

Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ
Уральского отделения
Российской академии наук
(ИМАШ УрО РАН)

Комсомольская ул., 34, г. Екатеринбург, 620049
Тел.: (343) 374-47-25, факс: (343) 374-53-30
E-mail: ges@imach.uran.ru; http://www.imach.uran.ru
ОКПО 04538044, ОГРН 1036603482992
ИНН/КПП 6660005260/667001001

06.12.2021 № 16348/01-218-196

на № _____ от _____

Г

директор ИМАШ УрО РАН д.т.н.
В.П. Швейкин



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения Уральского отделения Российской академии наук на диссертационную работу Попелюха Альберта Игоревича на тему «Деформация и разрушение сталей в условиях ударно-усталостного нагружения», представленную к защите по специальности "2.16.17 – материаловедение" на соискание ученой степени доктора технических наук

На отзыв представлены:

- диссертационная работа объемом 395 страниц, состоящая из введения, восьми глав, заключения, списка литературы из 326 источников и 6 приложений
- автореферат диссертации на 40 страницах, включая список из 33 публикаций по теме диссертационной работы, в том числе 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.

Актуальность темы диссертационной работы

В своей работе А.И. Попелюх решает проблему разработки эффективной технологии упрочнения деталей горных машин с позиции рационального сочетания высоких эксплуатационных свойств выпускаемой продукции, минимальных затрат на ее внедрение и простоты использования в условиях реального производства. Актуальность диссертационной работы связана с выявлением основных закономерностей разрушения материалов в условиях многократного воздействия ударных импульсов изучением способов формирования в сталях смешанных структур с высокими показателями прочности и тещиностойкости. Свои исследования автор проводит с использованием как оригинального, так и серийно выпускаемого современного исследовательского, технологического и аналитического оборудования, что позволяет решить ряд фундаментальных задач и расширить представления о процессах повреждения и разрушения металлических материалов в условиях ударно-усталостного нагружения.

Несмотря на известные достижения в области конструирования новых машин ударного действия с высокими показателями производительности и энергоэффективности, показатели их ресурса работы остаются недостаточными. Диссертационная работа Попелюха А.И. заключалась в выявлении основных особенностей разрушения сталей в условиях ударно-усталостного нагружения и разработке эффективных процессов повышения конструктивной прочности тяжело нагруженных деталей ударных машин. В связи с вышеизложенным работа Попелюха А.И. является актуальной, а отраженные в ней результаты имеют важное научное и прикладное значение. Содержание диссертации, изложенной в восьми главах, в полной мере отражает логику, методологию, результаты и выводы проведенного исследования.

Научная и практическая значимость работы

Основные теоретические результаты работы заключаются в выявлении не изученного ранее механизма роста усталостных трещин при многократном воздействии на материал ударных импульсов сжатия. К научным достижениям диссертации Попелюха Альберта Игоревича следует так же отнести подробное изучение процессов разрушения сталей в условиях нагружения по схеме многократного динамического сжатия на воздухе, в коррозионно-активных и инертных жидких средах и выявление факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на сопротивление сталей ударно-усталостному разрушению

Диссертантом были изучены и проанализированы различные технологические приемы повышения конструктивной прочности нагруженных деталей машин ударного действия, и выбраны наиболее эффективные методы, связанные с формированием в сталях смешанной структуры, состоящей из областей с высокой прочностью, и участков, где материал обладает повышенным сопротивлением росту усталостных трещин. Использованные в работе подходы, основанные выяснении основополагающих зависимостей между структурой сталей, их дефектностью и свойствами легли в основу практических рекомендаций по выбору материалов и технологий их упрочнения для изготовления нагруженных деталей ударных машин и механизмов. Сформулированные рекомендации используются в Институте горного дела СО РАН, на Томском электромеханическом заводе им В.В. Вахрушева, ООО «Сибирская горная компания» для новых типов энерговооруженных ударных машин и ООО «Алтайский завод прецизионных изделий» для повышения надежности и безотказности деталей топливной аппаратуры.

Научную новизну работы составляет совокупность теоретических и экспериментальных данных, полученных при исследовании, в частности:

Установлены основные закономерности зарождения и кинетики роста усталостных трещин при ударно-усталостном нагружении по схеме сжатия, что при циклическом воздействии сжимающей силы. Показано, что развитие усталостных трещин может приводить к полному разрушению объекта исследований;

Выявлены основные особенности формирования смешанной структуры в стали при термической обработке с мартенсито-бейнитным превращением аустенита. Разработан новый метод термомеханического упрочнения, при реализации которого в легированных сталях может быть сформирована градиентная (полосчатая) структура из чередующихся зон отпущенного мартенсита и нижнего бейнита.

