

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный  
технический университет»

На правах рукописи

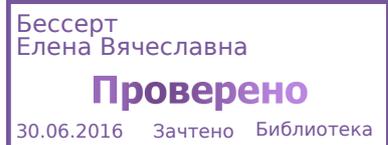
Абрамов Павел Александрович

**Исследование влияния структурного и напряженного состояния на физико-механические свойства сталей, применяемых для изготовления нефтехимического оборудования**

Направление подготовки

22.04.01- «Материаловедение и технологии материалов»

**АВТОРЕФЕРАТ  
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**



2016

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Интенсивное повышение технического уровня и эффективности производства нефтяной промышленности и создание и освоение современных технологий с улучшением качества продукции определяют устойчивый интерес к проблеме оценки влияния напряженного и структурного состояния, существенно влияющих на технологические и эксплуатационные свойства материалов, применяемых для изготовления нефтехимического оборудования. Особое значение приобретает проблема данных факторов в деталях и узлах ответственного назначения, изготовленных из углеродистых и легированных сталей, условия эксплуатации, которых предполагают воздействие существенных механических нагрузок и коррозионно-активных сред.

В связи с этим, одной из ключевых задач становится обеспечение создания методики, включающую в себя оценку структуры, а также напряженного и дефектного состояния материала, как на этапе изготовления, так и в процессе производства и эксплуатации изделий.

Наиболее целесообразное решение этой задачи связано с применением новых методов неразрушающего контроля, таких как метод эффекта магнитных шумов Баркгаузена и давно подтвердившего свою эффективность – акустико-эмиссионного контроля. Однако, широкое применение этих методов сдерживается неоднозначностью зависимости известных информативных параметров от уровня микро- и макронапряжений, отсутствием данных об исследованиях конструкционных материалов, в частности, высоколегированных мартенситных и углеродистых сталей, применяемых в различном термообработанном состоянии.

Таким образом, разработка новых методик оценки влияния напряженного, дефектного и структурного состояния материалов, разработка новых информативных параметров и алгоритмов контроля, создание аппаратуры, разработка методических основ их использования для контроля металлоизделий в нефтепромышленных условиях является **актуальностью данной работы.**

**Целью работы** является установление влияния структурного, напряженного и легированного состояния на показатели механических свойств материалов, применяемых для изготовления нефтехимического оборудования, а также на их характер деформации и разрушения.

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие основные **задачи**:

1) разработка методики проведения исследований и испытаний материалов в различном структурном состоянии;

2) проведение термической обработки выбранных материалов для получения различных структурных состояний;

3) проведение исследований оценки напряженного состояния материалов в условиях воздействия упругих напряжений, с применением магнитных методов;

4) проведение исследований для изучения характера накоплений повреждений при пластической деформации и разрушении материалов методом АЭ;

5) анализ проведенных исследований и испытаний, и последующая разработка критериев оценки напряженного состояния и параметров повреждений исследуемых материалов.

### **Объект и предмет исследования**

Объектом исследования являются стали следующих марок: Ст20, Ст45, 15Х5М и 40Х13. Предметом исследования является оценка влияния структурного и напряженного состояния на физико-механические свойства данных сталей стали, при применении различных режимов термической обработки.

### **Методы исследования**

Выполнение научных исследований проводилось на основе экспериментов с использованием магнитных, акустических и механических методов испытаний, а также результатов металлографического анализа, статистических методов обработки экспериментальных данных.

### **Новизна полученных результатов**

В работе представлен анализ напряженного состояния, показателей механических свойств стали, структуры сталей, используемых для изготовления нефтехимического оборудования. Новизна работы заключается в применении методов анализа, ранее не используемых для данных типов сталей, и оценке показателей, которые не регламентируются нормативно-технической документацией на данные типы сталей. В работе выполнен анализ напряженного состояния, состояния накопления повреждений. По результатам оценки анализируемых показателей были установлены предположительные причины протекания данных процессов.

### **Достоверность и обоснованность результатов исследования**

Достоверность полученных и представленных в диссертации результатов подтверждается использованием современных независимых, взаимодополняющих методов исследования, большим объемом непротиворечивых экспериментальных данных, согласованность сданными теоретических исследований. Анализ экспериментальных данных проведен с соблюдением критериев достоверности измерений.

