

01.02.06

С474

На правах рукописи

Слесарев Евгений Николаевич



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ УСТАЛОСТНОЙ  
ПОВРЕЖДЕННОСТИ И РЕСУРСА ДЕТАЛЕЙ МАШИН  
С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКОВ ДЕФОРМАЦИЙ ИНТЕГРАЛЬНОГО ТИПА

Специальность 01.02.06 – «Динамика, прочность машин,  
приборов и аппаратуры»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск  
2005

Работа выполнена в филиале Южно-Уральского государственного университета  
в г. Миассе.

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор  
Сызранцев В.Н.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Шефер Л.А.  
кандидат технических наук Прохоров А.А.

Ведущее предприятие: ОАО «Автомобильный завод «УРАЛ»,  
г. Миасс Челябинской области

Защита диссертации состоится 23 июня 2005 г., в 15 часов, на заседании  
диссертационного совета Д212.298.02 в Южно-Уральском государственном уни-  
верситете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЮУрГУ.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим на-  
правлять в ученый совет ЮУрГУ по указанному выше адресу.

Автореферат разослан 12 мая 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор

 Чернявский А.О.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ.** Повышение качества и увеличение эксплуатационной надежности транспортных машин являются актуальными задачами технического прогресса промышленности с точки зрения экономической эффективности и конкурентоспособности отечественных образцов техники. Разработка новой техники включает в себя ряд этапов: проектирование, изготовление экспериментальных образцов, конструкторско-технологическая доработка, запуск конструкции в производство и ее последующая эксплуатация.

Первый этап в настоящее время достаточно широко автоматизирован и выполняется, как правило, на ЭВМ с применением систем автоматизированного проектирования (САПР).

Процесс же конструкторско-технологической доводки экспериментальных образцов новой техники остается практически неизменным с середины прошлого века и отличается достаточно высокой продолжительностью и трудоемкостью. Особой сложностью отличается доработка несущих конструкций. Полномасштабные экспериментальные исследования зачастую растягиваются на годы, что в условиях ограниченного времени, отводимого на запуск продукции в производство, приводит к снижению конкурентоспособности предприятия. Сокращение же объема экспериментальных исследований, как правило, негативно сказывается на качестве вновь выпускаемой продукции, которая может не в полной мере соответствовать прочностным и усталостным характеристикам, заложенным на этапе проектирования.

Таким образом, создание средств и методов экспериментального исследования нагруженности и ресурса деталей машин и металлоконструкций, которые с минимальными затратами времени и средств позволяют определять места и предсказать сроки вероятного разрушения является для современного машиностроения весьма актуальной проблемой.

Одним из эффективных направлений решения поставленной проблемы является использование нетрадиционных средств измерения напряжений и деформаций, возникающих на поверхностях деталей при их циклическом нагружении. К таким средствам относятся разработанные в середине 80-х годов и совершенствующиеся под руководством В.Н.Сызранцева датчики деформаций интегрального типа (ДДИТ).

Кроме того, точность основных справочных данных по параметрам усталости, а также кривых выносливости построенных по стандартным методикам (т.н. кривые Вёллера) не может удовлетворять исследователей при расчетах на уста-

лость. Их погрешность, особенно в области многоциклового усталости, слишком велика, и достигает порой десятков процентов.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** – разработка методов экспериментального исследования распределения напряжений на поверхности несущих конструкций и оценки ресурса новых образцов техники при их конструкторско-технологической доработке.

#### **В работе решены следующие ЗАДАЧИ:**

1. На основе кинетической теории усталости Е.К.Почтенного разработана уточненная методика описания результатов испытаний образцов на выносливость.
2. Выполнен комплекс испытаний образцов из сталей 09Г2, 20, 08Х, 20Ю, 08Ю, 20кп и алюминиевого сплава АМгЗ на выносливость и осуществлена обработка результатов по предлагаемой методике.
3. На образцах из исследуемых сталей проведен эксперимент по построению тарировочных зависимостей для датчиков деформаций интегрального типа по моменту возникновения на них внешней реакции и осуществлена обработка результатов.
4. Реализован новый способ регистрации реакции ДДИТ по отраженному с его поверхности сигналу, зафиксированному с помощью оптоэлектронного световодного преобразователя (ОСП), в процессе усталостных испытаний построены тарировочные зависимости для ДДИТ и выполнено их математическое описание.
5. Разработаны расчетно-экспериментальные методы определения по показаниям ДДИТ эквивалентных напряжений и чисел циклов деформирования исследуемых конструкций при нерегулярном их нагружении.
6. Апробирование разработанных методов в процессе конструкторско-технологической отработки образцов техники.

**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** При выполнении работы использовались как теоретические, так и экспериментальные методы исследований. При теоретических исследованиях применялись методы расчета деталей машин на выносливость, методы оценки циклических напряжений с помощью датчиков деформаций интегрального типа, методика кинетической теории механической усталости Е.К.Почтенного. Экспериментальные исследования проводились в Курганском государственном университете в Вузовско-академической лаборатории «Эксплуатационная надежность машин» Академии транспорта на уникальном стенде усталостных испытаний повышенной мощности, спроектированном и изготовленном специально для решения поставленных в работе задач.

## **НАУЧНАЯ НОВИЗНА.** Новыми являются следующие основные результа-

ты:

1. Уточнена методика обработки результатов усталостных испытаний образцов Е.К.Почтенного в части определения границ рассеивания экспериментальных данных.
2. На основе кинетической теории механической усталости Е.К.Почтенного предложено новое математическое описание результатов тарирования ДДИТ по моменту возникновения на них внешней реакции.
3. Предложен и реализован новый способ регистрации реакции ДДИТ с помощью оптоэлектронного световодного преобразователя (ОСП), получены математические зависимости, описывающие результаты тарировочных испытаний.
4. Для нерегулярного режима нагружения конструкции решена задача определения эквивалентных напряжений и чисел циклов деформирования с использованием ДДИТ отличающихся чувствительностью и различным способом фиксирования их реакции.

**ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ.** В процессы выполнения работы получены следующие практические результаты:

1. Для апробации предлагаемой методики был спроектирован и изготовлен специальный экспериментальный стенд повышенной мощности для испытаний на выносливость образцов и элементов несущих конструкций машин.
2. Для исследуемых сталей с вероятностными границами получены усталостные характеристики (для сталей 20Ю и 08Ю – впервые).
3. Разработано методическое и программное обеспечение для обработки результатов, как усталостных испытаний образцов, так и данных тарирования ДДИТ.
4. Проведена апробация предложенной методики на ЗАО «УралАЗспецтехника». В результате удалось существенно уменьшить толщину применяемого листового проката, используемого при изготовлении прицепа модели 8973. Благодаря чему удалось снизить его массу на 15%.
5. Результаты работы внедряются в учебный процесс Машиностроительного факультета филиала Южно-Уральского государственного университета в г. Миассе.

**НА ЗАЩИТУ ВЫНОСЯТСЯ:** уточненная (в части определения границ рассеивания экспериментальных данных) методика обработки результатов усталостных испытаний образцов на основе теории Е.К.Почтенного; математическое описание результатов тарирования ДДИТ по моменту возникновения на них внешней реакции и методика оценки нагруженности несущих конструкций по этим показателям ДДИТ; новый способ регистрации реакции ДДИТ с помощью

оптоэлектронного световодного преобразователя (ОСП), а также методика оценки накопленной усталостной поврежденности и ресурса несущих конструкций с помощью полученных математических зависимостей, описывающих результаты тарировочных испытаний ДДИТ по отраженному с поверхности датчика сигналу, зафиксированному ОСП; методика определения эквивалентных напряжений и чисел циклов деформирования конструкций, работающих в условиях нерегулярного режима нагружения, с использованием ДДИТ отличающихся чувствительностью и различным способом фиксирования их реакции.

**РЕАЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ.** Предложенные в работе методы использовались при определении усталостных характеристик некоторых новых марок сталей, при оценке напряженно-деформированного состояния перспективных образцов техники на предприятии ЗАО «УралАЗспецтехника». Результаты работы вводятся в расчетную практику ОАО «Автомобильный завод «УРАЛ» и внедряются в учебный процесс Машиностроительного факультета филиала Южно-Уральского государственного университета в г. Миассе.

**АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ.** Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались: на I фестивале-конкурсе научно-исследовательского, технического и прикладного творчества молодежи и студентов (г. Курган, 1997 г.), шестом международном симпозиуме «Теория реальных передач зацеплением» (г. Курган, 1997 г.), на международном научном семинаре «Современные информационные технологии. Проблемы исследования, проектирования и производства зубчатых передач» (г. Ижевск, 2001 г.), на XXI Российской школе по проблемам науки и технологий в секции «Прикладные исследования» (г. Миасс, 2001 г.), на Международной научно-технической конференции «Надежность машин и технических систем» (г. Минск, 2001), на XXII Российской школе по проблемам науки и технологий в секции «Прикладные исследования» (г. Миасс, 2002 г.), на XXIII Российской школе по проблемам науки и технологий в секции «Результаты диссертационных исследований» (г. Миасс, 2003 г.).

В полном объеме работа докладывалась и была одобрена на объединенном научном семинаре кафедры «Прикладная механика, динамика и прочность машин» Южно-Уральского государственного университета.

**ПУБЛИКАЦИИ.** По теме диссертации опубликовано 15 работ.

**СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ.** Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста, выводов, списка использованных источников, включающего 132 наименования, содержит 140 страниц машинописного текста, 22 иллюстрации, 17 таблиц, приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы. Дана краткая характеристика состояния проблемы, поставлены цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, а также положения, которые выносятся на защиту.

**В первой главе** на примере несущих конструкций рассмотрены условия работы и современные требования, предъявляемые к машинам. Приведен анализ существующих методов и средств измерения деформаций и напряжений на поверхностях деталей машин, а также оценки накопленной ими поврежденности. Из широкого арсенала данных средств были выбраны безбазовые датчики деформаций интегрального типа (ДДИТ). Эти датчики представляют собой пластинки металлической фольги толщиной 10...30 мкм, получаемой по специальной технологии. Наиболее распространены датчики из медной и алюминиевой фольги, хотя не исключается использование других материалов, например, никеля и серебра. Они очень чувствительны к циклическим деформациям, а благодаря отсутствию базы обладают высокой локальностью измерений и не требуют предварительной ориентации на поверхности испытываемой детали. Несомненным преимуществом ДДИТ является также отсутствие каких-либо соединительных проводов, усилительных устройств и т. п., что особенно важно при измерении деформаций на деталях, совершающих сложное движение в пространстве.

Здесь же выполнен подробный обзор существующих математических моделей описания кривых выносливости. Очевидно, что предпочтительней нелинейные зависимости описания кривых, так как линейные модели плохо согласуются с экспериментальными данными особенно в области напряжений близких к пределу выносливости  $\sigma_R$ . Среди множества современных математических моделей, описывающих кривую выносливости нелинейной зависимостью в полулогарифмических координатах, была выбрана кинетическая теория механической усталости Е.К.Почтенного, поскольку она в наибольшей степени соответствует поставленным задачам. Из всех рассмотренных уравнений кривых выносливости лишь здесь в самой математической модели изначально заложен такой параметр, как поврежденность материала, что позволяет строить, как кривые выносливости испытываемого материала, так и тарировочные кривые ДДИТ для этого материала по однотипным уравнениям. К тому же она позволяет существенно сократить время построения кривой выносливости, так как буквально по 10÷15 экспериментальным точкам можно построить вполне приемлемую с точки зрения современных требований точности кривую усталости.

Выявлены ограничения и определены условия реализации предлагаемых методик в ходе стендовых и эксплуатационных испытаний деталей и несущих систем машин. На основе проведенного анализа сформулированы задачи исследований.

Во второй главе предложено математическое и методическое обеспечение оценки накопленных повреждений и прогнозирования ресурса несущих систем с помощью ДДИТ на основе кинетической теории механической усталости Е.К.Почтенного.

Зависимость числа циклов  $N$  до предельного повреждения (разрушения) от уровня действующего напряжения  $\sigma$  по кинетической теории механической усталости Е.К.Почтенного можно представить в следующем виде:

$$N_K = \frac{Q}{\sigma} \ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{\sigma - \sigma_R}{\sigma_R - \sigma_{RT}} \right) - 1 \right]^{-1} \right\}, \quad (1)$$

где  $Q$  – коэффициент выносливости;  $\sigma_R$  – предел выносливости детали при коэффициенте асимметрии цикла  $R$ ;  $\sigma_{RT}$  – циклический предел текучести (предельное значение напряжения, при котором нагружение любой длительности не вызывает повреждений даже в локальных объемах металла);  $\sigma_B$  – предел прочности материала;  $N$  – число циклов нагружения (деформирования).

