

На правах рукописи

Корниенко Елена Евгеньевна

**ПОВЫШЕНИЕ КОНСТРУКТИВНОЙ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ  
СОЕДИНЕНИЙ ПУТЕМ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ  
ДЕФОРМАЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ШВОВ И ЗОН  
ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ**

Специальность 05.02.01 – Материаловедение (в машиностроении)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2009

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении  
высшего профессионального образования «Новосибирский  
государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Батаев Анатолий Андреевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент  
Шевченко Олег Игоревич

кандидат технических наук, доцент  
Ковалевская Жанна Геннадьевна

Ведущая организация: Институт теоретической и прикладной  
механики им. С.А. Христиановича СО РАН,  
г. Новосибирск

Защита диссертации состоится « 25 » декабря 2009 г. в 16<sup>00</sup> часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.173.13 в Новосибирском государственном тех-  
ническом университете по адресу: 630092, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского  
государственного технического университета.

Автореферат разослан «25» ноября 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент

Иванцовский В.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Основными показателями, характеризующими поведение большинства деталей машин и элементов конструкций ответственного назначения в тяжелых условиях внешнего нагружения, являются прочностные свойства и параметры трещиностойкости. При оптимизации технологических процессов обработки материалов ставится задача обеспечения требуемого сочетания показателей обоих типов. Успешное решение этой проблемы удается не всегда, поскольку дислокационные механизмы, способствующие росту прочностных свойств, как правило, приводят к снижению показателей трещиностойкости материалов. Технологическими процессами, в большинстве случаев оказывающими негативное влияние на комплекс показателей конструктивной прочности металлических материалов, являются процессы сварки. Структурные преобразования, сопутствующие различным видам сварки, в наибольшей степени отражаются на показателях трещиностойкости материалов. Поэтому исследование характера пластической деформации и разрушения материала сварных швов, а также обоснование эффективных решений, способствующих повышению важнейших показателей конструктивной прочности материала сварных швов, имеют как фундаментальное, так и прикладное значение.

Основными факторами, оказывающими негативное влияние на комплекс показателей конструктивной прочности сварных соединений, являются формирование грубокристаллической структуры сварных швов с большим количеством дефектов литой структуры, образование малопластичных зон термического влияния, обладающих повышенным комплексом прочностных свойств и остаточных напряжений растягивающего типа. Избавиться от этих дефектов, управляя лишь технологическими режимами процесса сварки не представляется возможным. Их образование обусловлено физической сутью процессов сварки, основанных на обеспечении высоких температур и плавлении металла. В качестве методов дополнительного воздействия, позволяющих снизить вредное влияние дефектов кристаллической структуры, возникших на стадии сварки, могут быть использованы интенсивная пластическая деформация поверхностных слоев материала и термическая обработка. Исследованию особенностей влияния этих видов обработки на структуру и комплекс показателей конструктивной прочности, в первую очередь, усталостной трещиностойкости, посвящена данная работа.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с государственным контрактом № 20.438.11.7025 «Научно-организационное, методическое и техническое обеспечение организации и поддержки научно-образовательных центров в области машиностроения и осуществление на основе комплексного использования материально-технических и кадровых возможностей совместных исследований и разработок» (2006-2007 г.); государственным контрактом № 02.513.11.3138 «Повышение надежности и долговечности сварных соединений путем формирования нанокристаллической структуры в поверхностных слоях сварных швов», выполненным в рамках федеральной целевой научно-

технической программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы», аналитической ведомственной целевой программой «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 годы)» (Проект «Развитие Новосибирского научно-образовательного центра в области машиностроения, интегрирующего деятельность Новосибирского государственного технического университета, Институтов СО РАН и станкостроительного центра *DMG*»).

**Цель работы** заключалась в исследовании структуры сварных швов, особенностей их пластической деформации и разрушения, разработке предложений по повышению показателей циклической трещиностойкости сварных соединений путем интенсивной пластической деформации сферическим индентором, колеблющимся с ультразвуковой частотой, обеспечивающей формирование в поверхностных слоях измельченной структуры.

Для достижения поставленной в работе цели решались следующие **задачи**:

1. Изучение особенностей разрушения сварных швов, полученных при реализации технологии электродуговой сварки.
2. Исследование структурных параметров поверхностных слоев, сформированных путем интенсивной пластической деформации сварных швов и зон термического влияния индентором, колеблющимся с ультразвуковой частотой.
3. Исследование влияния термической обработки на структуру поверхностных слоев, подвергнутых локальной интенсивной пластической деформации.
4. Изучение циклической трещиностойкости сварных швов после интенсивной пластической деформации и последующей термической обработки.
5. Оценка напряженно-деформированного состояния сварных швов и зон термического влияния после обработки материала высокопрочным индентором, колеблющимся с ультразвуковой частотой.

**На защиту выносятся:**

1. Результаты структурных исследований поверхностных слоев сварных швов и зон термического влияния после интенсивной пластической деформации и последующей термической обработки.
2. Результаты математического моделирования напряженно-деформированного состояния, возникающего при электродуговой сварке листовых заготовок и последующей интенсивной пластической деформации.
3. Результаты исследования механических свойств сварных соединений, полученных методом электродуговой сварки, последующей обработки поверхностных слоев высокопрочным индентором, колеблющимся с ультразвуковой частотой, и термической обработки.

**Достоверность** научных положений, результатов и выводов, содержащихся в работе, подтверждается использованием современных методов структурных исследований и методов определения характеристик надежности и долговечности металлических материалов; большим объемом эксперименталь-

ных данных, полученных при исследовании сварных соединений; статистической обработкой экспериментальных данных. Полученные результаты об особенностях строения поверхностных слоев сварных швов конструкционных сталей, подвергнутых интенсивной пластической деформации и последующему нагреву, не противоречат современным теоретическим представлениям.

### **Научная новизна:**

1. Установлено, что при интенсивной пластической деформации дефектных зон сварных соединений сферическим индентором, колеблющимся с ультразвуковой частотой, в поверхностном слое глубиной до 400...450 мкм формируется градиентная структура, особенности которой определяются степенью пластической деформации материала в каждой конкретной зоне. Показано, что наиболее явные изменения, связанные с коллективной перестройкой дислокаций и формированием фрагментированной структуры, реализуются в слое глубиной до 100 мкм. В поверхностных слоях сталей 20 и 09Г2С на глубине 50...100 мкм формируется структура с размерами фрагментов 250...300 нм. Размер областей когерентного рассеяния непосредственно у поверхности составляет ~ 25 нм.

2. Экспериментально установлено, что интенсивная пластическая деформация поверхностных слоев сварных швов и прилегающих к ним зон оказывает благоприятное воздействие на показатели циклической трещиностойкости материалов. Обработка дефектных зон материала высокопрочным индентором, колеблющимся с ультразвуковой частотой, приводит к росту пороговых значений размаха коэффициента интенсивности напряжений в 1,5...2 раза. Показано, что основными факторами, способствующими этому, являются формирование высокодисперсных цементитных частиц, фрагментированной дислокационной структуры и формирование остаточных напряжений сжимающего типа.