### **Практическая значимость и ценность работы**

Практическая значимость работы заключается в получении результата – установлении влияния структурного и напряженного состояния на механические свойства исследуемых сталей. Ценность работы заключается в предложении новой методики оценки параметров напряженности и показателей механических свойств, позволяющей выполнить оценку их влияния на возможность применения выбранного материала в требуемом технологическом процессе.

### **Личный вклад автора**

Представленные в работе результаты получены лично автором или при его непосредственном участии.

Анализ литературных источников, экспериментальные исследования, а

также обработка и анализ результатов экспериментов выполнены лично автором. Постановка задач исследований и обсуждение результатов проведено при непосредственном участии автора совместно с научным руководителем.

### **Основные положения выносимые на защиту**

На защиту выносятся следующие основные положения и результаты работы:

1. Соответствие исходных данных нормативной документации.
2. Влияние режимов проведенной термической обработки на твердость, значение коэрцитивной силы, среднеквадратичного значения шумов Баркгаузена (в нагруженном и ненагруженном состоянии) и исследование влияния термической обработки на стадийность накопления повреждений при деформации, с применением акустико-эмиссионного контроля.
3. Выводы по результатам проведенных исследований.

### **Апробация результатов работы**

Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на Научной технической конференции студентов и аспирантов КНАГТУ (апрель 2016 г.).

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 3 глав, списка литературы; изложена на 72 страницах, включает 36 рисунков, 31 таблицу. Список литературы содержит 16 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы и определены основные направления исследования.

В **первой главе** проведены основные теоретические сведения, описывающие методы неразрушающего контроля и оценки структурного и напряженного состояния металлических материалов, а также классификация сталей и виды термической обработки применяемых в нефтехимии.

Во **второй главе** приведено описание материала и методики исследования.

Для проведения исследования были изготовлены образцы трех видов из прутков. Образцы для испытаний на сжатие с применением оборудования для регистрации шумов Баркгаузена, образцы для испытаний на растяжение с применением оборудования для регистрации акустической эмиссии и образцы для оценки структурного состояния.

Все образцы подвергались определению химического содержания элементов, измерению твердости и термической обработке.

После проведения термической обработки, был произведен контроль качества путем измерения значений твердости, стали 45 и 40X13 по шкале HRC, стали 15X5M по шкале HB. Перед испытаниями, образцы типа I подвергались процессу измерения коэрцитивной силы.

Образцы типа I подвергались исследованиям с применением прибора для регистрации шумов Баркгаузена, в различном термообработанном состоянии. Исследование образцов проводилось, как в нагруженном, так и не в нагруженном состоянии.

Образцы типа II подвергались испытаниям на растяжение с применением прибора для регистрации акустической эмиссии, в различном термообработанном состоянии.

Образцы типа III исследовались, путем оценки структурного состояния с применением металлографических исследований.

**В третьей главе** представлены результаты исследования. В начале исследовательской работы были определены химический состав и значения твердости исследуемых сталей. Исходя из анализа полученных значений можно сделать вывод, что содержание химических элементов и значения твердости соответствует установленным нормам.

Пройдя термическую обработку, образцы (тип I, II, III) были подвергнуты контролю качества путем измерения значений твердости. Исходя из анализа полученных значений можно сделать вывод, что значения твердости, полученные после проведения термической обработки, соответствует установленным нормам.

Пройдя процесс измерения твердости, образцы типа I в последующем подверглись процессу измерения коэрцитивной силы ( $H_c$ ) и значений RMS в ненагруженном состоянии, с применением прибора для регистрации шумов Баркгаузена.

Из полученных данных наблюдается четкая взаимосвязь между такими параметрами как  $H_c$  и твердость, наибольшее значение  $H_c$  принимает в том случае, когда значение твердости максимально, за исключением низкоотпущенного состояния, что по себе логично так, как низкий отпуск служит для снятия внутренних напряжений и сохранения исходных значений твердости. Что касается значений RMS, то здесь наблюдается обратная взаимосвязь, чем выше твердость, тем ниже RMS.

