

Ученому секретарю диссертационного  
совета Д 212.298.09 ЮУрГУ,  
д.т.н., профессору Е.А.Лазареву  
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу **Сызранцевой Ксении Владимировны «Совершенствование методологии оценки нагруженности и надежности деталей машин на основе учета особенностей их эксплуатационного деформирования»**, представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.02 – «Машиноведение, системы приводов и детали машин»

Представленная на отзыв диссертационная работа К.В.Сызранцевой написана на русском языке, состоит из введения, шести глав, основных выводов, библиографического списка из 345 наименований отечественных и зарубежных авторов, приложений. Общий объем работы составляет 281 страницу, включает 110 рисунков и 15 таблиц.

### **1.Актуальность темы диссертации**

Детали машин общепромышленного применения: валы, подшипники, различного типа передачи, корпусные детали - являются составными частями практически всех машин и механизмов. С развитием научно-технического прогресса требования к работоспособности и надежности деталей машин постоянно возрастают, особенно это актуально для машин, выход из строя которых влечет за собой различного рода инциденты, аварии и катастрофы. Первоначально основой проектирования деталей машин являлись методики их расчета по различным критериям работоспособности. Необходимость изучения закономерностей возникновения и устранения отказов деталей в процессе эксплуатации машин, оценки их долговечности привела к появлению новых методов расчета, разрабатываемых в рамках теории надежности. Для потенциально опасных изделий эта теория, дополненная различными экономическими показателями, является основой теории рисков, теории катастроф и

теории черного лебедя.

Теория надежности развивается с 20-х годов прошлого столетия, в то же время методики расчета безотказности и долговечности деталей машин общепромышленного применения созданы в 70-х годах прошлого века и используются и в настоящее время. При разработке этих методик описание режимов нагружения деталей выполнено на основе законов случайных величин (нормального, бета, гамма распределения, Вейбулла), предложенных и исследованных в рамках параметрической статистики, а действующих и допускаемых напряжений - по нормальному закону. Использование условия распределения действующих напряжений по нормальному закону было вынужденным, поскольку сложность зависимостей прочностного расчета, содержащих случайные внешние нагрузки, не позволяет методами теории вероятности и математической статистики определить фактический закон распределения напряжений. Из вышеизложенного следует, что применяемые в настоящее время методики расчета безотказности деталей машин содержат систематические ошибки, величину которых традиционными расчетными методами оценить невозможно. Аналогичная ситуация имеет место при решении задач прогнозирования долговечности деталей на основе кривой усталости, определение параметров которой и границ доверительных интервалов традиционно осуществляется на основе линейного регрессионного анализа из условия подчинения чисел циклов до разрушения логнормальному закону.

Сказанное определяет актуальность темы диссертационной работы, направленной на совершенствование методов расчета безотказности и долговечности деталей машин общепромышленного применения путем учета фактических законов действующих и допускаемых напряжений, законов распределения чисел циклов деформирования образцов до поломки. Исключение систематических ошибок методик расчета вероятности отказов, прогнозирования ресурса особенно важно для корректного решения задач теории рисков и катастроф, базирующихся на теории надежности.

Измерение напряжений и определение накопленных усталостных по-

вреждений в деталях в процессе испытаний машин являются приоритетными задачами их конструкторско-технологической отработки. Среди используемых в настоящее время для решения этих задач экспериментальных средств перспективными являются датчики деформаций интегрального типа (ДДИТ). Изготовление этих датчиков с переменной чувствительностью к амплитуде циклических деформаций (ДДПЧ) открывает новые перспективы экспериментального исследования напряжений, оценки накопленных усталостных повреждений и прогнозирования ресурса деталей машин в условиях эксплуатационных испытаний изделий. Однако отсутствие математического и методического обеспечения процедур применения ДДПЧ не позволяет использовать данные средства в практике экспериментальных исследований деталей. Актуальность решения в этом направлении задач, поставленных в диссертационной работе, сомнений не вызывает.

## **2. Степень обоснованности и достоверности исследований**

Научные положения, выводы и рекомендации, представленные в диссертации, теоретически обоснованы корректным использованием методов непараметрической статистики, современных численных методов расчета напряженно-деформированного состояния деталей, кинетической теории механической усталости, процедур статистической обработки экспериментальных данных.

Достоверность расчета безотказности и долговечности деталей машин по разработанным в диссертации методикам и алгоритмам подтверждается их согласованием с результатами оценки отказов деталей машин при среднем режиме их работы, для которого действующие и предельные напряжения описываются нормальным законом, согласованием результатов расчета со статистикой отказов рам ЦНИИ МПС России для этого же режима нагружения.