3. Установлено, что дополнительная термическая обработка интенсивно деформированных слоев, позволяющая сформировать ультрамелкозернистую структуру феррита (0,5...1 мкм) с равномерно распределенными карбидными частицами размерами ~ 25 нм и снижающая склонность материала к внезапному хрупкому разрушению, в значительной степени уменьшает эффект поверхностного упрочнения и приводит к снижению величины порогового значения размаха коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta K_{th}$ . Показано, что с целью обеспечения высоких значений усталостной трещиностойкости, температура нагрева при дополнительной термической обработке должна быть на 30...50 °С ниже температуры рекристаллизации феррита.

4. Изучены особенности тонкого строения кристаллов видманштеттова феррита, объясняющие особенности их поведения в условиях циклического нагружения сталей. Установлено, что пластины видманштеттова феррита имеют слоистое строение с толщиной слоев ~ 300...1000 нм. Межслойные границы являются местами выделения мелкодисперсных цементитных частиц, ограничивающих пластические свойства материала. Экспериментально показано, что траектория развития усталостных трещин в швах, полученных при электроду-

говой сварке углеродистых сталей, связана с местами выделения феррита видманштеттова типа.

### **Практическая значимость и реализация результатов работы:**

1. Полученные при выполнении работы результаты экспериментальных исследований будут полезны при разработке технологических процессов повышения комплекса показателей надежности и долговечности широкого класса металлов и сплавов, используемых для изготовления деталей машин и элементов конструкций с применением технологии сварки плавлением.

2. Предложенные при выполнении работы технические решения и опытный экземпляр технологической установки, предназначенной для повышения качества сварных швов методом интенсивной пластической деформации, отмечены медалями IV Сеульской ярмарки изобретений «*SIF 2008*», Московского международного салона инноваций и инвестиций, а также международной промышленной выставки «Металлы Сибири – 2009».

3. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе в ГОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет» в учебных курсах, читаемых при подготовке инженеров по специальности «Материаловедение в машиностроении» и магистров по направлению «Материаловедение и технология новых материалов».

4. Разработанные в результате проведения исследований предложения по улучшению качества сварных соединений из разнородных сталей запатентованы патентом РФ на изобретение № 2361030.

**Личный вклад автора** заключается в постановке задач, проведении экспериментальных исследований, разработке методического и аппаратного обеспечения исследований, интерпретации результатов и формулировке выводов.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на научных конференциях молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2006, 2007, 2008 гг.); на Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона» (г. Новосибирск, 2006, 2007, 2008 гг.); на 4-й и 5-й Всероссийских научно-практических конференциях «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе» (г. Новосибирск, 2006, 2007 гг.); на 7-й международной научно-технологической конференции "Уральская школа семинар металловедов-молодых ученых" (г. Екатеринбург, 2006 г.); на 6-й Всероссийской школе «Новые материалы. Создание, структура, свойства» (г. Томск, 2006 г.); на 3-й международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» (г. Томск, 2006 г.); на международной научно-технической конференции «Современные технологические системы в машиностроении» (г. Барнаул, 2006 г.); на XIII и XIV международных научно-практических конференциях «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2007, 2008 гг.); на Всероссийской научно-технической

конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Молодежь и наука. Начало XXI века" (г. Красноярск, 2007 г.); на 3-м международном форуме молодых ученых «Механика. Машиностроение» (г. Самара, 2007 г.).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 9 печатных работ, из них: 2 статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 6 – в сборниках трудов Международных и Всероссийских научно-технических конференций, 1 патент на изобретение.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти разделов, основных результатов и выводов, списка литературы из 147 наименований и приложений. Объем диссертации составляет 200 страниц основного текста, включая 81 рисунок и 14 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы и изложены основные вопросы, рассмотренные в диссертации.

**Первый раздел** «Структура и механические свойства сварных соединений, полученных термическими методами сварки углеродистых сталей» представляет собой анализ литературных данных по проблемам связи структуры с комплексом механических свойств сварных соединений низкоуглеродистых и легированных сталей. Представлена классификация структурных составляющих, образующихся в сварных швах и зонах перегрева, проанализирован характер их возникновения. Рассмотрены типичные дефекты, возникающие в зонах сварных соединений, полученных электродуговой сваркой. Показано, что структурная неоднородность и дефекты сварных соединений значительно снижают их механические свойства.

Проанализированы различные методы повышения качества сварных соединений, в том числе дополнительная термическая обработка и поверхностно-пластическая деформация. Отмечены ограничения, характерные для этих методов. С учетом литературных данных обосновано использование в качестве методов исправления дефектной структуры сварных соединений поверхностного упрочнения индентором, колеблющимся с ультразвуковой частотой, и последующей термической обработки. На основании изложенного материала сформулированы цель и задачи исследования.

**Во втором разделе** «Материалы и методы исследования» обоснован выбор объектов исследования, методов их обработки и анализа. Пластины из сталей 20, 09Г2С и 30ХГСА толщиной 3 мм соединяли встык по технологии электродуговой сварки с двух сторон без разделки кромок. Выбор рациональных режимов сварки основывался на данных математического моделирования напряженно-деформированного состояния материала, проведенных с использованием расчетного комплекса «*SYSWELD*».

Пластическую деформацию сварных швов и зон термического влияния, осуществляли на установке, изготовленной на базе модифицированного фрезер-

ного станка МШ-2.2. Обработку производили индентором, выполненным из твердого сплава диаметром 8 мм. Частота ультразвуковых колебаний составляла 22 кГц, амплитуда колебаний индентора была равной 20 мкм. Индентор прижимался к обрабатываемой поверхности с силой 98 Н. Продольная подача индентора составляла 0,3 м/мин, шаг между дорожками был равным 0,1 мм.

С целью изучения влияния температуры нагрева на структурные превращения в поверхностно-упрочненных слоях сварных швов проводили дополнительный печной отжиг при 500, 550, 600 и 650 °С.

Распределение химических элементов в локальных участках сварных соединений оценивали с использованием электронного микроскопа *Carl Zeiss EVO50 XVP*, оснащенного микроанализатором *EDS X-Act (Oxford Instruments)*. Структурные исследования сталей проводили методами металлографического анализа (*Carl Zeiss Axio Observer Alm*), просвечивающей электронной микроскопии (*Technai G2 FEI*), растровой электронной микроскопии (*Carl Zeiss EVO50 XVP*) и рентгеноструктурного анализа (*ARL X'TRA*).

Для оценки остаточных напряжений первого рода в работе использовали рентгеновский и механический методы. Механические свойства при растяжении определяли в соответствии с ГОСТ 1497-73 на испытательной машине растяжения-сжатия *Instron 3369*. Испытания на ударный изгиб выполняли на образцах с *U*-образными надрезами в соответствии с ГОСТ 9454-78 на маятниковом копре КМ-5Т. Для оценки циклической трещиностойкости материалов использовали методику, основанную на построении кинетических диаграмм усталостного разрушения (КДУР).

**В третьем разделе** «Влияние структуры сварных швов на особенности их деформации и разрушения» изучены дефекты кристаллического строения в сварных соединениях, полученных путем сварки листовых заготовок из сталей 20, 09Г2С и 30ХГСА. Проанализировано влияние этих дефектов на комплекс механических свойств материалов.