Объясняется это тем, что, как известно, коэрцитивная сила - это значение напряженности магнитного поля для размагничивания ферромагнитного вещества, а в основе метода применяемого для регистрации значений RMS лежит именно способ перемагничивания ферромагнетика (т. е. внесение переменного магнитного поля, сгенерируемого прибором для регистрации ШБ, в собственное магнитное поле исследуемых образцов), соответственно можно предположить, что при определенных режимах термообработки доменная структура материала в связи с изменениями значений  $H_c$  либо беспрепятственно ориентиру-

ется по направлению возбуждаемого магнитного поля, в том случае когда значение коэрцитивной силы имеет минимальное значение, и наоборот когда  $H_c$  имеет максимальное значение возникает необходимость во внесении магнитного поля с большей напряженностью, для того чтобы цикл перемагничивания был осуществлен.

Вторым этапом исследований, является проведение испытаний на сжатие образцов типа 1 с применением прибора для регистрации шумов Баркгаузена. Исследование проводилось в упругой области нагружения.

Для начала стоит отметить тот факт, что в независимости от того какой режим термообработки и для какой стали проведен, наблюдается уменьшение значения RMS с увеличением напряжения, как для углеродистых, так и для легированных сталей.

Как и в ненагруженном состоянии, так и в нагруженном состоянии RMS имеет минимальные значения в закаленном состоянии для Ст45 и 40X13, и в отожжённом состоянии с охлаждением на воздухе для стали 15X5M. Однако, в данных случаях наблюдается небольшой скачок значения RMS, что объясняет тот факт, что в закаленном состоянии значение коэрцитивной силы имеет максимальное значение, тем самым возникает необходимость во внесении магнитного поля с большей напряженностью, для того чтобы цикл перемагничивания был осуществлен.

Максимальные значения наблюдаются при режимах: закалка + высокий отпуск (Ст45, 40X13), и в состоянии поставки для стали 15X5M.

Стоит также отметить, что с повышением напряжения для Ст45 значения RMS в высокоотпущенном и в низкоотпущенном состоянии приблизительно равны друг другу. Что касается стали 40X13, то здесь можно заметить, что с повышением напряжения значения RMS в высокоотпущенном и в закаленном состоянии также приблизительно равны друг другу.

У стали 15X5M также наблюдается приближенное равенство значений RMS в состоянии поставки и в отожжённом состоянии с охлаждением в печи.

Подводя промежуточные итоги, стоит рассмотреть влияние состояния микроструктуры на характеристики, описанные выше, так, например, увеличение значения  $H_c$  и тем самым уменьшение значений RMS, по всей видимости, происходит из-за содержания углерода и легирующих элементов. Повышение содержания углерода приводит к увеличению  $H_c$ , и тем самым снижению намагниченности насыщения. Это хорошо видно на примере сравнения Ст20 и Ст45. Также содержание хрома приводит к подобным последствиям, это просматривается так же на примере сравнения Ст45 и 40X13, в которых содержание углерода практически одинаковое, и разница лишь в процентном содержании хрома.

Также на изменение значений  $H_c$  и тем самым значений RMS влияет дисперсность включений. Так, например, у стали 15X5M дисперсность включений (таких как карбидов хрома) в состоянии поставки ниже, чем у стали 40X13. Тем самым значение  $H_c$  у стали 15X5M - 20,4 А/см, а значение RMS – 0,596, в то время как у стали 40X13 – 21,8 и 0,460 соответственно. Таким образом можно предположить, что чем больше количество включений в микроструктуре металла, тем выше значение коэрцитивной силы и меньше значение RMS.

Так же большое значение может иметь величина зерна на примере сравнения показателей магнитных параметров и микроструктурного состояния на примере стали 45, в состоянии поставки. В данном случае величина зерна больше чем в высокоотпущенном состоянии

Так при крупнозернистой структуре углеродистой стали Ст45, значение  $H_c$  и значение RMS, меньше чем при мелкозернистой. Такая же зависимость наблюдается и у легированных сталей (40X13).

Исходя из этого можно сделать вывод, что образцы в высокоотпущенном состоянии обладают большими внутренними напряжениями, нежели образцы в состоянии поставки, и тем самым сложнее поддаются перемагничиванию.

Для исследования влияния режимов термической обработки на стадийность накопления повреждений при пластической деформации, процесс проведения испытаний проводился на образцах типа II.

При изучении данных накопления сигналов от времени всех четырех марок стали в состоянии поставки можно отметить наличие 5 стадий.