Получены новые экспериментальные данные по влиянию внешней среды на сопротивление стали усталостному разрушению в условиях циклического сжатия.

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.

Обоснованность и достоверность научных результатов

Достоверность экспериментальных данных, научных положений рекомендаций и выводов обеспечивается использованием комплекса взаимодополняющих традиционных и новых методов исследования с использованием современного научного оборудования, статистической обработкой полученных результатов. Основные результаты работы докладывались на всероссийских и международных конференциях и опубликованы в рецензируемых международных журналах, входящих в перечень ВАК, и индексируемых в базах Web of Science и Scopus. По результатам работы опубликована монография (в соавторстве) и получен патент на способ термомеханической обработки стальных изделий.

Анализ содержания диссертационной работы

Во введении описаны структуры и объем работы, обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель и определены основные задачи, решаемые для ее достижения, приведены научная ценность и практическая значимость работы, изложены положения, выносимые на защиту, даны сведения о публикациях автора по теме диссертации.

В первой главе приведен обзор литературы по теме диссертационной работы. Проанализированы особенности эксплуатации ударных машин и основные причины выхода из строя их наиболее ответственных тяжело нагруженных деталей. Установлены особенности влияния динамического характера нагружения на показатели механического поведения стали. Пристальное внимание в литературном обзоре уделено оценке современных методов формирования в сталях высокопрочных структур со значительным сопротивлением усталостному разрушению. Показано, что поиск новых технических решений, повышающих показатели конструктивной прочности стальных изделий, является на сегодняшний день актуальной научной и производственной проблемой. В обзоре научно-технической литературы рассмотрены различные варианты технологических процессов термической и термомеханической обработки, в результате реализации которых в сталях формируются смешанные структуры из высокопрочных мартенсита и нижнего бейнита, в том числе имеющие прослойки метастабильного остаточного аустенита по границам. Произведена оценка влияния дефектности сталей и внешних условий на сопротивление зарождению и росту усталостных трещин. На основании литературного обзора обозначены проблемы в области ударно усталостного разрушения материалов и определены наиболее рациональные и перспективные методы их решения.

Во второй главе изложены основные методики определения химического и фазового состава материалов, их структуры и механических свойств. Особый интерес представляет описание устройства и принципа работы разработанного автором испытательного комплекса для исследования процессов разрушения и усталостных свойств материалов при их ударно-циклическом нагружении по схемам сжатия и изгиба.

В третьей главе А.И. Попелухом рассмотрены особенности зарождения и распространения усталостных трещин при многократном динамическом нагружении по схеме сжатия в сталях с различными прочностными характеристиками и структурой. Выявлены явные отличия в поведении объектов, деформируемых в таких условиях. Показано, что о сравнению с изгибом или растяжением, при которых разрушение материалов обычно происходит с нарастающей скоростью, в условиях ударно-циклического сжатия скорость распространения максимальна у трещины, продвигающейся в поле напряжений, созданном поперечным концентратором. По мере роста трещина

замедляет свое движение и распространяется с низкой скоростью, которая практически не зависит от длины трещины и оставшегося поперечного сечения детали. Автором предложен механизм, объясняющий рост усталостных трещин в глубине материала, и обоснована возможность полного разрушения деталей при многократном воздействии на них сжимающих напряжений сжатия. Показано, что рост усталостных трещин происходит на этапе разгрузки под действием остаточных напряжений растяжения появляющихся в окрестности вершины трещины вследствие наличия незамкнутого фрагмента трещины вблизи ее фронта, на котором на стадии сжатия не происходит смыкания противоположных берегов излома.

В четвертой главе представлены результаты исследований усталостных свойств сталей, упрочненных традиционными способами термической обработки. На основании анализа диаграмм конструктивной прочности автором разработаны рекомендации по рациональному применению методов термической обработки, обеспечивающих повышение надежности деталей ударных машин в зависимости обеспечения необходимых показателей прочности, твердости, ударной вязкости усталостной долговечности. Показано, что в условиях многократного динамического нагружения сжатием обладают стали с твердостью 48-52 HRC. При реализации технологии изотермической закалки оптимальные показатели конструктивной прочности деталей, нагруженных по схеме многократного динамического сжатия, обеспечиваются при образовании в сталях структуры нижнего бейнита, однако Применение технологии изотермической закалки для упрочнения тяжело нагруженных деталей энерговооруженных ударных механизмов нецелесообразно, поскольку не позволяет обеспечить требуемый уровень прочностных свойств сталей. Установлено что использование бойков уменьшенной массы из титановых сплавов является эффективным способом увеличения ударной мощности погружных пневмоударников. Проблему низкой износостойкости титановых бойков можно решить цементацией их поверхностного слоя.

