**Зык Евгений Николаевич. Повышение усталостной прочности деталей из высокопрочных сталей при производстве и восстановлении ударными методами ППД: автореферат дис. ... кандидата Технических наук: 05.02.08 / Зык Евгений Николаевич;[Место защиты: ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»], 2018**

ФГБОУ ВО «Московский технологический университет»

На правах рукописи

/7.



Зык Евгений Николаевич

**ПОВЫШЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ И ВОССТАНОВЛЕНИИ УДАРНЫМИ МЕТОДАМИ ППД**

Специальность 05.02.08 - Технология машиностроения

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: к.т.н., доц., В.В. Плешаков

Москва - 2018

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

[ВВЕДЕНИЕ 5](#bookmark1)

1. [СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА 10](#bookmark3)
   1. [Анализ статистики отказов деталей транспортной техники 10](#bookmark6)
   2. [Методы повышения надёжности деталей из высокопрочных сталей 15](#bookmark9)
   3. [Остаточные напряжения в поверхностном слое деталей при ППД 18](#bookmark11)
   4. Неразрушающие методы контроля деталей при ППД 25

[ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ 31](#bookmark18)

1. [МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ 32](#bookmark20)
   1. [Определение методики теоретических и экспериментальных исследований 32](#bookmark23)
   2. [Методика проведения испытаний и измерений 33](#bookmark25)
   3. [Методика обработки результатов экспериментальных исследований 38](#bookmark27)
   4. [Методика оценки параметров регрессионного моделирования, адекватности и информативности полученных моделей 44](#bookmark29)
   5. [Определение методики проведения магнитошумового контроля деталей. 46](#bookmark35)

[ВЫВОДЫ 52](#bookmark42)

1. [ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ... 54](#bookmark43)
   1. Предпосылки 54
   2. [Остаточные напряжения в результате деформирования поверхности 59](#bookmark45)
   3. [Остаточные напряжения в результате нагрева поверхности 65](#bookmark49)
   4. [Определение эксплуатационного коэффициента 79](#bookmark62)
   5. [Изменение механических характеристик материала в процессе ППД 83](#bookmark65)
   6. [Оценка точности прогноза теоретической модели формирования остаточных напряжений 84](#bookmark67)

[ВЫВОДЫ 87](#bookmark69)

1. [ВЛИЯНИЕ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ДРОБЬЮ НА СВОЙСТВА](#bookmark70) [ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ](#bookmark70) [ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ И](#bookmark70) [ВОССТАНОВЛЕНИИ 88](#bookmark70)
   1. [Унификация технологических характеристик процесса обработки дробью](#bookmark71)  [88](#bookmark71)
   2. [Влияние циклического нагружения на усталостные процессы в материале 93](#bookmark77)
   3. [Влияния предварительного упрочнения и ремонта на характер кривых](#bookmark80)

нагружения 99

* 1. [Влияния наработки на характер изменения остаточных напряжений в поверхностном слое 102](#bookmark84)
  2. [Обеспечение выносливости деталей при производстве 108](#bookmark87)
  3. [Обеспечение выносливости деталей при восстановлении 111](#bookmark92)
  4. [Шероховатость поверхности после повторного упрочнения во время восстановления 119](#bookmark99)

123

[ВЫВОДЫ](#bookmark100)

1. [ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УВЕЛИЧЕНИЮ](#bookmark102) [УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ И ТЕХНИЧЕСКОГО РЕСУРСА ДЕТАЛЕЙ](#bookmark102)

ПРИ УПРОЧНЕНИИ ДРОБЬЮ 125

[ВЫВОДЫ 129](#bookmark105)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 130](#bookmark106)

[СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАНЫХ ИСТОЧНИКОВ 132](#bookmark108)

ПРИЛОЖЕНИЕ 147

**ВВЕДЕНИЕ**

Развитие современной техники и системы её технической эксплуатации поставило перед промышленностью и наукой новые задачи.

Во-первых, это обеспечение надёжности изделий, сохранение их прочностных свойств на этапе производства. Поскольку в настоящее время эффективность производства определяется в первую очередь

технологическим уровнем процесса и использованием современных методов обработки, то развитие в данном направлении видится в необходимости рационального использования существующих средств и методов,

применению новых технологических способов их реализации.

