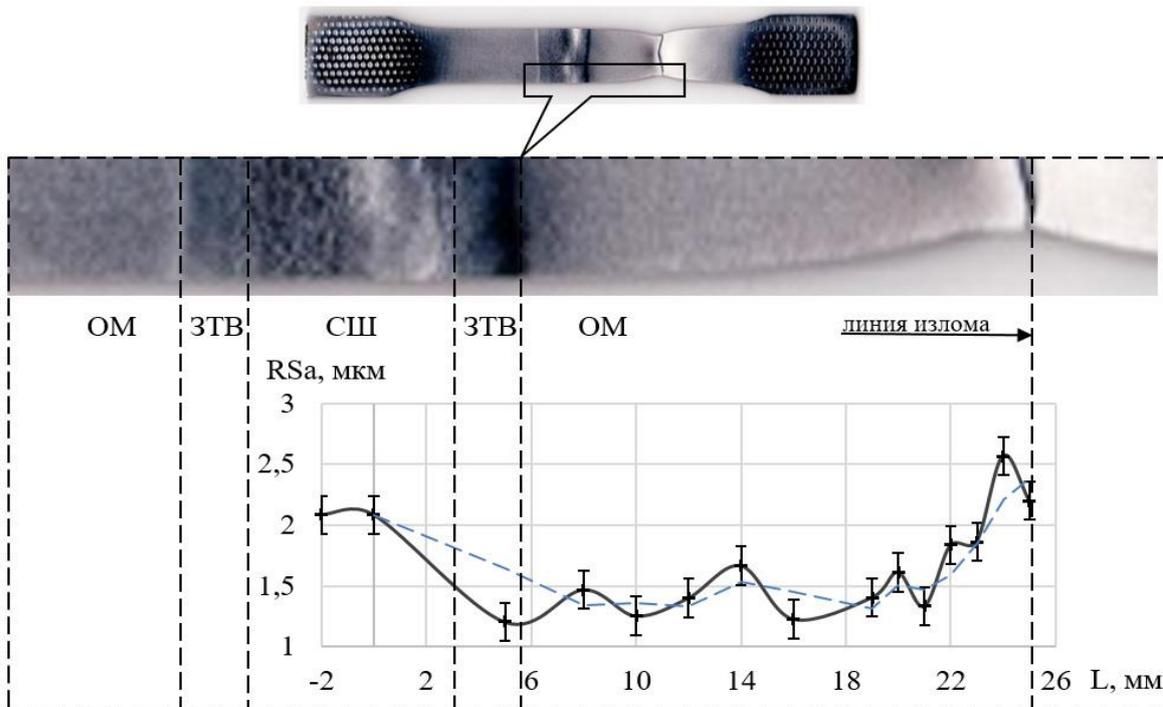


Рисунок 4 – Распределение RS_a деформационного рельефа поверхности вдоль образца со сварным соединением

При одноосном растяжении образцов со сварным соединением, которое является геометрическим концентратором напряжений, из-за различия пределов текучести основных зон, разной структуры металла их адаптация к внешнему воздействию осуществляется по разным механизмам. Подтверждением этого является разная деформация зон сварного соединения, что проиллюстрировано на Рисунке 5. На Рисунке 6 показана схема образования деформационного рельефа поверхности.

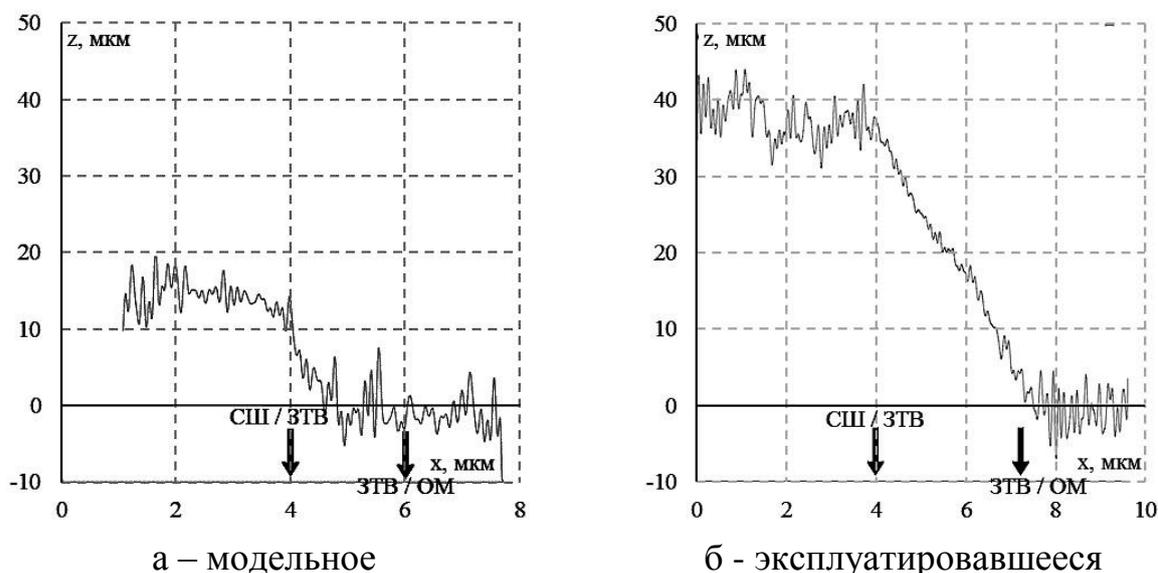
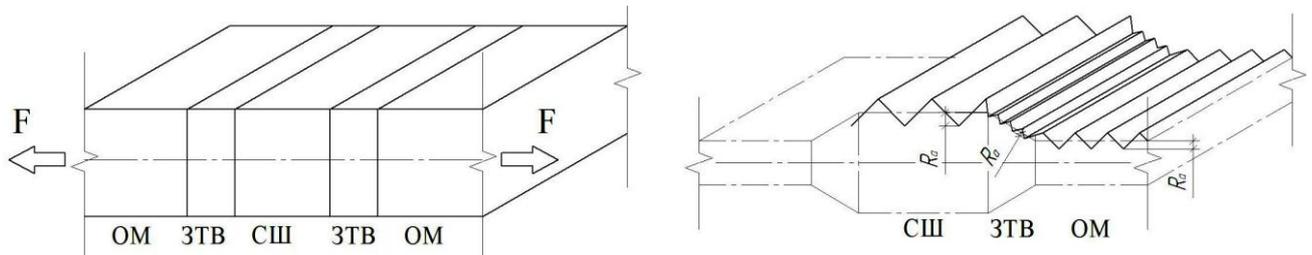