Наиболее дефектными участками соединения являются второй валик сварного шва и зоны термического влияния. При испытаниях на ударную вязкость и циклическую трещиностойкость на поверхностях изломов в зоне второго валика наблюдаются явные признаки хрупкого разрушения. В то же время тепло, выделившееся при сварке второго валика, способствовало перекристаллизации материала валика, наплавленного первым. Несмотря на присутствие грубых элементов структуры, перекристаллизация благоприятно отражается на механических свойствах материала первого валика. Его разрушение происходит по механизму, основанному на пластическом течении металла.

Зоны термического влияния, прилегающие к сварному шву и имеющие явно выраженное градиентное строение, содержат участки грубокристаллической структуры, сформированной на месте перегретого материала. В сталях 20 и 09Г2С наиболее характерными структурными элементами, свидетельствующими о перегреве металла и формировании крупнозернистого аустенита, являются выделения феррита видманштеттова типа.

В рамках решаемых в работе задач изучались особенности образования видманштеттова феррита, исследовалось его тонкое строение и объяснялись

особенности поведения сталей, содержащих феррит с чётко ориентированным строением, в процессе их пластической деформации. Во многих случаях при высокотемпературной обработке сталей образуется структура смешанного типа, содержащая одновременно кристаллы видманштеттова феррита и полиэдрический феррит. Возникает вопрос об очередности выделения феррита различного типа. Результаты металлографических исследований дают основания предположить, что на начальном этапе распада аустенита вдоль его границ выделяется феррит полиэдрического типа, который в дальнейшем выполняет функцию подложки для зарождающегося видманштеттова феррита. Однако анализ тонкого строения ферритных выделений вблизи бывших границ аустенитных зерен свидетельствует об обратном – кристаллы видманштеттова феррита выделяются самостоятельно, без участия полиэдрического феррита. Металлографически зафиксированы кристаллы видманштеттова феррита V-образной формы, со стрелами феррита, растущими в разные аустенитные зерна. Полиэдрический феррит обволакивает кристаллы видманштеттова типа.

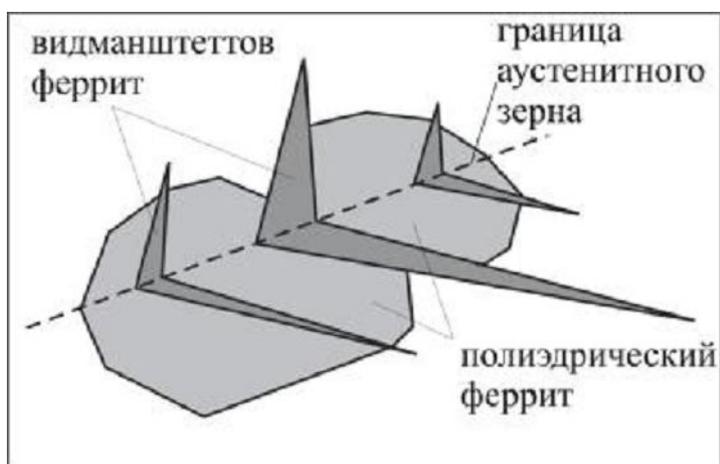


Рис. 1. Схема образования видманштеттова феррита.



Рис. 2. Слоистое строение пластин видманштеттова феррита.

Анализ результатов металлографических исследований позволяет предложить следующую схему образования структуры смешанного типа (рис. 1). На первом этапе распада  $\gamma$ -фазы зарождаются кристаллы видманштеттова феррита. Наиболее предпочтительными местами зарождения являются границы аустенитных зерен. На следующем этапе охлаждения промежутки между пластинами видманштеттова феррита заполняет феррит полиэдрического типа.

Структурные исследования свидетельствуют о том, что пластины видманштеттова феррита, как и кристаллы видманштеттова цементита, имеют слоистое строение (рис. 2). Толщина отдельных слоёв составляет  $\sim 300 \dots 1000$  нм. Анализ результатов структурных исследований позволяет

предположить, что механизмы образования пластин феррита (и цементита) видманштеттова типа и формирования в них слоистой структуры подобны. Особенности тонкого строения пластин свидетельствуют в пользу механизма роста кристаллов путём миграции ступенек вдоль их широких граней. Наблю-

даемые границы между отдельными слоями в кристаллах феррита могут дополнительно декорироваться различного рода структурными дефектами. При образовании видманштеттова феррита такого рода дефектами могут быть мелкие карбидные частицы, успевающие выделиться на межфазной ( $\alpha$ - $\gamma$ ) границе за время диффузионного роста пластины в продольном направлении. Учитывая изложенное выше, можно объяснить пониженную пластичность сталей, содержащих выделения видманштеттова феррита. Снижению пластичности сталей способствуют дефекты, расположенные по границам многочисленных слоёв. Распространяющаяся трещина находит наиболее слабые места в структуре феррита, которыми являются, по

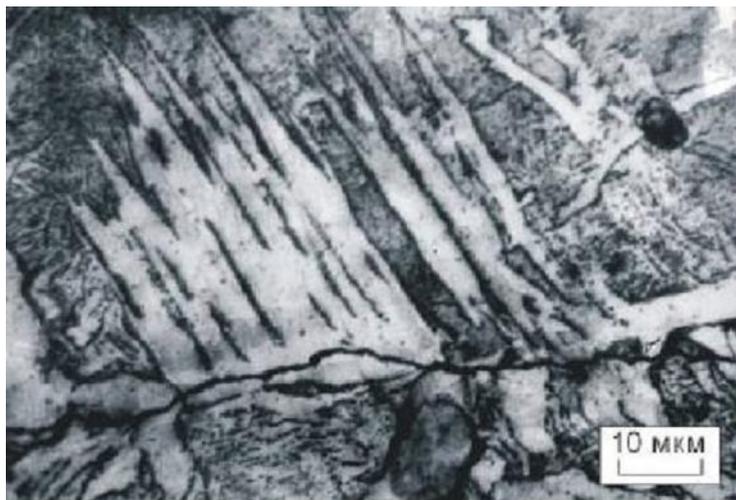


Рис. 3. Особенности разрушения структуры с видманштеттовым ферритом.

всей вероятности, границы между отдельными слоями пластины. Именно с этим явлением можно связать тот факт, что кристаллы видманштеттова феррита являются наиболее благоприятными местами развития усталостных трещин в сварных швах (рис. 3).

