

ОТЗЫВ

Официального оппонента Шацова Александра Ароновича на диссертационную работу Попелюха Альберта Игоревича на тему «Деформация и разрушение сталей в условиях ударно-усталостного нагружения», на соискание ученой степени доктора технических наук представленную к защите по специальности "2.16.17 – материаловедение"

Актуальность темы диссертации

В настоящее время о ударно-вращательный способ бурения является одним из наиболее эффективных методов получения скважин и бестраншейной прокладки подземных коммуникаций. Однако вследствие экстремальных условий погружные ударные машины имеют незначительный ресурс работы и низкие показатели безотказности. Для решения проблемы повышения надежности горного оборудования при одновременном увеличении его производительности требуется проведение детальных исследований, направленных на выявление механизмов деградации и разрушения материалов при экстремальных нагрузках и разработка новых методов повышения трещиностойкости высокопрочных сталей в условиях ударно-усталостного нагружения. Диссертационная работа Попелюха А.И., содержащая результаты таких исследований, а так же рекомендации по выбору марок сталей для изготовления ответственных деталей ударных машин и перспективных методов их термического упрочнения, имеет важное значение для промышленности и безусловно является актуальной

Анализ содержания диссертации

Во введении обоснована актуальность запланированных исследований, сформулирована цель и задачи работы, изложены научная новизна и практическая значимость проведенных исследований, основные защищаемые положения.

Первый раздел диссертации представляет собой литературный обзор, в котором описано современное состояние исследований процесса разрушения материалов при их при нагружении многократным динамическим сжатием, проанализированы условия работы и основные причины выхода из строя тяжело нагруженных деталей энерговооруженных ударных механизмов, определены наиболее перспективные способы повышения их долговечности и безотказности.

Вторая глава диссертации посвящена описанию основных методов исследований, используемых в диссертационной работе. Подробно изложен принцип работы и конструкция оригинального испытательного комплекса, предназначенного для исследования свойств материалов в условиях ударно-циклического нагружения, описаны способы и средства измерения параметров удара, а так же свойства, характеризующие сопротивление материалов ударно-усталостному разрушению.

В третьей главе диссертационной работы отражены результаты исследований особенностей зарождения и развития усталостных трещин в сталях

при многократном динамическом нагружении по схеме сжатия, которые свидетельствуют, что процесс усталостного разрушения ударных деталей машин, характеризуется рядом особенностей. При нагружении сталей ударно-циклическим сжатием скорость распространения усталостных трещин максимальна на начальном этапе разрушения. Рост трещин вглубь образца сопровождается уменьшением скорости разрушения, что в значительной степени отличается от кинетики разрушения материалов в условиях действия растягивающих или изгибающих нагрузок, при действии которых разрушение деталей по мере уменьшения фактической площади их поперечного сечения происходит с нарастающей скоростью.

В главе отражены особенности роста усталостных трещин сталях с различной структурой при их ударно-усталостном по схеме сжатия. Выявлено, что усталостные трещины продвигаются преимущественно по границам зерен, вдоль межфазных границ или по границам мартенситных или бейнитных кристаллов. Часто разрушение совпадает с областями материала, в которых зафиксирована повышенная концентрация дефектов, например в зонах в которых обнаружена высокая загрязненность неметаллическими включениями.

В работе предложен механизм, объясняющий рост «длинных» усталостных трещин, основной особенностью которого является наличие участка в вершине трещины, где не происходит ее закрытия на этапе сжатия. Действие этого участка, названного автором «незамкнутым фрагментом трещины», подобно полуму внутреннему концентратору эллиптической формы с постоянным раскрытием берегов. Вследствие наличия подобного дефекта при ударе в окрестности вершины трещины происходит формирование области с повышенной концентрацией напряжений, последующая пластическая деформация материала и появление в вышеуказанной области на этапе разгрузки значительных остаточных растягивающих напряжений. Результатом этих процессов является локальное накопление в материале усталостных повреждений при дальнейших циклах нагружения, последующее разрушение и подрастание усталостной трещины в направлении максимальных касательных напряжений в соответствии с кристаллографической моделью. Предложенный механизм объясняет формирование поверхностного рельефа с бороздками, характерными для усталостного разрушения материалов, который можно обнаружить вблизи фронта растущей трещины или около зоны долома. Вследствие контакта смежных берегов трещины на этапе сжатия, их пластической деформации и разрушения, излом объекта при нагружении ударно-циклическим сжатием обычно имеет сглаженную поверхность. Проведенные исследования свидетельствуют, что значительный вклад в ускоренный рост трещины вносят, несовпадение элементов рельефа поверхностей разрушения при смыкании противоположных берегов трещины, ее заполнение продуктами разрушения, а так же внутренние дефекты в стали, в частности неметаллические включения.

