

На правах рукописи



ПОПЕЛЮХ АЛЬБЕРТ ИГОРЕВИЧ

**ДЕФОРМАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ СТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ  
УДАРНО-УСТАЛОСТНОГО НАГРУЖЕНИЯ**

Специальность: 2.6.17 - Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Новосибирск - 2021

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

**Научный консультант:**

доктор технических наук, профессор **Батаев Анатолий Андреевич**

**Официальные оппоненты:**

**Громов Виктор Евгеньевич**, доктор физико-математических наук, Заслуженный деятель науки РФ, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет», кафедра естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля, заведующий кафедрой;

**Шацов Александр Аронович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра металловедения, термической и лазерной обработки металлов, профессор кафедры;

**Хотинов Владислав Альфредович**, доктор технических наук, доцент Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра термообработки и физики металлов, доцент кафедры.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук» (ИМАШ УрО РАН), г. Екатеринбург.

Защита диссертации состоится 23 декабря 2021 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.03 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте [www.nstu.ru](http://www.nstu.ru)

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

канд. техн. наук, доцент



Андрей Геннадиевич Тюрин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

К числу машин и механизмов, наиболее востребованных в строительной индустрии, а также в отраслях, связанных добычей полезных ископаемых, относится оборудование погружного типа, основанное на использовании ударно-вращательных способов бурения и обеспечивающее высокую производительность проходки при низких энергозатратах. Размещаемые в ограниченном пространстве скважин погружные ударные машины должны быть максимально компактными. При этом для эффективного разрушения горной породы они должны обладать высокой удельной мощностью (энерговооруженностью). Практика показывает, что типичной причиной выхода из строя энерговооруженных машин ударного действия является усталостное разрушение их наиболее нагруженных деталей – бойков и инструментов. Эффективность бурения резко снижается также в результате изнашивания подвижных деталей оборудования, обусловленного их контактом с горной породой или абразивными частицами бурового шлама.

Проектирование машин ударного действия представляет собой сложную техническую задачу. Значения амплитуды и форма ударного импульса в них зависят от показателей податливости и жесткости обрабатываемой породы, которые могут существенно изменяться при проходке даже одной скважины. Кроме того, стали, из которых изготавливаются детали ударных механизмов, обычно содержат дефекты различного рода – неметаллические включения, поры и др., вблизи которых при воздействии циклически повторяющихся динамических нагрузок формируются области с высоким уровнем внутренних напряжений. Отмеченные особенности являются причиной существенных различий между расчетными значениями ресурса работы технологического оборудования и реальными результатами, полученными в процессе его эксплуатации. Средний ресурс работы серийно выпускаемых отечественных пневмоударников составляет 115 - 130 часов машинного времени. Ресурс работы новых ударных машин зарубежных компаний выше в несколько раз, но он также не превышает нескольких сотен часов.

Наиболее рациональный подход к проблеме повышения скорости проходки скважин основан на увеличении амплитуды ударных импульсов, что на практике невозможно без использования новых материалов с более высокими показателями конструктивной прочности, под которой понимается обобщенная характеристика материала, определяющая комплекс его механических свойств в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным. Материалы, используемые для изготовления тяжело нагруженных деталей ударных механизмов, должны обладать высокой прочностью, ударной вязкостью, трещиностойкостью и износостойкостью.

Актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью выявления закономерностей разрушения материалов при периодическом воздействии на них ударных импульсов и определения факторов, оказывающих как

положительное, так и негативное влияние на сопротивление сталей разрушению. В работе изучены особенности зарождения и развития усталостных трещин в сталях при воздействии циклической сжимающей нагрузки, проведена оценка влияния дефектности материалов на их сопротивление разрушению в условиях динамического сжатия при испытаниях в нейтральных и коррозионно-активных средах. Предложены новые технологические способы повышения конструктивной прочности сталей, основанные на формировании смешанных структур мартенсито-бейнитного и мартенсито-аустенитного типа с целью их последующего использования при производстве современных образцов энерговооруженных машин ударного действия. Работа выполнялась в сотрудничестве со специалистами лаборатории машиноведения Института горного дела СО РАН, что позволило на практике оценить эффективность разработанных способов упрочнения тяжело нагруженных деталей энерговооруженных погружных ударных машин нового поколения.

### **Степень разработанности темы исследования**

Вопросы усталостного разрушения материалов входят в круг интересов многих научных коллективов. В большинстве работ предполагается, что сжимающие напряжения, не превышающие значения предела упругости стали, не приводят к накоплению в конструкциях усталостных повреждений (О.Н. Романов, В.В. Панасюк, В.С. Иванова, Л.Р. Ботвина, Р.В. Херцберг и др.). По этой причине процессы усталостного разрушения материалов обычно изучают при циклическом воздействии на них переменной растягивающей силы, либо при знакопеременном циклическом нагружении. Несмотря на то, что первые упоминания об эффекте зарождения и роста трещин в условиях циклического сжатия датируются серединой прошлого века, разрушение в поле действия циклических сжимающих напряжений остается малоизученным процессом. Количество публикаций по данной теме мало, а их результаты противоречивы. Большинство исследователей, изучающих процессы разрушения материалов в условиях циклического сжатия, придерживаются точки зрения, что при данном типе нагружения область распространения усталостных трещин ограничена величиной зоны пластической деформации вблизи поверхностных концентраторов напряжений (*R. Habbard., S. Suresh., L. Zhonghu, A. Vasudevan, D. Holm*). На границе этой зоны трещины останавливаются и полного разрушения объекта не происходит. Однако, в ряде научных работ (*Y. Lenets, В.М. Тихомиров, А.П. Шабанов*) экспериментально подтверждена возможность роста усталостных трещин значительной длины в поле сжимающих напряжений. Таким образом, вопрос о возможности полного разрушения деталей в поле циклически изменяющихся сжимающих напряжений остается дискуссионным. Слабо изучены также аспекты влияния неметаллических включений и внешней среды на сопротивление сталей усталостному разрушению при циклическом действии сжимающей силы. Вследствие противоречивости полученных результатов, проведение объективного анализа причин быстрого разрушения высоконагруженных деталей ударных машин затруднено.

Не менее актуальной является проблема разработки новых эффективных процессов упрочнения деталей ударных машин. Наиболее перспективные способы повышения эксплуатационных свойств деталей ударных машин связаны с объемным упрочнением, результатом которого является формирование в сталях структуры смешанного типа, состоящей из высокопрочного мартенсита и обладающего повышенным уровнем трещиностойкости нижнего бейнита. Известные технологические приемы формирования в сталях высокопрочной бейнито-мартенситной структуры вследствие высоких напряжений, возникающих в структуре на финальной стадии мартенситного превращения, не обеспечивают высокие показатели трещиностойкости стали. Таким образом, разработка новых технологических подходов к формированию в сталях смешанной высокопрочной структуры является актуальной задачей.

**Объектами исследований** являются конструкционные стали, используемые при производстве динамически нагруженных деталей энерговооруженных горных машин и механизмов ударного действия.

**Предметом исследований** являются процессы повреждения сталей при их многократном нагружении ударными импульсами, фазовые и структурные превращения, происходящие в сталях при формировании высокопрочных структур смешанного типа.

**Цель исследования** заключалась в выявлении основных особенностей разрушения сталей в условиях ударно-усталостного нагружения и разработке эффективных процессов повышения конструктивной прочности тяжело нагруженных деталей ударных машин.

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

1) разработать рациональный подход к оценке свойств и достоверному прогнозированию поведения материалов в различных условиях ударно-циклического нагружения;

2) с использованием методов световой и электронной микроскопии исследовать на различных масштабных уровнях особенности процесса повреждения и выявить механизм разрушения стали при многократном воздействии на нее ударных импульсов;

3) оценить влияние структурного состояния сталей на процессы зарождения и распространения трещин при ударно-усталостном нагружении;

4) используя методы математического моделирования и физического эксперимента выявить влияние размера, типа и морфологии неметаллических включений на сопротивление сталей усталостному разрушению в условиях циклического сжатия;

5) изучить влияние внешней среды на процессы зарождения и распространения усталостных трещин в деталях ударных машин при циклическом действии сжимающей нагрузки;

6) выработать рекомендации по рациональному применению традиционных видов термообработки для упрочнения деталей ударных машин и установить режимы, обеспечивающие высокие показатели конструктивной прочности стали в условиях ударно-усталостного нагружения;

7) разработать новые эффективные методы упрочнения, обеспечивающие высокий уровень прочности, ударной вязкости и трещиностойкости сталей при многократном нагружении ударными импульсами.

**Научная новизна работы:**

1. Установлено, что при ударно-усталостном нагружении по схеме сжатия в сталях зарождаются усталостные трещины, которые могут распространяться до полного разрушения объекта. Развитие усталостных трещин обеспечивается наличием незамкнутых фрагментов трещины вблизи их фронта, характеризующихся отсутствием смыкания противоположных берегов излома на стадии сжатия. При воздействии ударного импульса в окрестности незамкнутого фрагмента формируется область пластически деформированного материала, в которой на стадии разгрузки возникают остаточные растягивающие напряжения, приводящие к продвижению трещины.

2. Показано, что процессы накопления усталостных повреждений вблизи фронта трещин и их дальнейший рост в низкопрочных сталях развиваются под действием максимальных касательных напряжений и соответствуют сдвиговой модели деформации и разрушения материала. На изломах объектов, подвергнутых ударно-усталостному сжатию, зафиксировано формирование поверхностного рельефа с бороздками, характерными для усталостного разрушения материалов.

3. Установлено, что при циклическом воздействии сжимающей силы, в отличие от нагружения по схеме растяжения и изгиба, скорость распространения усталостных дефектов максимальна на начальном этапе. При продвижении трещин вглубь образца их скорость уменьшается почти на порядок и стабилизируется на низком уровне. При этом теряется связь зависимости скорости от их длины и оставшегося целым поперечного сечения деформируемого объекта. Уровень растягивающих напряжений в вершине магистральной трещины, распространяющейся вдали от поверхности деформируемого объекта, длительное время остается стабильно невысоким, что обеспечивает малую площадь зоны долома, которая обычно не превышает пяти - семи процентов от номинальной площади поперечного сечения.

4. Изучены основные особенности формирования смешанной структуры в стали при термической обработке с мартенсито-бейнитным превращением аустенита. Установлено, что для тяжело нагруженных деталей ударных механизмов наиболее рациональным является формирование структуры, состоящей из 40 % отпущенного мартенсита и 60 % нижнего бейнита.

5. Разработан новый метод термомеханического упрочнения, при реализации которого в легированной стали 40X2H2MA формируется градиентная (полосчатая) структура из чередующихся зон отпущенного мартенсита и нижнего бейнита. Показано, что условием ее образования является незавершенность рекристаллизационных процессов в деформированном легированном аустените, развивающихся на стадии последеформационной выдержки.

6. Получены новые экспериментальные данные по влиянию внешней среды на сопротивление стали усталостному разрушению в условиях цикличе-

ского сжатия. Показано, что наличие на поверхности стальных образцов жидкой среды в 2 - 5 раз ускоряет процесс разрушения материала по сравнению с испытаниями на воздухе. Установлено, что интенсификация процессов разрушения обусловлена ростом локальных напряжений в окрестности вершины усталостной трещины на этапе сжатия материала и повышением остаточных растягивающих напряжений в этой области на этапе разгрузки из-за развития процессов фреттинг-коррозии и микрогидравлических ударов.

7. Методами математического моделирования и физического эксперимента выявлены особенности влияния морфологии, типа, размера и ориентации неметаллических включений на сопротивление сталей усталостному разрушению в условиях нагружения по схеме многократного динамического сжатия. Основным фактором, негативно влияющим на долговечность стали, является тип включений. Показано, что наименее опасными являются твердые высокопрочные включения, вблизи которых уровень локальных напряжений, возникающих на этапе сжатия, ниже среднего значения в стали. Установлено, что наличие в стали низкопрочных неметаллических включений является фактором, существенно увеличивающим риск зарождения усталостных трещин при отсутствии механических концентраторов напряжений.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость полученных в работе данных заключается в расширении знаний об особенностях процессов разрушения сталей в условиях нагружения по схеме многократного динамического сжатия на воздухе, в коррозионно-активных и инертных жидких средах; изучении влияния структуры и дефектного состояния сталей на их сопротивление ударно-усталостному разрушению. Полученные данные свидетельствуют о проявлении не изученного ранее механизма роста усталостных трещин при многократном воздействии на материал ударных импульсов сжатия.

Практическая значимость работы определяется предложенными техническими решениями по повышению степени безотказности и долговечности энерговооруженных ударных механизмов. При выполнении диссертации разработано и изготовлено новое экспериментальное оборудование для оценки усталостных свойств материалов в условиях многократного динамического нагружения по схемам сжатия и изгиба. На основании проведенных исследований сформулированы рекомендации по выбору сталей и режимов их термического упрочнения для изготовления тяжелонагруженных деталей ударных машин. Предложен и защищен патентом Российской Федерации на изобретение способ термомеханической обработки сталей с мартенсито-бейнитным превращением аустенита, обеспечивающий высокие значения прочности стальных деталей и сопротивления ударно-усталостному разрушению.

#### **Методология и методы исследования**

В качестве материалов исследования использовали среднеуглеродистые легированные стали российского и зарубежного производства, применяемые для изготовления деталей ударных машин. Химический состав исследуемых в работе материалов оценивали на оптико-эмиссионном спектрометре ARL 3460.

Металлографические исследования структуры исходного проката, заготовок и образцов после термической и термомеханической обработки проводили на микроскопах *Carl Zeiss Axio Observer Z1m* и *Nikon eclipse MA 100*. Фрактографический анализ процессов объемного и поверхностного разрушения материалов осуществляли на растровом электронном микроскопе *Carl Zeiss EVO50XV*. Тонкую структуру сталей изучали на просвечивающем микроскопе *Tecnai G2 20 TWIN*. Фазовый анализ полученных в результате термической обработки структур и анализ напряженного состояния материалов выполняли с использованием дифрактометра *ARL X'TRA*. Качественный и количественный фазовый состав определяли на основании данных профильного анализа, выполненного в программном пакете *WinXRD*. Кристаллические фазы в материалах идентифицировали методом сравнения с применением базы данных *ICDD PDF*. Топографию поверхности образцов исследовали на комплексе *Zygo NewView 7300*. Измерения твердости сталей и микротвердости отдельных структурных составляющих после различных видов обработки проводили на твердомерах *Wolpert Group 600MRD* и *Wolpert Group 402MVD*. Испытания на растяжение выполняли на универсальных измерительных комплексах *Instron 300DX* и *Instron 3369*. Для испытаний на ударный изгиб использовали маятниковые копры *MetroCom 06103300* и *Instron CEAST 9050*. Процессы ударной усталости материалов исследовали на оригинальном испытательном комплексе, спроектированном и изготовленном на кафедре материаловедения в машиностроении НГТУ. Усталостные испытания при циклическом нагружении проводили на универсальной сервогидравлической системе *Instron 8801*. Износостойкость материалов в условиях трения скольжения по схеме «диск - плоскость» оценивали на машине трения ИИ 5018.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Рост трещин в стальных изделиях при их ударно-усталостном нагружении по схеме сжатия связан с формированием растягивающих напряжений у вершины дефекта по окончании разгрузки материала, причиной формирования которых является наличие незамкнутого фрагмента трещины вблизи ее фронта и отсутствие смыкания противоположных берегов излома на стадии сжатия деформируемого объекта.

