

ПЕРФИЛЬЕВА АНАСТАСИЯ ДМИТРИЕВНА

**ДИНАМИЧЕСКАЯ КОНТАКТНАЯ ПОДАТЛИВОСТЬ
ЗАКЛЕПОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В УСЛОВИЯХ
ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО СМЕЩЕНИЯ**

Специальность 01.02.06 – Динамика и прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2011

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Научный руководитель-
доктор технических наук, профессор

А.А. Максименко

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

П.Я. Крауиньш.,

доктор физико-математических наук, профессор

В.Н. Барашков.

Ведущая организация:

ГОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ)

Защита диссертации состоится «__» _сентября_ 2011 г.
в «15» часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских
диссертаций Д 212.269.01 при ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, корп. 4, ауд.
210.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ГОУ ВПО
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (634034, г.
Томск, ул. Белинского, 55).

Автореферат разослан «_____» _____ 2011 г.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций
к.т.н., доцент

Т.Г. Костюченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Практика эксплуатации машин и механизмов показывает, что такие параметры качества их работы как точность, виброустойчивость, производительность, надежность и долговечность в значительной степени определяются контактными процессами, протекающими в сочленениях сопрягаемых деталей, в частности статической и динамической контактной жесткостью. Пренебрежение при конструировании машин контактной жесткостью стыка во многих случаях приводит: в цилиндрическом соединении с натягом к ошибке определения давления в сопряжении от 10-20 % при большом и до 40 % при малом натягах, также влечет за собой ошибку в определении силы трения в сопряжении, в расчетах резьбового соединения к ошибке в необходимой силе затяжки винта до 50 % и прочности винта до 30 %. В точных машинах (станках, роботах) отсутствие учета контактных перемещений как в статике, так и в динамике дает погрешность в оценке точности позиционирования рабочего органа машины до 70 %. В силу этого рассматриваемые вопросы являются весьма актуальными.

Принято различать контактные задачи, направленные на исследование процессов сближения, и контактные задачи по изучению взаимодействий в пределах предварительного смещения или трения покоя.

Данная проблема глубоко проработана для статических условий контактирования, при этом оценка влияния динамических нагрузок на свойства механического контакта практически не проводилась, нет расчетных методик, позволяющих определять амплитуды и частоты колебаний в сопряжениях деталей, контактную прочность и податливость контактирующих тел в различных направлениях. Поэтому дальнейшие исследования в этой области знаний помогут создавать точные, устойчивые, работоспособные соединения с заданными прочностными, диссипативными и динамическими характеристиками.

В работе проводились как теоретические, так и экспериментальные исследования.

Объектом исследования являются сопряжения деталей заклепочных соединений при динамическом нагружении.

Известно, что заклепочные соединения обладают высокой технологичностью и надежностью в работе и широко используются в технике. Они обеспечивают высокую стойкость в условиях ударных и вибрационных нагрузок, поэтому находят применение в следующих случаях: в соединениях, где необходимо исключить изменение структуры металла, коробление конструкции и перегрев расположенных рядом деталей; соединение разнородных, трудно свариваемых и не свариваемых материалов; в соединениях с затруднительным доступом и контролем качества; в случаях, когда необходимо предотвратить распространение усталостной трещины из детали в деталь. Большинство соединений в самолётах по-прежнему выполняется клёпкой.

Однако в инженерных расчетах прочности и жесткости не учитываются перемещения на контактных площадках сопряжения в пределах трения покоя при динамической работе заклепочных соединений.

Цель работы заключается в разработке уточненного метода расчета заклепочных соединений с учетом динамической контактной податливости на основе динамической модели упругого механического диссипативного контакта в пределах трения покоя.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. На основе динамической модели, позволяющей определять характеристики нормального и тангенциального контакта, разработать численно-аналитический метод определения динамических характеристик контакта деталей заклепочных соединений при различных видах динамического нагружения (ударном, вибрационном и т.д.).

2. Разработать методику расчета динамической контактной податливости сопряжений заклепочных соединений с учетом физико-механических и микрогеометрических параметров шероховатости.