Уравнение (1) является трехпараметрическим (параметры  $Q$ ,  $\sigma_R$ ,  $\sigma_{RT}$ ). Причем его вид не позволяет для определения параметров воспользоваться методом линейного регрессионного анализа. В работе подробно рассмотрена методика получения значений искомых параметров уравнения усталости (1) на основе имеющейся совокупности экспериментальных данных испытаний деталей (или образцов) до разрушения  $\{\sigma_i, N_i\}$ ,  $i=1, n$ , где  $n$  – число испытанных деталей. Е.К.Почтенным были предложены некоторые методические приемы решения задач определения параметров уравнения, однако, подробную методику, доступную любому исследователю или инженеру машиностроительного предприятия, он не изложил. К тому же в конце 60-х годов прошлого века компьютерная техника была еще достаточно слаба, поэтому предлагаемый им математический аппарат определения параметров не был ориентирован на применение ЭВМ. Для более точного и быстрого определения параметров данная методика в настоящей работе была адаптирована к реализации на ЭВМ. После чего на языке программирования C++ были написаны специальные программы, позволяющие очень просто и быстро по экспериментальным данным усталостных испытаний нахо-



дуть все необходимые параметры уравнения кривой выносливости Е.К.Почтенного.

Пожалуй, наиболее важным параметром, интересующим большинство исследователей, является значение предела выносливости. В данной работе его значение определяется не эмпирическим, а аналитическим путем с учетом статистических параметров. При этом определяется математическое ожидание предела выносливости  $\bar{\sigma}_R(Q^*)$ .  $S_R$  доверительный интервал для него можно определить с учетом того факта, что функция распределения  $\sigma_R$ , в подавляющем большинстве случаев, близка к функции нормального распределения:

$$\bar{\sigma}_{Rmin} = \bar{\sigma}_R(Q^*) - t_{\alpha,K} \frac{S_R(Q^*)}{\sqrt{n}} < M(\bar{\sigma}_R) < \bar{\sigma}_R(Q^*) + t_{\alpha,K} \frac{S_R(Q^*)}{\sqrt{n}} = \bar{\sigma}_{Rmax}, \quad (2)$$

где  $n$  – число разрушенных экспериментальных образцов;  $t_{\alpha,K}$  – квантиль нормального распределения Стьюдента при уровне значимости  $\alpha$  и числе степеней свободы  $K$ ;  $\bar{\sigma}_{Rmin}$  и  $\bar{\sigma}_{Rmax}$  – соответственно нижняя и верхняя границы доверительного интервала для математического ожидания предела выносливости.

Расчет границ  $100 \cdot (1-\alpha)\%$  доверительного интервала для математического ожидания среднего квадратичного отклонения выполняются по следующим зависимостям:

$$S_{min} = \psi_1 S_R(Q^*) < S_R(Q^*) < \psi_2 S_R(Q^*) = S_{max}. \quad (3)$$

Входящие в (3) множители  $\psi_1$  и  $\psi_2$  при оценке нижней ( $S_{min}$ ) и верхней ( $S_{max}$ ) границ доверительного интервала определяются по формулам:

$$\psi_1 = \sqrt{\frac{n-1}{\chi_{n-1, 1-\alpha/2}^2}}; \quad \psi_2 = \sqrt{\frac{n-1}{\chi_{n-1, \alpha/2}^2}},$$

где  $\alpha$  – вероятность ошибки первого рода,  $\chi_{n-1, 1-\alpha/2}^2$ ,  $\chi_{n-1, \alpha/2}^2$  – критические значения двухстороннего критерия, определяются по таблицам  $\chi^2$  распределения при  $n-1$  числе степеней свободы и принятой величине  $\alpha$ .

При испытаниях небольших партий образцов ( $n=10 \div 20$ ) значение предела выносливости  $\sigma_R$  при заданной вероятности неразрушения  $p_r$  может быть рассчитано по следующей формуле:

$$\sigma_{Rp} = \bar{\sigma}_{Rmin} - t \cdot S_{max}, \quad (4)$$

где  $t$  – квантиль нормального распределения при вероятности неразрушения  $p_r$ .

Установленные в процессе обработки исходной совокупности экспериментальных данных  $\sigma_i$ ,  $N_i$ ,  $i=\overline{1, n}$  значения параметров  $Q$ ,  $v_0$ ,  $\overline{\sigma}_R$ ,  $\sigma_{RP}$ ,  $S_{\max}$ ,  $\overline{\sigma}_{R\min}$  позволяют воспроизвести семейство кривых усталости разной вероятности разрушения. Для этого при заданной  $p_r$  по формуле (4) рассчитывают  $\sigma_{RP}$ , которая после подстановки в зависимость (1) определяет уравнение кривой выносливости:

$$N = \frac{Q}{\sigma} \cdot \ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{\sigma - \sigma_{RP}}{v_0} \right) - 1 \right]^{-1} \right\}. \quad (5)$$

Задаваясь рядом значений  $\sigma$  в пределах:

$$\sigma_{PR} < \sigma < \sigma_B,$$

где  $\sigma_B$  – предел прочности, устанавливают расчетную совокупность точек кривой усталости при вероятности разрушения  $p_r$ . Варьируя величину  $p_r$  в требуемых пределах (обычно  $0,5 \leq p_r \leq 0,99$ ) получают ряд кривых усталости с заданной вероятностью разрушения.