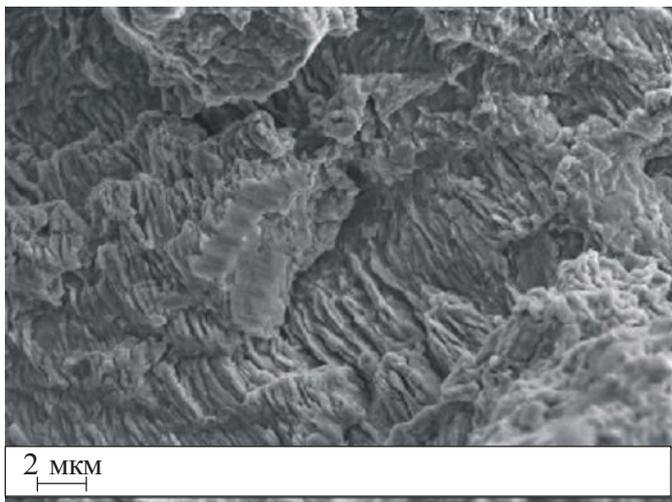
Результаты рентгеноструктурных исследований свидетельствуют о том, что в сварных швах сталей 09Г2С и 30ХГСА присутствуют кристаллы аустенита. Для сварных

швов, сформированных на стали 30ХГСА, характерно образование кристаллов мартенсита, имеющих преимущественно реечное строение. В то же время, имеются участки мартенсита двойникового типа.

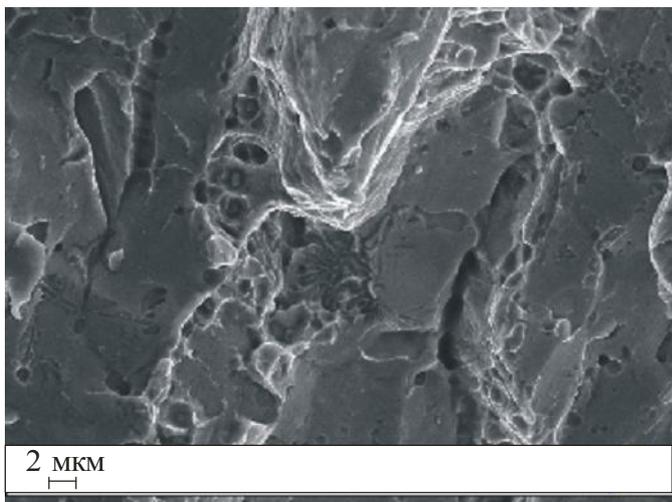
Условия нагрева и охлаждения, характерные для сварки исследуемых сталей, способствуют формированию неоднородного структурного состояния по сечению сварных соединений. Анализ количественных данных, полученных с использованием математического моделирования напряженно-деформированного состояния, показал, что при любых режимах сварки сталей 20, 09Г2С и 30ХГСА возникают растягивающие напряжения. На стали 30ХГСА максимальный уровень напряжений составляет более 400 МПа.

Литое строение сварных швов, наличие неравновесной структуры в зонах термического влияния и высокий уровень растягивающих напряжений являются причинами снижения механических свойств сварных соединений. Сварные швы характеризуются пониженными показателями пластических свойств и ударной вязкости. Для сварных конструкций ответственного назначения наиболее опасным является снижение показателей усталостной трещиностойкости, характеризующих способность материала работать в условиях циклического нагружения.

Влияние материала сварного шва на усталостную трещиностойкость может быть продемонстрировано на примере разрушения первого и второго свар-



а



б

Рис. 4. Поверхность разрушения сварных швов из стали 30ХГСА:

а - усталостные бороздки в первом валике; б – хрупкое разрушение второго валика.

ных валиков. Материал первого валика, подвергнутый дополнительному нагреву и перекристаллизации, в значительной степени восстановил свою пластичность и при продвижении трещины разрушается с образованием усталостных бороздок (рис. 4, а). В то же время второй сварной валик имеет принципиально иную структуру, характерную для литого состояния. Разрушение материала с такой структурой имеет преимущественно хрупкий характер (рис. 4, б).

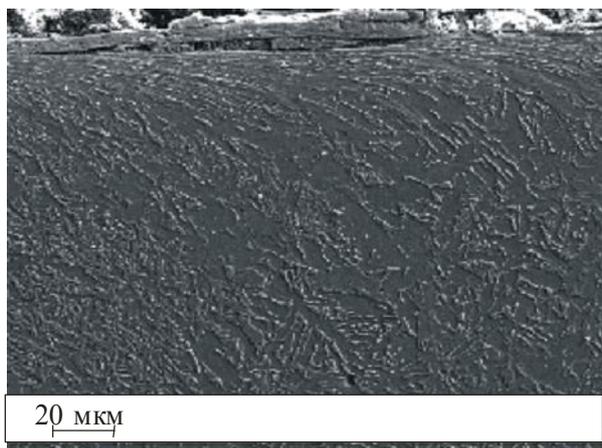
Существенным фактором, способствующим разрушению сварных швов, сформированных на стали 20, является присутствие в структуре значительного количества кристаллов феррита видманштеттова типа и мелкодисперсных цементитных включений, выделяющихся вдоль пластин  $\alpha$ -фазы.

Таким образом, полученные результаты структурных исследований свидетельствуют о необходимости обоснования таких технических решений, которые

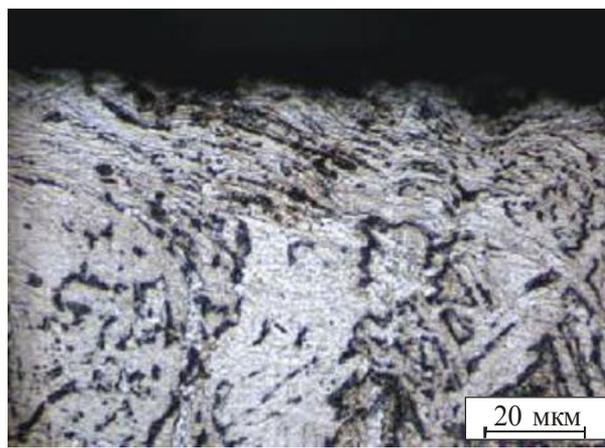
способствовали бы устранению отмеченных недостатков сварных соединений.

**В четвертом разделе** «Влияние интенсивной пластической деформации и последующего нагрева на структуру и свойства сварных соединений из углеродистых и легированных сталей» показано, что эффективным решением, способствующим устранению дефектов, характерных для сварных соединений, является применение интенсивной пластической деформации поверхностных слоев индентором сферической формы, колеблющимся с ультразвуковой частотой, и дополнительной термической обработки. В разделе представлены результаты исследования тонкого строения деформированных материалов, изучено влияние данной обработки на уровень остаточных напряжений и механические свойства сварных соединений.

Электронно-микроскопические исследования показали, что ультразвуковое пластическое деформирование приводит к резким изменениям морфологии структурных составляющих и дислокационной структуры  $\alpha$ -фазы в поверхностных слоях сварных швов (рис. 5, а). Взаимодействующие с инструментом



а



б

Рис. 5. Влияние интенсивной пластической деформации на структуру поверхностных слоев сварных швов (а) и зон термического влияния (б).

слои приобретают характерное строение, свидетельствующее о значительной деформации по схеме, сочетающей сдвиг и сжатие материала. В поверхностных слоях сварных швов на сталях 20 и 09Г2С, подвергнутых интенсивной пластической деформации, не наблюдается присутствия характерных признаков видманштеттова феррита. Пластины феррита сильно деформированы, границы между ними трудно идентифицируемы (рис. 5, б).