3. Применить динамическую модель упругого контактного взаимодействия и созданный на ее основе численно-аналитический метод расчета динамической контактной податливости к инженерным расчетам заклепочных соединений.

4. Получить амплитудно-частотные характеристики механического контакта заклепочных соединений на основе модели контакта шероховатых сфер и плоскости, а также шероховатых поверхностей, и произвести оценку влияния на динамические и диссипативные характеристики контакта параметров динамического контактирования.

5. Рассчитать потери механической энергии в условиях затухающих колебаний в контакте заклепочных соединений при различных параметрах контактирования.

6. Разработать прикладную программу для уточненного расчета динамических характеристик упругого механического контакта при конструировании заклепочных соединений.

7. Модернизировать экспериментальную установку для моделирования работы условно-неподвижных соединений и исследований поведения контактных пар в широком спектре прочностных и диссипативных характеристик при ударных, вибрационных и других видах нагружения.

8. С помощью разработанной методики расчета, учитывающей динамическую контактную податливость, провести уточненный инженерный расчет соединений узла двигателя А–41.

Методы исследований. В работе использовались теоретические и экспериментальные исследования. Основу теоретических исследований составляют методы механики контактного взаимодействия и классической теории упругости. Нелинейные дифференциальные уравнения движения контактирующих тел интегрировались разложением в степенные ряды с

обязательным исследованием сходимости и устойчивости решения. В работе использовались статистический и экспериментальный методы. Для экспериментальных исследований модернизирована оригинальная установка с использованием лазера при фиксации контактных колебаний.

Научная новизна работы. Научная новизна диссертационной работы заключается в создании уточненного инженерного метода расчета заклепочных соединений с учетом динамических контактных параметров, а именно:

- в адаптации физико-математической модели динамического контактного взаимодействия в условиях предварительного смещения, описывающей все стадии контактирования, для уточненного расчета заклепочных соединений;

- в разработке численно-аналитического метода расчета нелинейных контактных смещений и диссипации механической энергии в сопряжениях заклепочных соединений;

- в получении амплитудно-частотных характеристик механического контакта заклепочных соединений в зависимости от различных условий контактирования;

- в установлении потерь механической энергии в условиях затухающих колебаний в контакте заклепочных соединений для определения оптимального сочетания параметров контактирования, повышающих работоспособность конструкции;

- в определении закономерностей изменения контактной податливости в нормальном и тангенциальном направлениях в сопряжениях заклепочных соединений при динамическом нагружении и различных физико-механических и микрогеометрических параметрах контактирования;

- в разработке комплекса прикладных программ по расчету характеристик динамического контактного взаимодействия заклепочных соединений.

Предложенный метод решения динамических контактных задач базируется на структуре упругих аналитических зависимостей расчета статического контакта твердых тел, тем самым дает новую область применения классических решений теории упругости в динамической области, что также составляет научную ценность данного подхода в исследованиях.

Практическая ценность и реализация работы. Разработанный автором численно-аналитический метод расчета контактных перемещений в динамике является уточненным инженерным методом, позволяющим учитывать при конструировании соединений контактную податливость и перемещения как в статике, так и при динамической работе соединения. Предложенный метод ведет к повышению несущей способности и жесткости, а также к снижению металлоемкости и стоимости условно-неподвижных соединений за счет совершенствования расчетов на стадии проектирования.

В качестве практического применения созданной методики инженерного расчета контактных взаимодействий представлены результаты исследований соединений узла двигателя А-41 (ОАО «Алтайдизель». От прочности, долговечности, работоспособности данных соединений зависит в конечном итоге надежная эксплуатация рассматриваемой конструкции в целом.

Результаты исследований позволяют сделать вывод о правильности выбора теоретических предпосылок, динамической модели упругого контактного взаимодействия в пределах трения покоя, а также о необходимости использования в инженерных расчетах на прочность и жесткость соединений разработанной методики.

Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе для студентов и аспирантов специальности «Динамика и прочность машин» АлтГТУ им. И.И. Ползунова.