Рисунок 5 – Профиль деформационного рельефа поверхности сварного соединения на мезомасштабном уровне

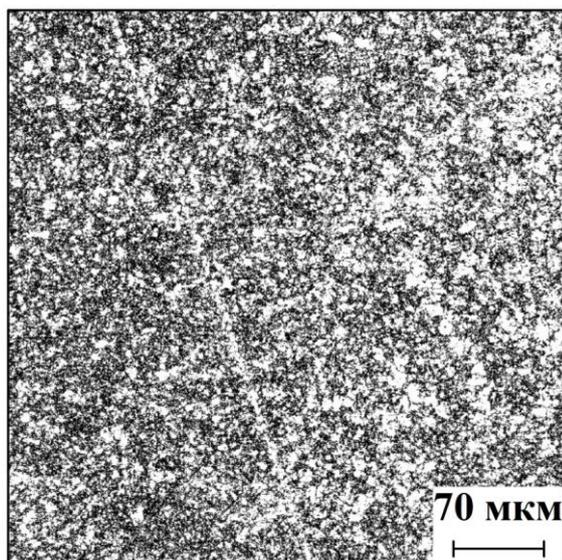


а - до растяжения

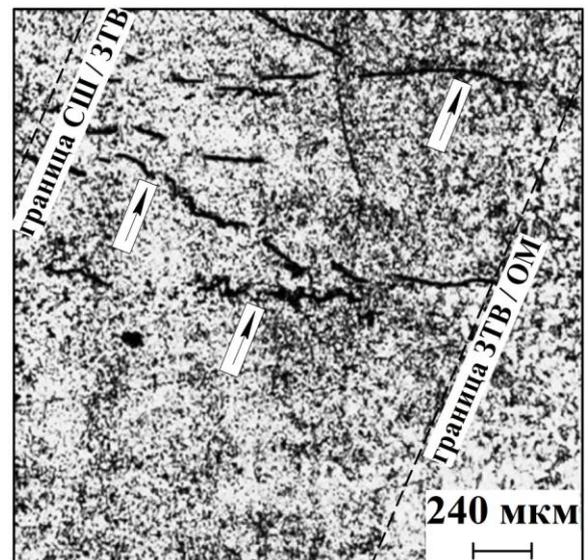
б - после растяжения

Рисунок 6 – Схема образования деформационного рельефа поверхности сварного соединения

Образовавшийся перепад высот в рельефе поверхности сварного соединения, по нашему мнению, связан с преобладанием в ЗТВ поворотных мод пластической деформации, тогда как в СШ и ОМ преобладает механизм сдвига, обуславливающего линейность их движения. Наклон поверхности ЗТВ можно рассматривать как макроповорот объемов металла при адаптации сварного соединения к внешней нагрузке. Наличие поворотных мод обусловлено тем, что ЗТВ претерпевает стесненную деформацию, кроме того, продолжительность процесса влияет на скорость адаптации структуры металла к внешней нагрузке. Косвенным подтверждением такого механизма является наличие микротрещин в ЗТВ (указаны стрелками на рисунке 7) эксплуатировавшегося под статической и циклической нагрузкой сварного соединения, а их образование в мезомеханике связывается с поворотной модой деформации.



а



б

Рисунок 7 – Структура металла ЗТВ модельного (а) и длительно эксплуатировавшегося (б) сварного соединения

Для объяснения механизмов образования деформационных ступеней на рельефе поверхности под нагрузкой исследовали микротвердость вдоль сварного соединения (рисунок 8).