Одним из наиболее значимых недостатков семейства кривых выносливости, построенных по теории Почтенного является равномерное рассеяние свойств материала на всех уровнях напряжений и чисел циклов деформирования. Другими словами эти кривые равноудалены друг от друга во всем диапазоне напряжений и чисел циклов. Это не в полной мере отражает результаты экспериментальных данных. Как правило, рассеяние усталостных свойств материала на низких уровнях напряжений и, соответственно, большом числе циклов деформирования существенно выше. Для лучшего согласования построенных кривых выносливости с экспериментальными данными усталостных испытаний, уравнение (5) предложено уточнить, таким образом, чтобы по мере уменьшения уровня действующих напряжений кривые выносливости различной вероятности разрушения расходились друг от друга. Параметр  $v_0$  характеризует угол наклона кривой, поэтому логичнее всего добиться желаемого эффекта, варьируя именно этим параметром. Угол изменения наклона кривой должен зависеть от вероятности разрушения (точнее от квантиля нормального распределения  $t$  при вероятности разрушения  $p_r$ ), числа циклов до точки нижнего перегиба кривой усталости  $N_0 = Q^* / \overline{\sigma}_R(Q^*)$ , а также учитывать разброс данных усталостных испытаний (характеризуемый средним квадратичным отклонением). Чтобы учесть влияние самой величины  $v_0$ , лучше вычислять новые значения характеристики угла наклона  $v_{RP}$  при заданной вероятности разрушения  $p_r$  в процентах от величины параметра  $v_0$ . Проанализировав данные усталостных испытаний и вышеозначенные требования, для определения предлагается следующая эмпирическая формула:

$$v_{RP} = v_0 \cdot \left( 1 + \frac{S_{\max} \cdot \lg N_0 \cdot t}{K \cdot 100} \right), \quad (6)$$

где  $v_{RP}$  – параметр, характеризующий угол наклона кривой выносливости при заданной вероятности неразрушения  $p_r$ ;

$v_0$  – параметр уравнения кривой выносливости, характеризующий угол ее наклона при вероятности неразрушения  $p_r=0,5$ ;

$S_{\max}$  – верхняя граница доверительного интервала среднего квадратичного отклонения;

$N_0$  – число циклов до точки нижнего перегиба кривой усталости;

$t$  – квантиль нормального распределения при вероятности неразрушения  $p_r$ ;

$K$  – константа, зависящая от материала (для испытываемых сталей значения  $K=18...22$ ).

При построении кривых выносливости различной вероятности неразрушения, полученные значения уточненного параметра угла наклона  $v_{RP}$  подставляются в формулу (5) вместо параметра  $v_0$ . Последний используется только при построении кривых выносливости материала с вероятностью неразрушения  $p_r=0,5$ . При построении семейства тарировочных кривых выносливости различной вероятности для ДДИТ уточнять значения  $v_{RP}$  по формуле (6) нет необходимости, поскольку по мере уменьшения уровня деформаций и увеличения числа циклов нагружения разброс показаний датчиков не только не увеличивается, но даже сокращается. Поэтому для всего семейства кривых можно использовать значение  $v_0$ .

Для того чтобы максимально упростить построение всех этих кривых с использованием вычислительной техники по описанным выше зависимостям была написана специальная программа на языке программирования C++. Этой программой можно пользоваться не только для обработки данных усталостных испытаний, но и непосредственно во время проведения испытаний. Так с помощью этой программы буквально по четырем–пяти экспериментальным точкам можно построить вполне приемлемую предварительную кривую усталости. И дальнейшие испытания проводить уже не вслепую (т.н. методом «научного тыка»), а вполне осознанно заполняя «пробелы» на уже имеющейся кривой.

Необходимо также помнить о том, что несущие системы транспортных машин в процессе эксплуатации подвергающихся воздействию случайного спектра нагрузок. Поэтому оценка накопленной поврежденности и ресурса является весьма сложной задачей. В работе предложена следующая методика ее решения: для начала, предполагаем, что действительное нагружение исследуемой детали представляет собой случайный стационарный процесс, что соответствует, напри-

мер, движению транспортного средства с постоянной скоростью по определенному дорожному покрытию. Наша задача состоит в том, чтобы соотнести результаты усталостных испытаний, полученные на стенде при циклически изменяющейся нагрузке постоянной амплитуды и ходовых испытаний несущей системы транспортного средства. Сложность задачи состоит в том, что в лабораторных условиях при испытаниях на выносливость нам известны как амплитуда деформирования, так и число циклов деформирования, а в ходе эксплуатационных испытаний амплитуда напряжений меняется случайным образом, а, кроме того, совершенно не известно число циклов нагружения.

Для решения поставленной задачи требуется установить в опасных сечениях конструкции по два датчика деформаций интегрального типа разной чувствительности, изготовленных, например, из алюминия и меди. Допустим, что на алюминиевом датчике реакция появилась через  $N'_1$  км пробега, а на медных – через  $N'_2$  км пробега. Поскольку алюминиевые ДДИТ гораздо чувствительнее медных, то  $N'_1 < N'_2$ .

Так как тарировка датчиков производится по числу циклов деформирования, а в результате испытаний мы получаем пробег в километрах, то тарировочная зависимость в виде (5) здесь неприемлема. Полагая, что случайный процесс нагружения несущих систем транспортных машин является стационарным, вводится понятие эквивалентного по повреждающему воздействию числа циклов. Правомерность такого подхода при использовании ДДИТ, реакция которых возникает при одной и той же поврежденности материала, доказана в работах В.Н.Сызранцева.

Отсюда эквивалентные числа циклов нагружения для алюминиевых и медных датчиков, соответственно:

$$N_1 = N'_1 \cdot K_E; \quad N_2 = N'_2 \cdot K_E,$$

где  $K_E$  – коэффициент эквивалентности, цикл/км.

Таким образом, мы имеем следующие зависимости:

$$\begin{cases} N_1 \cdot N'_2 - N_2 \cdot N'_1 = 0; \\ N'_2 - N_2 / K_E = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Учитывая, что тарировочные зависимости (5) для алюминиевых и медных ДДИТ, соответственно:

$$N_1 = \frac{Q_1}{\sigma_a} \ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{\sigma_a - \sigma_{RP1}}{\nu_{01}} \right) - 1 \right]^{-1} \right\} \quad \text{и} \quad N_2 = \frac{Q_2}{\sigma_a} \ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{\sigma_a - \sigma_{RP2}}{\nu_{02}} \right) - 1 \right]^{-1} \right\},$$