Достоверность результатов исследований обусловлена подтверждением предлагаемых в работе теоретических зависимостей результатами экспериментальных исследований, выполненных как автором, так и другими

исследователями. Эксперимент был проведен на установке с использованием лазера и аттестованными электронными приборами. Была проведена оценка погрешности измеряемых величин.

Достоверность основана на использовании положений классической механики контактного взаимодействия и теории колебаний.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались автором, обсуждались и были одобрены на научных семинарах кафедры «Прикладная механика» АлтГТУ им. И.И. Ползунова (г. Барнаул), на Всероссийской научно-практической конференции по совместной программе Министерства образования и науки Российской Федерации и Государственного Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере «Студенты, аспиранты и молодые ученые – малому наукоемкому бизнесу – «Ползуновские гранты» (г. Барнаул, 2009), на XI городской научно-практической конференции молодых ученых «Молодежь-Барнаулу» (2009), на 67-ой научно-технической конференции студентов, аспирантов и ППС технического университета (г. Барнаул, 2009).

Настоящая работа выполнялась в соответствии с программой Министерства образования и науки РФ, поддержана Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК-2008»), а также в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 годы», ГК № 02.740.11.0828 и аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011годы), код проекта 4799.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Уточненный инженерный метод расчета контактных перемещений сопряженных шероховатых поверхностей в заклепочных соединениях, разработанный на основе динамической модели упругого контактного взаимодействия твердых тел в условиях трения покоя.

2. Амплитудно-частотные характеристики механического контакта в сопряжениях заклепочных соединений в зависимости от параметров, известных на стадии проектирования: материала деталей, номинального давления, чистоты обработки сопряженных поверхностей.

3. Результаты теоретических расчетов закономерностей изменения контактной податливости в нормальном и тангенциальном направлениях в сопряжениях заклепочных соединений при динамическом нагружении и различных физико-механических и микрогеометрических параметрах контактирования;

4. Результаты исследований диссипации механической энергии в условиях затухающих колебаний в контакте заклепочных соединений в широком спектре условий контактирования.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 16 работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка литературы и приложений. Работа представлена на страницах, включает 3 таблицы, 48 рисунков, библиографию из 193 наименований и приложений на страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено обоснованию актуальности учета контактных перемещений в инженерных расчетах условно-неподвижных соединений машиностроительных конструкций. Изложена цель, научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе отражен обзор контактных задач в статике и динамике.

Основоположниками исследований контактных взаимодействий являются российские и зарубежные ученые: А.В. Верховский, И.С. Ренкин, Г.А. Томлинсон, Р.Д. Миндлин, И.Р. Коняхин, Д. Тейбор. Вопросами моделирования процесса деформирования в зоне контакта твердых тел занимались исследователи: Д.Н. Решетов, З.М. Левина, Н.Б. Демкин, И.В. Крагельский, Э.В. Рыжов, А.Г. Суслов, И.Г. Горячева, В.И. Максак. Работы

Г.Я. Пановко, Д.Р. Геккера, С.Г. Костогрыза, А.Н. Тритенко, Я.И Куна, А.А. Максименко и других ученых посвящены исследованию процессов, происходящих в контакте твердых тел при динамических нагрузках.

В разделе проанализировано состояние вопроса, определены задачи исследований и пути их решения.

Во второй главе принимается расчетная модель единичного выступа и шероховатой поверхности контактирования и основные допущения, а именно: 1). Шероховатость моделируется сегментами эллипсоидов с одинаковыми радиусами главных кривизн, вершины которых распределены согласно детерминированной кривой опорной поверхности. 2). Ввиду того, что деформации в зоне контакта превышают на порядок общие деформации тел, последними можно пренебречь. 3). Массой выступов шероховатого слоя можно пренебречь, ввиду их малости, по сравнению с массой контактирующих тел. 4). Все касательные силы считаются лежащими в плоскости контактирования. 5). Диссипация энергии на площадках контакта представляется микротрением в зонах проскальзывания. 6). Характерные времена протекания процессов деформирования на площадках контакта много больше периодов собственно колебаний твердых тел. 7). Диссипация энергии и трение в зонах проскальзывания не зависят от частоты нагружения и скорости деформирования.