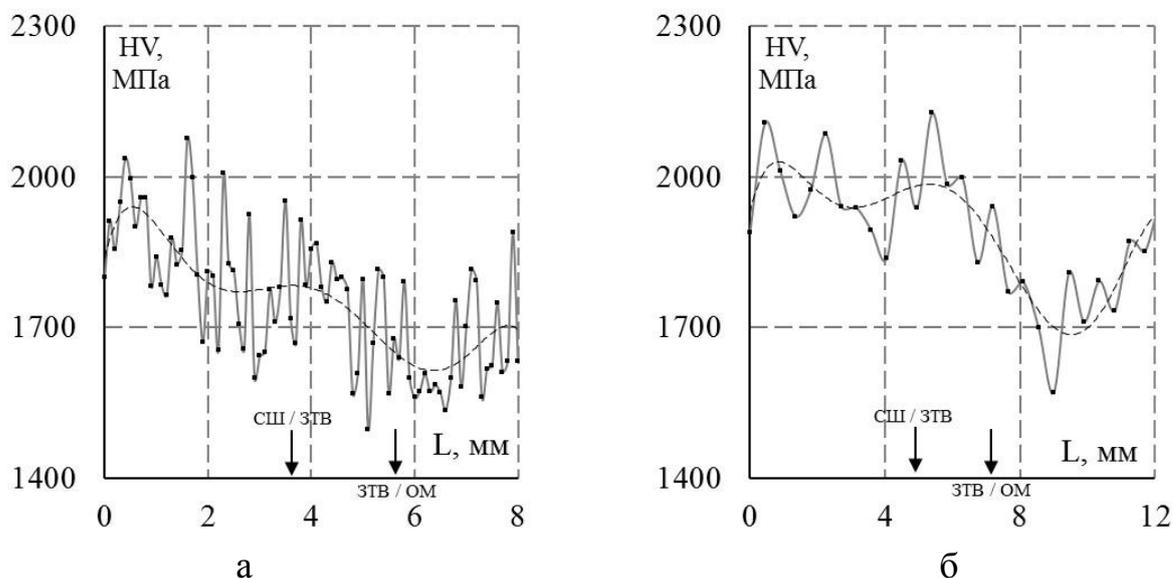


Рисунок 8 – Микротвердость модельного (а) и длительно эксплуатировавшегося (б) сварного соединения

Некоторый разброс значений микротвердости связан с выраженной гетерогенностью структуры приповерхностных слоев стали, включающей как феррит и перлит, так и неметаллические включения (рисунок 9).

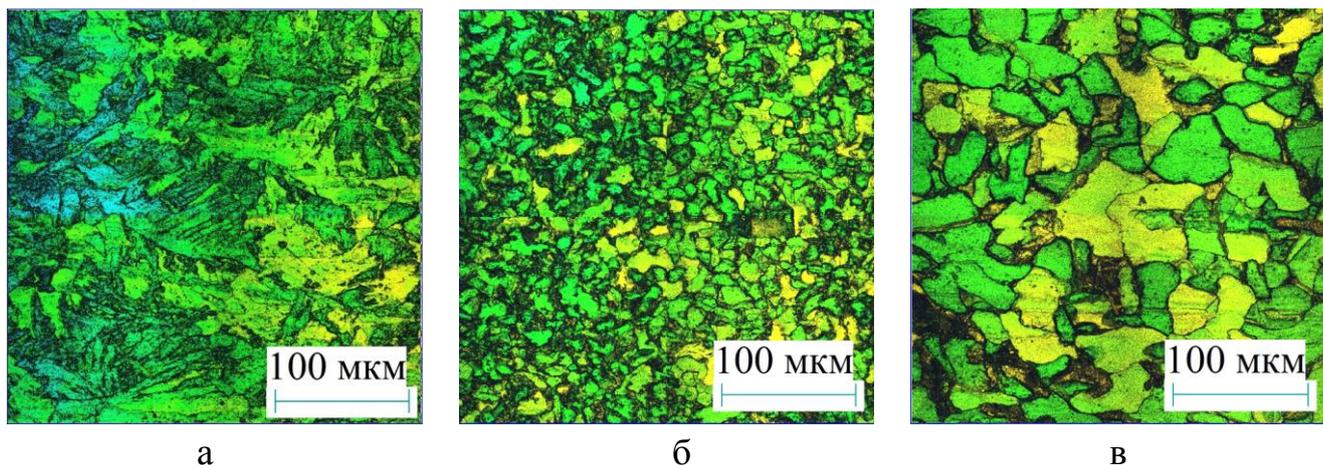


Рисунок 9 – Микроструктура СШ (а), ЗТВ (б) и ОМ (в)

Высота рельефа отображена в виде цветового спектра, где фиолетовый – низкие значения, красный – высокие. Характерной структурой сварного шва является крупный видманштеттов феррит. Присутствует также игольчатый феррит,

который является причиной повышенной твердости в СШ (рисунок 8) по сравнению с другими зонами. Крупный размер зерна (около 50 мкм) и малая доля границ зерен СШ обуславливают крупные ступени на деформационном рельефе поверхности (рисунки 5 и 6). Малый размер зерна (около 10 мкм) и большая доля границ ЗТВ препятствуют движению дислокаций и обуславливают формирование малых ступеней на деформационном рельефе.

Для диагностики появления поверхностных деформационных дефектов нами предложена методика исследования рельефа химического травления, которую применяли на модельных и эксплуатировавшихся сварных соединениях. На Рисунке 10 приведены полученные профилограммы данного рельефа.