получим следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_2' \cdot \frac{Q_1}{\sigma_E} \ln \left[ 1 + \left[ \exp \left( \frac{\sigma_E - \sigma_{RP1}}{\nu_{01}} \right) - 1 \right]^{-1} \right] - N_1' \cdot \frac{Q_2}{\sigma_E} \ln \left[ 1 + \left[ \exp \left( \frac{\sigma_E - \sigma_{RP2}}{\nu_{02}} \right) - 1 \right]^{-1} \right] \right\} = 0; \\ N_2' \cdot \frac{Q_2}{K_E \cdot \sigma_E} \ln \left[ 1 + \left[ \exp \left( \frac{\sigma_E - \sigma_{RP2}}{\nu_{02}} \right) - 1 \right]^{-1} \right] \right\} = 0. \\ \left\{ \begin{array}{l} N_2' \cdot Q_1 \cdot \ln \left[ 1 + \left[ \exp \left( \frac{\sigma_E - \sigma_{RP1}}{\nu_{01}} \right) - 1 \right]^{-1} \right] - N_1' \cdot Q_2 \cdot \ln \left[ 1 + \left[ \exp \left( \frac{\sigma_E - \sigma_{RP2}}{\nu_{02}} \right) - 1 \right]^{-1} \right] \right\} = 0; \\ N_2' \cdot K_E \cdot \sigma_E - Q_2 \cdot \ln \left[ 1 + \left[ \exp \left( \frac{\sigma_E - \sigma_{RP2}}{\nu_{02}} \right) - 1 \right]^{-1} \right] \right\} = 0. \end{array} \right. \quad (8)$$

Таким образом, мы получаем систему двух уравнений с двумя неизвестными ( $\sigma_E$ ,  $K_E$ ), которую можно решить любым известным способом. Простого аналитического решения данная система, к сожалению, не имеет, однако, при современном уровне развития вычислительной техники, ее можно легко решить численным методом. Для реализации данного метода составлена соответствующая программа на языке программирования C++. В результате мы получим эквивалентные по повреждающему действию напряжение  $\sigma_E$  и число циклов нагружения  $N_E = N' \cdot K_E$ , где  $N'$  – пробег исследуемой конструкции в заданных условиях эксплуатации. Зная эквивалентное напряжение в опасном сечении конструкции и кривую усталости ее материала, можно оценить ресурс несущей системы или ее коэффициент запаса с заданной вероятностью.

Данный способ работоспособен лишь в том случае, когда нам удастся точно зафиксировать момент появления на установленных на исследуемом объекте датчиках первых «темных пятен». К сожалению, это не всегда возможно, поэтому более перспективным является метод съема информации с ДДИТ по отраженному с его поверхности сигналу, зафиксированному с помощью оптоэлектронных световодных преобразователей. Преимуществом данного способа является то, что информацию с датчиков можно снимать в любое время. Прибор фиксирует степень потемнения датчика и по этой информации можно оценивать накопленную деталью поврежденность.

Оценка напряженно-деформированного состояния деталей с помощью ДДИТ по отраженному с поверхности датчика сигналу, зафиксированного оптоэлектронными световодными преобразователями (ОСП) является актуальной проблемой, решение которой позволит преодолеть характерные недостатки ранее

разработанных методик. Решение поставленной проблемы включает в себя несколько этапов.

Предварительно строим тарировочные кривые для датчиков по отраженному сигналу. Для того чтобы учесть разброс показаний прибора, для каждого сечения выполняем не менее десяти замеров и производим их статистическую обработку, а собственно тарировочная кривая строится по математическому ожиданию показаний прибора. Практика показывает, что разброс показаний прибора, не превышает общепринятый порог точности  $\pm 5\%$ . В результате выполнения с применением современной вычислительной техники и программного обеспечения аппроксимации экспериментальных данных, получаем тарировочные зависимости, например, для стали 20Ю в следующем виде:

$$\Delta U = 5,6 \cdot 10^{-6} \exp(0,070\sigma - 14,0) \cdot (\lg N)^{-0,0269\sigma + 13,060}, \quad (9)$$

где  $\Delta U$  – показания прибора приращения реакции ДДИТ (в единицах усталости ОСП),

$\sigma$  – уровень действующего напряжения,

$N$  – число циклов нагружения.

Тарировка датчиков по отраженному с их поверхности сигналу производится при известном числе циклов деформирования и напряжении для каждого тарირуемого сечения. В ходе дорожных испытаний транспортных средств нам необходимо получить не только уровень действующего в опасном сечении исследуемой конструкции напряжения, но и установить число циклов деформирования. В то время как нам известны лишь пробег машины в километрах и поврежденность датчика. Полагая случайный процесс нагружения несущих систем транспортных машин стационарным, по аналогии с предыдущим подразделом вводится понятие эквивалентного по повреждающему воздействию числа циклов. Определение эквивалентных по повреждающему воздействию напряжения и числа циклов деформирования представляет собой сложную задачу.

Для ее решения на установленных на испытываемой конструкции ДДИТ последовательно фиксируем два показания ОСП прибора  $\Delta U$ : через  $N'_1$  км пробега –  $\Delta U_1$ , а затем через  $N'_2$  км пробега –  $\Delta U_2$ . Для учета разброса показаний прибора также необходимо производить не менее десяти замеров для каждого сечения и усреднять полученные значения с помощью математической статистики. При этом по аналогии с предыдущим подразделом эквивалентные числа циклов нагружения:

$$N_1 = N'_1 \cdot K_E; \quad N_2 = N'_2 \cdot K_E.$$

где  $K_E$  – коэффициент эквивалентности, цикл/км.

Следовательно, получаем:

$$\begin{cases} \Delta U_1 = 5,6 \cdot 10^{-6} \exp(0,070\sigma_E - 14,0) \cdot [\lg(K_E N_1')]^{-0,0269\sigma_E + 13,060}; \\ \Delta U_2 = 5,6 \cdot 10^{-6} \exp(0,070\sigma_E - 14,0) \cdot [\lg(K_E N_2')]^{-0,0269\sigma_E + 13,060} \end{cases} \quad (10)$$

В полученной системе нам неизвестны эквивалентное по повреждающему воздействию напряжение  $\sigma_E$  и коэффициент эквивалентности  $K_E$ , зная который можно легко определить эквивалентное число циклов. Данная система двух уравнений с двумя неизвестными может быть решена любым доступным способом. Простого аналитического решения данная система не имеет, но она достаточно просто решается численным методом, для реализации которого составлена соответствующая программа на языке программирования С++, хотя данная задача может быть решена с использованием любых других известных пакетов современных математических программ.