Первая стадия (стадия «упругости») характеризуется слабой активностью АЭ наличием небольшого пика к моменту ее окончания.

Стадия вторая является началом пластической деформации характеризуется значительным повышением активности АЭ, что предположительно свидетельствует об активной генерации дислокаций в материале.

На третьей стадии, по всей видимости, наблюдается процесс деформационного упрочнений. Генерация сигналов АЭ максимальна. Данное повышение, предположительно, вызвано совокупным действием двух факторов: активным развитием дислокационных механизмов деформации (сдвиги и двойникование) и микрорастрескиванием поверхностного слоя. Несмотря на это, деформационное упрочнение должно сопровождаться повышением плотности дислокаций и тем самым снижением энергии.

Стадия четвертая является спадом деформационного упрочнения, и тем самым, активность АЭ на данной стадии монотонно снижается.

Для предотвращения повреждения датчиков АЭ, их снятие происходило перед разрушением – в момент образования «шейки», поэтому активность АЭ увеличивается лишь перед разрушением.

При испытании высокоотпущенных материалов наблюдается равномерно повышение активности АЭ без наличия стадии пластической деформации, что указывает на наличие достаточно твердой структуры по сравнению со структурой в состоянии поставки, но также присутствует стадия деформационного упрочнения, судя по наличию максимальной генерации сигналов АЭ. У стали 45 перед началом образования «шейки» увеличение сигналов АЭ отсутствует.

При испытании стали 15Х5М в отожженном состоянии стоит отметить значительное количество пиков сигналов АЭ.

Низкоотпущенная сталь 40Х13 в ходе испытаний приобретает резкое увеличение генерации АЭ, что обусловлено значительной хрупкостью материала

(твёрдость – 53 HRC) и тем самым образование большого количества микро-трещин на поверхности металла.

Что касается характера накопления повреждений, то здесь можно предположить, что чем больше в стали легирующих элементов, тем больше регистрируется сигналов АЭ, что в свою очередь говорит нам о присутствии большого количества микроструктурных неоднородностей, вызванных присутствием легирующих элементов.

При анализе характера накопления суммарной АЭ при пластической деформации, можно также сделать предположение, что стали, которые имеют большое количество сигналов с малой энергией, являются мелкозернистыми в своей структуре.

Сталь 40X13 в высокоотпущенном состоянии обладает мелкозернистой структурой, и тем самым большим количеством сигналов, около 2500 единиц, при этом не большой, относительно остальных сталей накопленной энергией – около 240 единиц.

При выше изложенном, также можно предположить, что стали имеющие крупнозернистую структуру, обладают наличием малого количества накопленных сигналов, но при этом большой энергией.

Если сравнивать микроструктуру стали 15X5М в состоянии поставки и в отожженном состоянии, то в первом случае микроструктура является мелкозернистой, при этом количество сигналов суммарной АЭ приблизительно равно  $\sum N_{АЭ} = 1200$  сигналов, в то время как в отожженном состоянии всего лишь 320, но при этом с большей накопленной энергией  $\sum E_{АЭ} = 1500 \text{ мВ}^2 \cdot \text{с}$ . Данная особенность вызвана тем, что при мелкозернистой структуре величина пробега микродефектов, таких как дислокаций меньше, чем в крупнозернистой, тем самым возникает большое количество соударений данных дефектов друг с другом и большое количество сигналов, но меньшее значение энергии.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе проведены исследования влияния режимов термической обработки и микроструктуры на напряженность магнитного поля и механические свойства исследуемых сталей и на стадийность накопления повреждений при пластической деформации.

При первом случае установлена прямая связь между значениями твердости и коэрцитивной силы, и обратная между значениями  $H_c$  и RMS. Также установлено влияние углерода и легирующих элементов, а также микроструктуры.

При анализе характера накопления суммарной АЭ при пластической деформации, можно также сделать предположение, что стали, которые имеют большое количество сигналов с малой энергией, являются мелкозернистыми в своей структуре, а стали имеющие крупнозернистую структуру, обладают наличием малого количества накопленных сигналов, но при этом большой энергией.

Таким образом, все выше изложенные предположения доказывают, что особое влияние на магнитные характеристики, и механические свойства оказывают особенности микроструктуры, также как и на характер накопления повреждений при деформации.