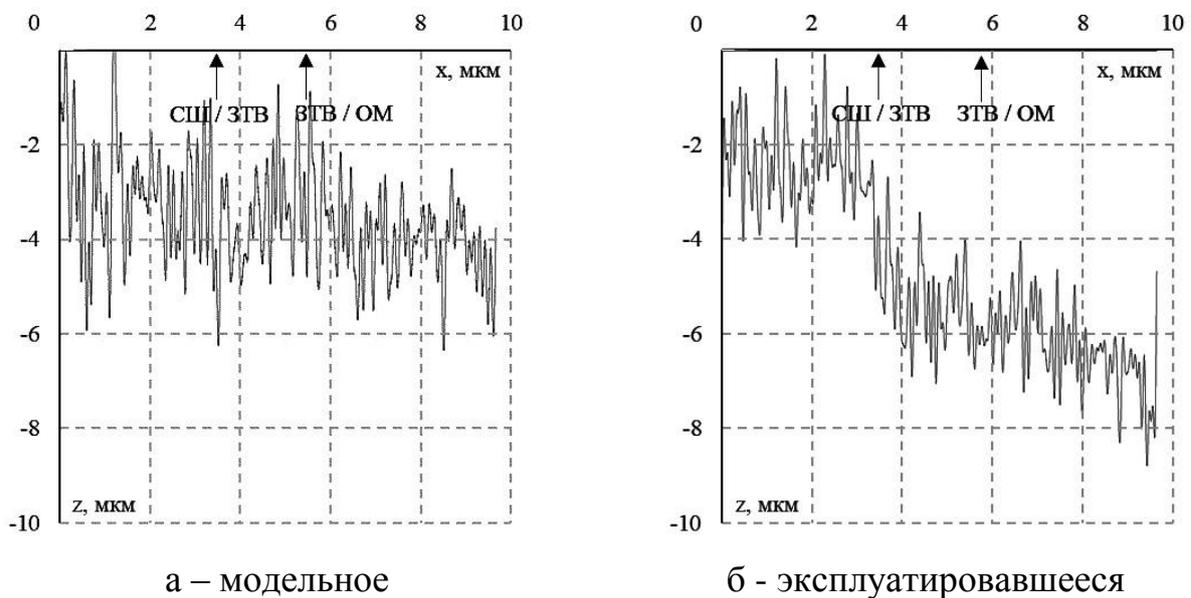


Рисунок 10 – Профиль рельефа химического травления поверхности сварного соединения на мезомасштабном уровне

В случае модельного сварного соединения растворение поверхности металла происходит равномерно, что свидетельствует о его гомогенной структуре. В результате воздействия в процессе эксплуатации резервуара статических и циклических нагрузок металл различных зон сварного соединения приобретает неодинаковый повышенный изобарно-изотермический потенциал, и, как следствие, саморастворение сварного соединения происходит неравномерно. Области повышенного протравливания являются ЗТВ и ОМ, поскольку при воздействии нагрузки деформация локализуется в ЗТВ (косвенным подтверждением является

наличие микротрещин, рисунок 7), а с последующим приращением нагрузки распространяется в область ОМ.

Предложенную методику испытали на образцах с разной концентрацией углерода в наплавленном металлопокрытии и разным типом сварки. Повышение концентрации углерода в наплавленном металле и остаточных напряжений от воздействия термомеханических циклов сварки приводит к образованию ступеньки в ЗТВ.

В **четвертой главе** приведены результаты сравнительного исследования 3D-параметров деформационного рельефа поверхности модельного и эксплуатировавшегося сварных соединений при статическом растяжении на разных структурно-масштабных уровнях. Приведены результаты исследования 3D-параметров рельефа травления модельного и эксплуатировавшегося сварных соединений.

В Таблице 1 приведены значения RS_a и RS_{sk} по сканируемой площади S (128×128) мкм деформационного рельефа поверхности сварных соединений на разных структурно-масштабных уровнях.

Таблица 1 - Параметры морфологии деформационного рельефа поверхности

	RS_a до растяжения, мкм	RS_a после растяжения, мкм			RS_{sk} после растяжения	
			Модельное	Эксплуатированное	Модельное	Эксплуатированное
Макро	$4,2 \pm 0,6$	СШ	$18,8 \pm 0,6$	$14,9 \pm 0,6$	- 0,1	-0,2
		ЗТВ	$16,2 \pm 0,6$	$15,1 \pm 0,6$	- 0,2	-0,2
		ОМ	$13,6 \pm 0,6$	$14,9 \pm 0,6$	0,0	-0,1
Мезо	$0,4 \pm 0,1$	СШ	$2,1 \pm 0,1$	$1,1 \pm 0,1$	- 0,4	- 0,2
		ЗТВ	$1,2 \pm 0,1$	$2,8 \pm 0,1$	0,1	- 1,3
		ОМ	$1,5 \pm 0,1$	$1,2 \pm 0,1$	- 0,4	- 0,2
Микро	$0,25 \pm 0,04$	СШ	$1,00 \pm 0,04$	$0,50 \pm 0,04$	0,1	-0,3
		ЗТВ	$0,40 \pm 0,04$	$0,40 \pm 0,04$	- 0,1	-0,4
		ОМ	$0,60 \pm 0,04$	$0,60 \pm 0,04$	0,2	-0,5

Данные Таблицы 1 отражают повышение значений RS_a профиля шероховатости деформационного рельефа после статического растяжения по сравнению с профилем полированной поверхности на всех структурно-масштабных уровнях. Эти данные позволяют утверждать о корреляции RS_a со степенью относительной деформации металла. Кроме того, RS_a коррелирует с

размером зерна металла на всех структурно-масштабных уровнях (наименьшее значение в ЗТВ, наибольшее – в СШ).