Таким образом, по предлагаемой методике на основании показаний прибора ОСП по отраженному с поверхности ДДИТ сигнала и известного пробега исследуемого транспортного средства в заданных дорожных условиях, мы можем установить эквивалентное по повреждающему воздействию напряжение  $\sigma_E$  в опасном сечении конструкции. Зная это напряжение и кривую выносливости для материала конструкции, построенную с учетом технологического, масштабного и других факторов, мы можем оценить ресурс или коэффициент запаса испытуемого объекта.

Данная методика, в отличие от ранее предложенных, не требует точного фиксирования времени появления на датчиках реакции в виде первых «темных пятен», что значительно упрощает задачу исследователей при определении уровня действующих напряжений, оценке накопленных повреждений и ресурса несущих систем транспортных машин.

**В третьей главе** обоснована необходимость для построения кривой выносливости и тарировочных зависимостей ДДИТ современных средств механических испытаний конструкций, их деталей и материалов. Перечислены требования, предъявляемые к экспериментальному оборудованию, подробно описана конструкция спроектированной экспериментальной установки для проведения усталостных испытаний. Полученный стенд обладает следующими положительными свойствами: возможностью изменения амплитуд деформаций образца без останова испытательной машины в процессе испытаний, возможностью изменения коэффициента асимметрии цикла и достаточной мощностью для испытания натуральных деталей машин или их моделей. Применение электронных датчиков позволяет автоматизировать процесс испытаний и реализовать режим программно-го нагружения без остановки испытательной машины для измерения величины

амплитуды. Поскольку несущие конструкции подавляющего большинства транспортных машин изготавливают из проката, то испытаниям на усталость подвергаются плоские образцы. Приведены основные требования и дано описание испытываемых образцов, а также методики проведения эксперимента. Для того, чтобы учесть влияние конструктивных и технологических факторов на кривую выносливости и показания ДДИТ, производим усталостные испытания образцов из того же материала, той же толщины, и того же поверхностного упрочнения, что и исследуемая конструкция. При наличии у детали концентратора производим усталостные испытания образцов с таким же концентратором. Например, рамы автомобилей чаще всего собирают с помощью заклепочных соединений. Установить датчик непосредственно в зону концентратора напряжений (на краю отверстия) технологически невозможно. Поэтому в данном случае нужно произвести усталостные испытания аналогичных образцов с отверстиями тех же геометрических параметров, полученными по той же технологии, что и у исследуемой рамы. Можно даже для этих целей использовать непосредственно фрагмент исследуемой рамы. В результате получим закономерность распределения напряжений по мере удаления от концентратора. Зная расстояние на раме от датчика до концентратора, с помощью полученной зависимости легко определить напряжения непосредственно на краю отверстия. Подробно изложена методика обработки экспериментальных данных усталостных испытаний и процесс тарирования ДДИТ по различным критериям для различных марок конструкционных материалов.

**В четвертой главе** приведены результаты усталостных испытаний плоских образцов, изготовленных из листового проката семи различных марок конструкционных материалов, применяемых на современных машиностроительных предприятиях при изготовлении несущих систем транспортных машин. Например, для выявления механических свойств стали 20Ю (данные по этой марке стали в справочной литературе отсутствуют), испытаниям на выносливость были подвергнуты плоские образцы толщиной 3,7 мм, изготовленные из листового проката этой стали. Эту марку стали применяют на Ульяновском автомобильном заводе как перспективный материал при изготовлении несущих систем (рам) к легковым и грузовым автомобилям. В результате проведенных испытаний получена экспериментальная выборка  $\{\sigma_i, N_i\}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , где  $\sigma_i$  – напряжение в опасном сечении испытываемого образца,  $N_i$  – число циклов до поломки образца,  $n$  – количество испытанных образцов. После обработки полученных данных по описанной во второй главе методике были определены все необходимые параметры уравнения кривой выносливости Е.К.Почтенного: коэффициент выносливости  $Q = 551\ 819\ 840$ , параметр наклона кривой  $v_0 = 11,567$  МПа и среднее значение



предела выносливости  $\bar{\sigma}_R = 180$  МПа. Доверительный же интервал его математического ожидания:  $\bar{\sigma}_{R\min} = 179$  МПа  $< \bar{\sigma}_R < \bar{\sigma}_{R\max} = 182$  МПа. Кривые выносливости для образцов, изготовленных из стали 20Ю, при различной вероятности неразрушения приведены на рисунке 1. Кривая 1 (рис. 1) соответствует вероятности неразрушения  $p_r = 0,5$ , кривая 2 –  $p_r = 0,95$  и кривая 3 –  $p_r = 0,99$ . Кривая 4 – тарировочная кривая алюминиевых ДДИТ по первым «темным пятнам» для стали 20Ю.

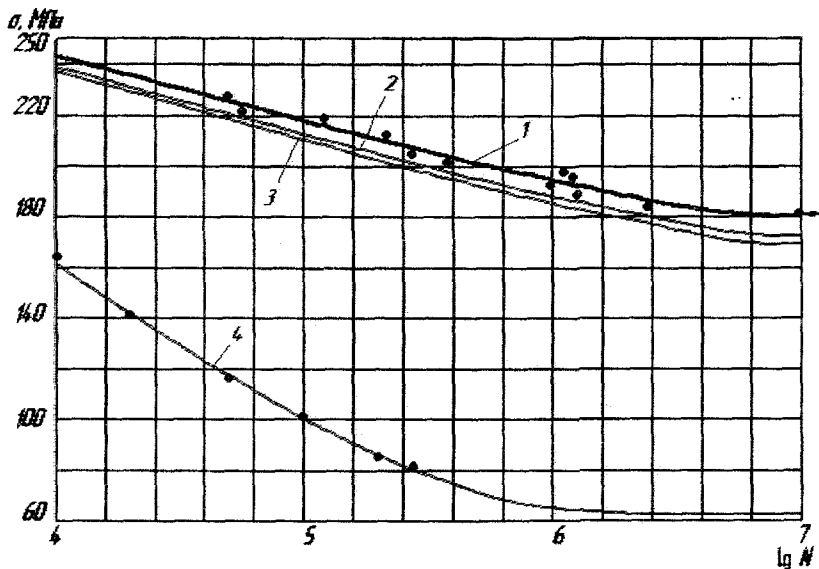


Рис. 1. Кривые выносливости различной вероятности неразрушения и тарировочная кривая ДДИТ для стали 20Ю

Кроме того, с датчиков, установленных на тарировочных образцах были получены данные по отраженному с их поверхности сигналу, зафиксированному с помощью ОСП. В результате выполненной с применением современной вычислительной техники и программного обеспечения аппроксимации полученных экспериментальных данных для стали 20Ю была выведена тарировочная зависимость (8).