В пятой главе диссертационной работы представлены результаты экспериментов, направленных на увеличение показателей конструктивной прочности деталей ударных машин за счет формирования в сталях смешанной структуры сталей с использованием методов термической и термомеханической обработки. Показано, что одним из эффективных способов повышения конструктивной прочности сталей является термическая обработка с мартенсито-бейнитным превращением аустенита, позволяющая сочетать высокие прочностные характеристики и сопротивление усталостному разрушению. При изготовлении тяжело нагруженных деталей ударных механизмов рациональным является формирование смешанной структуры, состоящей из 40 % отпущенного мартенсита и 60 % нижнего бейнита.

При выполнении исследований разработан и запатентован технологический процесс термопластического упрочнения легированных среднеуглеродистых сталей с мартенсито-бейнитным превращением аустенита (ВТММБ), который рационально совмещать с операциями горячей объемной штамповки. Показано, что при сопоставимых прочностных характеристиках сталь 40X2H2MA, упрочненная по технологии ВТММБ, по показателям ударной вязкости и усталостной долговечности в 2 раза превосходит закаленную и отпущенную сталь. Результаты исследований, изложенных в пятой главе, свидетельствуют, что для упрочнения деталей ударных механизмов рационально так же использовать технологический процесс упрочнения Quenching and Partitioning и стали с нанобейнитной структурой (с безкарбидным бейнитом).

Шестая глава диссертационной работы посвящена исследованию влияния неметаллических включений на сопротивление сталей ударно-усталостному разрушению при циклическом воздействии сжимающих напряжений. Представлены результаты

математического моделирования полей напряжений, формирующихся в окрестности включений различного размера, формы и типа. Установлено, что наиболее существенное влияние на интенсивность поля напряжений оказывает тип неметаллических включений. Выявлено, что при циклическом воздействии сжимающих напряжений величина напряжений, возникающих вблизи твердые включений, ниже, чем средний уровень напряжений в материале детали, при этом напряжения локализованы в пределах этих включений. Полученные результаты позволяют считать, что в условиях нагружения по схеме ударно-усталостного сжатия высокопрочные твердые включения являются менее опасными по сравнению с пластичными низкопрочными частицами и дефектами в виде пор. Сравнительный анализ данных, полученных математическим моделированием, с результатами рентгеноструктурного анализа зональных напряжений и данными экспериментов по оценке влияния неметаллических включений на долговечность закаленных и отпущенных сталей показал обоснованность сделанных выводов.

В седьмой главе отражены результаты оценки влияния внешней среды на сопротивление сталей ударно-усталостному разрушению при циклическом воздействии сжимающих напряжений. Автором показано, что в зависимости от химического состава и структурного состояния используемой стали наличие на поверхности деталей жидкой среды снижает их усталостную долговечность от двух до пяти раз. Минимальной долговечностью обладают стальные образцы, испытанные в водной среде. Автором показано, что высокая скорость зарождения и роста усталостных трещин в присутствии воды связана с процессами коррозионного разрушения, приводящим к затуплению распространяющейся трещины, и, как следствие, с росту остаточных растягивающих напряжений в окрестности ее вершины. Причина высокой скорости разрушения стали в условиях многократного динамического сжатия в присутствии масла, по мнению автора, иная и связана с резким увеличением давления в вершине трещины при гидроударах, возникающих на этапах сжатия образцов. Показано, что использование жидких рабочих сред или водно-воздушной смеси вместо воздушного энергоносителя может сопровождаться существенным снижением ресурса работы деталей ударных машин.

В восьмой главе работы приведены данные о практическом использовании результатов исследований при разработке и производстве высокоэффективного энерговооруженного оборудования ударного и ударно-вращательного действия, в АО «Томский электромеханический завод им В.В. Вахрушева», ООО «Сибирская горная компания», ООО «Алтайский завод прецизионных изделий», Институте горного дела СО РАН. Установлено, что новые методы упрочнения увеличить срок службы деталей отбойного молотка МО-2 в 1,5 раза и в два раза повысить ресурс работы новых образцов погружных пневмоударников и расширителей скважин повышенной мощности. Приведена информация о применении полученных результатов в Новосибирском государственном техническом университете при реализации образовательных программ в области материаловедения и технологии новых материалов

В заключении представлены основные выводы по диссертационной работе и обсуждены перспективы и направления дальнейшей разработки темы.