Показано, что в поверхностном слое глубиной до 400...450 мкм формируется градиентная структура. Особенности тонкого строения формируемого слоя определяются степенью пластической деформации материала на различной глубине от поверхности. Наиболее явные изменения, связанные с коллективной перестройкой дислокационной структуры, реализуются в слое глубиной менее 100 мкм. Установлено, что в сталях 20 и 09Г2С на глубине 50...100 мкм формируется дислокационная структура с

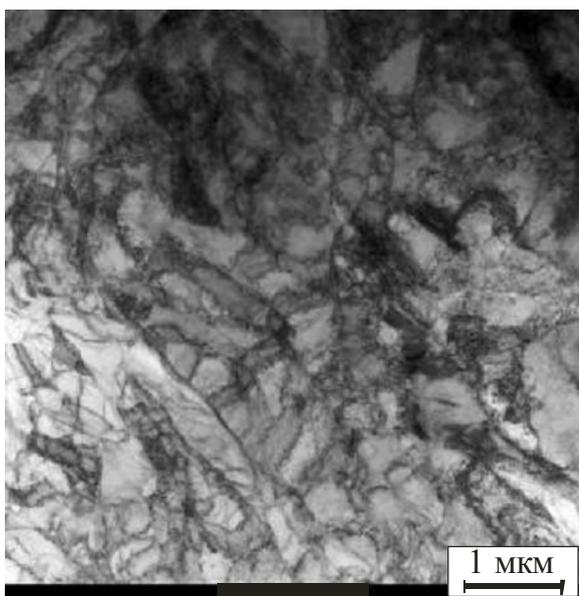
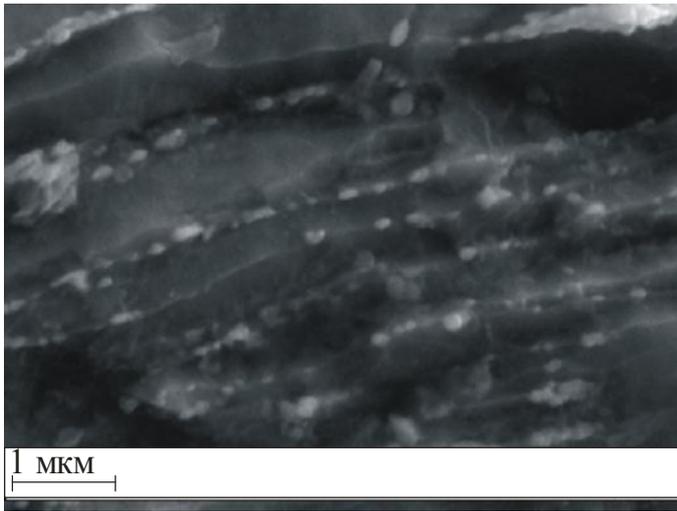


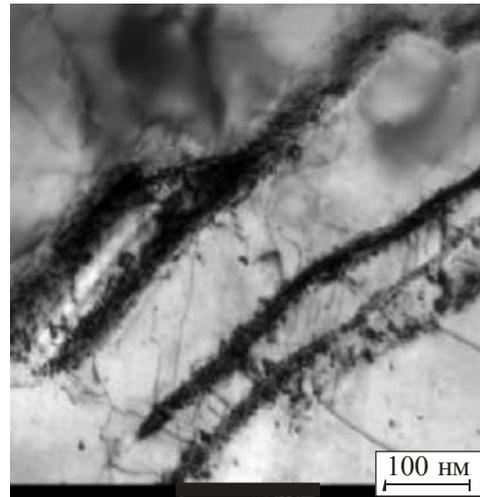
Рис. 6. Фрагментированная в результате интенсивной пластической деформации структура  $\alpha$ -железа сварного шва стали 09Г2С на глубине  $\sim 50$  мкм от поверхности.

размерами фрагментов 250...300 нм (рис. 6). Размер областей когерентного рассеяния непосредственно у поверхности составляет  $\sim 25$  нм.

Существенным изменениям подвергается карбидная фаза сварных швов и околошовных зон. На рис. 7а показаны глобулярные выделения, декорирующие границы зерен  $\alpha$ -фазы. Под действием индентора цементитные пластины деформируются, теряют устойчивость и измельчаются. Электронномикроскопические изображения, полученные в рефлексе цементита, свидетельствуют о том, что в процессе интенсивной пластической деформации цементит делится на отдельные фрагменты размерами 25...30 нм.



а



б

Рис. 7. Цементитные частицы в поверхностных слоях интенсивно деформированных сварных швов на стали 20 (а) и 09Г2С (б).

Экспериментально подтверждены известные данные о растворении цементитных пластин, обусловленном резким повышением плотности дислокаций в ферритной матрице. В этой связи можно было бы ожидать уменьшения количества карбидной фазы в исследуемых микрообъемах материала. Однако структурными исследованиями это предположение не подтвердилось. Причина этого обусловлена, вероятно, тем, что в условиях многократного динамического воздействия поверхностный слой стали нагревается, в результате чего избыточный углерод из твердого раствора выделяется на имеющихся цементитных частицах и образуются новые мелкодисперсные частицы карбидов. Конкуренция двух противоположно направленных процессов приводит к тому, что объемная доля цементита заметно не изменяется. Деформация сварных швов, сформированных на сталях 09Г2С и 30ХГСА, приводит также к изменениям, связанным с количеством остаточного аустенита. После ультразвуковой обработки стали 09Г2С аустенит в сварных швах рентгенографически не идентифицируется (рис. 8). В стали 30ХГСА его объемная доля уменьшается в 2 раза - с 9 % до 4 %

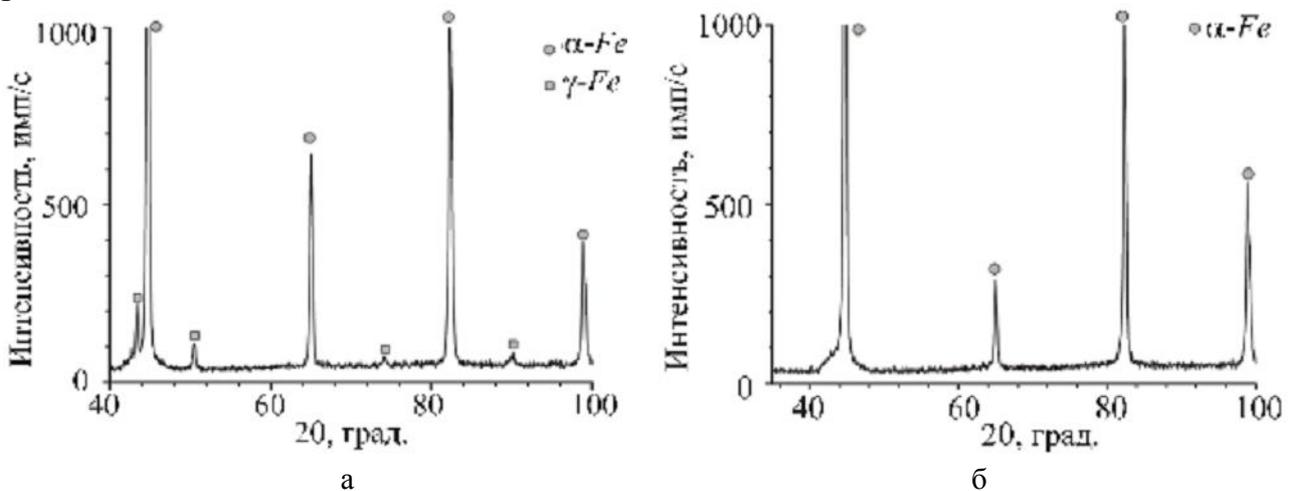


Рис. 8. Рентгенограммы сварных швов на стали 09Г2С до (а) и после (б) интенсивной пластической деформации.