Четвертая глава посвящена определению рационального химического состава и структуры сталей, а так же режимов их термического упрочнения, обеспечивающих высокие показатели конструктивной прочности тяжело нагруженных деталей машин ударного действия. Произведена оценка влияния температуры отпуска и режимов термической обработки с изотермическим превращением аустенита в промежуточной области на сопротивление стали усталостному разрушению при многократном динамическом сжатии. Показано, что максимальный уровень усталостных свойств в условиях многократного динамического нагружения сжатием обеспечивает твердость стали 48-52 HRC. При реализации технологии термической обработки с изотермическим превращением аустенита в промежуточной области высокие показатели усталостных свойств имеют стали со структурой нижнего бейнита. Однако для упрочнения деталей энерговооруженных ударных механизмов применение данной технологии нецелесообразно, так как она не обеспечивает требуемый уровень прочностных свойств сталей.

В работе выполнена оценка возможности применения титановых сплавов для изготовления тяжело нагруженных деталей ударных механизмов. Показано, что цементация поверхности титановых бойков обеспечивает их высокую износостойкость в паре трения с латунями и позволяет использовать титановый сплав ОТ4-1 для изготовления бойков малогабаритных пневмоударников. Данное техническое решение позволяет в 1,5 раза повысить ударную мощность и на 30 % увеличить скорость бурения по сравнению с пневмоударниками, оснащенными стальными бойками.

В пятой главе диссертации приведены результаты исследования строения и свойств сталей со смешанной мартенсито-бейнитной структурой и высокопрочных сталей с высоким содержанием метастабильного остаточного аустенита. Показано, что при изготовлении тяжело нагруженных деталей ударных механизмов наиболее рациональным является формирование смешанной структуры, состоящей из 40 % отпущенного мартенсита и 60 % нижнего бейнита. Стали с такой структурой превосходят по сопротивлению распространению усталостных трещин в 1,5...2 раза при равных показателях прочности закаленную и отпущенную сталь.

Автором разработан новый технологический процесс термопластического упрочнения стали, который защищен патентом Российской Федерации на изобретение. Приведенные в диссертационной работе результаты оценки механических свойств, свидетельствуют, что высокотемпературная термомеханическая обработка с мартенсито-бейнитным превращением аустенита является эффективным способом увеличения ударной вязкости и трещиностойкости среднеуглеродистой легированной стали и может быть применена для повышения конструктивной прочности деталей, изготавливаемых с применением горячей объемной штамповки.

При реализации высокотемпературной термомеханической обработки с мартенсито-бейнитным превращением аустенита в легированных сталях может быть сформирована градиентная структура, состоящая из чередующихся зон отпущенного мартенсита и нижнего бейнита. Автором установлено, что ее образование происходит вследствие незавершенности рекристаллизационных процессов в деформированном легированном аустените, развивающихся на стадии последеформационной выдержки. Сталь 40X2H2MA с градиентной структурой, полученной по технологии ВТММБ, При сопоставимых прочностных характеристиках по ударной вязкости и усталостной долговечности в 2 раза превосходит закаленную и отпущенную сталь.

Повышение комплекса свойств динамически нагруженных деталей машин возможно применения сталей со структурой состоящей из кристаллов α -фазы, разделенных тонкими прослойками вязкого метастабильного остаточного аустенита. Стали со структурой нанобейнита, а так же упрочненные по технологии *Quenching and Partitioning* позволяют обеспечить высокие прочностные характеристики деталей и 1,5-2 раза повысить их сопротивление усталостному разрушению.

В шестой главе диссертации изучено влияние неметаллических включений и дефектности стали на ее сопротивление усталостному разрушению в усталостному разрушению в условиях многократного динамического сжатия. Результатами численного моделирования и экспериментальными данными показано, что основным фактором, влияющим на долговечность стали, является тип содержащихся в ней включений. Наименее опасными являются твердые высокопрочные включения, в окрестности которых уровень локальных напряжений ниже среднего значения в стали. В основном материале вблизи низкопрочных неметаллических включений возникают остаточные растягивающие напряжения высокого уровня, которые в совокупности с локальными напряжениями в окрестности вершины трещины, приводят к ускорению процесса разрушения стали. Так как в отличие от знакопеременного нагружения, в условиях динамического сжатия весь объем детали, в том числе и берега растущей магистральной трещины, воспринимает действие внешней силы, влияние неметаллических включений при нагружении по схеме ударно-циклического сжатия является более значительным. В зависимости от марки стали и ее структурного состояния наличие дефектов такого рода снижает усталостную долговечность в два - пять раз.