2. В отличие от усталостного нагружения по схеме растяжения или изгиба процесс распространения трещин при циклическом воздействии сжимающей нагрузки наиболее интенсивен на начальных этапах деформации и затухает с увеличением размеров дефекта, результатом чего является потеря зависимости скорости продвижения трещины от ее длины и оставшегося целым поперечного сечения деформируемого объекта.

3. Термическая обработка с мартенсито-бейнитным превращением аустенита обеспечивает высокие значения прочностных свойств сталей в сочетании с сопротивлением усталостному разрушению. При изготовлении тяжело-нагруженных деталей ударных механизмов оптимальна структура, состоящая из 40 % отпущенного мартенсита и 60 % нижнего бейнита.



4. Формирование наноструктурированного бейнита является эффективным решением, обеспечивающим высокий комплекс свойств сталей, используемых для изготовления тяжело нагруженных деталей ударных машин.

5. Предложенный в работе способ термопластического упрочнения с формированием смешанной структуры мартенсито-бейнитного типа является эффективным техническим решением, способствующим повышению уровня конструктивной прочности сталей, предназначенных для изготовления деталей, эксплуатирующихся в условиях ударно-усталостного нагружения.

6. Разрушение циклически сжимаемых стальных деталей в присутствии жидких сред интенсифицируется процессами фреттинг-коррозии и микрогидравлическими ударами, в результате чего выход изделий из строя происходит быстрее, чем при эксплуатации в воздушной среде

7. Фактором, препятствующим разрушению сталей в процессе их ударно-усталостного нагружения по схеме сжатия, является снижение степени загрязненности стали неметаллическими включениями. С позиции сопротивления разрушению пластически недеформируемые включения предпочтительны перед пластичными низкопрочными частицами.

#### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность результатов работы определяется использованием современных методов оценки свойств, структуры и фазового состава материалов, применением методов статистической обработки полученных результатов, привлечением современных теорий упрочнения металлических материалов и представлений о природе их разрушения, а также отсутствием противоречий между результатами исследований и данными, имеющимися в литературных источниках.

Результаты работы были представлены и обсуждены на IV международной конференции «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий» (г. Новокузнецк) в 1995 г.; международной научно-технической конференции «Пластическая и термическая обработка современных металлических материалов» (г. Санкт-Петербург) в 1995 г.; III Российско-Корейском международном симпозиуме науки и технологий «*Korus 99*» (г. Томск) в 1999 г., III международном форуме стратегических технологий «*IFOST*» (г. Новосибирск) в 2008 г.; VII всероссийской научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе» (г. Новосибирск) в 2009 г.; конференциях с участием иностранных ученых «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды», (г. Новосибирск) в 2010 и 2012 г.; всероссийской конференции «Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций» (г. Новосибирск) в 2011 и 2014 г.; международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении» (г. Новосибирск) в 2014 г.; международной конференции «*International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems*» (г. Томск) в 2015 г., международной конференции «*Earth and Environmental Science. Geodynamics and Stress State of the Earth's Interior*» (г. Новосибирск) в 2017 г.

### **Личный вклад автора**

Диссертационная работа обобщает результаты исследований, проведенных непосредственно автором и в сотрудничестве с коллегами в период с 1986 по 2019 гг. Личный вклад автора заключается в постановке целей и задач исследований, участии в планировании и проведении экспериментов, анализе полученных закономерностей, обработке и обобщении результатов, формулировании выводов и подготовке рукописей публикаций.

**Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 05.16.09. – Материаловедение (в машиностроении) (в соответствии с новой номенклатурой научных специальностей: 2.6.17 - Материаловедение) в части пунктов:**

1) «теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных связей состава и структуры материалов с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности материалов и изделий» (п. 1);

2) «разработка научных основ выбора материалов с заданными свойствами применительно к конкретным условиям изготовления и эксплуатации изделий и конструкций» (п. 3);

3) «установление закономерностей и критериев оценки разрушения материалов от действия механических нагрузок и внешней среды» (п. 5);

4) «разработка и совершенствование методов исследования и контроля структуры, испытание и определение физико-механических и эксплуатационных свойств материалов на образцах и изделиях» (п. 6).

### **Публикации**

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 33 работах, из них 17 статей в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК, в том числе в журналах индексируемых в базах *Web of Science* и *Scopus*, и 14 статей в прочих изданиях. Диссертант является соавтором 1 монографии и 1 патента, полученного на изобретение в РФ.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 8 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, словаря терминов, списка литературы из 326 наименований и 6 приложений. Общий объем работы составляет 395 страниц, включая 189 рисунков и 31 таблицу.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** отражена общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, приведены цели и задачи исследований, представлены теоретическая и практическая значимость, научная новизна работы, сформулированы защищаемые положения.

**В первой главе** представлен обзор литературы по теме исследований. Проанализированы условия работы и выявлены причины выхода из строя машин ударного действия. Показано, что высокая надежность деталей энерговооруженных ударных машин может быть обеспечена внедрением новых техно-

логий упрочения, результатом которых является повышение прочности, трещиностойкости и износостойкости сталей.

В литературном обзоре представлен анализ основных гипотез разрушения материалов в условиях усталостного нагружения по схеме сжатия. Отмечается, что в объектах под воздействием циклически изменяющихся сжимающих напряжений вблизи поверхностных концентраторов могут зарождаться и распространяться усталостные трещины. Рост дефектов происходит под влиянием поля остаточных растягивающих напряжений, формирующихся у концентратора (надреза) на стадии разгрузки. Механизм разрушения материалов в условиях многократного динамического сжатия изучен слабо и до конца не выяснен. Полученные экспериментально результаты не позволяют объяснить факт быстрого выхода деталей ударных машин из строя, поэтому целесообразно проведение дополнительных исследований для определения факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на характер разрушения материалов в условиях воздействия ударных импульсов сжатия.

Установлено, что на усталостные свойства сталей существенное влияние оказывают содержащиеся в их структуре дефекты, в том числе неметаллические включения. Однако до сих пор не ясно, в какой мере тип, размер и морфология включений влияют на сопротивление сталей усталостному разрушению при многократном воздействии сжимающих напряжений.

Представленные в литературе данные свидетельствуют о том, что для повышения конструктивной прочности тяжело нагруженных деталей ударных машин, эксплуатирующихся в условиях многократного динамического сжатия, перспективными являются технологические процессы объемного упрочнения, при реализации которых в сталях формируется смешанная структура, состоящая из кристаллов отпущенного мартенсита и нижнего бейнита. Наиболее рациональное сочетание прочности и трещиностойкости сталей соответствует объемной доле бейнита в диапазоне 25...50 %.

На основании проведенного обзора литературных данных сделаны выводы и сформулированы основные направления исследований.

**Во второй главе** изложены методики исследования механических свойств и структуры стали. Особое внимание уделено описанию разработанного в НГТУ испытательного комплекса, предназначенного для изучения процессов разрушения и оценки свойств материалов в условиях ударно-усталостного нагружения. Комплекс состоит из пяти идентичных установок электромагнитного типа (рисунок 1) и позволяет одновременно проводить испытания серии образцов по схемам ударно-циклического сжатия или изгиба с максимальной энергией удара до 8 Дж и частотой до 600 ударов в минуту. Параметры ударного нагружения регулируются величиной питающего напряжения, исходным положением бойка в катушке, а также применением бойков различного диаметра и веса. Испытания по схеме ударно-циклического сжатия выполняли на образцах размерами 35×10×3 мм с применением бойков диаметром 26 мм и весом 570 грамм. Испытания по схеме трехточечного изгиба проводили на плоских образцах (100×20×3,5 мм) с использованием бойков диаметром 14 мм и весом

140 грамм. Образцы каждого типа имели на боковых поверхностях концентраторы напряжений глубиной 1,5 мм.

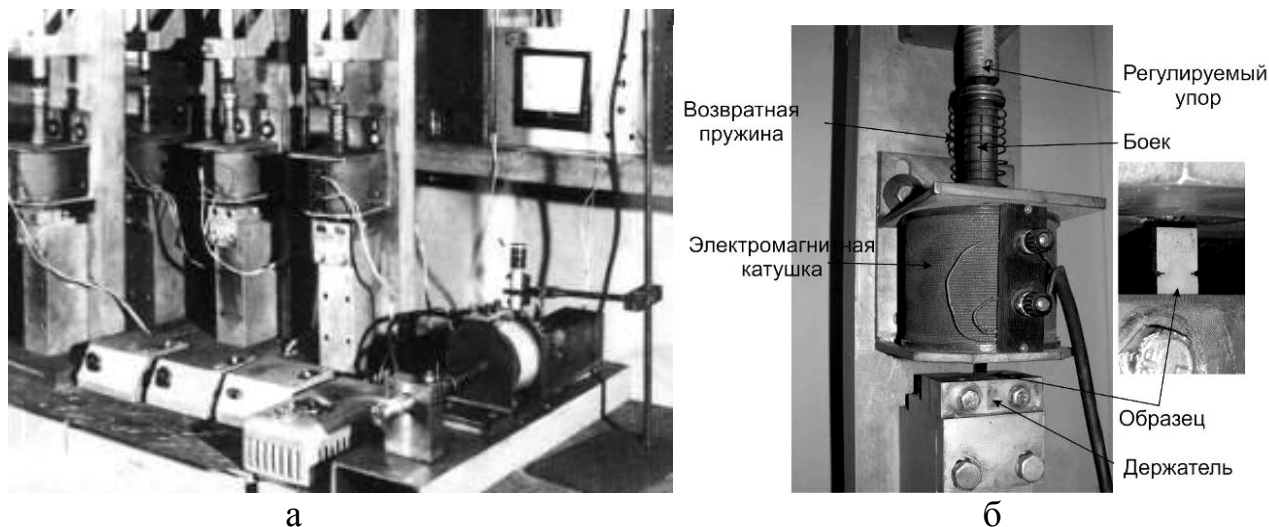


Рисунок 1 – Внешний вид испытательного комплекса (а) и отдельной установки (б) при испытаниях образцов на ударно-циклическое сжатие

Амплитуду, продолжительность и энергию ударных импульсов определяли с использованием измерительной системы, включающей в себя контактный, акселерометрический и тензометрический датчики, тензометрическую станцию, запоминающий осциллограф С8-14 и компьютер с программным обеспечением *Zetlab* (рисунок 2).

Анализ параметров ударного нагружения показал, что при испытаниях по схеме сжатия боек воздействовал на образец с максимальным усилием, равным 14000 Н. Энергия ударного импульса сжатия составляла 7,8 Дж, время удара –  $3 \times 10^{-3}$  с, общая длительность цикла –  $120 \times 10^{-3}$  с. Продольные волны растягивающих напряжений при разгрузке образца не зафиксированы. Таким образом, можно полагать, что процесс разрушения стали обусловлен циклическим воздействием на нее напряжений сжатия. При испытаниях по схеме трехточечного изгиба сила удара составляла 1962 Н, а энергия ударного импульса – 1,8 Дж.

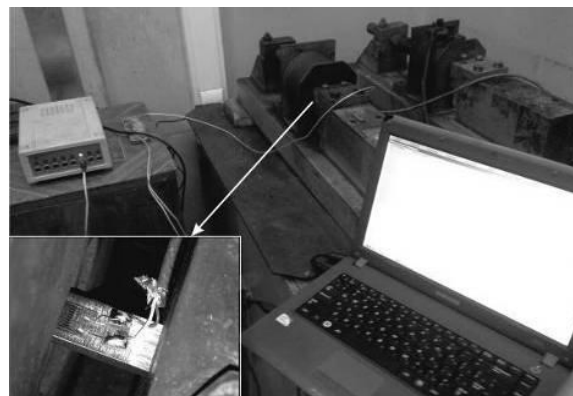


Рисунок 2 – Внешний вид комплекса для измерения ударных импульсов в образце

Сравнение различных материалов и оценку эффективности режимов их термического упрочнения при испытаниях по схеме ударно-циклического сжатия осуществляли по уровню усталостной долговечности и скорости роста трещин при одинаковых параметрах внешнего силового воздействия. При испытаниях материалов по схеме ударно-циклического изгиба трещиностойкость ста-

лей дополнительно оценивали, основываясь на кинетических диаграммах усталостного разрушения (КДУР).

**В третьей главе** представлены результаты изучения процессов зарождения и кинетики распространения усталостных трещин в сталях с различной структурой и предложен механизм роста трещин под воздействием циклических сжимающих напряжений. В процессе разрушения материала можно выделить четыре стадии (рисунок 3). На начальной стадии в окрестности концентратора или дефекта (как правило, поверхностного) происходит пластическая деформация материала, сопровождающаяся накоплением усталостных повреждений с последующим зарождением трещины. Зарождение трещин в низкопрочной стали обычно происходит по сдвиговому механизму, о чем свидетельствует преимущественная ориентация дефектов в направлении максимальных касательных напряжений (рисунок 4).

