

В диссертационный совет Д 002.059.04
при ФГБУН Институте машиноведения
им. А.А.Благонравова РАН (ИМАШ РАН)
119334, Москва, ул. Бардина, д.4

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Нахатакяна Филарета Гургеновича « Напряженно-деформированное состояние упругих элементов зубчатых механизмов и сооружений при их линейном и кромочном контакте», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности: 01.02.06 –Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Актуальность

Диссертационная работа Ф.Г.Нахатакяна, целью которой является повышение качества проектируемых зубчатых механизмов, создания малошумных редукторов для современного отечественного судостроения путем совершенствования существующих и разработки новых аналитических методов расчетов нагруженности и прочности, является весьма актуальной. Проблема совершенствования методов проектирования зубчатых передач путем учета факторов, действующих в реальных механизмах- наличие угла перекося; конечные размеры деталей; упругие деформации элементов машин; погрешности монтажа и т.д., является одной из важнейших для повышения качества проектируемых передач, создания современных механизмов на их основе. Существующие методы расчетов прочности элементов зубчатых механизмов построены на основе экспериментальных данных. Построенные такие эмпирические зависимости дают хорошую точность расчетов в определенном диапазоне варьирования входных параметров. Однако стремительный научно-технический прогресс, и связанный с этим рост скоростей и нагрузок на элементы машин и механизмов, предъявляют повышенные требования к совершенствованию методов расчетов нагруженности и прочности, т.к. в новых условиях зависимости существующих методик уже дают большие погрешности.

В частности:

- контактная жесткость зубьев муфт и зубчатых колес, а также роликовых подшипников при номинальном контакте и при перекося из- за отсутствия аналитических формул, определяются либо экспериментально, либо с использованием так называемой базовой точки, координата которой теоретически не определяется, ее или задают, или подбирают. (в литературе значение контактной податливости подшипников разнятся на 25 % - 30 % , а податливость зубчатых зацеплений – на 30 -35 %);

- расчеты зубьев на контактную прочность при перекося основываются на введении условной удельной расчетной нагрузки, которая теряет физический смысл при кромочном контакте;

- концентрация изгибных напряжений в продольном направлении при перекося определяется приближенно на основе гипотезы отраженного момента Вэллауера-Сейрага, которая не учитывает ограниченные размеры зубьев, что особенно важно для коротких зубьев;

- влияние изгибной деформации зубьев на параметры контакта в существующем ГОСТ не учитывается;

– нет также единой методики для определения сближения плит, сжимающие ролик, имеющиеся в литературе данные которых на 25 % -40 % отличаются между собой, и т.д.

Сказанное подтверждает актуальность темы диссертационной работы Ф.Г.Нахатакяна.

Диссертация изложена на 212 страницах, состоит из введения, трех разделов, включающих двенадцать глав, заключения и списка литературы из 248 наименований.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы проблемные вопросы, нуждающиеся в дальнейшей разработке и развитии, показана научная новизна, практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту. Дан краткий обзор типовых методов расчетов нагруженности и прочности податливых элементов зубчатых передач. Приведены примеры типовых расчетов на прочность зубчатых зацеплений.

На основании выполненного анализа существующих методов расчета отмечается, что в связи с тем, что до сих пор остаются слабо развитыми аналитические методы расчета нагруженности и прочности упругих элементов (зубчатые зацепления; роликовые подшипники; зубчатые соединения) зубчатых механизмов в реальных условиях, то дальнейшее совершенствование конструкции зубчатых механизмов, проектирование нового поколения малошумных редукторов, повышение их срока безаварийной работы возможны лишь на основе уточнения и развития существующих методов прочностных расчетов и разработки новых аналитических методов для учета различных эксплуатационных и технологических факторов. Для достижения поставленной цели, сформулированы задачи, решению которых посвящена диссертация.

В первом разделе (главы 2-6) изложены новые физико- математические модели, методы и подходы, которые являются теоретической основой для определения контактных, изгибных деформаций и напряжений в деталях и узлах реальных механизмов, машин.