Во-вторых, это восстановление эксплуатационных характеристик деталей в процессе ремонта. К примеру, накопление при эксплуатации усталостных повреждений в поверхностном слое циклически упрочняемых деталей из высокопрочных сталей создаёт предпосылки для создания новых технологий повторного упрочнения.

В-третьих, создание методов и способов технологического контроля свойств поверхностного слоя деталей, подходящих для применения как в процессе изготовления, так и при восстановлении и ремонте.

В настоящее время в конструкциях машин различного типа большое применение находят детали из высокопрочных сталей марок 30ХГСНА, 30ХГСН2А, 35ХГСА, 25Х2ГНТА, ВНС, ВНЛ и др. Стали такого типа применяются при изготовлении высоконагруженных ответственных деталей типа пальцев, осей, болтов, втулок, кривошипов, которые работают в тяжёлых условиях, в том числе при больших знакопеременных нагрузках. Выход из строя таких деталей, к примеру, на транспортной технике, приводит к возникновению аварий и катастроф.

С целью повышения прочностных характеристик таких деталей, увеличения надёжности и долговечности, широкое распространение в современном машиностроении приобрели методы поверхностного пластического деформирования (ППД). Одним из основных способов упрочнения, относящихся к ППД, является обработка деталей дробью. Дробемётная обработка является одним из наиболее действенных и эффективных методов поверхностного пластического деформирования. Преимуществами такого типа упрочнения являются высокая производительность метода и возможность обработки поверхностей деталей различного сложного профиля и размеров.

Высокая эффективность использования метода обработки дробью деталей машин доказана в работах Плешакова В.В., Серебрякова В.И, Овсеенко А.Н., Суслова А.Г., Бабичева А.П., Лебедева В.А., Попова М.Е., Копылова Ю.Р. и др., а также подтверждается практикой современного машиностроения.

Методы ППД в настоящее время широко применяются в промышленности, и в подавляющем большинстве случаев рассмотрен только процесс упрочнения при производстве. Однако большое количество деталей, отработав плановый межремонтный ресурс, поступают на ремонтные предприятия, в связи с чем встаёт вопрос об эффективности повторного упрочения с целью восстановления прочностных характеристик, продления полного технического ресурса, повышения надёжности изделий.

Таким образом, изложенное выше подтверждает, что тема диссертационного исследования является актуальной и направлена на решение научно-технической задачи по сохранению и повышению прочностных свойств и характеристик деталей из высокопрочной стали как при производстве, так и при восстановлении в процессе эксплуатации, с помощью ударных методов ППД.

**Научная новизна.**

1. Выявлены закономерности изменения свойств поверхностного слоя деталей в процессе эксплуатации и повторного ППД при ремонте - дополнительная упрочняемость деталей в начальный период наработки с последующим лавинообразным накоплением усталостных повреждений; смещение вглубь поверхности основных усталостных процессов в результате повторной обработки.
2. Предложена математическая модель процесса формирования эквивалентных остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя и прочностных свойств деталей в процессе упрочения ППД при производстве, эксплуатации и ремонте, учитывающая усталостные процессы, происходящие в детали во время наработки.
3. Для эффективного проведения процедур повторного упрочнения посредством ударных методов ППД с целью повышения усталостной прочности деталей определена рекомендуемая величина назначенного ресурса.
4. Экспериментальным путём установлено различие режимов обработки деталей дробью на этапе производства и на этапе восстановления с целью повышения уровня усталостной прочности.

**Теоретическая и практическая ценность работы** заключаются в исследовании, разработке и апробации технологии обработки дробью деталей из высокопрочных сталей типа 30ХГСН2А как при производстве, так и в процессе эксплуатации с целью повышения усталостной прочности деталей, увеличения их ресурса и надёжности. Предложено использование обобщающего технологического фактора процесса упрочнения деталей дробью, позволяющего унифицировать процесс обработки для упрочнительных устройств различного принципа действия. Предложена методика неразрушающего контроля накопления усталостных повреждений поверхностного слоя деталей при изготовлении, эксплуатации и ремонте, основанная на магнитошумовом эффекте.