В ЗТВ эксплуатировавшегося сварного соединения на мезомасштабном уровне (выделено рамкой в таблице 1) наблюдается резкий скачок значения среднеарифметического отклонения $RS_a = 2,8$ мкм, нарушающий принцип корреляции с размером зерна, что характеризует появление нового структурного элемента на поверхности в этой области. Визуализация приведенных в выделенной рамке таблицы параметров приведена на рисунке 11.

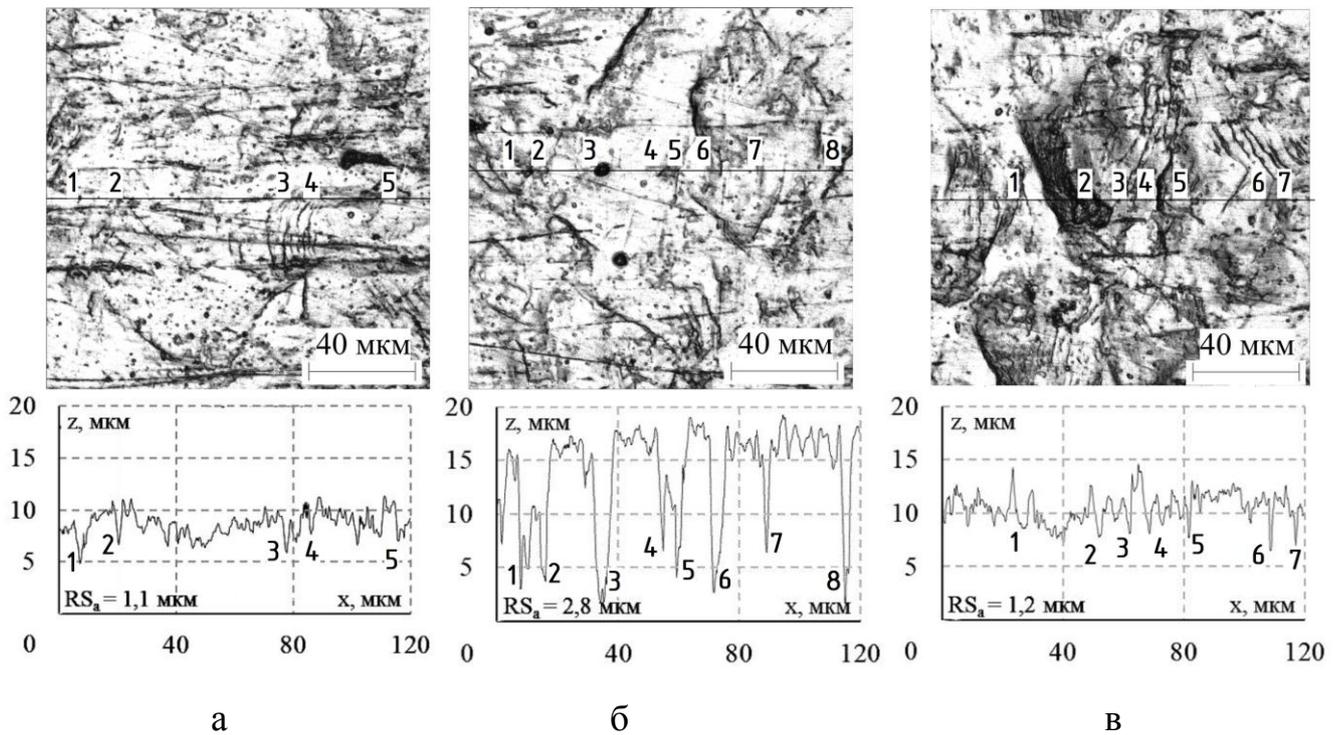


Рисунок 11 – Деформационный рельеф поверхности СШ (а), ЗТВ (б) и ОМ (в) эксплуатировавшегося сварного соединения на мезомасштабном уровне

Мониторинг наличия микротрещин на поверхности сварного соединения проводили при помощи интегральных безразмерных параметров асимметрии и эксцесса, которые являются мерой отклонения от нормального распределения выборки данных по ГОСТ Р ИСО 5479-2002 и свидетельствуют о нарушении сплошности поверхности. При отрицательной асимметрии для морфологии рельефа характерны изолированные впадины, которые указывают на наличие микротрещин на поверхности.

Согласно данным, приведенным в Таблице 1, в модельном сварном

соединении асимметрии рельефа нет, поскольку значения этого параметра находятся в пределах нормального распределения (критерий $|RS_{sk}| \approx 0,18$). В области ЗТВ эксплуатировавшегося сварного соединения на мезомасштабном уровне асимметрия $RS_{sk} = -1,3$ указывает на наличие изолированных впадин, что подтверждается качественным изображением профиля рельефа ЗТВ (№ 1 - 8 рисунок 11 б). В СШ и ОМ наблюдается появление полос скольжения (№ 1 – 5 на рисунке 11 а и № 1 – 7 на рисунке 11 в), но на интегральном (по всей площади) параметре асимметрии мезомасштабного уровня отклонения от нормального распределения не регистрируются. Исследование RS_{ku} профиля деформационного рельефа поверхности показало, что его морфология после статического растяжения характеризуется острыми пиками и впадинами во всех зонах сварного соединения (критерий $RS_{ku} > 3,37$), что наряду с превышением критического значения асимметрии означает нарушение сплошности поверхности.

При анализе профилограмм поверхности сварных соединений обнаружено визуальное подобие деформационного рельефа поверхности на разных структурно-масштабных уровнях (рисунок 12).