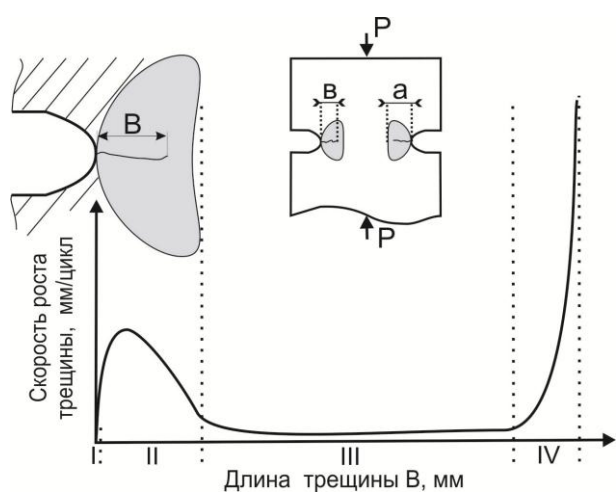


Рисунок 3 – Процесс распространения усталостных трещин при динамическом нагружении образца по схеме сжатия. а – локальное поле напряжений вблизи поверхностного концентратора, в – длина усталостной трещины

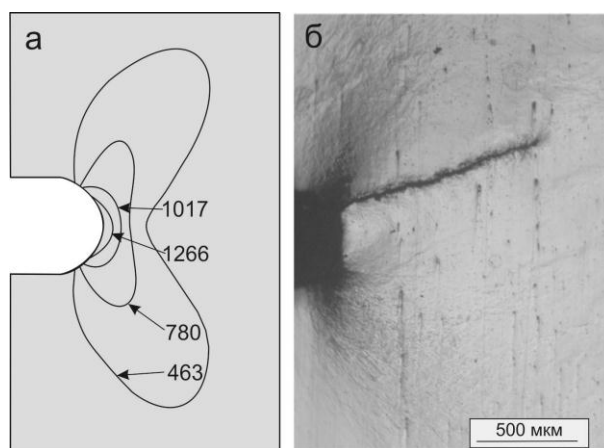


Рисунок 4 – Схематическое изображение поля напряжений (цифры представлены в МПа) (а) и деформация стального образца вблизи надреза с зародившейся усталостной трещиной (б)

Микротрещины, возникшие в закаленных сталях со структурой отпущенного мартенсита, чаще всего ориентированы перпендикулярно направлению сжимающей нагрузки. Зарождение трещин происходит, вероятно, по механизму нормального отрыва на благоприятно ориентированных границах раздела (на границах двойников или выделений карбидной фазы). Подросшие трещины, ставшие со временем магистральными, вне зависимости от структурного состояния стали практически всегда ориентированы перпендикулярно направлению действия внешней сжимающей силы.

Особенностью поведения сталей при проведении испытаний по схеме циклического сжатия является высокая скорость роста микротрещин в окрестности надреза на начальном этапе разрушения, последующее их торможение при удалении от концентратора напряжений (рисунок 3, область II) и дальнейшее распространение с низкой скоростью. В зависимости от структурного со-

стояния стали размер зоны, в которой наблюдается ускоренный рост трещины, составляет от 0,6 до 1,0 мм. Расчет величины напряжений, возникающих в окрестности надреза при циклическом воздействии внешней сжимающей силы, выполненный с использованием программного пакета *ANSYS Workbench*, показал, что при максимальном значении сжимающей силы размер зоны, соответствующей стадии ускоренного роста трещины, коррелирует с областью, в пределах которой максимальный уровень напряжений превышает предел текучести стали (рисунок 4 а).

На третьей стадии процессы пластической деформации локализованы в окрестности вершины развивающейся трещины (рисунок 3, область III). На этом этапе трещина замедляет свое движение в 10 - 20 раз и распространяется со стабильно низкой скоростью, которая практически не зависит от длины дефекта и от площади оставшегося поперечного сечения объекта. Так в закаленной и низкоотпущенной стали У8 скорость роста трещин снижается с  $6 \times 10^{-5}$  мм/цикл до  $0,4 \times 10^{-5}$  мм/цикл. Этап стабильного роста трещины характеризуется формированием на изломе рельефа с выраженными усталостными бороздками (рисунок 5). Расстояние между отдельными бороздками обычно составляет 8 - 12 мкм, но отчетливо бороздки усталости можно наблюдать лишь вблизи фронта растущей трещины или зоны долома. По мере развития процесса усталостного разрушения происходит контактное взаимодействие берегов растущей трещины, результатом которого является их интенсивная пластическая деформация и разрушение, сопровождающееся заполнением полости трещины оксидами и продуктами фреттинг-коррозии (рисунок 6).

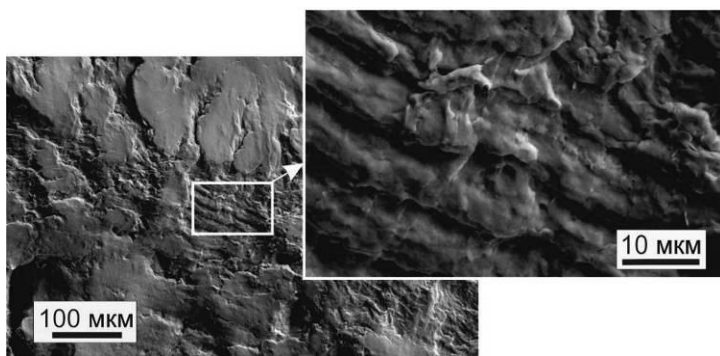


Рисунок 5 – Участок со следами пластической деформации на поверхности разрушения и выделенная область с усталостными бороздками.

Сталь 45, закалка с отпуском при 600 °С

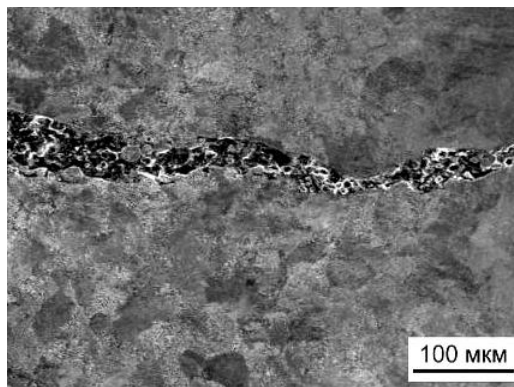


Рисунок 6 – Трещина, заполненная продуктами разрушения материала

Низкая скорость распространения трещин в условиях ударно-усталостного нагружения по схеме сжатия сочетается с такой характерной особенностью разрушения сталей как малая площадь области долома, которая в большинстве случаев не превышает 5 % от номинальной площади поперечного сечения деформируемого объекта. Этот факт свидетельствует об относительно низком и стабильном уровне растягивающих напряжений в окрестности вершины распространяющейся трещины. На заключительной стадии возможен



рост скорости разрушения, обусловленный снижением жесткости деформируемого объекта и появлением в нем значительных изгибающих напряжений (рисунок 3, область IV).

Важная особенность процесса разрушения, характерная для ударно-усталостного нагружения по схеме сжатия, связана с искривлением фронта распространяющейся трещины. Форма усталостных линий, зафиксированных на изломах, как лабораторных образцов, так и реальных деталей горных машин, свидетельствует о том, что при многократном динамическом воздействии сжимающей нагрузки процесс усталостного разрушения поверхностных слоев развивается с более высокой скоростью по сравнению внутренними объемами материала (рисунок 7). Анализируемый эффект может быть обусловлен тем, что поле остаточных растягивающих напряжений, являющееся причиной разрушения материала в условиях многократного сжатия, в значительной степени зависит от величины пластической деформации, которая максимальна у свободной поверхности деформируемого объекта. Можно полагать, что именно этот фактор объясняет более высокую скорость роста усталостных трещин вблизи наружных поверхностей и их замедленное распространение в глубине образца, где влияние поверхностного эффекта уменьшается.

При циклическом нагружении сжатием распространение усталостной трещины не приводит к разгрузке материала вдоль ее берегов, поэтому новые усталостные трещины часто инициируются дефектами, находящимися за фронтом усталостной трещины. Трещины могут расти также во встречных направлениях с несовпадением своих плоскостей (рисунок 8).

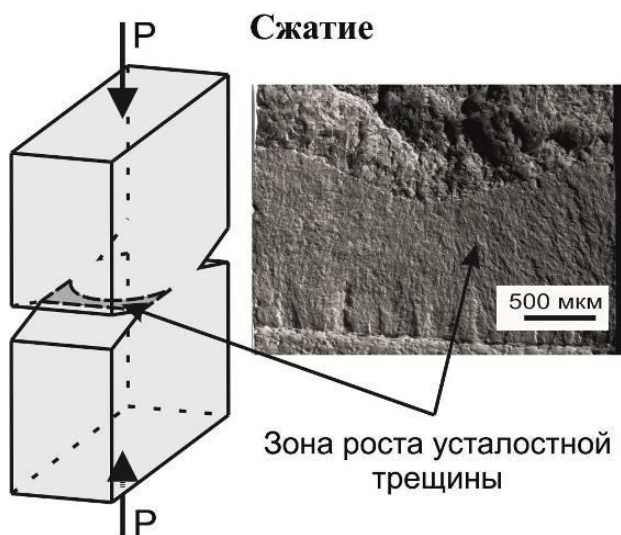


Рисунок 7 – Фронт распространения усталостной трещины, возникшей в условиях циклического нагружения по схеме сжатия

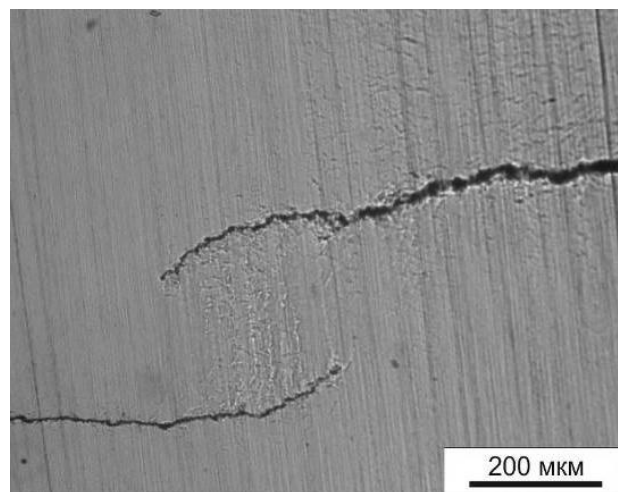


Рисунок 8 – Рост усталостных трещин во встречных направлениях

Особенности роста усталостных трещин в условиях ударно-усталостного нагружения по схеме сжатия в значительной степени определяются структурным состоянием материалов. Предпочтительным путем их продвижения в го-

могенных материалах являются границы зерен. В сталях с феррито-перлитной структурой усталостные трещины продвигаются преимущественно по границам зерен феррита и перлитных колоний. При нагружении сталей со структурой мартенсита доминирует механизм роста усталостных микротрещин, обусловленный присутствием неметаллических включений и границ раздела кристаллов  $\alpha$ -фазы. С увеличением температуры отпуска, сопровождающегося распадом пересыщенного твердого раствора и формированием мелкодисперсной феррито-цементитной смеси, траектория трещины стабилизируется, а процесс разрушения становится менее зависимым от наличия на пути растущей трещины неметаллических включений.

Важная часть научных исследований была связана с выявлением возможного механизма разрушения сталей в условиях многократного динамического сжатия. Результаты исследования топографии поверхности образцов с дефектами, возникшими в этих условиях, свидетельствуют о том, что в окрестности вершины растущей трещины формируются две зоны с различным характером пластического течения материала. Перед вершиной возникает зона, в пределах которой проявляется утяжка материала, сопровождающаяся его движением вглубь образца, (рисунок 9, область 1). Такая особенность пластического течения типична для материалов при воздействии на них растягивающих напряжений. На расстоянии 0,1-0,3 мм позади фронта продвигающейся трещины характер деформации меняется. Противоположные берега трещины смыкаются, в результате чего материал выдавливается в направлении наружной поверхности (рисунок 9, область 2).

Рост усталостной трещины за пределами зоны концентрации напряжений, создаваемых поверхностным дефектом, может происходить по следующему механизму. Под действием сжимающих напряжений со средней величиной  $\sigma_{сж}$ , не превышающей предел упругости материала, трещина полностью не закрывается. При этом вблизи ее фронта остается участок  $L$  (незамкнутый фрагмент), в пределах которого смыкания противоположных берегов не происходит (рисунок 9 а). Гипотеза о наличии незамкнутого фрагмента, впервые предложенная в работах А.П. Шабанова и В.М. Тихомирова, предполагает, что для вершины трещины эллиптической формы характерен определенный радиус кривизны. В противном случае уровень локальных напряжений в этой зоне стремится к бесконечности. Незамкнутый фрагмент трещины подобен полости, вблизи которой на стадии сжатия формируется область с повышенной концентрацией напряжений. Если уровень сжимающих напряжений в окрестности фронта трещины превышает предел текучести, то материал деформируется пластически. На этапе разгрузки накопленные ранее напряжения раздвигают берега трещины, приводя к появлению растягивающих напряжений в объеме пластически деформированной зоны (рисунок 10 б). Многократное повторение циклов сжатия приводит к увеличению размера этой зоны (рисунок 10 в), накоплению структурных дефектов (рисунок 10 г) и росту усталостной трещины (рисунок 10 д).

В отличие от механизма распространения трещин, предложенного в работах А.П. Шабанова, накопление усталостных повреждений и подрастание тре-



щины происходит, вероятно, в направлении максимальных касательных напряжений в соответствии с кристаллографической моделью. Этим объясняется формирование на поверхности излома бороздок усталостного происхождения, которые сглаживаются при смыкании противоположных берегов трещины в процессе дальнейшего нагружения объекта (рисунок 10 е).

Таким образом, для зарождения и распространения усталостных трещин в условиях циклического нагружения необходимо чтобы на стадии сжатия локальные напряжения в окрестности дефекта превышали предел текучести материала, а последующая разгрузка объекта была практически полной. Эти факторы типичны для бойков энерговооруженных ударных машин, что является причиной их быстрого разрушения.