Во второй главе разработан метод определения контактной деформации цилиндров бесконечной длины с начальным касанием по линии, с помощью которого впервые с помощью модели упругого полупространства определена контактная деформация круговых цилиндров. Показано, что решение Б.С.Ковальского по определению контактной деформации круговых цилиндров, приводимое в энциклопедических и машиностроительных справочниках, приближенное. Установлено, что погрешность решения Б.С.Ковальского зависит от радиуса цилиндров, упругих свойств материала и от величины внешней нагрузки, и колеблется в пределах от 5 до 30 % .

В этой же главе уточнено также известное решение Н.М.Беляева в части определения контактной деформации цилиндров.

В третьей главе приведены результаты теоретических исследований по определению суммарных контактных деформаций двух упругих тел конечных размеров с начальным касанием по линии. При этом используется разработанный во второй главе метод определения контактной деформаций упругих тел при контактном взаимодействии по линии. Рассмотрены различные контактные пары: ролик-цилиндрический сегмент; цилиндрический сегмент-плита; ролик-плита; два цилиндрических сегмента. Задачи решаются впервые, ниже они использованы для решения прикладных задач машиноведения.

Четвертая глава посвящена определению параметров контакта при силовом взаимодействии упругих тел цилиндрической формы в условиях перекоса. Ограниченная точность изготовления и монтажа зубчатых колес совместно с упругими деформациями элементов передачи приводят к начальному неприлеганию зубьев (перекосу), в контакте ролик-кольцо в роликовых подшипниках, и исключают возможность использования решения контактной задачи Г.Герца для определения параметров контакта.

Для решения проблемы, в работе предложена физико-математическая модель контактного взаимодействия двух цилиндров конечных размеров при перекосе. Использование разработанной модели дало возможность автору впервые аналитически решить поставленную задачу – контакт двух цилиндров (или цилиндра с плоскостью) при наличии перекоса γ между ними и определить параметры контакта в замкнутом виде: контактную деформацию α ; максимальные контактные напряжения σ_{\max} ; максимальную полуширину b_γ и длину l_k площадки контакта. Полученные результаты также использованы ниже для решения прикладных задач машиноведения.

В пятой главе построена модель изгибной деформации по длине зубьев зубчатых колес, использование которой позволило автору впервые аналитически определить коэффициент концентрации изгибных напряжений в основании зубьев зубчатых колес. Здесь же определена расчетная оценка влияния изгибной деформации зубьев на параметры контакта в условиях перекоса с учетом их конечных размеров. Показано, что в результате изгибной деформации по длине зуба, часть угла перекоса компенсируется (до 45 %).

В шестой главе исследовано влияние конечных размеров упругих тел цилиндрической формы на их контактную податливость и концентрацию контактных напряжений. Показано, что при контакте цилиндров с разными длинами контактные напряжения на свободном конце короткого цилиндра на 22 % больше, чем в срединной области (по Герцу).

Во втором разделе (главы 7-10) диссертации приведено применение физико-математических моделей, методов и подходов, разработанных в первом разделе в прикладных задачах деталей и узлов машин и механизмов. В частности, для роликовых подшипников, мостовых опор, зубьев зубчатых колес и соединений (муфт), впервые определены контактные и изгибные деформации и напряжения при линейном и кромочном контактах с учетом их конечных размеров.

В седьмой главе получены аналитические формулы для определения контактной податливости (отношение контактной деформации зубьев к удельной нагрузке) зубчатых зацеплений в отсутствии перекоса; контактных деформаций и напряжений при перекосе; изгибных напряжений в основании зубьев при перекосе. Установлено, что в известных методиках указанные параметры определяются приближенно, они отличаются от реальных величин на 25-50 %.

В восьмой главе на основе полученных в третьей главе соотношений для суммарной контактной деформации двух упругих тел конечных размеров, впервые аналитически определена податливость ролика, сжатого между двумя плитами из одинаковых материалов. Эта зависимость используется при определении жесткости мостовых опор. В литературе проблема решается экспериментально, и результаты у различных авторов отличаются между собой на 20-30 %. С помощью полученного в работе аналитического решения показано, что существующие эмпирические зависимости приближенные. В этой же главе расчетным путем доказан известный факт, вытекающий из имеющихся в

литературе многочисленных экспериментальных данных о независимости величины сближения плит от радиуса ролика из одинаковых материалов, сжатого между ними, и показано, что сближение зависит от толщины плит.