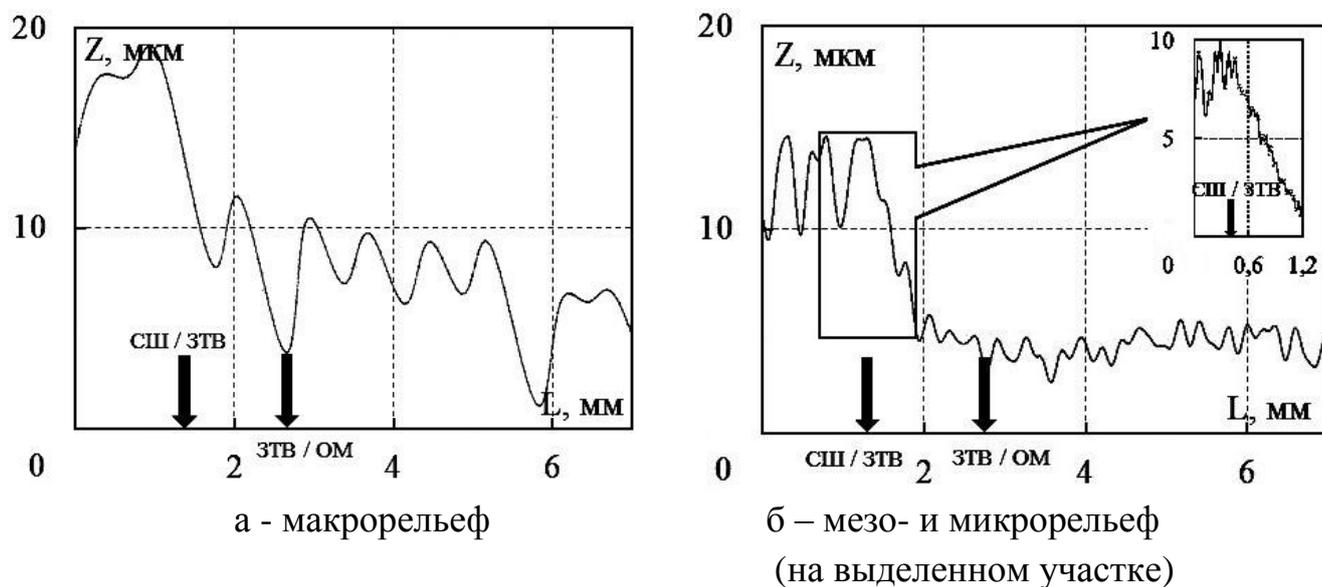


Рисунок 12 – Профилограмма деформационного рельефа поверхности сварного соединения на разных структурно-масштабных уровнях

Проведена оценка фрактальной размерности деформационного рельефа каждой зоны сварного соединения на мезомасштабном уровне, поскольку согласно Таблице 1 в рассматриваемом масштабе регистрируются микротрещины.

В Таблице 2 приведены значения фрактальной размерности деформационного рельефа поверхности, образованного при статическом растяжении.

Таблица 2 – Фрактальная размерность деформационного рельефа поверхности

	До растяжения	После растяжения	
		Модельное	Эксплуатировавшееся
СШ	2,2716	2,4833	2,4182
ЗТВ		2,4038	2,5234
ОМ		2,4254	2,4321

Значения фрактальной размерности рельефа в модельном сварном соединении коррелируют с размером зерна металла и степенью относительной деформации, что означает сплошность поверхности. В эксплуатировавшемся сварном соединении фрактальная размерность в ЗТВ по сравнению с другими областями повышена, что характеризует нарушение сплошности поверхности (рисунок 11 б).

Для диагностики поверхностных деформационных дефектов нами предложена методика количественного анализа рельефа травления сварного соединения. Параметры этого рельефа исследовали на мезомасштабном уровне, поскольку на данном уровне зафиксированы изменения в структуре поверхности (таблица 1).

В Таблице 3 приведены значения RS_a и RS_{sk} для рельефа травления.

Таблица 3 - Параметры морфологии рельефа травления

RS_a до травления, мкм	RS_a после травления, мкм			RS_{sk} после травления	
		Модельное	Эксплуатировавшееся	Модельное	Эксплуатировавшееся
0,4 ± 0,1	СШ	0,8 ± 0,1	0,8 ± 0,1	0,2	0,0
	ЗТВ	0,6 ± 0,1	0,9 ± 0,1	0,3	- 1,0
	ОМ	0,6 ± 0,1	0,7 ± 0,1	0,2	0,5

Данные Таблицы 3 позволяют утверждать, что формирование рельефа травления зависит от размера зерна, поскольку с ним коррелируют значения RS_a . Нарушение этой закономерности проявляется в ЗТВ эксплуатировавшегося сварного соединения, где RS_a профиля выше, чем в СШ и ОМ. Это характеризует нарушение сплошности поверхности. При этом асимметрия рельефа в ЗТВ

эксплуатировавшегося сварного соединения $R_{sk} = - 1,0$ указывает на наличие микротрещин. Соответствующая приведенным значениям параметров Таблицы 3 визуализация рельефа в области ЗТВ проиллюстрирована на Рисунке 13.