В качестве иллюстрации для стали 20Ю, на рисунках 2 и 3 представлены тарифовочные данные (экспериментальные точки) и аппроксимирующие их кривые, точки которых рассчитаны по зависимости (8). На этих диаграммах по оси абсцисс отложена величина  $\lg(N)$ , а по оси ординат значения  $\Delta U$ .

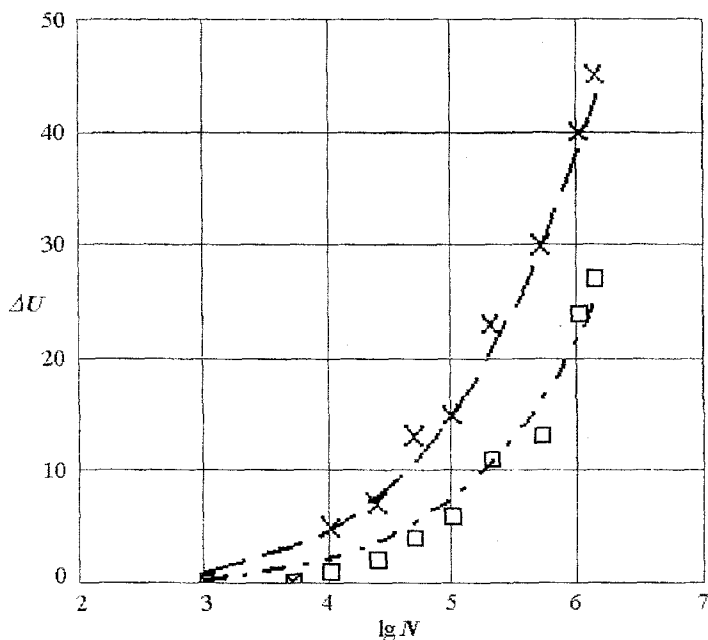


Рис. 2. Экспериментальные значения  $\Delta U$  при различных  $N$  для уровней напряжений  $\sigma=291$  МПа и  $\sigma=265$  МПа и аппроксимация полученных данных зависимостью (8)

Полученная тарифовочная зависимость (8) позволяет для деталей изготовленных из стали 20Ю реализовать следующую методику измерения напряжений по показаниям ДДИТ. На исследуемый участок детали наклеивают датчик и до начала испытаний с помощью ОСН фиксируют величину отраженного от поверхности датчика потока инфракрасного излучения. Деталь подвергают циклическому деформированию известным числом циклов  $N$ , после чего снова замеряют величину отраженного потока инфракрасного излучения и определяют его изменение ( $\Delta U$ ). Предположим за  $N=50\,000$  получено значение приращения реак-

ции датчика по показаниям прибора  $\Delta U=12$ . Тогда решая уравнение (8) численным методом, установим, что  $\sigma=132,75$  МПа.

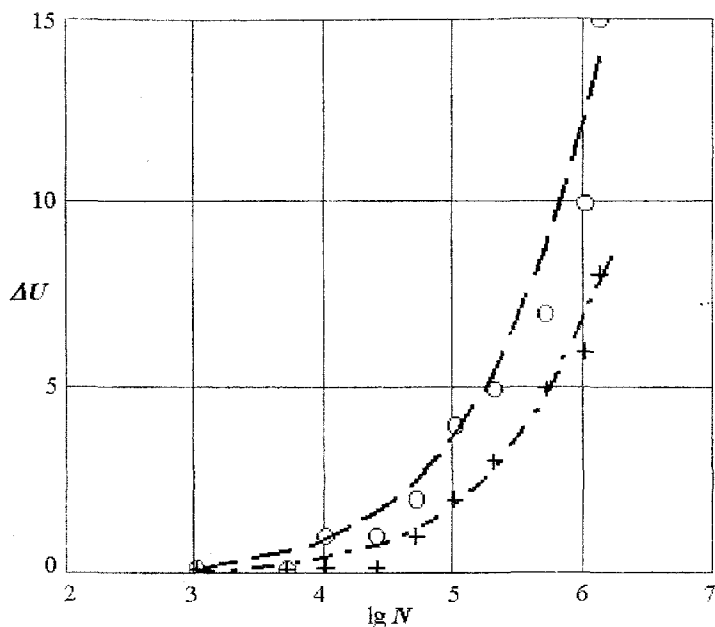


Рис. 3. Экспериментальные значения  $\Delta U$  при различных  $N$  для уровней напряжений  $\sigma=239$  МПа и  $\sigma=213$  МПа и аппроксимация полученных данных зависимостью (8)

Установленные зависимости дополняют ранее созданные методики измерения напряжений и прогнозирования ресурса с помощью ДДИТ и позволяют разрабатывать и реализовывать другие алгоритмы решения многих задач, в том числе с учетом информации, получаемой на основе других критериев оценки реакции датчиков.