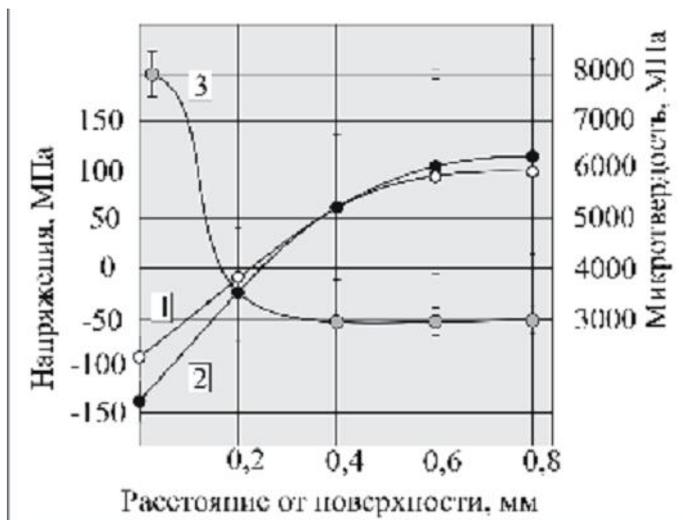


Рис. 9. Распределение остаточных напряжений по глубине сварного соединения из стали 30ХГСА: 1 – продольные напряжения; 2 – поперечные напряжения; 3 – микротвердость.

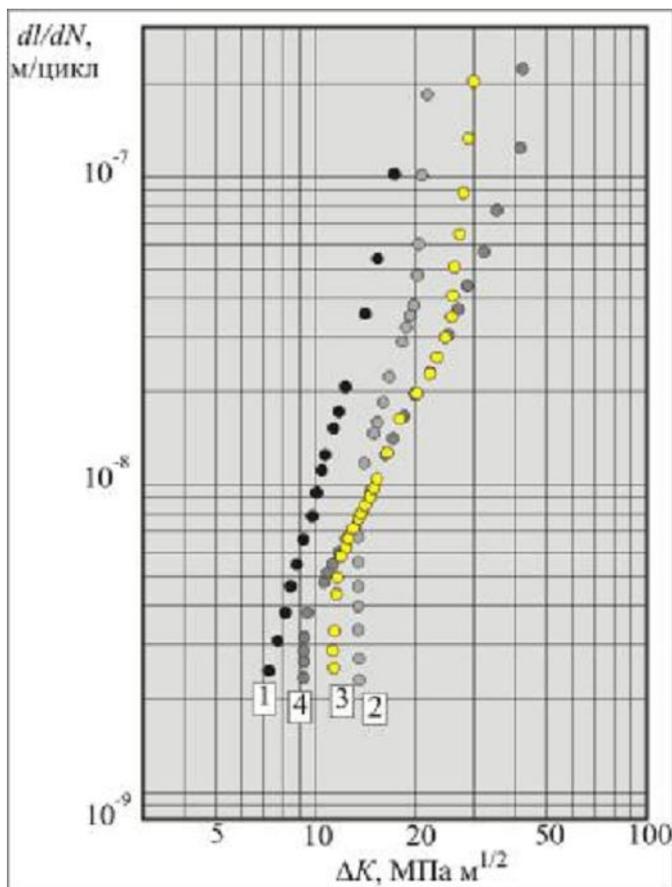


Рис. 10. Кинетические диаграммы усталостного разрушения сварных соединений из стали 20 без дополнительной обработки (1), после интенсивной пластической деформации (2) и последующего нагрева при 550 °С (3) и 650 °С (4).

В результате структурных изменений, происходящих в поверхностных слоях сварных соединений после поверхностной пластической деформации, значительно повышается микротвердость материала (рис. 9).

Рентгеноструктурным анализом и математическим моделированием методом конечных элементов показано, что интенсивная деформация поверхностных слоев приводит к смене растягивающих напряжений сжимающими. При реализации используемых в работе режимов сварки и ультразвуковой обработки на поверхности стали 20 формируются сжимающие напряжения с уровнем до 80 МПа, на стали 09Г2С – до 80...100 МПа.

Максимальные сжимающие напряжения в сварных соединениях образуются на поверхности.

Глубина слоя, в котором удалось сформировать напряжения сжатия, достигает 200...250 мкм.

Результатом благоприятных изменений, касающихся как тонкой структуры поверхностных слоев сварных швов, так и уровня сжимающих напряжений, является резкое улучшение показателей циклической трещиностойкости. Критические значения размаха коэффициента интенсивности  $\Delta K_{th}$ , характеризующие условия старта трещины, повышаются в 1,5...2 раза (рис. 10). При этом, показатели прочностных свойств и ударной вязкости существенно не изменяются. Полученные данные свидетельствуют о высокой эффективности пластической

деформации сварных швов индентором, колеблющимся с ультразвуковой частотой. Еще одна из возможностей повышения комплекса показателей конструктивной прочности сварных швов заключается в использовании комбинированной обработки, сочетающей интенсивную пластическую деформацию по технологии ультразвукового пластического деформирования с последующим нагревом сварных соединений.