Далее приводиться контактная задача по оценки упругих перемещений нормального направления для статических и динамических условий работы контактирующих твердых тел, которая была положена в основу данных исследований.

Для случая контакта шероховатой сферы и плоскости при определении упругих нормальных сближений использовалось решение А.А. Ланкова

$$\delta = (1 + \beta^{3/2}) k N^{2/3} / 2\beta, \quad (1)$$

где N и δ – нормальная нагрузка и сближение; k – коэффициент пропорциональности между сближением и силой в формуле Герца, β –

коэффициент сжатия эпюры контактных давлений (точки статического равновесия M_1 – нагружение и M_2 – разгрузка, рисунок 1).

При рассмотрении контакта шероховатой и гладкой поверхностей принято уравнение Крагельского – Демкина:

$$\delta = \left[\frac{5Nr^{1/2}(1-\mu^2)R_{\max}^\nu}{A_c b \nu(\nu-1)k_1 E} \right]^{2/(2\nu+1)}, \quad (2)$$

где A_c – контурная площадь контакта; k_1 – постоянная интегрирования, зависящая от ν ; $R_{\max}$, ν , b , r – параметры микрогеометрии шероховатости; μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости I рода материала.

Принятое дифференциальное уравнение движения тела контактной пары в условиях нормальных вынужденных колебаний имеет вид:

$$m\ddot{x} + \bar{\bar{K}}_1 \bar{\bar{x}} + \bar{\bar{K}}_2 \bar{\bar{x}}^2 + \bar{\bar{K}}_3 \bar{\bar{x}}^3 = P \sin \omega t, \quad (3)$$

где m – масса штампа; коэффициенты K_1 , K_2 , K_3 , характеризующие силы восстановления и диссипации.

Данная механическая система является нелинейной и обладает значительной диссипацией энергии, поэтому уравнение движения интегрировалось при помощи степенных рядов Тейлора. Восстанавливающая сила представлена в виде кусочно-нелинейных функций с разложением в окрестностях точек статического равновесия (задача Коши). Начальными условиями каждого последующего этапа были конечные условия предыдущего.

Для определения сближения на каждом этапе ограничивались суммой первых четырех значащих членов ряда, поскольку последующие, ввиду их малости, не вносили существенных изменений в конечный результат. Коэффициенты рядов определяются по рекуррентным формулам.

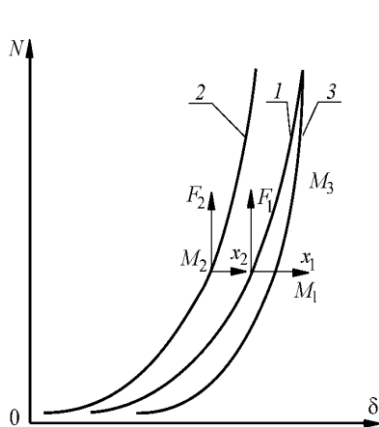


Рисунок 1– Зависимость сближения от поджатия

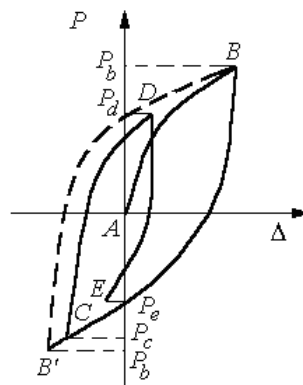


Рисунок 2 – Смещение контакта единичных сферических выступов

В третьей главе рассматривается контактная задача тангенциального направления в условиях предварительного смещения, положенная в основу методики расчета динамических характеристик контакта заклепочных соединений.