В седьмой главе приведены результаты исследования особенностей разрушения сталей в условиях циклического нагружения по схеме сжатия в присутствии жидких сред. Результаты экспериментов свидетельствуют, что наличие на поверхности стальных образцов жидкой среды от двух до пяти раз ускоряет процесс разрушения материала по сравнению с испытаниями на воздухе. В воде быстрое разрушение сталей связано с интенсивным развитием процессов фреттинг-коррозии в вершине растущей трещины. Процесс разрушения образцов в присутствии минерального масла развивается со скоростью, сопоставимой с разрушением в водопроводной воде. Автор предполагает, что причина высокой

скорости разрушения стали в присутствии масла связана с резким увеличением давления в вершине трещины при гидроударах, возникающих на этапах сжатия образцов. На поверхности разрушения образцов, испытанных в масле, доля зон со следами пластической деформации мала, оставшаяся часть излома имеет рельеф в виде мелкой шагрени, что позволяет сделать вывод о том, что на стадии сжатия внутри трещин находилась среда, не позволяющая смыкаться берегам дефекта. Результаты проведенных исследований свидетельствуют, что использование жидких рабочих сред или водно-воздушной смеси вместо воздушного энергоносителя может сопровождаться существенным снижением ресурса работы деталей ударных машин.

В последней восьмой главе диссертации описаны примеры практического применения результатов исследований при разработке высокоэффективного энерговооруженного бурового оборудования ударно-вращательного действия, предназначенного для проходки скважин в прочных горных породах. Приведены результаты испытаний ударников (бойков), отбойных молотков, тяжелонагруженных деталей высокопроизводительных пневмударников-расширителей скважин и погружных пневмударников, работающих при высоком давлении сжатого воздуха. Использование новых методов упрочнения позволило в полтора - два раза повысить их ресурс работы и на 50 % уменьшить эксплуатационные затраты. Внедрение результатов диссертационной работы при производстве деталей топливной аппаратуры на Алтайском заводе прецизионных изделий позволили повысить показатели усталостной прочности корпусов распылителей и втулок плунжеров на 25 %.

В заключении представлены основные полученные результаты и выводы по диссертационной работе. Рассмотрены перспективы продолжения работ в области изучения особенностей разрушения материалов при их ударно-усталостном нагружении, а так же аспектов разработки новых методов объемного упрочнения сталей с формированием в них смешанных высокопрочных структур, в том числе с высоким содержанием остаточного аустенита.

Новизна и практическая значимость работы подтвержден патентом на изобретение, актами внедрения и использования результатов на промышленных предприятиях и научных учреждениях (АО «Томский электромеханический завод им В.В. Вахрушева», ООО «Сибирская горная компания», ООО «Алтайский завод прецизионных изделий», Институт горного дела СО РАН)

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы обеспечивается с одной стороны, использованием при проведении экспериментальных исследований широкого арсенала современного испытательного оборудования и приборов, типовых и оригинальных методов изучения структуры и свойств материалов. Полученные результаты исследований и испытаний не противоречат опубликованным результатам других авторов и дополняют их. Таким образом, обоснованность выводов, сформулированных на основе всей совокупности полученных результатов, сомнений не вызывает.

Вопросы и замечания по диссертационной работе

1. При описании структуры не всегда учитывали тонкую структуру и морфологию мартенсита. Не определена доля реечной и пластинчатой составляющей в закаленных сталях. Для низко и среднеуглеродистых сталей, уже небольшое количество игольчатой (пластинчатой) составляющей резко понижает ударную вязкость стали; высокий отпуск во многом нивелирует свойства, но характеристики ударной вязкости у сталей с реечным мартенситом остаются выше.

2. На стр. 175 в качестве ХТО выбрана цементация - не самый разработанный процесс упрочнения титановых сплавов. Азотирование позволяет получить HV на 200 ед выше и изучено подробнее. Напрашивается применение композиционных материалов, если стоимость изделия позволяет, то деталь из титанового сплава можно покрыть слоем электролитического железа требуемой толщины, а затем провести ХТО.

3. На стр.49 перед описанием сталей необходимо было указать, что бейнит следует понимать в широком смысле этого слова.