В пятой главе разработаны алгоритмы применения предлагаемой методики экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния и оценки ресурса несущих систем транспортных машин. Предложено два способа такой экспериментальной оценки конструкций, работающих при случайном спектре нагрузок: по первым «темным пятнам» и по отраженному с поверхности ДДИТ сигналу, зафиксированному с помощью ОСП. Приведены примеры расчетов по предложенным алгоритмам.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена уточненная методика описания результатов испытаний образцов на выносливость на основе теории Е.К.Почтенного численным методом с использованием современной вычислительной техники.
2. В результате проведенного комплекса испытаний образцов из сталей 09Г2, 20, 08Х, 20Ю, 08Ю, 20кп и алюминиевого сплава АМгЗ на выносливость получены с вероятностными границами усталостные характеристики исследуемых материалов (для сталей 20Ю и 08Ю – впервые).
3. Разработано методическое и программное обеспечение для обработки результатов, как усталостных испытаний образцов, так и тарифовочных данных ДДИТ по моменту возникновения на них внешней реакции.
4. Разработан и реализован новый способ регистрации реакции ДДИТ по отраженному с его поверхности сигналу, зафиксированному с помощью ОСП, а также в процессе усталостных испытаний построены тарифовочные зависимости для ДДИТ и выполнено их математическое описание.
5. Разработан расчетно-экспериментальный метод определения эквивалентных напряжений и чисел циклов деформирования исследуемых конструкций при нерегулярном их нагружении с помощью информации, полученной с ДДИТ.
6. Показана возможность использования новой методики для оценки нагруженности и ресурса несущих конструкций.
7. Проведено апробирование разработанных методов в процессе конструкторско-технологической отработки образцов техники.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Слесарев, Е.Н. Разработка стенда для усталостных испытаний на усталость образцов и деталей транспортных машин/ Е.Н.Слесарев. – Курган, 1997. – 10 с.: ил. – Библиогр. 7 назв. – Рук. – Деп. в ВИНТИ.
2. Слесарев, Е.Н. Стенд для усталостных испытаний образцов и деталей транспортных машин/ Е.Н.Слесарев// I фестиваль-конкурс научно-исследовательского, технического и прикладного творчества молодежи и студентов. Тезисы докладов областной научно-практической конференции. Часть 1. – Курган: , 1997. – С. 7.

3. Слесарев, Е.Н. Об одной методике обработки данных испытаний образцов на выносливость/ Е.Н.Слесарев// ТЕОРИЯ РЕАЛЬНЫХ ПЕРЕДАЧ ЗАЦЕПЛЕНИЕМ. Информационные материалы VI международного симпозиума. Ч. 2. Проблемы оценки и повышения работоспособности реальных передач зацеплением. – Курган, 1997. – С. 110–111.

4. Слесарев, Е.Н. Обработка данных испытаний образцов на основе кинетической теории механической усталости/ Е.Н.Слесарев// Сборник научных трудов аспирантов и соискателей Курганского государственного университета (естественные, технические и экономические науки). – Курган, 1999. – С. 91–96.

5. Слесарев, Е.Н. Обработка результатов экспериментальных исследований образцов с помощью кинетической теории механической усталости на примере испытаний стали 20Ю/ Е.Н.Слесарев// Под. ред. проф. Дровозова Г.П.: Сб. науч. тр. Проблемы исследования, проектирования и изготовления передаточных механизмов. – Курган, 2000. – С. 70–74.

6. Методическое обеспечение способа измерения напряжений по показаниям датчиков деформаций интегрального типа/ В.Н.Сызранцев, Е.Н.Слесарев, А.П.Котельников, С.Л.Яковлев// Сборник докладов международного научного семинара. Современные информационные технологии. Проблемы исследования, проектирования и производства зубчатых передач. – Ижевск, февраль 2001. – С. 103–105.

7. Методика прогнозирования ресурса металлоконструкций по показаниям датчиков деформаций интегрального типа/ В.Н.Сызранцев, Е.Н.Слесарев, А.П.Котельников, С.Л.Яковлев// Надежность машин и технических систем. Материалы Межд. науч.–техн. конф. – Минск, 16–17 октября 2001. – С. 99–100.

8. Слесарев, Е.Н. Методическое обеспечение экспериментальных исследований материалов на выносливость/ Е.Н.Слесарев// Труды XXI Российской школы. НАУКА И ТЕХНОЛОГИИ. Серия ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. – М., 2001. – С. 184–195.

9. Слесарев, Е.Н. Применение кинетической теории механической усталости при экспериментальных исследованиях стали на выносливость/ Е.Н.Слесарев// Труды XXI Российской школы. НАУКА И ТЕХНОЛОГИИ. Серия ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. – М., 2001. – С. 196–203.

10. Слесарев, Е.Н. Измерение напряжений с помощью датчиков деформаций интегрального типа по отраженному сигналу/ Е.Н.Слесарев// XXII Российская школа по проблемам науки и технологий. Тезисы докладов. – Миасс: МНУЦ, 2002. – С. 23–24.

11. Слесарев, Е.Н. Методика оценки уровня напряжений по показаниям датчиков деформации интегрального типа с помощью оптоэлектронных световодных преобразователей/ Е.Н.Слесарев// Труды XXII Российской школы. НАУКА И ТЕХНОЛОГИИ. – М., 2002. – С. 109–117.

12. Слесарев, Е.Н. Анализ методов и средств оценки усталостных повреждений несущих конструкций / Е.Н.Слесарев // Труды XXII Российской школы. НАУКА И ТЕХНОЛОГИИ. Серия ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. – М., 2002. – С. 120–141.

13. Слесарев, Е.Н. Применение кинетической теории механической усталости при расчетах на выносливость/ Е.Н.Слесарев// XXIII Российская школа по проблемам науки и технологий. Тезисы докладов. – Миасс: МСНТ, 2003. – С. 33.

14. Слесарев, Е.Н. Оценка ресурса несущих конструкций по показаниям ДДИТ на основе кинетической теории механической усталости / Е.Н.Слесарев// Труды XXIII Российской школы. НАУКА И ТЕХНОЛОГИИ. Специальный выпуск, посвященный 230-летию города Миасса. – М., 2003. – С. 188–199.

15. Сызранцев, В.Н. Средства и методы оценки напряженно-деформированного состояния и ресурса несущих конструкций: Учебное пособие / В.Н.Сызранцев, Е.Н.Слесарев. – Челябинск: ЮУрГУ, 2004 – 115 с.

Слесарев Евгений Николаевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ УСТАЛОСТНОЙ  
ПОВРЕЖДЕННОСТИ И РЕСУРСА ДЕТАЛЕЙ МАШИН  
С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКОВ ДЕФОРМАЦИЙ ИНТЕГРАЛЬНОГО ТИПА

Специальность 01.02.06 – «Динамика, прочность машин,  
приборов и аппаратуры»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать 05.05.2005. Формат 60x84 1/16  
Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,12 Тираж 100 экз.

---

Филиал Южно-Уральского государственного университета в г. Миассе  
Миасский машиностроительный факультет, ризограф  
г. Миасс Челябинской обл., ул. Калинина, 37