Достоверность научных положений, результатов и выводов обусловлена использованием современных методов исследований, новейшего аналитического и испытательного оборудования, а так же разработкой оригинальных методик исследования материалов в условиях ударно-усталостного нагружения. Результаты работы докладывались на многочисленных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных журналах, в том числе и высокорейтинговых.

Автореферат диссертации соответствует содержанию диссертации и отражает все основные положения и выводы, выносимые на защиту.

Соответствие содержания работы указанной специальности

Диссертационная работа соответствует пунктам №1, 3, 5, 6 научной специальности 05.16.09. – Материаловедение (в машиностроении) (в соответствии с новой номенклатурой научных специальностей: 2.6.17 - Материаловедение)

п. 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. 3 - разработка научных основ выбора материалов с заданными свойствами применительно к конкретным условиям изготовления и эксплуатации изделий и конструкций

п. 5 - установление закономерностей и критериев оценки разрушения материалов от действия механических нагрузок и внешней среды;

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

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. Название диссертационной работы, несмотря на то, что оно носит весьма общий характер, не отражает часть исследований, которая касается применения и технологии химико-термической обработки титанового сплава для деталей ударно-буровых машин.

2. Судя по тексту работы и библиографии, описанный нанобейнит – это безкарбидный бейнит. Как минимум любой нижний бейнит в сталях имеет высокодисперсную карбидную фазу, которую можно охарактеризовать словом "наноструктура". Неясно, почему в работе используется не устоявшийся в материаловедческой литературе, а менее понятный и распространенный термин.

3. На модельных и натуральных материалах в главе 6 получен вывод о негативном влиянии включений на долговечность стали при ударно-усталостном нагружении. В выводе 10 к работе, относительно влияния включений на долговечность, напряжений автор слишком упрощенно делит все включения на высокопрочные твердые и низкопрочные пластичные, без учета состава, морфологии и характера распределения включений. В выводе фигурирует концентрация напряжений возле включений, без приведения конкретных значений анализируемых напряжений.

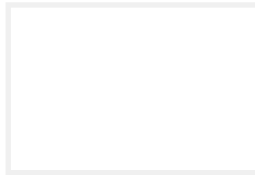
Заключение

Оценивая в целом диссертационную работу Попелюха Альберта Игоревича на тему «Деформация и разрушение сталей в условиях ударно-усталостного нагружения», можно констатировать, что отмеченные выше недостатки не снижают значимости проведенных исследований в целом. Представленная к защите диссертация является законченной научно-квалификационной работой и соответствует требованиям, предъявляемым п.9 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ (Постановление Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г.) к докторским диссертациям. Работа содержит новые знания и научно обоснованные технические решения, внедрение которых внесет существенный вклад в развитие экономики страны в сфере материалов

машиностроительного и иного назначения. Автор диссертации заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.17 – Материаловедение.

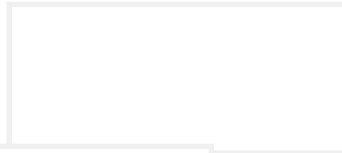
Отзыв на диссертационную работу составлен и утвержден на научном семинаре Отдела физических проблем машиностроения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук (протокол №249 от 11 ноября 2021 года)

Председатель научно-технического семинара
Отдела физических проблем
машиностроения ИМАШ УрО РАН, г.н.с., д.т.н.



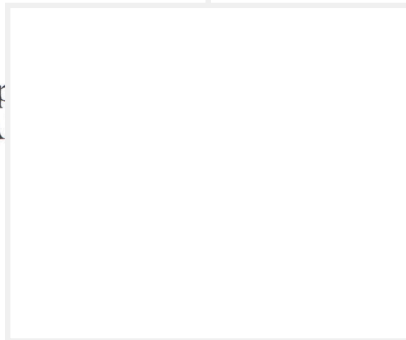
С.В. Смирнов

С.н.с. Лаборатории конструкционного
материаловедения, к.т.н.



С.В. Буров


Подписи С.В. Смирнова и С.В. Бур
Ученый секретарь ИМАШ УрО РАН



А.М. Поволоцкая

Адрес организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
Уральского отделения Российской академии наук,
620049, г.Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34,
телефон (343)-374-47-25
e-mail: ges@imach.uran.ru

Получили в свет 08.12.2021  / *Теркин П.В.*
С отзывом и отзывами 09.11.2021 