**Реализация результатов работы.** Технологические рекомендации по режимам упрочнения деталей из высокопрочных сталей при производстве и восстановлении внедрены на предприятиях отрасли: на ПАО «КАМАЗ» и АО «Ремдизель», что подтверждается соответствующими актами. Теоретические и методические разработки внедрены в учебный процесс МТУ при подготовке бакалавров и специалистов (специальность 23.05.01). «Наземные транспортно-технологические средства».

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Технологическое обеспечение повышения величины усталостной прочности деталей из высокопрочных сталей путём применения повторной упрочняющей обработки дробью в процессе эксплуатации при достижении назначенного ресурса.
2. Математическая модель процесса формирования эквивалентных остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя деталей из высо­копрочных сталей в процессе упрочения ППД при производстве, эксплуатации и ремонте, учитывающая усталостные процессы, происходя­щие в детали во время наработки.
3. Совокупность научных положений, определяющих

необходимость коррекции режимов ППД в процессе последующего упрочнения при изготовлении и технической эксплуатации деталей из высокопрочных сталей типа 30ХГСН2А.

1. Технологические условия упрочнения деталей из высокопрочных сталей на этапах производства и восстановления, обобщённые для упрочнительных устройств различного типа, позволяющие повысить уровень усталостной прочности деталей и снизить вероятность их разрушения в процессе эксплуатации.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается

сопоставлением теоретических результатов с экспериментальными данными, в том числе с результатами исследований других авторов, а также успешной реализации разработанной технологии в производстве, применением отработанных методов и технических средств.

**Личный вклад автора.** Автором лично выполнен весь объём экспериментальных исследований, проведены необходимые расчёты, обработка результатов и их анализ, разработаны обоснованные теоретической базой технологические основы процессов первичного и повторного упрочнения деталей из высокопрочных сталей дробью соответственно при производстве и в ходе проведения ремонтных процедур.

**Апробация работы.** Основные положения апробированы на международной научной конференции ИМАШ РАН "Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении", Москва, 2012 г.

На научно-практической конференции «Актуальные проблемы приборостроения, информатики и социально-экономических наук», Москва, МГУПИ, 2013 г.

На международных научно-технических конференциях «Информатика и технология», Москва, МГУПИ, 2014 г.; «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике», Москва, 2015 г.

На 64 научно-технической конференции МГУИТРЭ (МГУПИ), Москва, 2015 г.

На научно-методических семинарах кафедр "Технология машино­строения", «Транспортные средства и бортовые информационно-

управляющие системы», МТУ, 2012-2016гг.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, из них 4 в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, шести разделов, общих выводов, списка использованных источников, приложения. Общий объём работы составляет 150 страниц, в том числе 2 таблицы, 46 рисунков, 131 наименование литературных источников, приложение.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Диссертационная работа посвящена вопросу увеличения усталостной прочности деталей из высокопрочных сталей типа 30ХГСН2А ударными методами поверхностного пластического деформирования на этапах производства и восстановления с целью повышения надёжности изделий и соответствующего продления общего технического ресурса. Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Установлено, что применение повторной упрочняющей обработки деталей из высокопрочных сталей дробью является эффективной мерой по увеличению уровня усталостной прочности и повышения технического ресурса. Наибольшая эффективность процедуры повторного упрочнения дробью достигается при обработке на уровне наработки не более 40% от общего ресурса. В данном случае обеспечивается повышение уровня усталостной прочности и долговечности на 18-20%, уменьшение вероятности разрушения деталей на 60-62% при базовом числе циклов нагружения.
2. Предложенная математическая модель формирования эквивалентных остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя после ППД и наработки подтверждает эффективность повторного упрочнения. Повторное упрочнение деталей дробью позволяет повысить уровень остаточных напряжений на 8-10% и сместить эпюру их формирования в сторону поверхности на 2-3%. Адекватность теоретического прогноза экспериментальным данным составляет 82%.
3. Предложена методика неразрушающего контроля деталей после их изготовления и эксплуатации. Показано, что наиболее эффективным критерием оценки степени упрочнения и уровня накопления усталостных повреждений в поверхностном слое является спектральный анализ магнитных шумов Баркгаузена.
4. На основании найденных зависимостей показателя

2 1

интенсивности обработки дробью *L (мм- с-)* от основных технологических

факторов и условий упрочнения предложено использование параметра интенсивности упрочнения как обобщающего технологического фактора обработки. Данное решение позволило унифицировать условия упрочнения для устройств различного типа.