Статическая задача Р. Миндлина о контакте упругих сфер одинакового радиуса, прижатых друг к другу силой N является основой динамической модели. Согласно ей распределение нормальных напряжений σ по площадке соприкосновения (кругу радиусом a) принимается соответствующим закону Герца:

$$\sigma = \frac{3N}{2\pi a^3} (a^2 - \rho^2)^{1/2}. \quad (4)$$

В случае упругого контакта тангенциального направления первый этап нагружения (ветвь AB_1 рисунок 2) описывается уравнением.

$$\bar{P} = f \cdot N(1 - (1 - \bar{\Delta}/\Delta_p)^j), \quad (5)$$

Далее процесс контактного взаимодействия описывается петлей механического гистерезиса:

$$\bar{P} = fN[\pm 2(1 - (\Delta^* \pm \bar{\Delta})/2\Delta_p)^j \pm (1 - \Delta^*/\Delta_p)^j \pm 1], \quad (6)$$

где $\vec{P}, \vec{\bar{P}}, \vec{\bar{\Delta}}$ – текущие значения касательных сил и смещений, соответствующих нисходящей ($\leftarrow$) и восходящей ($\rightarrow$) ветвям петли; Δ^* – амплитудное значение смещения; Δ_p – предельное смещение; f – коэффициент трения покоя; N – нормальное усилие сжатия, j – показатель степени: для контакта шероховатых поверхностей равен $(2\nu + 1)/2$, ν – параметр шероховатости кривой опорной поверхности.

Принятое дифференциальное уравнение движения тела контактной пары в тангенциальном направлении имеет вид:

$$m\ddot{\Delta} + \vec{\bar{\Phi}}(\Delta) = P \sin \alpha t, \quad (7)$$

где m – масса штампа, $\vec{\bar{\Phi}}(\Delta)$ – нелинейная функция, характеризующая восстанавливающую силу и диссипацию энергии одного периода. Функция записывается в виде кусочно-нелинейных функций, выраженных полиномами Тейлора. Коэффициенты рядов определяются по рекуррентным формулам.

Как правило, соединение работает под воздействием одновременно изменяющихся во времени нормальной и тангенциальной составляющих внешнего динамического воздействия. Известно, что в упругом контакте на колебания в нормальном направлении тангенциальная составляющая динамического усилия не оказывает значительное воздействие. Поэтому задача оценки поведения контактной пары при произвольном направлении внешнего воздействия к плоскости контактирования заключалась в определении контактных касательных колебаний.

В случае сложного динамического нагружения нормальное усилие N^* – является суммой нормальной статической составляющей $N = \text{const}$ и динамической силы $N(x)$, изменяющейся во времени:

$$N^* = N \text{const} + N(x(t)). \quad (8)$$

Учитывая изложенное, можно записать:

$$N^* = \vec{\bar{K}}_1 \vec{\bar{x}} + \vec{\bar{K}}_2 \vec{\bar{x}}^2 + \vec{\bar{K}}_3 \vec{\bar{x}}^3 + N \text{const}. \quad (9)$$

Таким образом, данное решение позволяет учесть влияние нормальных перемещений и нагрузки в каждый конкретный момент времени t на касательные смещения в упругом диссипативном контакте при сложном динамическом нагружении.

В четвертой главе приводится разработанный численно-аналитический метод определения динамических характеристик контакта деталей заклепочных соединений при различных видах динамического нагружения (ударном, вибрационном и т.д.).

В работе подробно рассматриваются так называемые *прочноплотные* заклепочные соединения, которые обеспечивают герметичность и несут в себе все преимущества соединений с натягом и самих заклепочных соединений, могут применяться в особо ответственных прецизионных конструкциях.

В их сопряжениях происходят контактные взаимодействия в условиях предварительного смещения, т.е. до срыва поверхностей. От динамических и диссипативных параметров сопряжений этих соединений будут зависеть эксплуатационные показатели конструкции в целом.

Прочноплотные швы проверяют на плотность, т.е. на отсутствие относительного скольжения листов. Этому скольжению препятствуют возникающие между листами силы трения. Значение этой силы трения определяют экспериментально и условно относят к поперечному сечению заклепки. Поэтому проверка заклепок по допускаемому условному напряжению $\tau_{yc} \leq [\tau_{yc}]$ одновременно является проверкой шва на плотность.