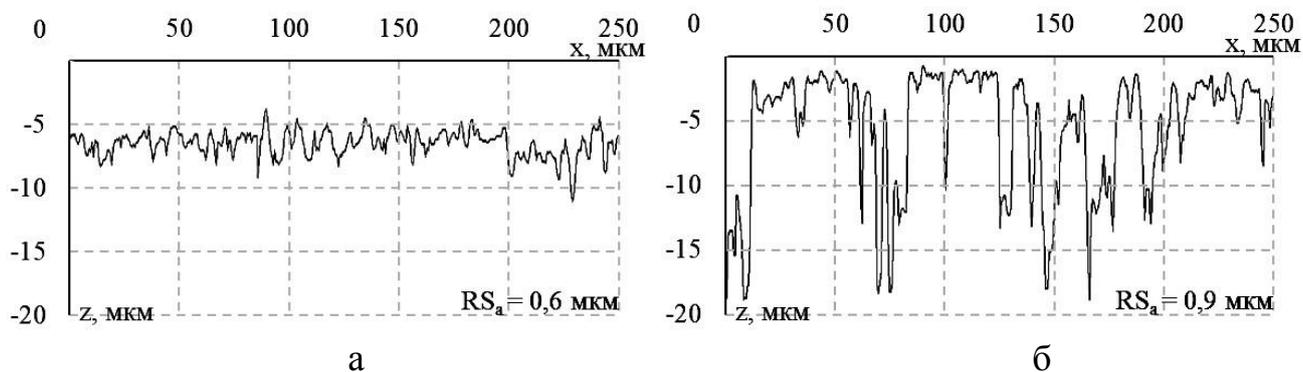


Рисунок 13 – Рельеф травления ЗТВ модельного (а) и эксплуатировавшегося (б) сварного соединения

Увеличение глубины протравливания ЗТВ эксплуатировавшегося сварного соединения можно объяснить повышением изобарно-изотремического потенциала металла в области сварного соединения, где локализуется деформация от воздействия статической и циклической нагрузок. Исследование значений RS_{ku} рельефа травления показало, что профиль рельефа характеризуется острыми пиками и впадинами в ЗТВ эксплуатировавшегося сварного соединения, что наряду с превышением критического значения асимметрии означает нарушение сплошности поверхности.

Таким образом, при проведении мониторинга особенностей морфологии рельефа поверхности сварных соединений следует учитывать, что при превышении критических значений асимметрии и эксцесса профиля рельефа необходим дополнительный контроль структуры приповерхностных слоев металла сварного соединения неразрушающими методами.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1 Разработана методика сканирования рельефа поверхности металла сварного соединения, которая позволяет осуществлять более представительную статистическую выборку координат рельефа за счет ее трехмерного профилографирования при высоком разрешении. Предложенная методика количественного анализа рельефа дает возможность получать дополнительную информацию о его морфологии посредством вычисления асимметрии и эксцесса профиля.

2 Исследовано изменение структурно-чувствительных параметров деформационного рельефа поверхности стали ВСтЗсп5 в состоянии поставки при статическом и малоцикловом нагружении. Показан рост среднеарифметического отклонения, фрактальной размерности и эксцесса по мере увеличения степени относительной деформации и циклической поврежденности металла. Выявлено, что по достижении 30 %-й циклической поврежденности на поверхности металла появляются и развиваются микротрещины, о чем свидетельствует отрицательная асимметрия рельефа поверхности.

3 Проведено сравнительное исследование структурно-чувствительных параметров деформационного рельефа поверхности и рельефа химического травления модельного и эксплуатировавшегося сварных соединений. Показано, что данные параметры непосредственно зависят от размера зерна металла зон сварного соединения, и изменение их значений отражает смену этапов адаптации структуры металла к внешней нагрузке, что позволяет достоверно фиксировать момент появления микротрещин в зоне термического влияния.

4 Разработанные рекомендации по применению 3D-параметров морфологии рельефа поверхности сварного соединения (стандарт ФГБОУ ВО «УГНТУ» СТО РИ 8.5.2-2018) были успешно использованы при диагностике состояния поверхности металла длительно эксплуатировавшегося резервуара. Предложенные и апробированные на практике структурно-чувствительные параметры морфологии рельефа поверхности могут быть использованы не только при диагностике состояния поверхности сварных соединений резервуаров, но и для случая любых сварных конструкций, применяемых в нефтегазовой отрасли и изготовленных из углеродистых сталей обыкновенного качества.

Содержание работы опубликовано в следующих научных трудах:

- в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, выпускаемых в РФ, в соответствии с требованиями ВАК Минобрнауки РФ

1. Демченко, А.А. Взаимосвязь деформационного рельефа поверхности и степени поврежденности стали при малоцикловом нагружении / А.А. Демченко, **М.В. Демченко**, А.В. Сисанбаев, Е.А. Наумкин, И.Р. Кузеев // Химическая физика и мезоскопия. - 2012. - Т. 14, № 3. - С. 426-429.

2. Демченко, А.А. Исследования фрактальной размерности деформационной поверхности стали лазерным методом / А.А. Демченко, **М.В. Демченко**, А.В. Сисанбаев, И.Р. Кузеев // Химическая физика и мезоскопия. - 2012. - Т. 14, № 4. - С. 569-573.

3. Сисанбаев, А.В. Экспериментальное моделирование аккомодации в тройных стыках общего типа при деформации трикристаллов и нанокристаллов / А.А. Демченко, **М.В. Демченко**, А.В. Сисанбаев // Деформация и разрушение материалов. - 2012. - № 9. - С. 2-6.