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния деталей с использованием численных методов согласуются с данными экспериментального исследования корпусов превентора при их гидравлических испыта-

ниях, испытаниями подшипников в составе бесступенчатой трансмиссии, соответствуют картинам распределения деформаций в зубчатых передачах Новикова, в сварных соединениях, в вершине усталостной трещины, полученным с использованием датчиков деформаций интегрального типа в процессе экспериментального исследования деталей при их циклическом деформировании.

### **3. Научная новизна результатов исследований**

1. Разработан новый подход оценки прочностной надежности деталей сложной геометрической формы, включающий конечное число расчетов методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния в соответствии с математическим планированием в заданных пределах изменения внешних нагрузок, аппроксимацию величин деформаций в фиксированных (базовых) точках поверхности детали в виде функций от внешних нагрузок, генерирование в соответствии с заданными функциями плотности распределения внешних нагрузок и восстановление методами непараметрической статистики функций плотности распределения действующих в базовых точках напряжений, расчет вероятности отказа в каждой базовой точке и определение вероятности отказа детали в целом.

2. На основе аппарата непараметрической статистики и методов компьютерного моделирования усовершенствованы методики расчета безотказности и долговечности зубчатых передач по критерию контактной прочности поверхностей зубьев и изгибной выносливости зубьев, валов и подшипников качения, обеспечивающие при расчете действующих и предельных напряжений учет реальных их функций плотности распределения, отражающих фактические законы внешних нагрузок и статистические характеристики прочности материала.

3. В рамках кинетической теории механической усталости на основе данных испытаний на выносливость впервые построена математическая модель определения имеющихся в материале начальных повреждений, получены решения задач определения накопленных усталостных повреждений в де-

талях при циклическом деформировании, расчета эквивалентных напряжений по повреждающему воздействию.

3. Предложен и реализован в программном продукте новый способ статистической обработки цифровых снимков реакции датчиков деформаций интегрального типа, используемых в процессе калибровки датчиков и методиках прогнозирования по их показаниям долговечности деталей. Для датчиков деформаций переменной чувствительности построены математические модели калибровки, определения эквивалентных напряжений, эквивалентных чисел циклов деформирования, обеспечивающие решение задач оценки нагруженности и долговечности деталей в условиях их эксплуатации под действием внешних нагрузок, изменяющихся по случайным законам любой сложности.

4. На основе использования датчиков деформаций переменной чувствительности, методов непараметрической статистики и кинетической теории механической усталости разработан расчетно-экспериментальный метод прогнозирования остаточного ресурса детали во времени с заданной вероятностью неразрушения.

#### **4. Практическая значимость результатов диссертационного исследования**

Разработанный подход к оценке прочностной надежности деталей сложной геометрической формы позволяет с учетом действующих в процессе эксплуатации детали случайного спектра внешних нагрузок определить места их вероятного разрушения вследствие усталости и оценить ресурс работы деталей. Выполненные расчеты напряженно-деформированного состояния корпусных и других деталей трубопроводной арматуры позволили на этапе их проектирования осуществить конструкторскую доработку по критерию прочности и герметичности.

Предложенная методика определения нагруженности деталей с многопарным контактным взаимодействием использована для расчета подшипников качения при нетрадиционной схеме их нагружения в составе привода импуль-

сной передачи и для исследования характера распределения нагрузки между ротором и статором винтового забойного двигателя. Разработанные методы оценки безотказности и долговечности передач, валов, подшипников исключают систематические ошибки, связанные с принятием нормального закона действующих и допускаемых напряжений, что повышает достоверность результатов расчета деталей для типовых режимов нагружения и позволяют получить данные для изменения внешних нагрузок по случайным законам независимо от их сложности.

На основе выполненных расчетов напряженно-деформированного состояния образцов, имеющих специальную геометрическую форму, разработан оригинальный способ тарирования датчиков деформаций интегрального типа для исследования сварных соединений.

Разработанные на основе развития кинетической теории усталости и использования методов непараметрической статистики методики обработки данных усталостных испытаний образцов обеспечивают определение границ доверительных интервалов кривой усталости с учетом фактических законов распределения чисел циклов до разрушения, что существенно повышает достоверность результатов прогнозирования долговечности деталей.

Расчетно-экспериментальные методики восстановления значений эквивалентных напряжений (нагрузок) на основе результатов расчета напряженно-деформированного состояния деталей и показаний датчиков деформаций, имеющих переменную чувствительность к циклическим деформациям, позволяют прогнозировать долговечность деталей и их остаточный ресурс с учетом реальных условий эксплуатации деталей.