Поскольку в прочноплотных заклепочных соединениях осуществляется прессовое соединение между стержнем заклепки и соединяемыми деталями, в данной работе была рассмотрена работа соединения с натягом с учетом процессов, происходящих на контактных поверхностях. В качестве рассматриваемой модели принималось цилиндрическое прессовое соединение вал–втулка, нагруженное осевой силой P_z .

Для обеспечения неподвижности соединения номинальные контактные давления q_0 должны быть такими, чтобы силы трения превышали внешние сдвигающие нагрузки:

$$q_0 \geq P_z k / \pi d l f, \quad (10)$$

где k – коэффициент запаса сцепления, f – коэффициент трения, l – длина.

Кроме того, при передаче нагрузки прессовыми соединениями на поверхностях контакта возникают касательные напряжения τ . Наибольшие значения их определяются выражением:

$$\tau_{\max} = q_0 f \leq \tau_T. \quad (11)$$

Но для ответственных соединений точных машин и приборов, подверженных знакопеременным динамическим нагрузкам, недостаточно инженерного расчета на прочность. В большинстве случаев при инженерных расчетах не учитывают деформации, перемещения, напряжения, возникающие в поверхностных шероховатых слоях сопряженных деталей соединения в пределах предварительного смещения.

При рассмотрении прочноплотных заклепочных соединений следует выделить следующие поверхности механического контакта (рисунок 3): поверхность А, расположенную между соединяемыми деталями конструкции, поверхность Б, по которой создается радиальный натяг между стержнем заклепки и соединяемыми деталями, поверхность В – между деталью и головкой заклепки.

Жесткость рассматриваемого соединения будет зависеть от упругих перемещений в пределах предварительного смещения или трения покоя в указанных зонах контактирования. Эти упругие контактные перемещения как в нормальном, так и в касательном направлении оказывают существенное влияние на формирование величины натяга соединения (поверхности Б), так и на силы трения (поверхности А, В) (рисунок 3).

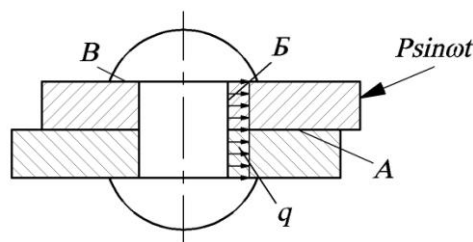


Рисунок 3 – Контактные поверхности в заклепочном соединении

Упругое сближение в контакте Б и предварительное смещение в зоне А будут связаны между собой условием совместности деформаций, а следовательно состояние натяга, в частности величина его податливости, будет оказывать непосредственное воздействие на тангенциальные смещения и формирование силы трения.

В рассматриваемом соединении по условию эксплуатации должно отсутствовать относительное скольжение листов. Этому препятствует сила трения, которую определяют экспериментально, и ее величина носит условный характер.

Срыв поверхностей под действием внешней нагрузки происходит в тот момент, когда в контакте соединенных деталей (А, В) упругое предварительное смещение одной шероховатой поверхности по другой переходит предельное значение Δ_p , за которым следует трение скольжение, а следовательно нарушается условие прочности и герметичности всего соединения.

Поскольку в реальных соединениях затруднительно определить величину нормальной статической нагрузки заранее, принимали за предельную силу, которую может выдержать соединение силу F , определяемую по допускаемому напряжению традиционным способом, а затем находили значение нормальной нагрузки.

Далее, зная величину нормального статического поджатия контакта и заданные условия контактирования, определяли значение предельного касательного смещения Δ_p согласно (глава 3), которое будет ограничивать трение покоя в соединении.

Амплитудные значения перемещений $\Delta^*(t), x^*(t)$ и соответствующих сил определяются согласно принятой динамической модели. А затем по этим величинам производится оценка состояния заклепочного соединения. В частности, сравнивается значение амплитудной силы P^* (глава 3) в касательном контакте (А) с допускаемой силой F и силой P_p , соответствующей предельному предварительному смещению Δ_p .