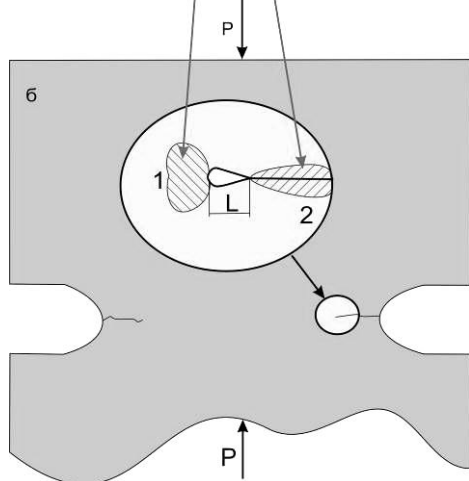
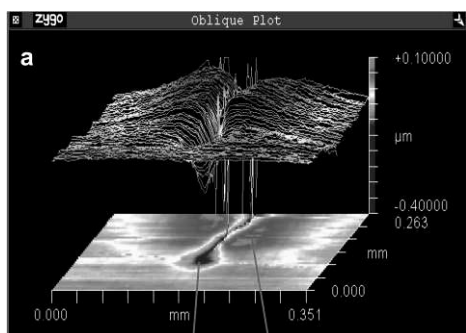


Рисунок 9 – Топография поверхности в вершине трещины (а) и схема ее оценки (б). 1 - зона утяжки материала перед трещиной, 2 - зона пластической деформации, развивающейся в направлении наружной поверхности образца

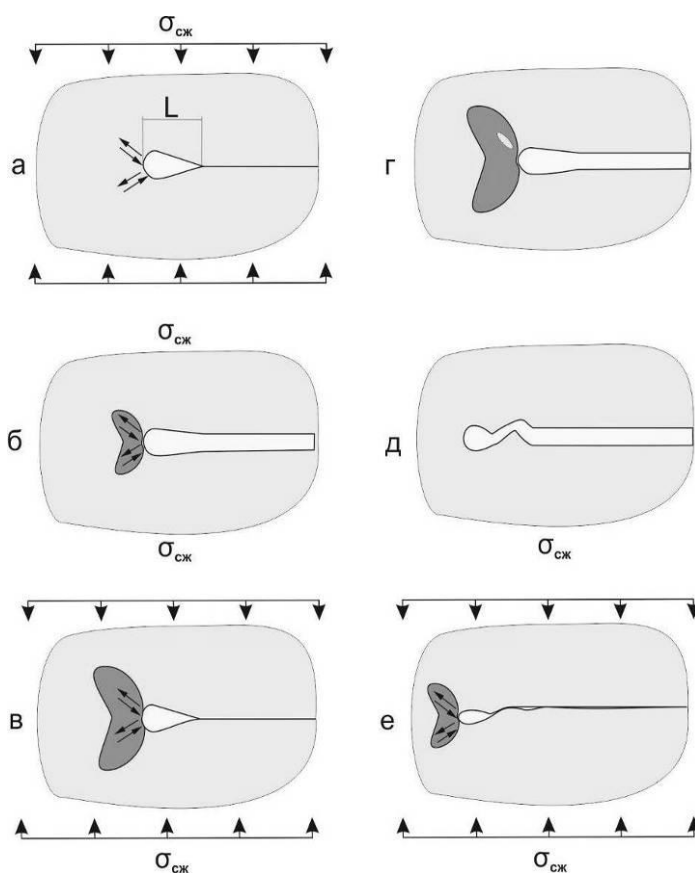


Рисунок 10 – Схема роста усталостной трещины при циклически повторяющемся динамическом сжатии

**В четвертой главе** диссертационной работы представлены результаты исследований химического состава и структуры сталей, используемых для изготовления бойков энерговооруженных ударных машин, и выявлены режимы термической обработки, обеспечивающие сопротивление материалов усталостному разрушению при нагружении по схеме многократного динамического

сжатия. Установлено, что высокие усталостные свойства закаленных сталей, содержащих 0,45-0,8 % углерода, обеспечивает структура, формируемая в процессе отпуска при 300 °С, что соответствует твердости 48-52 HRC (рисунок 11). В сталях с содержанием 0,3-0,45 % С высокий уровень усталостной долговечности может быть достигнут в результате закалки в сочетании с отпуском при 200 °С. Формирование структуры мартенсита твердостью более 54 HRC с высоким уровнем внутренних напряжений приводит к четырех-десятикратному снижению усталостной долговечности стали. При ударно-циклическом сжатии высокие показатели усталостной долговечности стали могут быть достигнуты при формировании в ней нижнего бейнита в области температур промежуточного превращения 300-350 °С (рисунок 12).

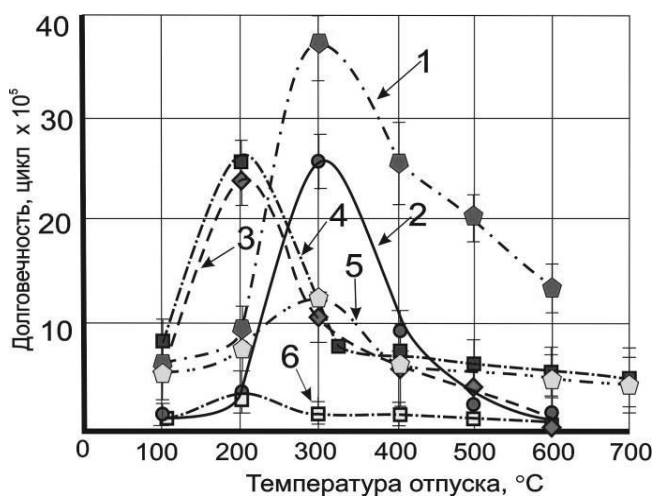


Рисунок 11 – Зависимость показателей усталостной долговечности сталей от температуры отпуска. 1 – сталь 5XB2C, 2 – сталь У8, 3 – сталь 40X, 4 – сталь SCM 445H, 5 – сталь 45, 6 – сталь 20

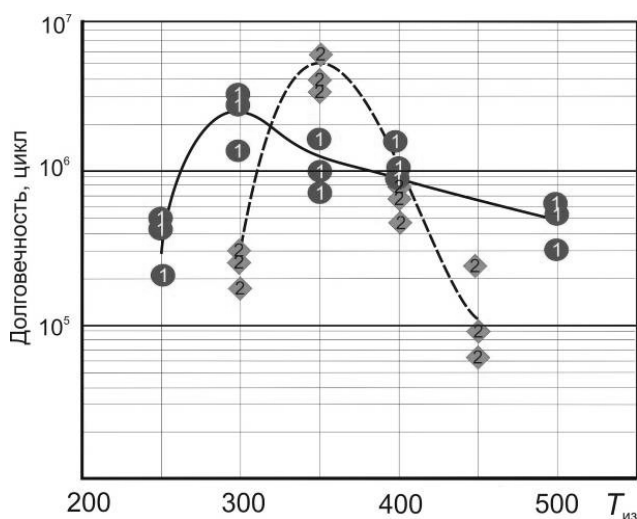


Рисунок 12 – Ударно-усталостная долговечность изотермически обработанных сталей У8 (1) и 5XB2C (2) в условиях сжатия

По сравнению с состоянием после закалки и отпуска сталь со структурой нижнего бейнита при аналогичном уровне твердости (37...40 HRC) обладает полуторакратным преимуществом в усталостной трещиностойкости. Однако технология изотермической закалки не обеспечивает высокую прочность материала ( $\sigma_{0,2} < 1000$  МПа). По этой причине для обработки тяжело нагруженных деталей энерговооруженных ударных машин ее использование нерационально.

Эффективный способ увеличения мощности погружных пневмоударных механизмов основан на повышении частоты ударного нагружения. Такой подход может быть реализован при использовании для изготовления бойков высокопрочных материалов с низким удельным весом, например, титановых сплавов. Модифицирование поверхности титановых бойков цементацией позволяет устранить их основной эксплуатационный недостаток – низкую износостойкость и склонность к схватыванию в паре трения со сталью. Результаты промышленных испытаний пневмоударника АШ43 (рисунок 13) показали, что применение титановых сплавов для изготовления бойков пневмоударников

позволяет в 1,5 раза повысить ударную мощность и на 30 % увеличить скорость бурения по сравнению с пневмоударниками со стальными бойками.

В пятой главе диссертационной работы проанализированы способы повышения конструктивной прочности деталей ударных машин, основанные на формировании структуры смешанного типа. Комплекс высоких механических свойств сталей может быть обеспечен термической обработкой с мартенсито-бейнитным превращением переохлажденного аустенита



Рисунок 13 – Конструкция малогабаритного погружного пневмоударника АШ43Т

(рисунок 14), обладающей рядом преимуществ по сравнению с известными схемами формирования бейнито-мартенситных структур, заключающимися в аустенитизации заготовок, охлаждении их и выдержке в расплаве солей до получения заданного количества бейнита с последующим ускоренным охлаждением, при котором остаточный аустенит преобразуется мартенсит. При реализации термической обработки с мартенсито-бейнитным распадом мартенситное превращение характеризуется своей незавершенностью. Возникшие мартенситные кристаллы окружены пластичным переохлажденным аустенитом, что обеспечивает эффективную релаксацию внутренних напряжений в стали.  $\alpha$ -фаза выделяется, в первую очередь, в микрообъемах, обедненных углеродом, что способствует образованию в структуре стали речного мартенсита, характеризующегося по сравнению с двойникованными кристаллами повышенной вязкостью разрушения. Кроме того, при обработке с мартенсито-бейнитным превращением переохлажденного аустенита количество составляющих в смешанной структуре определяется температурой предварительного охлаждения, что упрощает выполнение операции термической обработки в реальных условиях производства, а отсутствие последующего отпуска удешевляет процесс упрочнения деталей.

Прочностные характеристики сталей и их сопротивление усталостному разрушению могут варьироваться при изменении температуры предварительного охлаждения  $T_{\text{п}}$ , которая определяет объемные доли образующихся в структуре мартенсита и бейнита, и температуры нагрева в области изотермического распада  $T_{\text{из}}$ .

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что при термической обработке с мартенсито-бейнитным превращением аустенита формируется структура в виде темных областей (отпущенный мартенсит) и более светлых зон (бейнит) (рисунок 15). Степень дисперсности структурных составляющих определяется, главным образом, температурой изотермической выдержки  $T_{\text{из}}$ . При изменении температуры предварительного охлаждения  $T_{\text{п}}$  дисперсность фаз меняется незначительно, но в значительной степени изменяются размеры зон, занимаемых структурой мартенситного и бейнитного типа.



Высокие показатели конструктивной прочности деталей энерговооруженных ударных механизмов могут быть обеспечены также технологическими процессами, основанными на совмещении термического и деформационного воздействия, в частности процессом высокотемпературной термомеханической обработки с мартенсито-бейнитным превращением аустенита (ВТММБ) (рисунок 17). Горячая пластическая деформация приводит к уменьшению размеров зерен аустенита, способствует формированию развитой субструктуры  $\alpha$ -твердого раствора, что в итоге сопровождается измельчением кристаллов мартенсита и пластин  $\alpha$ -фазы бейнита. Релаксации механических напряжений, сопутствующих мартенситному превращению, способствует остаточный аустенит, окружающий мартенситные кристаллы. Таким образом, в результате описанных преобразований в стали формируется дисперсная структура смешанного типа, обеспечивающая высокий уровень прочностных свойств и сопротивления усталостному разрушению.

Используя ВТММБ-обработку, в легированных сталях, характеризующихся высокой устойчивостью переохлажденного аустенита, например, в стали 40X2H2MA, может быть сформована структура слоистого типа, которая в зависимости от направления вырезки образцов имеет вид чередующихся темных и светлых полос шириной 50-70 мкм, либо фрагментированных ячеек аналогичного размера. В светлых областях сталь имеет структуру нижнего бейнита, в темных – отпущенного мартенсита (рисунок 18). Фактически области, занятые мартенситом и бейнитом, имеют форму чередующихся эллиптических цилиндров различного размера. Установлено, что ширина и направление полос в упрочненных образцах не обусловлены наследственным эффектом концентрационной и структурной неоднородности исходного проката и не зависят от направления вырезки исходных заготовок.

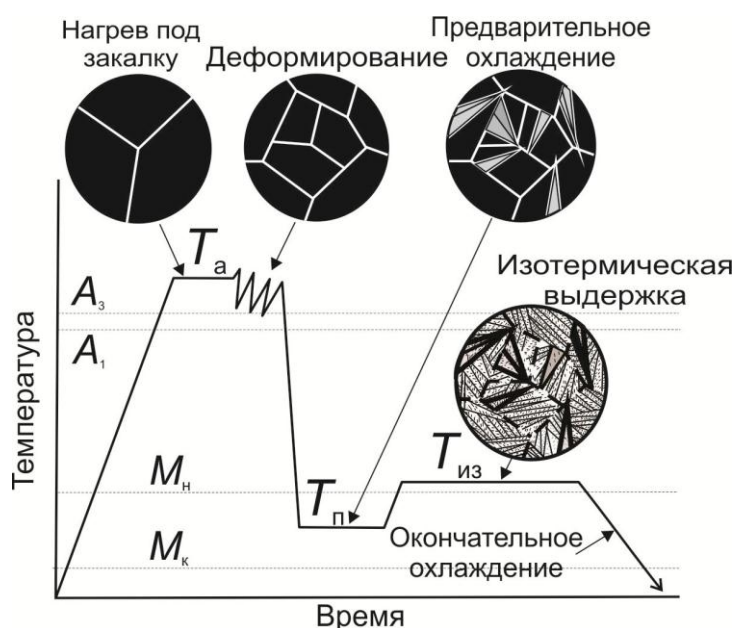


Рисунок 17 – Схема термомеханической обработки стали с мартенсито-бейнитным превращением аустенита (ВТММБ)

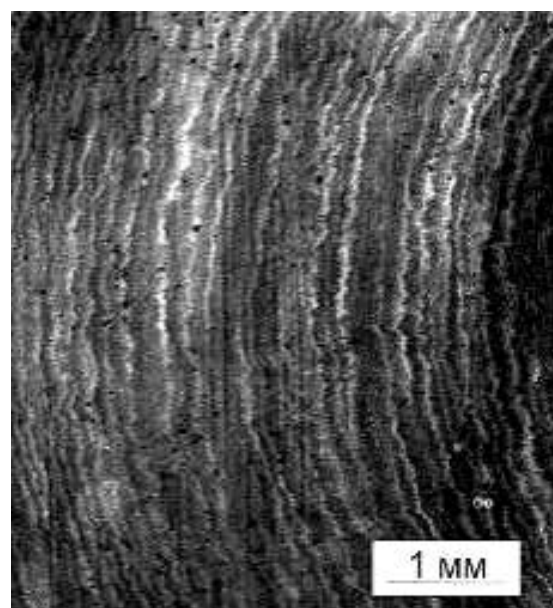


Рисунок 18 – Полосы в структуре поковки, обработанной по технологии ВТММБ (поперечный срез)



Формирование полос при термомеханической обработке стали 40X2H2MA связано, вероятно, с процессами, происходящими в легированном аустените при его горячей деформации (рисунок 19). На определенном этапе последеформационной выдержки вблизи границ аустенитных зерен формируются вытянутые области из мелких равноосных рекристаллизованных зерен, разделенные нерекристаллизованными объемами металла (рисунок 19 б). При охлаждении стали с такой структурой до температуры  $M_n$  мартенситные кристаллы появляются в первую очередь в рекристаллизованных зернах аустенита (рисунок 19 в). При неполном мартенситном превращении может быть получена структура, состоящая из областей с кристаллами мартенсита и зон остаточного аустенита между ними. Последующий нагрев материала до температуры промежуточного превращения приводит к отпуску мартенсита и преобразованию переохлажденного аустенита в структуру бейнита (рисунок 19 г). Описанная модель предполагает, что, если в горячедеформированной стали процессы рекристаллизации завершены, полосчатость в окончательной структуре стали не проявляется. Эксперименты, проведенные для проверки этой гипотезы, показали, что введение в технологический процесс обработки стали 40X2H2MA дополнительной трехминутной последеформационной выдержки при 800 °С приводит к полному устранению полос.