1. Определены оптимальные режимы упрочнения силовых деталей из высокопрочных сталей на этапах производства и восстановления. Эффективное применение повторного упрочнения деталей дробью возможно при использовании режимов обработки, отличных от применяемых при производстве. Повторное упрочнение целесообразно проводить с уменьшением интенсивности обработки в 2 раза, диаметра дроби на 30%.
2. Доказана экономическая эффективность предложенных методов. Минимальная экономия издержек составляет 31% от затрат на внеплановый ремонт.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАНЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Авиационные материалы: Справочник. / Отв. ред. Туманов А.Т. Изд. 6-е, перераб. и доп. Том 1. М.: Машиностроение, ОНТИ, 1975.
2. Адлер, Ю. П. Введение в планирование эксперимента / Ю. П. Адлер. - М.: Изд-во «Металлургия», 1968. - 155 с.
3. Алешин, Н.П. Методы акустического контроля металлов / Н.П. Алешин, В.Е. Белый, А.Х. Вопилкин и др.: Под ред. Н.П. Алешина. - М.: Машиностроение, 1989. - 456 с.
4. Анисимова, И.В. Поверхностный наклеп высокопрочных материалов. / И.В. Анисимова, Э.М. Радецкая, И.В. Фишеров. - М.: ВИАМ, 1971. -207 с.
5. Аракелов, П.Г. Разработка средств и метода магнитных шумов для контроля механических напряжений в плоских изделиях из ферромагнитных сталей: дис. ... к.т.н. - М.: МГУПИ, 2013. - 120 с.
6. Ахмеджанов, Р. А. Физические основы магнитного неразрушающего контроля: Конспект лекций / Р.А. Ахмеджанов. - Омск: Омский гос. Ун-т путей сообщения, 2004. - 69 с.
7. Балтер, М.А. Упрочнение деталей машин. / М.А. Балтер. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : Машиностроение, 1978. - 184 с.
8. Барашков, В.Н Основы теории упругости : учебное пособие для студентов, обучающихся по специальности (направлению) 271101 "Стр-во уникальных зданий и сооружений" / В. Н. Барашков /и др./ ; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования "Томский гос. архитектурно-строит. ун-т". - Томск : Изд-во ТГАСУ, 2012. - 183 с.
9. Барсуков, В.К Исследование преобразователей, основанных на эффекте Баркгаузена, и их применение в неразрушающем контроле: дис. ... к-та техн. наук/ В.К. Барсуков. - М.: 1979.
10. Биргер, И.А. Остаточные напряжения. / И.А. Биргер. - М.: Машгиз, 1963.
11. Биргер, И.А., Сопротивление материалов. Учебное пособие. / И.А. Биргер, P.P. Мавлютов. - М.: Наука, 1986. - 560 с.
12. Вейцман, М.Г. Упрочнение титановых сплавов поверхностным пластическим деформированием / М.Г. Вейцман, В.Г. Вайнштейн // "Вестник машиностроения", 1975. - с. 73-75.
13. Вульф, Б.К. Авиационное материаловедение: Учебник для авиац. вузов и фак. / Б. К. Вульф, К. П. Ромадин. - 3-є изд., перераб. и доп. - Москва : Машиностроение, 1967. - 391 с.
14. Герасимов, В.Г. Неразрушающий контроль качества изделий электромагнитными методами / Герасимов В. Г., Останин Ю. А., Покровский
15. Д. и др. — М.: Энергия, 1978.— 216 с.
16. Горяйнов, В. Б. Математическая статистика: Учеб. для вузов /
17. Б. Горяйнов, И.В. Павлов, Г.М. Цветкова и др.; Под ред. B.C. Зарубина,

А.П. Крищенко. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. - 424 с.

1. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение

[Текст]. - М.: Стандартинформ, 2005. - 22 с.

1. ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта

техники. Термины и определения [Текст]. - М.: Стандартинформ, 2007. - 11 с.

1. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Классификация

видов и методов [Текст]. - М.: Изд-во стандартов, 1980. - 40 с.