Если заклепочное соединение нагружено динамической или статической силой произвольного направления, то необходимо в общем инженерном расчете на прочность учесть касательную контактную податливость шероховатого слоя:

$$K_\tau = \Delta(x(t); t) / N^* f, \quad (12)$$

где $\Delta(x(t); t)$ – касательные контактные колебания, являющиеся функцией от $x(t)$ – нормальных контактных колебаний в каждый момент времени (главы 2, 3).

По условию прочности во избежание срыва поверхностей должно соблюдаться условие:

$$\begin{aligned} \Delta^* &\leq \Delta_p, \\ \tau^* &\leq \tau_{\max}. \end{aligned} \quad (13)$$

Итак, податливость за счет микронеровностей в контакте соединения с натягом в нормальном направлении (по отношению к оси заклепки) (поверхность Б) будет определяться общим выражением:

$$K_N = x(t) / N^*. \quad (14)$$

В знаменателе может стоять величина номинального давления в соединении q_0 с учетом динамической составляющей процесса.

С учетом нормальной контактной податливости шероховатого слоя в соединении номинальное давление будет определяться выражением

$$q_0 = \delta_H / 2(\lambda_1 + \lambda_2 + K_N), \quad (15)$$

где δ_H – номинальный натяг; λ_1, λ_2 – податливости деталей соединения.

Таким образом, номинальное давление в соединении с натягом (поверхность Б) будет уменьшаться, а, следовательно, фактическая величина натяга будет так же меньше минимального расчетного

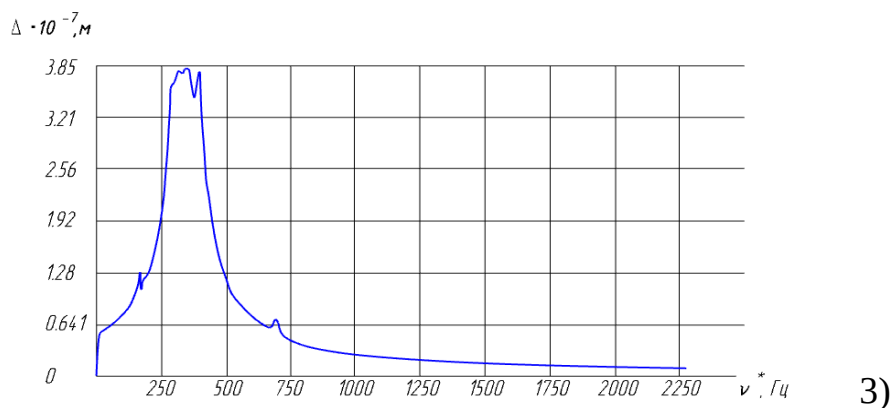
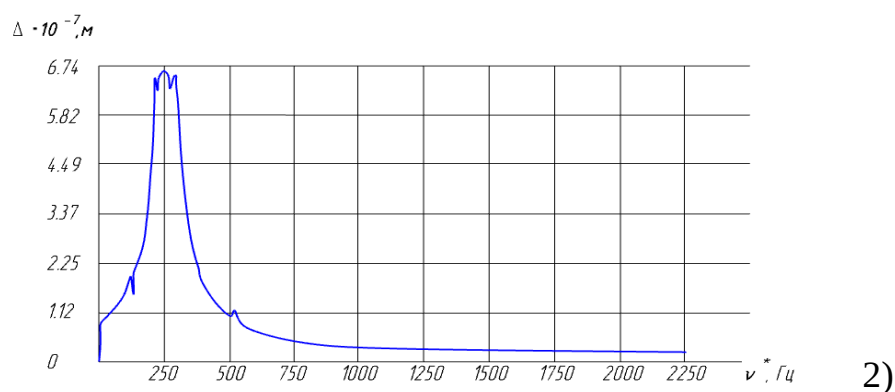
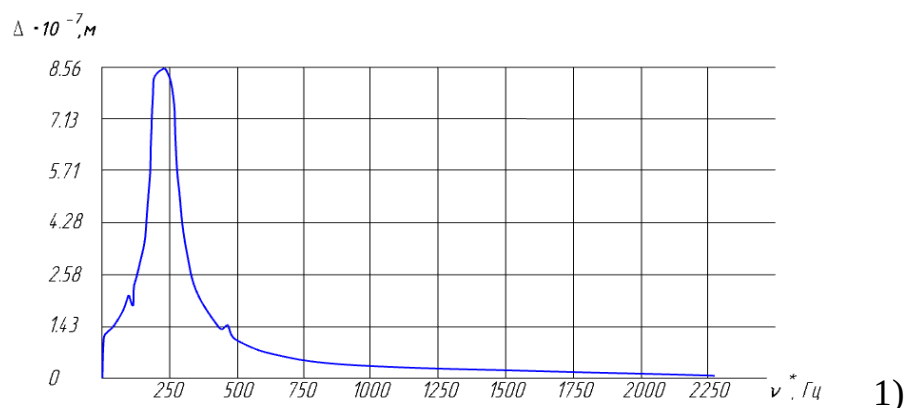