В девятой главе на основе полученных в первом разделе соотношений для суммарной контактной деформации двух упругих тел конечных размеров, аналитически определена (для одного тела) податливость роликовых подшипников в отсутствие перекоса. Здесь же определены контактные деформации и напряжения в них при перекосе. Полученные результаты на 10-30 % уточняют известные данные других авторов.

В десятой главе исследована нагруженность зубчатых соединений (муфт). Основываясь на работах Э.Л.Айрапетова и О.И.Косарева, оценено влияние перекоса, вызываемого погрешностями изготовления и монтажа, на напряженно- деформированное состояния элементов зубчатых муфт при различной геометрии боковых поверхностей зубьев. Уточнено влияние податливости обода на зону нагруженных зубьев муфты.

Третий раздел (главы 11 и 12) диссертации посвящен экспериментальным исследованиям, сопоставлению полученных результатов теоретических исследований с экспериментальными данными, а также сравнению с данными других авторов.

В одиннадцатой главе дано описание проведенного в работе специального эксперимента- исследование методом голографической интерферометрии контактных деформаций цилиндрических, конических и бочкообразных роликов, имитирующих контакт цилиндрических зубьев в отсутствие перекоса и при его наличии, а также с продольной модификацией.

В двенадцатой главе для проверки достоверности полученных в диссертации зависимостей приведено сопоставление полученных результатов теоретических исследований с экспериментальными данными, при этом использовались как результаты специально поставленных в работе экспериментов, так и проведенных другими авторами (А.В.Орлов, Э.Л.Айрапетов, О.И.Косарев, И.В.Волгин, Хоприх, Цантопулос). Результаты расчета проверялись также имеющимися в литературе (А.В.Орлов) данными, полученными с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Отмечается, что расчетные и экспериментальные данные находятся в хорошем соответствии.

В заключении подводятся итоги работы, приведены основные выводы.

Общая методика исследования в диссертации основывалась на дисциплинах: "Машиноведение и детали машин", "Теории механизмов и машин", "Теория упругости", "Строительная механика", "Сопrotивление материалов", выполнялись в рамках общепринятых допущений и заключалась в теоретическом решении рассматриваемых задач с последующим сопоставлением результатов расчетных исследований с экспериментальными данными.

Достоверность полученных результатов в работе подтверждается удовлетворительным соответствием результатов теоретических исследований в диссертационной работе с экспериментальными данными, при этом использовались как результаты специально поставленных автором экспериментов, так и проведенных другими авторами, а также имеющиеся в литературе расчетные данные, полученные другими методами.

Научная новизна диссертации состоит в:

- разработке метода определения контактной деформации круговых цилиндров бесконечной длины с начальным прилеганием по линии;

- аналитическом определении суммарной контактной деформации двух упругих тел, при силовом взаимодействии до деформации по линии, с учетом их конечных размеров;
- теоретическом решении задачи о контакте двух цилиндров (также цилиндр- плоскость) конечных размеров в условиях перекоса;
- разработке физико- математической модели изгибной деформации по длине зубьев конечной длины и на ее основе разработке аналитического метода определения коэффициента концентрации изгибных напряжений в зубьях муфт и зубчатых колес в условиях перекоса с учетом их конечных размеров;
- разработке аналитического метода определения коэффициента концентрации контактных напряжений и деформаций цилиндрических тел конечных размеров неодинаковых длин, при контакте по образующей (краевой эффект);
- аналитическом определении контактной податливости зубьев зубчатых колес в отсутствии перекоса и при его наличии;
- теоретическом определении контактной податливости в роликовых подшипниках в отсутствии перекоса и при его наличии;
- развитии метода расчетной оценки нагруженности зубчатых соединений (муфт) при различной форме боковых поверхностей зубьев с учетом податливости обода при перекосе;
- экспериментальном определении методом голографической интерферометрии контактной деформации роликов при различной геометрии образующей.