Технологический процесс ВТММБ наиболее рационален для упрочения легированной стали с повышенной устойчивостью переохлажденного аустенита. В углеродистых сталях, например, в стали 45 быстропротекающие процессы рекристаллизации могут приводить к замене ячеистой субструктуры горячедеформированного аустенита на крупнозернистую структуру, что в значительной степени снижает эффект обработки.

Анализ механических свойств стали 40X2H2MA после различных видов упрочнения позволяет сделать вывод о том, что технология вы-

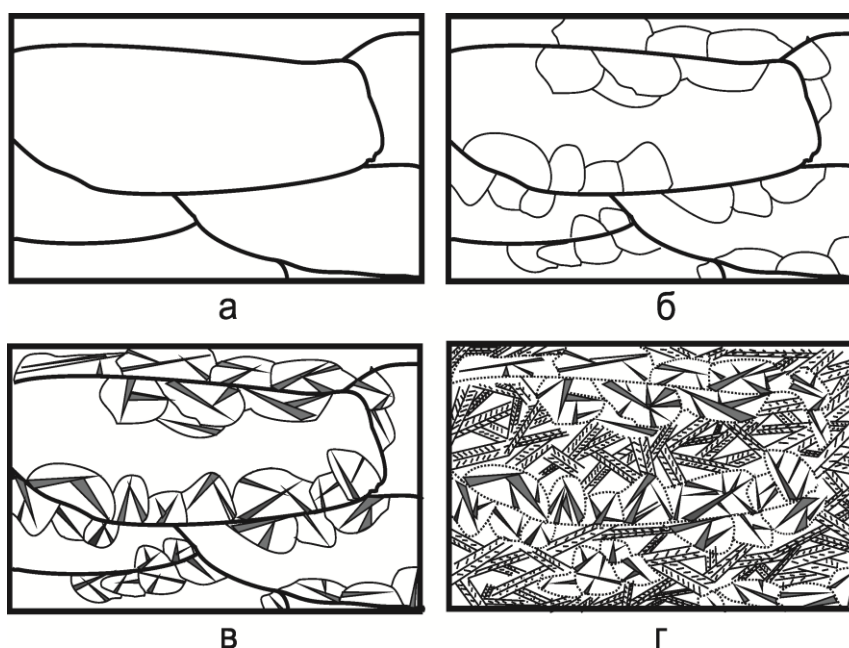
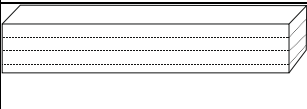
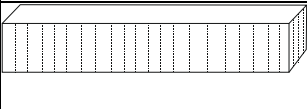
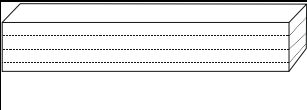
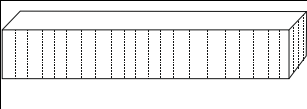


Рисунок 19 – Схема образования полосчатой структуры.  
 а - структура деформированного аустенита;  
 б - формирование рекристаллизованных зон вблизи границ деформированных зерен;  
 в - выделение мартенситных кристаллов в рекристаллизованном аустените,  
 г – превращение остаточного аустенита в бейнит, формирование мартенсито-бейнитной структуры

сокотемпературной термомеханической обработки со смешанным мартенсито-бейнитным превращением аустенита является эффективным способом повышения ударной вязкости, усталостной долговечности и трещиностойкости среднеуглеродистых легированных сталей (таблица 1). При сопоставимых прочностных характеристиках сталь, упрочненная по технологии ВТММБ, по показателям ударной вязкости в 2 раза превосходит закаленную и отпущенную сталь и в 1,5 раза сталь, обработанную по технологии ВТМО. При этом скорость распространяющихся в ней усталостных трещин в ней в 1,5 раза ниже (рисунок 20).

Таблица 1 – Механические свойства стали 40X2H2MA после различных видов термического и термомеханического упрочнения

Способ и режимы термического упрочнения (условное обозначение)	Ориентация полос в образце	HRC	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %	KCV, Дж/см <sup>2</sup>	Долговечность при изгибе, цикл
Нагрев до 910 °С; охлаждение в масле; отпуск 1 час при 400 °С (Зак. + отп. 400 °С)	Полосы отсутствуют	45	1207	1484	10	48	31920
Нагрев до 910°С; охлаждение и выдержка в течение 1 часа в расплаве солей при 350 °С (ИЗО 350 °С)	Полосы отсутствуют	35	750	1080	12	37	45390
Нагрев до 910°С; деформация со степенью 40 %; охлаждение и выдержка 1 час в расплаве солей при 350 °С (ВТМИЗО)	Полосы отсутствуют	37	876	1094	14	46	50190
Нагрев до 910°С; деформация со степенью 40 %; охлаждение в масле; отпуск 1 час при 400 °С (ВТМО)		46	1446	1483	13	59	33000
		46	1430	1431	11	58	-
Нагрев до 910°С; деформация со степенью 40 %; охлаждение и выдержка в течение 5 минут в расплаве солей при 270°С; изотермическая выдержка 1 час при 350 °С (ВТММБ)		47	1439	1597	18	97	67320
		46	983	1290	15	64	-

Следует отметить, что технологические процессы, основанные на горячей пластической деформации с последующим мартенсито-бейнитным превращением аустенита, являются причиной анизотропии механических свойств стали. Если изгибающая сила совпадает с направлением полос, то сопротивление ста-

ли разрушению при динамическом нагружении сопоставимо с показателями стали, упрочненной по технологии ВТМО, но вне зависимости от схемы испытаний ударная вязкость стали, упрочненной по технологии ВТММБ, превышает ударную вязкость после закалки и отпуска. Технологии, при реализации которых формируется структура нижнего бейнита различной дисперсности (ИЗО и ВТМИЗО), обеспечивают значения условного предела текучести и временного сопротивления разрушению на 400-500 МПа меньше по сравнению с процессами, результатом которых является структура мартенсита (при сопоставимых температурах изотермического превращения и отпуска). По этой причине использование их для обработки тяжело нагруженных деталей энерговооруженных ударных машин не целесообразно.

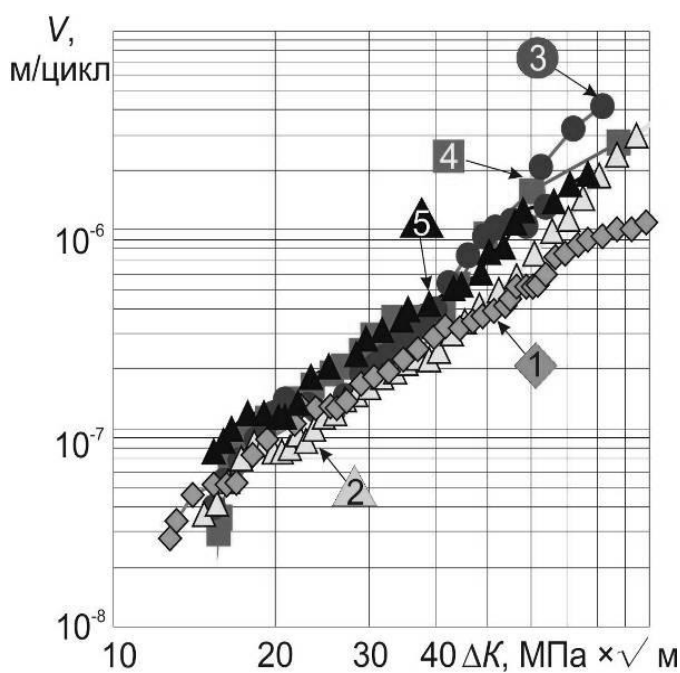


Рисунок 20 – Кинетические диаграммы установившегося разрушения стали 40X2H2MA после различных видов упрочнения.

1 – ВТММБ; 2 – ВТМИЗО; 3 – ИЗО 350 °С;  
4 – закалка + отпуск 400 °С; 5 – ВТМО

После закалки с отпуском при 400 °С характерными элементами структуры стали 40X2H2MA являются двойникованные кристаллы мартенсита длиной около 8 - 10 мкм, по границам которых выделяются карбиды размером 200 - 400 нм (рисунок 21). Средняя длина двойников в кристалле составляет 2 - 3 мкм при ширине – 10 - 50 нм. Высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМО) приводит к формированию дисперсной структуры со средней длиной мартенситных кристаллов около 5 - 8 мкм. После изотермической закалки (ИЗО) с температурой выдержки 350 °С в стали формируется структура нижнего бейнита с продольным размером пакетов, равным 10 - 15 мкм.

При упрочнении стали по технологии высокотемпературной термомеханической обработки с распадом аустенита в области промежуточного превращения (ВТМИЗО) пластическая деформация аустенита сопровождается уменьшением размеров бейнитных пакетов. Результатом технологических процессов термической обработки с мартенсито-бейнитным превращением аустенита (МБ) и термомеханической обработки с мартенсито-бейнитным превращением аустенита (ВТММБ) является формирование структуры, представленной кристаллами отпущенного мартенсита и пакетами нижнего бейнита. При реализации технологии ВТММБ длина двойникованных кристаллов мартенсита по



сравнению с МБ-обработкой уменьшается примерно в два раза (с 8 - 10 до 4 - 6 мкм). Средняя длина выделившихся карбидов составляет 200 - 500 нм.

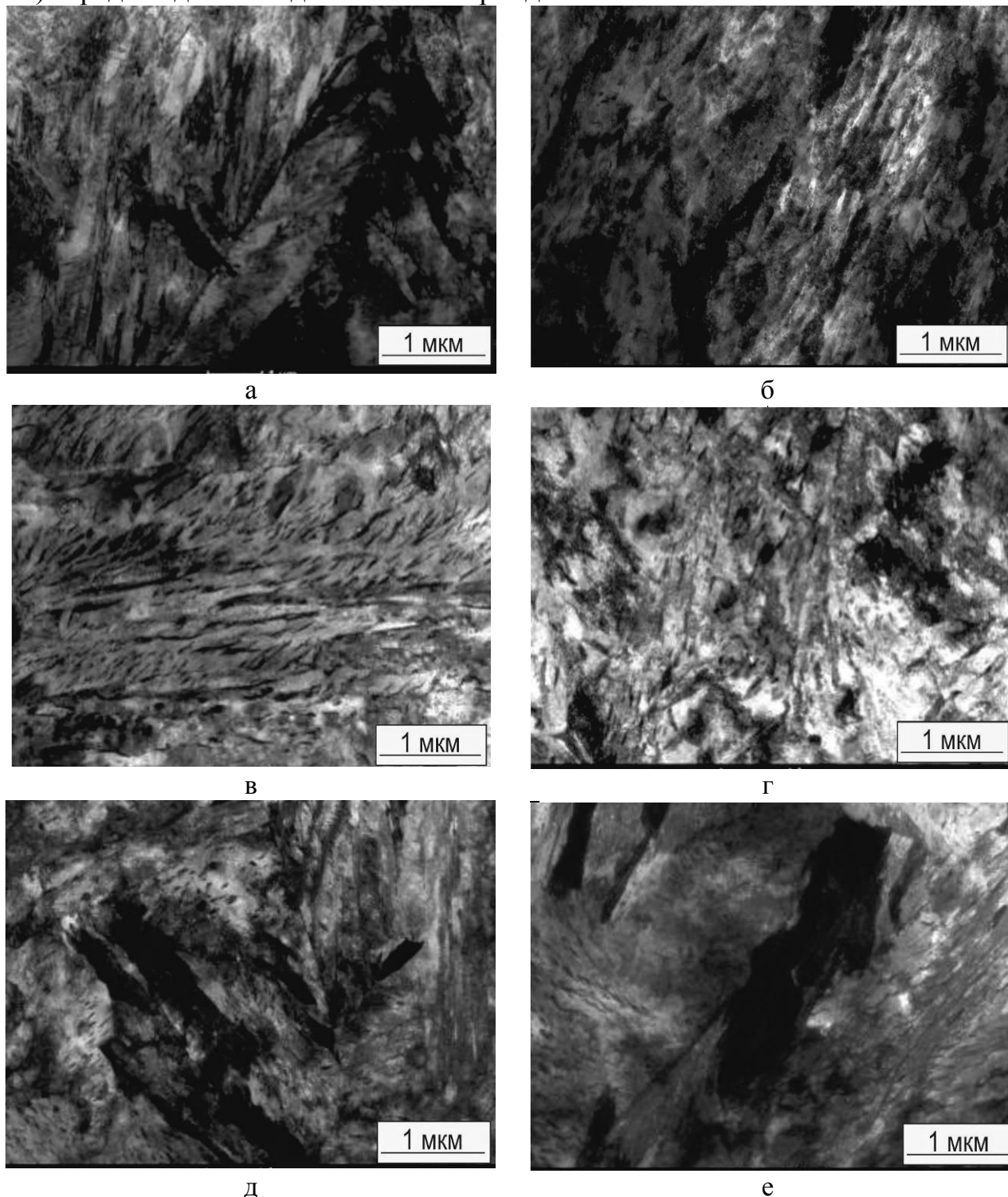


Рисунок 21 – Структура стали 40X2H2MA после различных видов термического и термопластического воздействия (ПЭМ). а - закалка + отпуск при 400 °С; б - VTMO; в - ИЗО; г - VTMIZO; д - МБ; е - VTMMB

Эффективное техническое решение, обеспечивающее повышение конструктивной прочности деталей ударных машин, связано с формированием в сталях многофазной высокопрочной структуры, содержащей значительную долю прослоек метастабильного остаточного аустенита. Склонность этой фазы к

деформационному мартенситному превращению является фактором, способствующим повышению сопротивления материала распространению усталостных трещин. К сплавам такого типа относятся стали с наноструктурированным бейнитом (нанобейнитом). В дуговой печи *Arc Melting System AM* в среде аргона была выполнена опытная плавка легированной стали, имеющей в своем составе 0,8 % C; 1,36 % Mn; 1,68 % Si; 0,86 % Cr; 0,67 % Co; 0,51 % Mo и 0,36 % Al. Для формирования нанобейнитной структуры образцы из полученной стали в течение 20 минут подвергали аустенитизации в камерной печи при 900 °С, быстрому охлаждению и выдержке в течение 5 минут в расплаве солей до 220 °С с последующей перекладкой заготовок в лабораторную электрическую печь и выдержке в течение 60 часов при 220 °С.

Исследования показали, что в стали с бескарбидной бейнито-аустенитной структурой содержится ~ 30 % остаточного аустенита. Возникшие в сплаве пластины бейнитного феррита толщиной 200-300 нм разделены прослойками остаточного аустенита толщиной до 50 нм (рисунки 22, 23). Структура такого типа обеспечивает высокий уровень прочностных свойств ( $\sigma_{0,2} = 1320$  МПа, 665 HV) пластичности ( $\delta = 12$  %) и ударной вязкости ( $KCV = 91$  Дж/см<sup>2</sup>).