4. Сисанбаев, А.В. Моделирование аккомодационных процессов в тройных стыках нанокристаллов с разным размером зерен / А.А. Демченко, **М.В. Демченко**, А.В. Сисанбаев // Химическая физика и мезоскопия. - 2012. - Т. 14, № 2. - С. 253-257.

5. Демченко, А.А. Исследование взаимосвязи деформационного рельефа и степени поврежденности стали / А.А. Демченко, **М.В. Демченко**, А.В. Сисанбаев, Е.А. Наумкин, И.Р. Кузеев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2013. - Т. 79, № 2. - С. 42-44.

6. Демченко, А.А. Методика исследования фрактальной размерности деформационной поверхности стали / А.А. Демченко, **М.В. Демченко**, А.В. Сисанбаев, И.Р. Кузеев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2013. - Т. 79, № 7-1. - С. 42-44.

7. Сисанбаев, А.В. Особенности деформационного рельефа поверхности металлической ленты, полученного при сдвиге под высоким давлением / А.В. Сисанбаев, А.А. Демченко, **М.В. Демченко**, А.В. Шалимова, Л.Р. Зубаиров, Р.Р. Мулюков // Химическая физика и мезоскопия. - 2013. - Т. 15, № 4. - С. 610-615.

8. Тукаев, Р.Ф. Коррозионный рельеф поверхности сварных швов, полученных электродуговой и лазерной сваркой / Р.Ф. Тукаев, **М.В. Демченко**, А.В. Сисанбаев // Химическая физика и мезоскопия. - 2015. - Т. 17, № 3. - С. 403-407.

- в рецензируемых научных журналах, включенных в международные базы данных SCOPUS и Web of Science в соответствии с требованиями ВАК Минобрнауки России

9. Sisanbaev, A.V. Experimental Simulation of the Accommodation in General Type Triple Junctions during the Deformation of Tricrystals and Nanocrystalline Structures / A. V. Sisanbaev, A. A. Demchenko, **M.V. Demchenko** // Russian Metallurgy (Metally), Vol. 2013, No. 10, pp. 738–741.

10. **Демченко, М.В.** Исследования состояния сварного соединения металла по параметрам деформационного и коррозионного рельефа поверхности / **М.В. Демченко**, А.В. Сисанбаев, И.Р. Кузеев // Нанотехнологии в строительстве. - 2017. - Т. 9, № 5. - С. 98-115. - DOI: dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-5-98-115.

11. Коннов, А.Ю. Оценка коррозионной стойкости металлопокрытий, сформированных методом порошковой металлургии / А.Ю. Коннов, **М.В. Демченко**, А.В. Сисанбаев, М.З. Нафиков, М.Н. Фархшатов // Электromеталлургия. - 2018. - № 6. - С. 19-24.

12. **Демченко, М.В.** Закономерности изменения морфологии рельефа поверхности сварного соединения нефтегазового оборудования в условиях эксплуатации / **М.В. Демченко**, И.Р. Кузеев // Нанотехнологии в строительстве. - 2018. - Т. 10, № 4. - С. 39-56. - DOI: dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-4-39-56.

- в материалах научно-технических конференций

13. **Демченко (Попова), М.В.** Оценка степени поврежденности материала резервуара / **М.В. Демченко (Попова)**, Е.А. Наумкин // 61-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: материалы конф. - УГНТУ. - Уфа, 2010. - Кн.1 - С. 210.

14. **Демченко (Попова), М.В.** Применение магнитных параметров материала при оценке остаточного ресурса резервуаров / **М.В. Демченко (Попова)**, Е.А. Наумкин // Проблемы строительного комплекса России: материалы XIV Международной научно-технической конференции при XIV специализированной выставке «Строительство. Коммунальное хозяйство. Энергосбережение. – 2010» (10-12 марта 2010). – Уфа, 2010. – Т. 2. – С. 116.

15. Сисанбаев, А.В. Экспериментальное исследование поведения сетки границ зерен, тройных стыков и внешних поверхностей в ходе деформации поликристалла / А.В. Сисанбаев, А.А. Демченко, **М.В. Демченко**, А.В. Шалимова // Фазовые превращения и прочность кристаллов: сб. тезисов VII Международной конференции (29 октября - 2 ноября 2012), - Черноголовка, 2012. - С. 117.

16. **Демченко, М.В.** Методики оценки степени поврежденности сварных соединений из углеродистой стали по изменению деформационного рельефа поверхности / **М.В. Демченко**, А.В. Сисанбаев, А.А. Демченко, И.Р. Кузеев // Фазовые превращения и прочность кристаллов: сб. тезисов VIII Международной конференции (27-31 октября 2014). - Черноголовка, 2014. - С. 48.

- в прочих изданиях

17. Sisanbaev, A.V. Features of strain relief of the surface of the metal strip, obtained by the high pressure shear / A.V. Sisanbaev, A.A. Demchenko, **M.V. Demchenko**, A.V. Shalimova, L.R. Zubairov, R.R. Mulyukov // Multifunctional materials and modeling. 2015. pp. 229-236.

18. **Демченко, М.В.** Методика оценки степени поврежденности сварных соединений в стали ВСтЗсп5 по изменению деформационного рельефа поверхности / **М.В. Демченко**, А.В. Сисанбаев, И.Р. Кузеев // Экспертиза промышленной безопасности и диагностика опасных производственных объектов. - 2015. - №5. - С. 63-66.