Практическую ценность работы составляют:

- Разработанные в диссертации физико- математические модели, методы и методики расчета контактных деформаций, напряжений зубьев зубчатых колес и соединений (муфт) при отсутствии и наличии перекоса с учетом их конечных размеров;
- Методики расчетного определения изгибных напряжений и деформаций, а также влияния изгиба на параметры контакта зубьев зубчатых колес в условиях перекоса с учетом их конечных размеров;
- Методика расчетной оценки нагруженности зубчатых соединений (муфт) при различной форме боковых поверхностей с учетом податливости обода и зубьев при перекосе;
- Методика расчетного определения жесткости (податливости) роликовых подшипников при наличии и отсутствии перекоса;
- Проведение качественного и количественного анализа влияния нагружения, условий контакта, геометрических и упругих параметров на напряженно- деформированное состояния элементов зубчатых механизмов;
- Доказательство положения о том, что изгибная деформация зуба, возникающая вследствие перекоса, способствует снижению концентрации контактных напряжений и частично компенсирует перекокс за счет деформативного угла перекоса в зацеплении зубьев;
- Результаты, полученные на основе теоретических и экспериментальных исследований, а также рекомендации по расчету нагруженности и прочности зубчатых зацеплений, соединений (муфт) и роликовых подшипников, используемые при оценке прочности и долговечности элементов зубчатых механизмов при проектировании.

По результатам исследований получены **патенты**:

- Патент № 1781477 Способ снижения уровня вибрации подшипника качения (в соавторстве). Бюл. изобр.- 1992- № 46.
- Патент № 1788364 Прямозубая цилиндрическая передача (в соавторстве). Бюл. изобр.- 1993- № 2

Основные результаты, полученные в диссертации, отражены в *публикациях* автора в 49 печатных работах, из них 27 в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Результаты диссертации Ф.Г.Нахатакяна использованы:

- в разработанных с участием автора методических рекомендаций по расчету на прочность цилиндрических и конических зубчатых передач и зубчатых муфт, предназначенные для инженеров-проектировщиков и научных работников, занимающихся проектированием и расчетами на прочность, и вошли в ГОСТы;
- на Электростальском заводе тяжелого машиностроения (ЭЗТМ) и на ОАО Калужском турбинном заводе (КТЗ) в конструкции зубчатых муфт и шпинделей и при проектировании и экспериментальной отработке перспективных проектов планетарных зубчатых редукторов;
- в Методике расчета вибраций малозумных редукторов и Правилах акустического проектирования основных механизмов и систем перспективных кораблей ВМФ (инв. № 145, НПВП "Турбоконт" 2009 г.)

Замечания по диссертации:

1. Неочевиден смысл используемого в работе понятия "координата базовой точки".
2. В решении задачи о контакте двух цилиндров при перекосе, говорится о малых углах; в каком же диапазоне изменения угла справедливы полученные соотношения. не указано
3. В первом разделе при решении задачи о контакте двух цилиндров при перекосе, деформации считаются упругими. Однако в точке начального касания, могут быть пластические деформации.
4. По тексту диссертационной работы и автореферата имеются отдельные стилистические ошибки.

Отмеченные замечания не носят принципиального характера и не снижают общего положительного впечатления о диссертации.

Автореферат диссертации достаточно полно отражает содержание диссертации.

Диссертация прошла апробацию на научных конференциях и семинарах, включая международные.

Заключение. Рассмотренная диссертационная работа выполнена на актуальную тему и является научно- квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены научно обоснованные технические решения. выполнена на высоком научном уровне, соответствует всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени доктора технических наук, утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. а ее автор, Нахатакян Филарет Гургенович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук.

Официальный оппонент,
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ, директор
института механики ФГБОУ ВПО Ижевского
государственного технического университета
им. М.Т.Калашникова



В. И. Гольдфарб

Подпись официального оппонента заверяю

Ученый секретарь
24 ноября 2014 г.



В. А. Алексеев

Гольдфарб Вениамин Иосифович,
426069, г.Ижевск, ул.Студенческая 7,
ИжГТУ, институт Механики
Тел. 8(3412)592503, e-mail: veniamingoldfarb@vahoo.com