Другим современным методом термического упрочнения, обеспечивающим высокие показатели конструктивной прочности сталей, является технологический процесс, получивший название *Q&P* (*Quenching and Partitioning*). Данная технология сопровождается перераспределением углерода между мартенситом и переохлажденным аустенитом, что повышает стабильность  $\gamma$ -фазы и позволяет сохранить ее при дальнейшем охлаждении стали до комнатной температуры в виде тонких прослоек по границам мартенситных кристаллов.

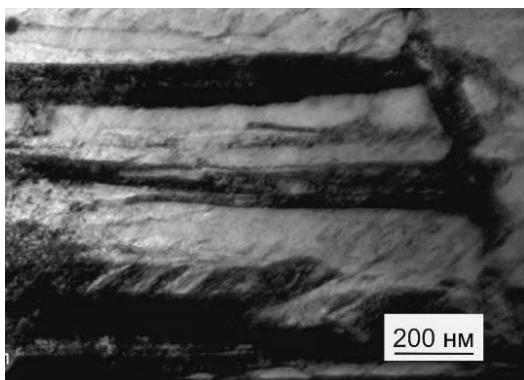


Рисунок 22 – Нанобейнитная структура стали. Просвечивающая электронная микроскопия

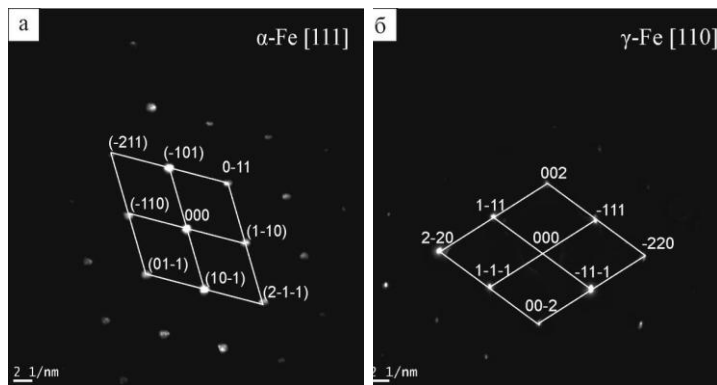


Рисунок 23 – Картины дифракции электронов от светлых (а) и темных (б) областей на рисунке 22.

Для оценки эффективности анализируемой технологии был проведен сравнительный анализ структуры и механических свойств стали 30ХГСА после *Q&P*-обработки и традиционной операции закалки. *Q&P*-обработка осуществлялась по следующим режимам: нагрев до 900 °С с выдержкой при этой температуре в течение 20 минут; охлаждение в расплаве солей при 270 °С с выдержкой при этой температуре в течение одной минуты; нагрев в расплаве свинца до 460 °С с выдержкой при этой температуре в течение двадцати секунд и после-

дующим охлаждением в масле до комнатной температуры. Для уменьшения внутренних напряжений часть образцов, упрочненных закалкой и *Q&P*-обработкой, подвергали отпуску в камерной печи при 300 °С в течение 1 часа.

Анализ результатов рентгеноструктурных исследований показал, что после *Q&P*-обработки в структуре стали 30ХГСА кроме мартенсита содержится около 9 % остаточного аустенита. Кристаллы мартенсита обеспечивают высокую прочность, а дисперсные прослойками метастабильного остаточного аустенита в 1,5-2 раза увеличивают ударную вязкость стали по сравнению с традиционной технологией закалки (таблица 2)

Таблица 2 - Свойства стали 30ХГСА после различных видов обработки

№	Наименование обработки	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	Твердость <i>HRC</i>	<i>KCU</i> , Дж/см <sup>2</sup>
1	Закалка	1370	1698	6	53...55	60
2	Закалка +отпуск при 300 °С	1391	1687	10	47...51	88
3	<i>Q&amp;P</i>	1332	1604	14	49...52	116
4	<i>Q&amp;P</i> +отпуск при 300 °С	1319	1564	15	44...48	120

В зависимости от основных требований, предъявляемых к материалам деталей ударных машин – высокой прочности, твердости, ударной вязкости, трещиностойкости, необходимо применять те или иные виды термического упрочнения, обеспечивающие наилучшее сочетание свойств. Для получения высокопрочной структуры (с твердостью более 52 *HRC*) следует выполнять закалку в сочетании с низким отпуском. При необходимости обеспечения высоких показателей надежности деталей в высокопрочном состоянии (42-52 *HRC*) целесообразно упрочнение стали по технологии термической обработки со смешанным мартенситно-бейнитным превращением аустенита. Изотермическая закалка, результатом которой является формирование структуры нижнего бейнита, обеспечивает оптимальное сочетание трещиностойкости и прочности стали твердостью 36-42 *HRC*. Технологический процесс высокотемпературной термомеханической обработки со смешанным мартенсито-бейнитным превращением аустенита рационально применять при прокатке заготовок бурового инструмента или штамповке малогабаритных деталей ударных машин, например, ударников отбойных молотков и перфораторов. Технологический процесс, *Quenching and Partitioning* рационально применять для повышения эксплуатационных свойств малогабаритных деталей ударных машин. Использование в ударных механизмах стальных деталей в термически необработанном состоянии является нерациональным вследствие того, что феррито-перлитная структура характеризуется низким сопротивлением усталостному разрушению, обусловленным распространением трещин по границам перлитных колоний или пластин цементита

**В шестой главе** представлены результаты исследований влияния неметаллических включений на сопротивление сталей разрушению при циклическом воздействии сжимающих напряжений. Анализировали образцы из двух плавок стали 12ХНЗА с различной долей неметаллических включений, а также

образцы из стали 45 и ее зарубежного аналога - стали *SCM 445N*. Содержание включений в стали 12ХН3А (плавка №1) и в стали *SCM 445N* соответствовало первому баллу по ГОСТ 1778-70. Загрязненность стали 45 и стали 12ХН3А (плавка № 2) строчечными включениями различного вида находилась на уровне четвертого балла. Результаты структурных исследований были использованы в качестве исходных данных при математическом моделировании полей напряжений, формирующихся в окрестности включений. Численные эксперименты проводили с использованием метода конечных элементов в программном пакете *ANSYS Workbench 15.0*. Модели с различными типами дефектов были проанализированы в программной среде *Solidworks*. В центре плоского образца размером 35×25×3 мм имитировали одиночные дефекты цилиндрической и ромбической формы, а также в виде включений строчечного типа.

Проверку достоверности результатов математического моделирования проводили, используя метод рентгеноструктурного анализа. Данные численного эксперимента свидетельствуют о том, что при действии сжимающей силы включения транслируют нагрузку в соседние объемы основного материала. По этой причине наиболее существенное влияние на интенсивность поля напряжений оказывает вид неметаллических включений. Уровень эквивалентных напряжений у дефектов в виде пор в 3-6 раз выше, чем средний уровень напряжений в материале детали (рисунок 24). Напряжения, возникающие вблизи пластичных неметаллических включений, в 1,8-2 раза ниже, чем в окрестностях пор, однако в 1,2-1,5 раза превышают средний уровень напряжений в объекте. В сплавах, содержащих жесткие и прочные частицы, напряжения локализованы в пределах этих включений. Величина напряжений, возникающих вблизи таких частиц, ниже среднего уровня, что дает основания считать высокопрочные твердые включения при данном типе нагружения менее опасными по сравнению с пластичными низкопрочными частицами.

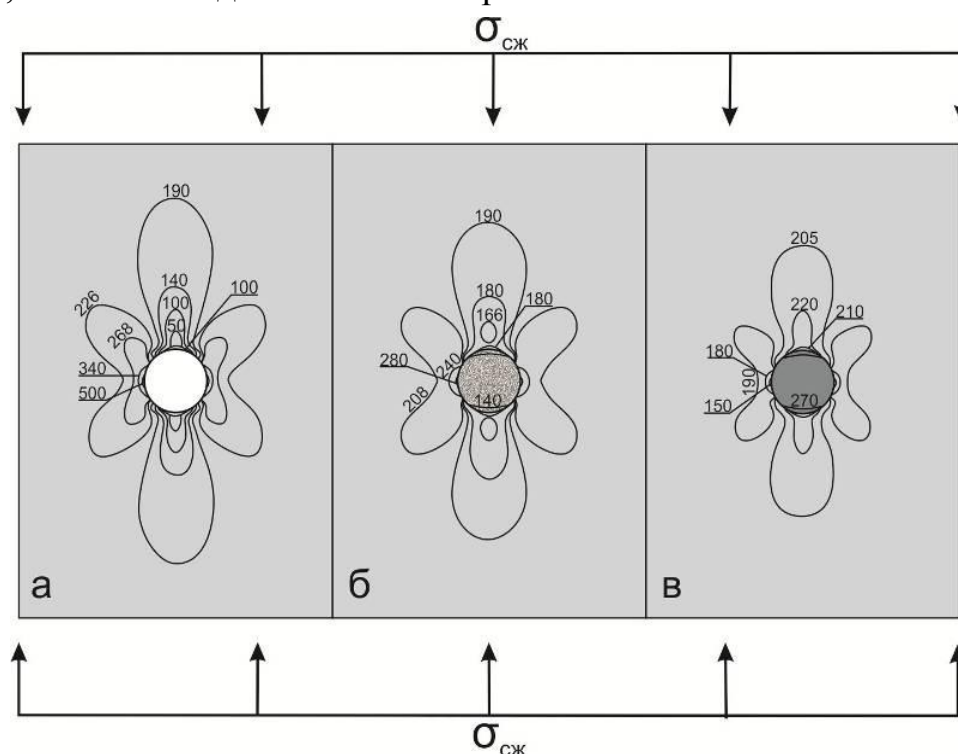


Рисунок 24 – Распределение напряжений при сжатии вблизи включений различного типа. а – пустое отверстие, б – твердое включение  $Al_2O_3$ , в – мягкое включение  $MnS$

Экспериментальная оценка влияния неметаллических включений на сопротивление усталостному разрушению закаленных и отпущенных сталей 45 и *SCM 445N* при нагружении по схеме ударно-циклического сжатия показала, что высокая степень загрязненности низкопрочными неметаллическими включениями (*MnS*) приводит к полутора-четырёхкратному снижению усталостной долговечности материала (рисунок 25).

Наличие неметаллических включений строчечного типа снижает усталостную долговечность образцов из стали 12ХН3А в 1,5 - 2 раза (рисунок 26). Наиболее негативно на сопротивление усталостному разрушению влияют строчечные неметаллические включения, ориентированные перпендикулярно действию сжимающей нагрузки.

Металлографические исследования сталей после испытаний на ударно-циклическое сжатие показали, что распространяющиеся в них трещины могут быть инициированы неметаллическими включениями, расположенными на значительном расстоянии от поверхности. Траектория роста усталостных трещин, как правило, совпадает с крупными частицами, имеющимися в стали, а разрушение происходит по границам включений с матричным материалом.

Таким образом, высокий уровень сопротивления усталостному разрушению деталей горных машин, эксплуатирующихся в условиях многократного динамического сжатия, может быть обеспечен применением сталей, неметаллические включения в которых характеризуются высокой твердостью и равномерным распределением по объему.

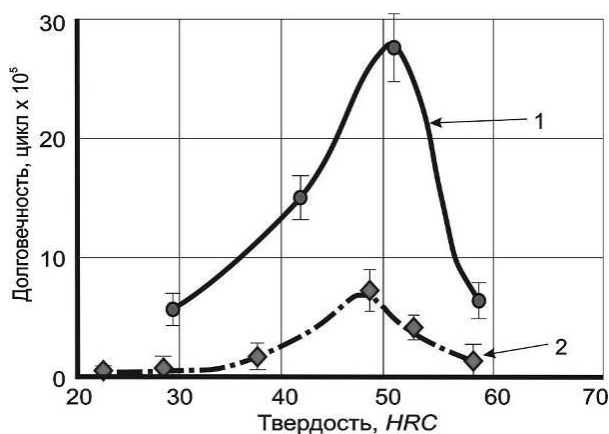


Рисунок 25 – Характеристики усталостной долговечности стали *SCM 445H* (1) и стали 45 (2)

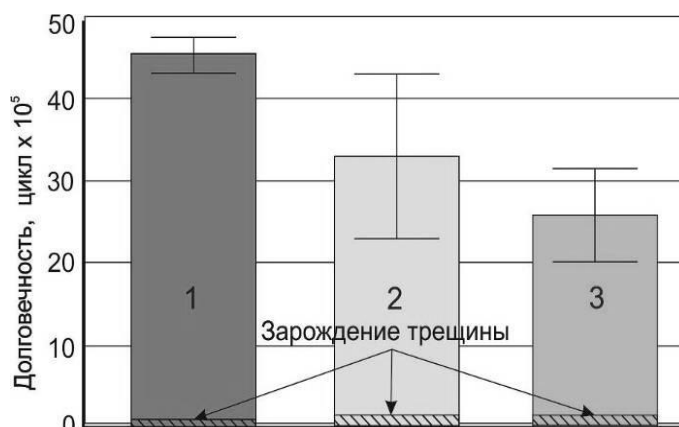


Рисунок 26 – Долговечность образцов из стали 12ХН3А. 1 – образцы с равномерно распределенными глобулярными включениями, 2 - образцы с продольным расположением строчечных включений, 3 – образцы с поперечным расположением строчечных включений

**В седьмой главе** отражены результаты оценки влияния внешней среды на сопротивление сталей ударно-усталостному разрушению при циклическом воздействии сжимающих напряжений. Были проведены испытания стальных образцов, в процессе которых в область концентраторов напряжений капель-

ным способом с постоянным расходом (50 мл/час) подавались водопроводная вода и минеральное масло. Дополнительно проведены испытания в изопропиловом спирте, который химически не взаимодействует со сталью и обладает жидкотекучестью, близкой к воде. В качестве эталонов для сравнения использовали аналогичные показатели материалов при испытаниях в воздушной среде.

Максимальной долговечностью обладали стальные образцы, испытанные в воздушной среде (рисунок 27). По сравнению с ними долговечность образцов из стали *SCM 445H* в воде снизилась в 5,3 раза, а образцов из стали 45 – в 1,2 раза. В условиях многократного динамического сжатия в присутствии жидких сред наблюдались те же закономерности роста усталостных трещин, что и в воздушной среде, однако существенным образом увеличивалась скорость их распространения (рисунок 28). Результаты испытаний со смачиванием поверхности образцов изопропиловым спиртом, имеющим близкую к воде кинематическую вязкость, но низкую коррозионную активность, показали, что уровень усталостной долговечности материала в 3,2 раза выше, чем при испытаниях в воде. Таким образом, высокая скорость зарождения и роста усталостных трещин в присутствии воды связана с процессами коррозионного разрушения материалов. Одна из возможных причин быстрого разрушения сталей в водной среде в условиях многократного динамического сжатия связана с эффектом затупления вершины трещины, увеличением размера незамкнутого фрагмента в ее вершине и, как следствие, с ростом остаточных растягивающих напряжений в окрестности вершины распространяющейся трещины. Возможный механизм разрушения материалов подробно описан в 3 главе диссертационной работы.