4. На стр.59 «создание в сталях структуры нанобейнита обеспечивает возможность повышения показателей предела прочности (до 2300 МПа) в сочетании со значительной вязкостью разрушения K_{IC} (до 30 МПа $\cdot\sqrt{м}$) и относительным удлинением (до 20 %)». Существуют альтернативные процессы которые позволяют после простой термообработки (K V SUDHAKAR* and G S MURTY. *Fracture toughness correlation with microstructure and other mechanical properties in near-eutectoid steel* Bull. Mater. Sci., Vol. 21, No. 3, June 1998, pp. 241-245. © Indian Academy of Sciences), в результате которой выделяются нанокарбиды получить на стали 60ГС K_{Ic} - 69 МПа $m^{1/2}$ при пределе текучести 1464 МПа. Таким образом, соотношение между прочностью и K_{Ic} у альтернативного процесса лучше, поэтому нанобейнитную структуру можно рассматривать только как один из возможных вариантов.

5. На рис.310 и др. на зависимостях отсутствуют доверительные интервалы

6. Схема образования полос в структуре стали 40X2H2MA требует коррекции, т.к. основной элемент структуры - пакетный мартенсит.

7. Стр 193 «Исследование сталей со смешанной мартенсито-бейнитной структурой сопряжено со сложностью идентификации отпущенного мартенсита и бейнита. По форме обе структурные составляющие близки между собой, точная визуальная идентификация их затруднительна»

Но это не так. Существует по крайней мере 2 признака, отделяющие мартенсит от верхнего бейнита.

- 1. Разнонаправленность выделений карбидов в стали.
- 2. Размеры пластинок бейнита в 2-5 раз больше реек мартенсита.

Кроме того, существуют отношения с/в/а (длина/ширина/толщина), характерные для пакетного мартенсита.

8. На рис.5.17 хорошо видна пакетно-реечная структура стали. На то, что это не бейнит указывают несколько ориентировок карбидов и малые размеры реек.

9. На стр.227 представлены результаты исследования нанобейнитной стали с высокими механическими свойствами. Непонятно принимал ли автор диссертации участие в ее разработке и, если да, то в чем оно заключалось?

Общее заключение по работе

Диссертационное исследование Попелюха Альберта Игоревича «Деформация и разрушение сталей в условиях ударно-усталостного нагружения» выполнено на актуальную научную тему и имеет большую научную значимость и существенное практическое значение для промышленности. Содержание диссертационной работы соответствует пунктам 1, 3, 5 и 6 паспорта специальности 05.16.09-«Материаловедение (в машиностроении)» в части пунктов 1, 3, 5, 6. (в соответствии с новой номенклатурой научных специальностей: 2.6.17 - Материаловедение)

Исследования выполнены на современном оборудовании. Для оценки свойств и изучения процессов деградации и разрушения материалов был разработан и изготовлен оригинальный испытательный комплекс. Результаты диссертационной работы докладывались на всероссийских и международных конференциях, опубликованы в журналах из перечня ВАК и в высокорейтинговых международных журналах, включенных в библиографические базы Web of Science и Scopus. На разработанный способ термомеханической обработки стальных изделий получен патент Российской Федерации. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. В нем представлены основные результаты диссертации и вытекающие из них выводы. Научные положения и выводы непротиворечивы и обоснованы результатами проведенных исследований.

Представленная к защите диссертация отвечает требованиям, изложенным в пункте 9 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. 842), предъявляемым к докторским диссертациям и представляет собой научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований предложены технологические решения, позволяющие повысить надежность и долговечность ответственных деталей ударных машин, а так же других изделий и конструкций, подвергающихся экстремальному механическому нагружению. Считаю, что автор диссертации Попелюх Альберт Игоревич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности "2.16.17 – материаловедение"

Официальный оппонент:

Шацов Александр Аронович

Доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры металловедения,
термической и лазерной обработки металлов
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
614990, Пермский край, г. Пермь,
Комсомольский проспект, д. 29
Тел. 7 (342) 219-80-67, +7 (342) 212-39-27
e-mail: shatsov@pstu.ru

Д - р техн. наук, профессор кафедры


«Металловедение, термическая и лазерная
обработка металлов», ФГАОУ ВО «ПНИПУ»

Шацов А. А.

Подпись Шацова

Ученый секретарь
ПНИПУ 22

В. И. Макаревич

Получено в целом 07.12.2021  В. И. Макаревич

С отзв. вкл. ознакомлен 09.12.2021  В. И. Макаревич