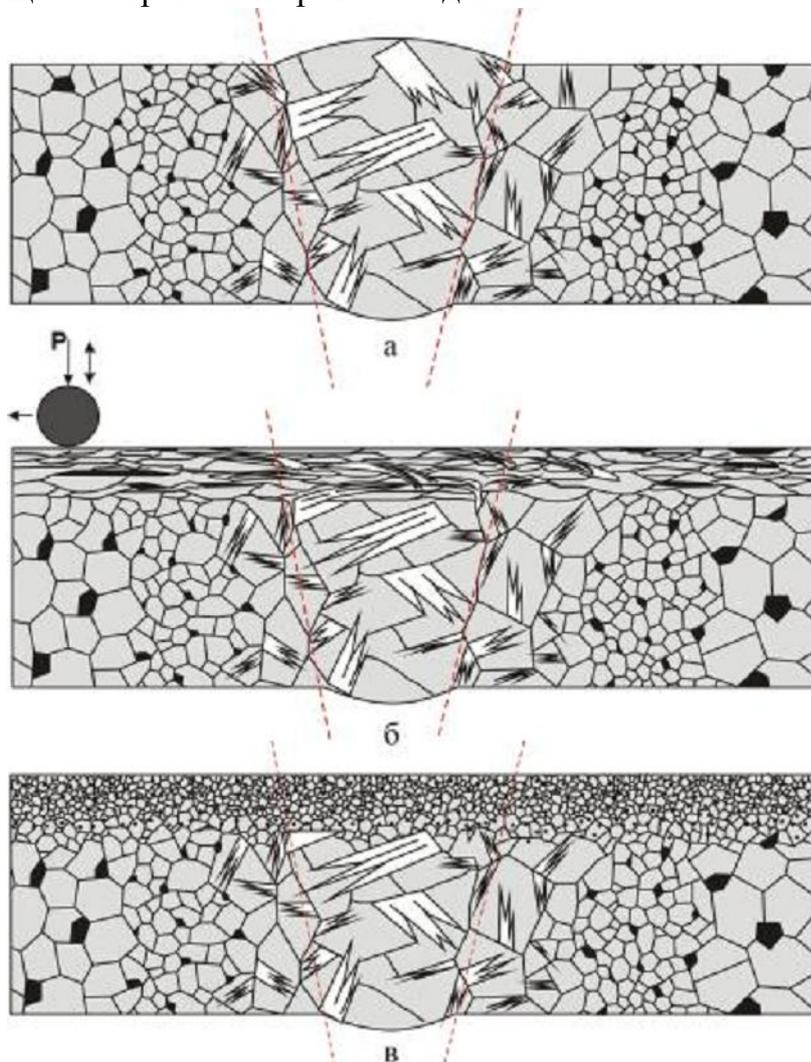


Рис. 11. Структура сварного соединения: а – после сварки; б – после обработки поверхности сферическим индентором; в – после поверхностной деформации и нагрева до температуры рекристаллизации феррита.

ударной вязкости материала сварного шва (рис. 12). Однако, приводя к росту показателей ударной вязкости, нагрев материала способствует снижению уровня сжимающих напряжений, что в итоге приводит к снижению значений  $\Delta K_{th}$ . Проведенные исследования показали, что с целью обеспечения высокого уровня усталостной трещиностойкости нагрев сталей 20 и 09Г2С должен быть на 30...50 °С ниже температуры рекристаллизации ферритной матрицы.

Анализ результатов исследований, приведенных в разделе 4, свидетельствует о том, что интенсивная пластическая деформация поверхностных слоев дефектных зон сварных соединений, осуществляемая сферическим индентором,

Схематически последовательность технологических операций, обеспечивающих благоприятную структуру поверхностного слоя сварного шва и зон термического влияния, представлена на рис. 11. Подбирая температурно-временные режимы нагрева могут быть обеспечены условия для реализации начального этапа первичной рекристаллизации и измельчения зеренной структуры (рис. 11, в). Развитие процессов первичной рекристаллизации деформированного феррита в сварных соединениях из стали 20 при 550 °С обеспечивает получение ультрамелкозернистой структуры (с размером зерен ~ 0,5...1 мкм). Такая структура является весьма благоприятной с точки зрения повышения показателей пластичности и

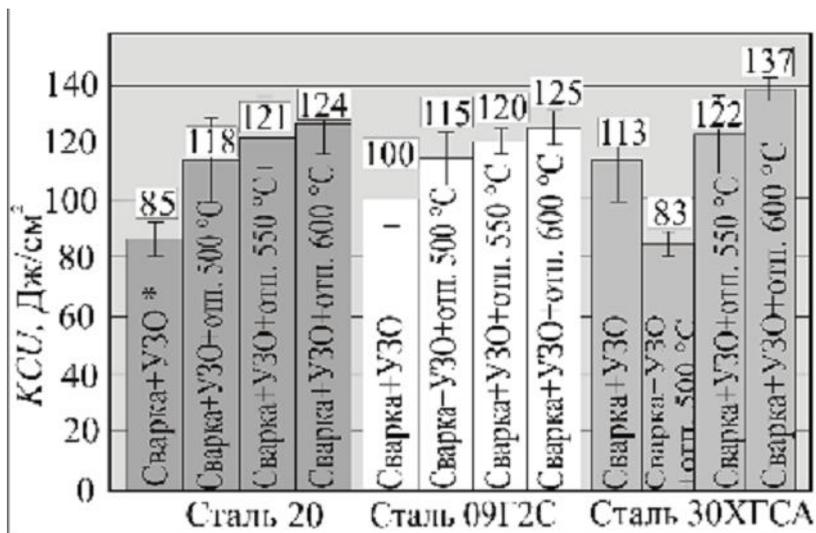


Рис. 12. Ударная вязкость сварных соединений:

\* - УЗО – интенсивная пластическая деформация.

колеблющимся с ультразвуковой частотой, является эффективным методом повышения показателей конструктивной прочности материалов. Ее применение рационально при изготовлении сварных конструкций, предназначенных для работы в тяжелых условиях внешнего нагружения. Сочетание технологии ультразвукового пластического деформирования с последующим контролируемым нагревом позволяет обеспечить высокий уровень показателей циклической трещиностойкости сварной конструкции и ударной вязкости материала шва.

Пятый раздел «Применение результатов исследований при решении производственных задач и в учебном процессе» имеет прикладной характер. В нем рассматриваются возможности применения полученных результатов на практике. Анализ технологического процесса поверхностной пластической деформации дефектных зон сварных соединений свидетельствует об экономической эффективности его применения в промышленном производстве. На примере изготовления цистерны массой 1 т показано, что срок окупаемости предлагаемого процесса составляет менее 2 лет.

Результаты проведенных исследований использованы для решения практических задач, поставленных промышленными предприятиями. Предложенные технические решения позволили уменьшить уровень внутренних напряжений в раскатных роликах, применяемых в НПО «Сибсельмаш», и в три раза увеличить их стойкость.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе в ГОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет» в учебных курсах, читаемых при подготовке инженеров по специальности «Материаловедение в машиностроении» и магистров по направлению «Материаловедение и технология новых материалов». С участием автора диссертационной работы разработана научно-учебная установка по ультразвуковой обработке деталей цилиндрической формы и модернизированы установки для испытания машиностроительных материалов на циклическую и ударно-усталостную трещиностойкость. Установки используются научными сотрудниками и студентами механико-технологического факультета НГТУ при реализации научного и учебного процессов.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. С использованием методов структурного анализа и математического моделирования изучены особенности структурных преобразований, имеющих место при реализации электродуговой сварки листовых заготовок из сталей 20, 09Г2С и 30ХГСА. Показано, что сварные швы и зоны термического влияния характеризуются наличием большого количества дефектов кристаллической структуры, определяющих поведение сварных конструкций ответственного назначения в тяжелых условиях внешнего нагружения. С целью устранения дефектов кристаллического строения, типичных для сварных соединений, рекомендованы интенсивная пластическая деформация поверхностных слоев дефектных зон и дополнительный нагрев деформированного материала.

2. Изучены особенности тонкого строения кристаллов видманштеттова феррита, объясняющие особенности их поведения в условиях циклического нагружения сталей. Установлено, что пластины видманштеттова феррита, как и пластины цементита, имеют слоистое строение. Толщина образующихся слоев составляет  $\sim 300 \dots 1000$  нм. Межслойные границы являются местами выделения мелкодисперсных цементитных частиц, ограничивающих пластические свойства материала. В присутствии низкопрочных межслойных границ ферритные пластины теряют запас пластичности. Экспериментально показано, что траектория развития усталостных трещин в швах, полученных при электродуговой сварке углеродистых сталей, связана с местами выделения феррита видманштеттова типа.