Процесс разрушения образцов в присутствии минерального масла развивается со скоростью, сопоставимой с разрушением в водопроводной воде. Данные микрорентгеноспектрального анализа поверхностей разрушения испытанных в масле образцов показали отсутствие на них оксидных пленок. Можно полагать, что причина высокой скорости разрушения стали в присутствии масла связана с резким увеличением давления в вершине трещины при гидроударах, возникающих на этапах сжатия образцов.

Для поверхностей разрушения образцов, испытанных в масле, характерен рельеф в виде мелкой шагрени (рисунок 29). Малая доля зон со следами пластической деформации и небольшая их площадь позволяют сделать вывод о том, что на стадии сжатия внутри трещин находилась среда, не позволяющая смыкаться берегам дефекта. Можно предположить, что формирование рельефа типа шагрени происходило в результате пластической деформации и разрушения микрообъемов материала по механизму кавитационной эрозии. Такого рода эффект может возникать на этапе разгрузки образца, когда напряжения, накопленные в материале при упругой деформации, раздвигают берега заполненной маслом трещины. Давление жидкости в трещине быстро уменьшается, в результате чего на поверхности материала возможно появление пузырьков, схлопывание которых сопровождается эрозией материала

Топографические исследования поверхности образцов показали, что при испытании в жидких средах размер областей пластической деформации в окрестности вершины усталостной трещины 3 - 5 раз больше, чем при испытаниях в воздушной среде. Этот факт является косвенным свидетельством увеличения локальных напряжений в окрестности вершины растущей трещины на этапе сжатия и соответственно роста остаточных растягивающих напряжений в данной области на этапе разгрузки

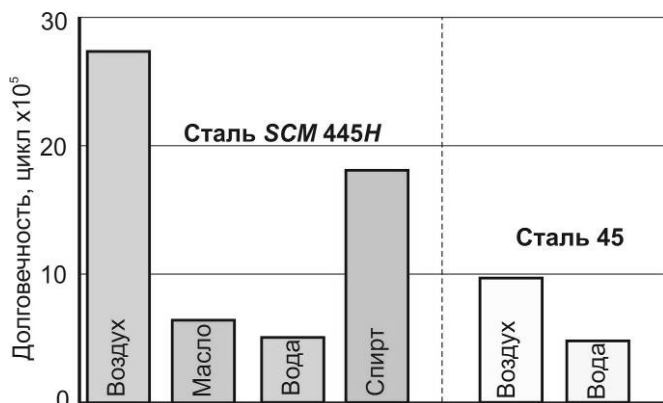


Рисунок 27 – Средняя долговечность образцов из стали *SCM 445H* и 45 (HRC 50) при испытаниях в различных средах

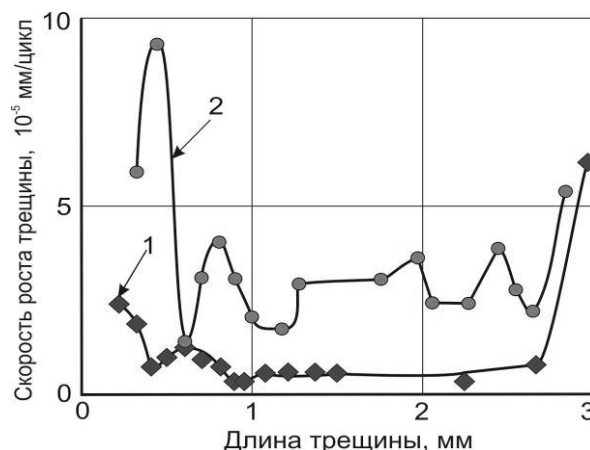


Рисунок 28 – Зависимость скорости распространения трещин от их длины в образцах из стали *SCM 445H* при испытаниях на воздухе (1) и в воде (2)

Процесс разрушения стали в условиях циклического нагружения сжатием в присутствии жидких сред происходит в несколько этапов. На первом этапе вблизи механических концентраторов напряжений возникают усталостные трещины, растущие в форме куста. С увеличением продолжительности испытаний и по мере накопления повреждений трещины появляются в зонах, которые первоначально деформировались упруго (рисунок 30).

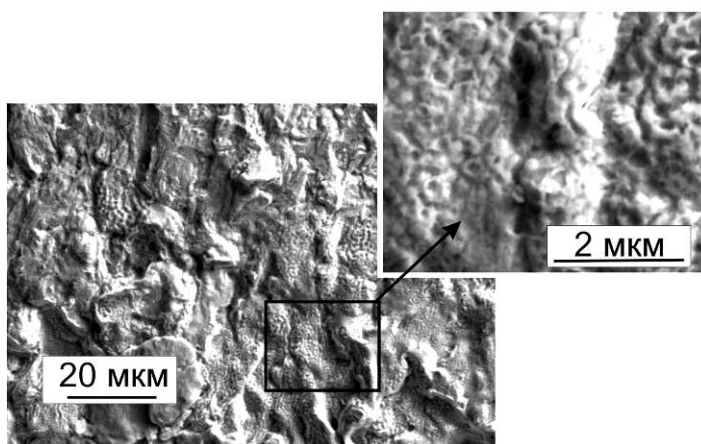


Рисунок 29 – Поверхность разрушения образца из стали *SCM 445H* со следами эрозии, возникшими при ударно-усталостном испытании в присутствии масла

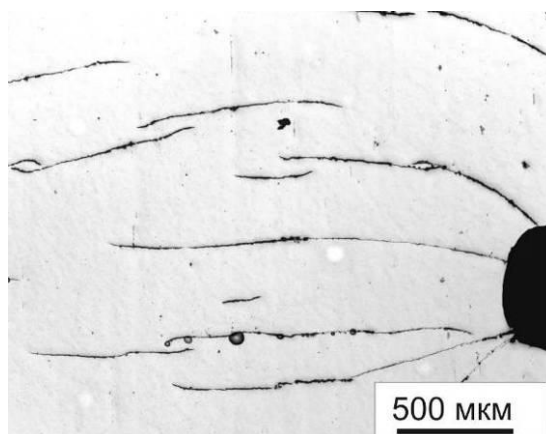


Рисунок 30 – Образование периферийных трещин вблизи концентратора напряжений на образце из стали *SCM 445H*



Для испытаний в воде характерно появление трещин вблизи внутренних дефектов, например, неметаллических включений. Зародившись на этих дефектах, трещины постепенно превращались в магистральные. Наиболее активное формирование системы периферийных трещин наблюдалось в сталях со структурой мартенсита. Рост периферийных трещин происходил преимущественно поперек образца (перпендикулярно действию сжимающей силы). Таким образом, использование жидких рабочих сред или водно-воздушной смеси вместо воздушного энергоносителя может сопровождаться существенным снижением ресурса работы деталей ударных машин.

**В восьмой главе** представлены данные, свидетельствующие о практическом использовании результатов исследований в АО «Томский электромеханический завод им В.В. Вахрушева», ООО «Сибирская горная компания», ООО «Алтайский завод прецизионных изделий», Институте горного дела СО РАН, а также о применении полученных результатов в учебном процессе. На Томском электромеханическом заводе им В.В. Вахрушева проведены промышленные испытания метода объемного термического упрочнения сталей с созданием в них смешанной структуры. Сравнительные испытания показали, что применение стали 5XB2C и новой технологии термического упрочнения деталей отбойного молотка МО-2 позволяет снизить количество случаев аварийного разрушения ударников и увеличить срок их службы в 1,5 раза (с 600 до 900 часов).

Результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, были использованы при разработке высокоэффективного энерговооруженного бурового оборудования ударно-вращательного действия, предназначенного для проходки скважин в массиве прочных горных пород. Выпуск этого оборудования на предприятиях РФ и широкое применение в практике буровых работ дает основания для усиления конкурентных позиций отечественной техники и развития прорывных технологий в горнодобывающей отрасли. На рудниках ООО «Евразруда» и карьерах ООО «Сибирская горная компания» были испытаны новые погружные пневмоударники и расширители скважин П165, ПВ130 и ПВ170, предназначенные для бурения новых и расширения ранее сформированных скважин (рисунок 31).

Бойки пневмоударников были изготовлены из высококачественной стали 40X2H2MA и упрочнены по технологии, обеспечивающей формирование смешанной мартенсито-бейнитной структуры. Установлено, что новые методы упрочнения позволяют в два раза повысить ресурс работы новых образцов погружных пневмоударников и расширителей скважин повышенной мощности и на 50 % уменьшить эксплуатационные расходы.

Внедрение результатов диссертационной работы на Алтайском заводе прецизионных изделий дало возможность не менее чем на 25 % увеличить показатели усталостной прочности деталей ответственного назначения.

Результаты исследований, проведенных в ходе выполнения диссертационной работы, используются в Новосибирском государственном техническом университете при реализации образовательных программ в области материаловедения и технологии новых материалов.





Рисунок 31 – Пневмоударник ПВ 170М, установленный на буровом станке *SWDB165*

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

В ходе выполнения диссертационной работы разработан и практически использован комплекс испытательного оборудования, позволяющий изучать процессы разрушения материалов и проводить сравнительный анализ эффективности различных способов термического и термомеханического упрочнения стали в условиях, приближенных к условиям эксплуатации деталей ударных машин. Примененный в работе подход к исследованию процессов ударно-усталостного разрушения основан на подробном изучении факторов, оказывающих наиболее значимое влияние на процессы зарождения и распространения усталостных трещин, выяснении связей и зависимостей между элементами системы «состав – структура – свойства». Предложен механизм, позволяющий объяснить зарождение и рост усталостных трещин при многократном воздействии на материал ударных импульсов сжатия. При выполнении исследований особое внимание уделено разработке новых методов термического и термомеханического упрочнения стали, основанных на принципах формирования в сталях высокопрочной смешанной структуры, обеспечивающей повышенный уровень ударной вязкости и трещиностойкости материалов.

Выполненные в работе расчеты и натурные испытания сталей, характеризующихся различной степенью чистоты, позволили оценить влияние морфологии, формы и размера неметаллических включений на процессы зарождения и распространения усталостных трещин в условиях нагружения по схеме многократного динамического сжатия. Особый интерес представляют результаты, свидетельствующие о существенном влиянии внешней среды на усталостную долговечность деталей горных машин, эксплуатирующихся в условиях динамического сжатия. Выявлены основные причины повышения остаточных растягивающих напряжений и особенности распространения трещин при динамическом нагружении сталей в жидких средах. Разработаны практические рекомендации по рациональному выбору сталей для изготовления деталей ударных механизмов.

### **Полученные результаты позволили сделать следующие выводы:**

1. На основании проведенных исследований разработан оригинальный комплекс испытательного оборудования, обладающий высокой надежностью и стабильными параметрами ударного нагружения, позволяющий проводить испытания материалов по схемам ударно-циклического сжатия и изгиба с максимальной энергией удара до 8 Дж и частотой до 600 ударов в минуту. Используемый в работе подход обеспечивает достоверность получаемых результатов и позволяет выполнять сравнительный анализ процессов разрушения изучаемых сплавов и эффективности способов их упрочнения, а также исследовать влияние параметров внешнего силового воздействия на поведение сталей при их ударно-усталостном нагружении.

2. В циклически сжимаемых образцах могут зарождаться и расти усталостные трещины, приводящие к их полному разрушению. Развитие трещин обеспечивается растягивающими напряжениями, возникающими в окрестности фронта движущихся дефектов на стадии разгрузки материала. Величина остаточных напряжений зависит от параметров зон упругопластической деформации, сформированных вблизи надрезов или движущихся трещин при воздействии сжимающей силы. Наиболее интенсивные процессы пластического течения, обеспечивающие ускоренное зарождение и быстрый рост усталостных трещин, развиваются вблизи поверхности деформируемых объектов в зонах концентрации механических напряжений. В глубине материала распространение дефекта обеспечивается наличием участка (незамкнутого фрагмента) трещины вблизи ее фронта, на котором на стадии сжатия не происходит смыкания противоположных берегов излома.

3. В процессе нагружения образцов по схеме ударно-циклического сжатия скорость распространения усталостных дефектов максимальна на начальном этапе. При продвижении трещин вглубь образцов их скорость уменьшается в 10-20 раз и стабилизируется на низком уровне. При этом устраняется зависимость скорости продвижения трещины от ее длины и оставшегося целым поперечного сечения деформируемого объекта. Уровень растягивающих напряжений в вершине магистральной трещины, распространяющейся вдали от поверхности деформируемого объекта, длительное время остается стабильно невысоким, что обеспечивает малую площадь зоны долома, которая обычно не превышает пяти - семи процентов от номинальной площади поперечного сечения. В стальных деталях процессы накопления усталостных повреждений вблизи фронта трещины развиваются под действием максимальных касательных напряжений и соответствуют сдвиговой модели деформации и разрушения материала. Об этом свидетельствует формирование на изломах объектов поверхностного рельефа с бороздками, характерными для усталостного разрушения металлических материалов.

4. При ударно-усталостном нагружении материалов проявляется несколько факторов, способствующих дополнительному росту остаточных растягивающих напряжений. Один из них связан с несовпадением элементов рельефа при смыкании противоположных берегов трещины. К усилению расклини-

вающего эффекта и ускорению процесса усталостного разрушения динамически нагруженных деталей приводит выкрашивание пластически упрочненных слоев материала и заполнение полости магистральной трещины продуктами разрушения, формирующимися по механизму фреттинг-коррозии. Доминирующий фактор ударно-усталостного разрушения зависит условий внешнего нагружения, прочностных характеристик и структурного состояния стали. На различных стадиях продвижения усталостных трещин факторы, определяющие характер поведения материалов, могут изменяться.

5. Для изготовления тяжело нагруженных деталей ударных машин наиболее рационально использовать стали с содержанием углерода 0,45-0,8 %. Наивысший уровень усталостных свойств закаленных и отпущенных сталей обеспечивает температура отпуска 300 °С, что соответствует их твердости 48-52 HRC. Высокое сопротивление усталостному разрушению имеют стали со структурой нижнего бейнита, сформированной закалкой с изотермическим превращением аустенита в промежуточной области. Они обладают полуторакратным преимуществом в трещиностойкости по сравнению со сталями, находящимися в закаленном и отпущенном состоянии (при аналогичном уровне твердости 37-40 HRC). В то же время стали, подвергнутые изотермической закалке, не обладают высоким уровнем прочностных характеристик, что делает невозможным применение данного технологического процесса для упрочнения деталей энергооборудованных ударных механизмов.