## **5.Соответствие содержания диссертационной работы требованиям ВАК РФ, замечания по работе**

Диссертация К.В.Сызранцевой «Совершенствование методологии оценки нагруженности и надежности деталей машин на основе учета особенностей их эксплуатационного деформирования» является законченной научно-квалификационной работой, отвечает содержанию паспорта специально-

сти 05.02.02 – «Машиноведение, системы приводов и детали машин» и требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, установленным п.п. 9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 02.08.2016).

Содержание диссертации отражено в 57 публикациях автора, в числе которых шесть монографий, два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 17 статей в журналах, включенных в международные системы цитирования (SCOPUS, Web of Sciences), 13 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ по группе специальностей 05.02.00, пять статей в журналах, рекомендованных ВАК по другим специальностям, что свидетельствует о полноте публикаций по теме исследования. Автореферат отражает основные положения диссертации.

Основные положения диссертационной работы прошли широкую апробацию на научно-технических конференциях и семинарах, в том числе международного уровня и за рубежом. Оформление диссертации и автореферата соответствуют требованиям ВАК.

**По диссертации имеются следующие замечания и вопросы.**

1. Выполненные расчеты (подраздел 2.3) корпуса преентора ППГ-230x35 показали его недостаточную прочность при пробном давлении 70 МПа. Что было изменено в конструкции корпуса для обеспечения его прочности при этом давлении?

2. Зависимость (3.44) расчета напряжений в местах их концентрации на корпусе клиновой задвижки от величины давления и температуры, аппроксимирующая результаты проведенных численных экспериментов в соответствии с матрицей планирования (таблица 3.2), достаточно громоздка. Можно ли ее упростить, воспользовавшись статистическими критериями проверки значимости коэффициентов регрессионного уравнения?

3. Традиционно кривая усталости строится на основе данных испытаний партий образцов до разрушения на нескольких, фиксированных уровнях

напряжений, что позволяет проверить для каждого уровня (в каждой партии) соответствие числа циклов до разрушения логнормальному закону распределения этой случайной величины. Именно для такого варианта экспериментальных данных (таблица 5.1) в диссертации рассмотрена процедура определения параметров кривой усталости в форме полуэмпирической модели и расчета границ доверительных интервалов кривой усталости. В то же время известны данные усталостных испытаний, когда результаты представлены в виде совокупности экспериментальных точек, полученных при различных, не подлежащих группировке, уровнях напряжений. «Работает» ли в этом случае рассмотренная в диссертации методика обработки данных испытаний образцов на выносливость?

4. В подразделе 6.5 разработано методическое обеспечение использования датчиков деформаций переменной чувствительности (ДДПЧ). Описанная технология изготовления ДДПЧ предусматривает их предварительную наработку на образцах с конической рабочей частью (рисунок 6.28) в условиях циклического изгиба при вращении образца. Именно для этой технологии получена зависимость (6.11) изменения поврежденности датчика в любом его сечении, определяемом продольной координатой. Изменится ли эта зависимость, если предварительную наработку датчика выполнять, например, на плоском образце в процессе его циклического изгиба?

5. На рисунке 6.21a (в автореферате рисунок 11a) показана реакция датчика деформаций интегрального типа в вершине усталостной трещины. В диссертации не приведены ни размеры этой трещины, ни увеличение, при котором сделан снимок реакции датчика.

### **Заключение**

Выполненное **Сызранцевой Ксенией Владимировной** диссертационное исследование представляет собой научно-квалификационную работу, в которой изложены новые, научно обоснованные решения, уточняющие для этапов проектирования, конструкторско-технологической доработки и экс-



плуатации результаты расчета безотказности и долговечности деталей машин общепромышленного применения.

Высокий уровень выполненных исследований, новизна научных результатов и их практическая значимость свидетельствуют, что диссертационная работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, а ее автор, Ксения Владимировна Сызранцева, заслуживает присуждения ей учёной степени доктора технических наук по специальности 05.02.02 – «Машиноведение, системы приводов и детали машин».

#### Официальный оппонент

Плеханов Федор Иванович,  
доктор технических наук (по специальности  
05.02.02 – «Машиноведение, системы приводов и  
детали машин»), профессор,  
заведующий кафедрой «Промышленное и  
гражданское строительство»  
Федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Ижевский государственный технический университет  
имени М.Т.Калашникова»  
Тел. (3412) 77-60-55, 8-(912)4403200  
E-mail: fplehanov@list.ru  
426069, г.Ижевск, ул. Студенческая д.42, кор.3.

Согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.



Ф.И.Плеханов

15.05.2018