3. Экспериментально установлено, что при образовании по границам аустенитных зерен ферритной структуры смешанного типа первыми образуются кристаллы видманштеттова типа. Промежутки между выделившимися на первом этапе пластинчатыми кристаллами заполняются ферритом полиэдрического типа.

4. Методами структурного анализа установлено, что при интенсивной пластической деформации дефектных зон сварных соединений сферическим индентором, колеблющимся с ультразвуковой частотой, в поверхностном слое глубиной до  $400 \dots 450$  мкм формируется градиентная структура. Особенности тонкого строения формируемого слоя определяются степенью пластической деформации материала на различной глубине от поверхности. Наиболее явные изменения, связанные с коллективной перестройкой дислокационной структуры, реализуются в слое глубиной менее 100 мкм. Установлено, что в сталях 20 и 09Г2С на глубине  $50 \dots 100$  мкм формируется дислокационная структура с размерами фрагментов  $250 \dots 300$  нм. Размер областей когерентного рассеяния непосредственно в поверхностном слое, деформированном индентором, составляет  $25 \dots 50$  нм.

6. Интенсивная пластическая деформация сварных швов и околошовных зон колеблющимся с ультразвуковой частотой индентором благоприятно отражается на характере напряженно-деформированного состояния материалов. При поверхностном упрочнении сварных соединений из стали 30ХГСА про-

изошло изменение знака остаточных напряжений – от растягивающих (~ 400...450 МПа) к сжимающим (~ 100 МПа).

7. Установлено, что ультразвуковая обработка не оказывает заметного влияния на прочностные характеристики и ударную вязкость сварных соединений. Объясняется это относительно малой глубиной упрочненного слоя. Наиболее благоприятное воздействие интенсивная пластическая деформация поверхностных слоев сварных швов и прилегающих к ним зон оказывает на показатели циклической трещиностойкости материалов. Обработка дефектных зон материала высокопрочным индентором, колеблющимся с ультразвуковой частотой приводит к росту пороговых значений размаха коэффициента интенсивности напряжений в 1,5...2 раза. Основными факторами, способствующими этому, являются формирование высокодисперсных цементитных частиц, фрагментированной дислокационной структуры и формирование остаточных напряжений сжимающего типа.

8. Дополнительная термическая обработка интенсивно деформированных слоев позволяет сформировать ультрамелкозернистую структуру феррита (0,5...1 мкм) с равномерно распределенными карбидными частицами размерами ~ 25 нм и снизить тем самым склонность материала к внезапному хрупкому разрушению. Однако при этом снижается уровень остаточных сжимающих напряжений и, соответственно, уменьшается величина порогового значения размаха коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta K_{th}$ . Повышение температуры нагрева сварных соединений до температур, обеспечивающих развитие рекристаллизационных процессов в поверхностных слоях деформированных зон не рационально.

9. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе в ГОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет» при подготовке инженеров по специальности «Материаловедение в машиностроении» и магистров по направлению «Материаловедение и технология новых материалов» в учебных курсах, связанных с проблемами повышения надежности и долговечности сварных соединений. С использованием результатов проведенных исследований решен ряд практических задач по повышению надежности и долговечности тяжело нагруженных деталей машин, поставленных промышленными предприятиями. Эффективность предложенных технических решений подтверждена актами промышленных испытаний.

#### **Основные положения диссертации опубликованы в работах:**

1. Особенности строения кристаллов видманштеттова феррита и цементита / И. А. Батаев, А. А. Батаев, В. Г. Буров, Я. С. Лизункова, Е. Е. Захаревич // Сталь. – 2008. – № 8. – С. 99–102.

2. Восстановление валов электрических машин с использованием технологии наплавки и ультразвуковой обработки покрытий / А. М. Кручинин, Е. Е. Захаревич, И. А. Батаев, А. А. Батаев, В. Г. Буров // Материаловедение. – 2008. – № 3. – С. 45–48.

3. Пат. 2361030 Российская Федерация, МПК, E01B 11/44, B23K 11/04. Способ сварного соединения крестовины из марганцовистой стали с рельсом из углеродистой стали / А. А. Батаев, В. А. Батаев, В. Г. Буров, А. А. Никулина, Е. Е. Захаревич, И. А. Батаев и др.; патентообладатель Новосибирский государственный технический университет. – № 2007142082/11; заявлен 13. 11. 2007 г.; опубликован 10. 07. 2009, Бюл. № 19. – 6 с.

4. Захаревич Е. Е. Повышение качества сварных соединений путем применения ультразвуковой обработки / Е. Е. Захаревич, И. А. Батаев // Новые материалы. Создание, структура, свойства : тр. 6 Всерос. шк. - семинара, Томск, 2006 г. – Томск : Изд-во ТПУ, 2006. – С. 100–102.

5. Захаревич Е. Е. Исправление дефектной структуры сварного соединения методом ультразвуковой обработки и термическим нагревом / Современные проблемы машиностроения : тр. 3 Междунар. науч. – техн. конф., Томск, 2006 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – С. 56–57.

6. Захаревич Е. Е. Комбинированная обработка сварных соединений путем сочетания ультразвукового и термического воздействия / Е. Е. Захаревич, И. А. Батаев // Современные техника и технологии : 18 Междунар. науч. – практ. конф. «Современные техника и технологии», Томск, 26–30 марта 2007 г. : тр. в 3-х т. – Томск : Изд-во ТПУ, 2007 – Т. 2. – С. 85–87.

7. Захаревич Е. Е. Обработка сварных соединений из стали 20 ультразвуковым воздействием / Е. Е. Захаревич, Н. В. Плотникова // Актуальные проблемы современной науки : тр. 3 Междунар. форума (8 Междунар. конф. молодых ученых и студентов). Естественные науки. 3. Механика. Машиностроение, Самара, 2007 г. – Самара : Изд-во СамГТУ, 2007. – С. 42–46.

8. Захаревич Е. Е. Изменение механических свойств сварных соединений после ультразвуковой обработки / Е. Е. Захаревич, И. А. Батаев, Н. В. Плотникова // Современные техника и технологии : 14 Междунар. науч. – практ. конф. «Современные техника и технологии», Томск, 24–28 марта 2008 г. : тр. в 3-х т. – Томск : Изд-во ТПУ, 2008. – Т. 2. – С. 58–59.

9. Корниенко Е. Е. Структурные и фазовые превращения в сварных швах сталей 20, 09Г2С и 30ХГСА при ультразвуковой обработке / Е. Е. Корниенко, Н. В. Плотникова // Современные проблемы и технологии машиностроения : Всерос. науч. – практ. конф.: сб. тр., Новосибирск, 2009 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2009. – С. 249–253.

Отпечатано в типографии Новосибирского  
государственного технического университета  
630092, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20, тел. 346-08-57  
формат 60x84/16, объем 1.25 п.л., тираж 100 экз.,  
заказ № 1670 подписано в печать 23.11.09 г.