6. Одним из эффективных способов повышения конструктивной прочности сталей является термическая обработка с мартенсито-бейнитным превращением аустенита, которая позволяет формировать смешанную структуру, обеспечивающую высокие показатели прочностных свойств и сопротивления усталостному разрушению. Важным достоинством термообработки с мартенсито-бейнитным превращением аустенита является возможность изменения в широких пределах свойств стали за счет варьирования объемного соотношения и морфологии получаемых в процессе превращения структурных составляющих. Для изготовления тяжело нагруженных деталей ударных механизмов наиболее оптимальной является структура, состоящая из 40 % отпущенного мартенсита и 60 % нижнего бейнита

7. Для повышения конструктивной прочности тяжело нагруженных деталей ударных машин перспективными являются технологические процессы, при реализации которых в сталях формируется высокопрочная структура, состоящая из кристаллов  $\alpha$ -фазы, разделенных тонкими прослойками вязкого метастабильного остаточного аустенита, обладающего в процессе пластического течения способностью к мартенситному превращению. Применение сталей со структурой наноструктурированного бейнита, а также сталей, для упрочнения которых использован технологический процесс *Q&P* (*Quenching and Partitioning*) позволяет обеспечить высокие прочностные характеристики сталей и 1,5-2 раза повысить их сопротивление распространению трещин.

8. Разработан и запатентован новый способ высокотемпературной термомеханической обработки с мартенсито-бейнитным превращением аустенита

(ВТММБ), при реализации которого в легированной стали 40Х2Н2МА проявляется эффект формирования градиентной (полосчатой) структуры из чередующихся зон отпущенного мартенсита и нижнего бейнита. Условием, способствующим образованию полосчатой структуры, является незавершенность рекристаллизационных процессов в деформированном легированном аустените, развивающихся на стадии последеформационной выдержки. Сталь, упрочненная по технологии ВТММБ, при сопоставимых прочностных характеристиках по показателям ударной вязкости и трещиностойкости в два раза превосходит закаленную и отпущенную сталь и в полтора раза сталь, обработанную по технологии высокотемпературной термомеханической обработки.

9. Эффективным способом увеличения ударной мощности погружных пневмоударников является повышение частоты динамического нагружения с использованием бойков уменьшенной массы. При конструировании пневмоударников малого диаметра такой подход может быть реализован с применением для изготовления бойков высокопрочных титановых сплавов, характеризующихся низким удельным весом. В соответствии с результатами промышленных испытаний пневмоударника АШ43 применение титановых сплавов для изготовления бойков пневмоударников позволяет в 1,5 раза повысить ударную мощность и на 30 % увеличить скорость бурения по сравнению с пневмоударниками, оснащенными стальными бойками.

10. Установлено, что в условиях многократного динамического сжатия загрязненность сталей неметаллическими включениями негативно влияет на ее сопротивление усталостному разрушению. Основным фактором, влияющим на долговечность стали, является тип содержащихся в ней включений. Результаты численного моделирования и экспериментальные данные свидетельствуют о том, что максимальная концентрация локальных напряжений в основном материале наблюдается вблизи пор и низкопрочных пластичных включений. Наименее опасными являются твердые высокопрочные включения, в окрестности которых уровень локальных напряжений ниже среднего значения в стали. Отмеченные факторы позволяют определять высокопрочные твердые включения при данном типе нагружения как менее опасные дефекты строения по сравнению с пластичными низкопрочными частицами.

11. Экспериментальные исследования по влиянию внешней среды на сопротивление сталей усталостному разрушению в условиях циклического сжатия показали, что наличие на поверхности стальных образцов жидкой среды (воды, минерального масла или спирта) в 2-5 раз ускоряет процесс разрушения материала по сравнению с испытаниями на воздухе. Наиболее негативное влияние на показатели усталостной долговечности образцов оказывает вода. Быстрое разрушение сталей в этой среде обусловлено интенсивным развитием процессов фреттинг-коррозии в вершине растущей трещины. В инертных средах с высокой кинематической вязкостью, например, в минеральном масле, интенсификация процессов разрушения обусловлена ростом локальных напряжений в окрестности вершины усталостной трещины на этапе сжатия материала и по-

вышением остаточных растягивающих напряжений в этой области на этапе разгрузки в результате микрогидравлических ударов.

12. На основании результатов проведенных исследований и промышленных испытаний разработаны эффективные технологические решения по повышению безотказности и долговечности деталей энерговооруженных ударных машин. На способ высокотемпературной термомеханической обработки стальных изделий с мартенсито-бейнитным превращением аустенита получен патент на изобретение Российской Федерации. Результаты исследований, представленных в диссертационной работе, используются Институтом горного дела СО РАН, АО «Томский электромеханический завод им В.В. Вахрушева», ООО «Сибирская горная компания», ООО «Алтайский завод прецизионных изделий», а также Новосибирским государственным техническим университетом при реализации образовательных программ в области материаловедения.

### **Рекомендации, перспективы и дальнейшие направления исследований**

Особенности разрушения материалов в условиях ударно-усталостного нагружения представляют научный и практический интерес для материаловедов, а также для специалистов в области конструирования ударных машин и буровой техники. Необходимость продолжения научных исследований, ориентированных на получение новых материалов, обеспечивающих высокие показатели долговечности и безотказности горношахтного оборудования, неоднократно отмечалась в трудах международных и всероссийских научно-технических конференций. Проведенные в работе исследования показали перспективность технологических решений, позволяющих повысить конструктивную прочность сталей на основе комплексного подхода, включающего подробный анализ системы «состав – структура - свойства» с последующей оценкой работоспособности материалов в составе реальных конструкций. Особое внимание в будущих исследованиях предполагается уделять вопросам разработки новых методов объемного упрочнения сталей с формированием в них смешанных высокопрочных структур, в том числе с высоким содержанием остаточного аустенита; определению технологических режимов, обеспечивающих рациональную морфологию и оптимальное соотношение структурных составляющих при различных условиях нагружения; изучению кинетики трансформационного превращения переохлажденного аустенита в условиях многократного динамического сжатия.

### **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Основные результаты диссертационной работы представлены в следующих публикациях, входящих в перечень ВАК, в том числе в журналах, индексируемых в базах *Web of Science* и *Scopus***

1. Особенности разрушения цементита при деформации сталей со структурой пластинчатого перлита/ А. А. Батаев, В. А. Батаев, А. И. Попелюх, Л. И. Тушинский // Физика металлов и металловедение. – 1995. – Т. 80, вып. 5. – С. 148–154.

2. Установка для проведения ударно-усталостных испытаний / Л. И. Тушинский, А. А. Батаев, В. А. Батаев, А. И. Попелюх // Заводская лаборатория. – 1996. – №5. – С. 45–47.
3. Структурные особенности разрушения сталей при ударно-циклическом сжатии / А. А. Батаев, В. А. Батаев, А. И. Попелюх, Л. И. Тушинский // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1996. – № 10. – С. 29–31.
4. Свойства сталей с гетерофазной структурой / А. А. Батаев, Л. И. Тушинский, А. И. Попелюх [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1998. – №1. – С. 56–61.
5. Особенности тонкого строения цементита в углеродистых сталях / А. А. Батаев, В. А. Батаев, А. И. Попелюх // Физика металлов и металловедение. – 1998. – Т. 85, вып. 6. – С. 132–137.
6. Способ термической обработки инструментальной стали со смешанным мартенситно-бейнитным превращением аустенита / А. И. Попелюх, А. А. Батаев, А. М. Теплых [и др.] // Сталь. – 2011. – №4. – С. 69–73.
7. Влияние неметаллических включений на долговечность ударных машин / А. А. Репин, С. Е. Алексеев, А. И. Попелюх, А. М. Теплых // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – №6. – С. 74–83.
8. Репин, А. А. Методы повышения надежности деталей ударных машин / А. А. Репин, С. Е. Алексеев, А. И. Попелюх // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 4. – С. 94–101.
9. Исследование закономерностей периодического деформирования металлических материалов / В. И. Капустин, В. П. Гилета, К. В. Захарченко, А. И. Попелюх // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012. – Т. 78, №12. – С. 50–55.
10. Попелюх, П. А. Влияние внешней среды на показатели надежности деталей горных машин, работающих в условиях динамического сжатия / П. А. Попелюх, А. А. Никулина, А. И. Попелюх // Науч. вест. НГТУ. – 2013. – № 4(53). – С. 133–138.
11. Погружные пневмоударники высокого давления для открытых горных работ / А. А. Репин, Б. Н. Смоляницкий, А. И. Попелюх [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 5. – С. 157–168.
12. Особенности зарождения и роста усталостных трещин в стали при многократном динамическом сжатии / А. И. Попелюх, П. А. Попелюх, А. А. Батаев [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 2016. – Т. 117, № 3. – С. 291–299.
13. Повышение мощности малогабаритных погружных пневмоударников / А. А. Репин, В. В. Тимонин, А. И. Попелюх [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 6. – С. 86–93.
14. Влияние неметаллических включений на сопротивление стали разрушению при многократном динамическом сжатии = *Influence of nonmetallic inclusions on the fracture resistance of steel under fatigue dynamic compression*

*conditions* / А. И. Попелюх, С. В. Веселов, Д. Д. Мункуева, В. В. Тимонин, В. Н. Карпов. // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты = *Obrabotka metallov: metal working and material science*. – 2017. – № 2 (75). – С. 67–78.

15. Пути повышения эффективности ударно-вращательного бурения скважин / А. С. Кондратенко, В. В. Тимонин, В. Н. Карпов, А. И. Попелюх. – Текст : непосредственный // Горный журнал. – 2018. – №5. – С. 63–68.

16. Попелюх, А. И. Структура и свойства стали 40Х2Н2МА после термомеханической обработки с мартенситно-бейнитным превращением аустенита / А. И. Попелюх, А. А. Никулина // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2018. – № 10 (760). – С. 51–60.

17. Структурные преобразования углеродистых ферритно-перлитных сталей в условиях высокоскоростного нагружения / А. А. Батаев, И. А. Батаев, А. И. Попелюх [и др.] // *Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты*. – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 115–128.

#### **Патент на изобретение:**

1. Пат. №2588936 С1 Российская Федерация, С21D8/00 (2006.01), С21D1/78 (2006.01). Способ термомеханической обработки стальных изделий : № 2015107816/02 : заявл. 05.03.2015 : опубл. 10.06.2016, Бюл. № 19 / Попелюх А. И., Никулина А. А., Попелюх П. А., Юркевич М. Р. ; заявитель и патентообладатель НГТУ. – 4 с.

#### **Монография:**

Исследование конструктивной прочности материалов после комбинированного упрочнения и специальных методов сварки / А. В. Плохов, А. И. Попелюх, С. В. Веселов [и др.]. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2015. – 392с. (Серия «Монографии НГТУ»).

#### **Статьи в прочих изданиях:**

1. Повышение конструктивной прочности деталей пневмопробойника / К. К. Тупицин, А. А. Артемьев, А. И. Попелюх [и др.] // *Объемное и поверхностное упрочнение деталей машин*. – Новосибирск : Изд-во НЭТИ, 1987. – С. 25–32.

2. Термическое упрочнение углеродистых сталей со смешанным превращением аустенита / В. А. Батаев, А. И. Попелюх, Ю. В. Осадчий, В. Г. Кощев // *Структура и конструктивная прочность стали*. – Новосибирск : Изд-во НЭТИ, 1989. – С. 19–27.

3. Теняев, И. К. Выбор материалов для изготовления деталей отбойных молотков / И. К. Теняев, А. И. Попелюх, В. Г. Кощев // *Структура и конструктивная прочность стали*. – Новосибирск : Изд-во НЭТИ, 1989. – С. 71–76.

4. Попелюх, А. И. Метод исследования свойств материалов при ударно-циклическом приложении нагрузки / А. И. Попелюх, И. К. Теняев, В. Г. Кощев // *Структура и свойства упрочненных конструкционных материалов*. – Новосибирск : Изд-во НЭТИ, 1990. – С. 91–97.

5 Кощев, В. Г. Свойства сталей 110Г13Л, 65Г в условиях ударно-усталостного нагружения / В. Г. Кощев, А. И. Попелюх, И. К. Теняев. // *Струк-*

тура и свойства упрочненных конструкционных материалов. – Новосибирск : Изд-во НЭТИ, 1990. – С. 12–22.

6. Батаева, З. Б. Свойства низкоуглеродистой стали, прокатанной в межкритическом интервале температур / З. Б. Батаева, А. И. Попелюх // Проблемы современного материаловедения : сб. науч. трудов. – Днепропетровск, 1999. – С. 36–37.

7. Повышение конструктивной прочности деталей ударных машин термической обработкой созданием в стали смешанной структуры / А. И. Попелюх, А. М. Теплых, Д. С. Терентьев, А. Ю. Огнев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2009. – № 2. – С. 19–24.

8. Пути повышения конструктивной прочности ударного инструмента / А. И. Попелюх, А. М. Теплых, Д. С. Терентьев, А. Ю. Огнев // Обработка металлов. – 2009. – № 4. – С. 15–16.

9. Экспериментальные исследования закономерностей периодического деформирования металлов / В. И. Капустин, В. П. Гилета, К. В. Захарченко, А. И. Попелюх // Вест. Нижегород. гос. ун-та им Н. И. Лобачевского. – Нижний Новгород : Изд-во ННГУ им Н.И. Лобачевского, 2011. – №4, Ч. 5. – С. 2219–2221.

10. Попелюх, П. А. Повышение надежности деталей ударных машин с помощью изотермической закалки / П. А. Попелюх, А. И. Попелюх // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 4. – С. 79–82.

11. Попелюх, П. А. Комбинированная термомеханическая обработка стали с мартенсито-бейнитным превращением аустенита / П. А. Попелюх, А. И. Попелюх, М. Р. Юркевич // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 2. – С. 62–68.

12. *Special features of strain and fracture in steels under impact fatigue loading* / A. Popelyukh, I. Bataev, P. Popelyukh, A. Chumachenko // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 446-447. – P. 576–580.

13. A. Popelyukh, A. *Combined Thermomechanical Treatment for the Mining Industry* / A. Popelyukh, M. Yurkevich, P. Popelyukh // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 698. – P. 382–385.

14. *Popelyukh, A. Effect of Thermomechanical Treatment on the Properties of Steel with a Mixed MartensiticBainitic Structure* / A. Popelyukh, M. Yurkevich, P. Popelyukh // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 788. – P. 157–162.

Отпечатано в типографии Новосибирского  
государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
Тел./факс: (383)346-08-57  
формат 60x84 1/16, объем 2,5 п.л., тираж 120 экз.  
Заказ № 278. Подписано в печать 17.09.2021 г.