Рисунок 4 - АЧХ тангенциальных контактных колебаний при различных параметрах микрогеометрии: 1) $R_{\max} = 1,75e-05$ м, $r = 1e-04$ м; 2) $R_{\max} = 7,5e-06$ м, $r = 1,8e-04$ м; 3) $R_{\max} = 5e-06$ м, $r = 3e-04$ м

значения. Оценочные расчеты показали что, номинальное давление в соединении, а, следовательно, и величина самого минимального натяга уменьшается при различных параметрах контактирования до 10 - 15%.

Изучалось влияние параметров контактирования на поведение соединения отдельно по контакту А и по прессовой поверхности Б (соединение с натягом) (рисунок 3).

В ходе исследования упругих контактных смещений при динамическом нагружении в условиях вынужденных колебаний получены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) процесса для различных внешних условий, которые дают возможность оценить величину диссипации механической энергии в контакте, а также установить зоны устойчивой работы контактных пар (рисунок 4). Изменяемыми параметрами контактирования являлись:

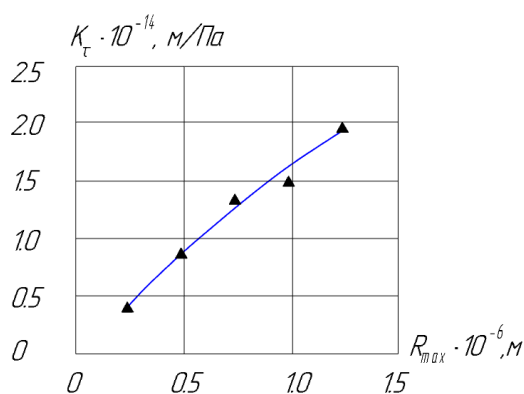


Рисунок 5 – Изменение коэффициента тангенциальной контактной податливости при различных параметрах микрогеометрии поверхностей соединения

Условия контактирования: $P = 200 \text{ Н}$, $\nu^* = 900 \text{ Гц}$

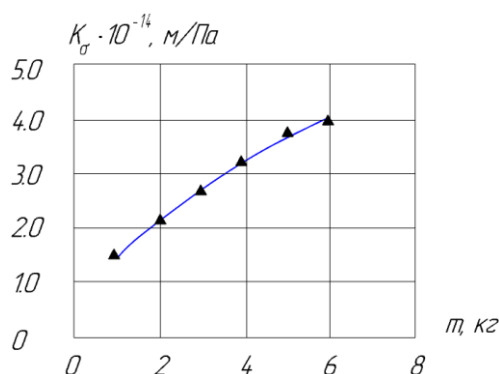


Рисунок 6 - Изменение коэффициента нормальной контактной податливости при различной массе

Условия контактирования: $P = 100 \text{ Н}$, $\nu^* = 1000 \text{ Гц}$

масса движущегося тела, усилие статического поджатия, величина вынуждающего усилия, параметры микрогеометрии поверхностного слоя

По величине динамической контактной податливости возможна оценка работоспособности соединения в том или ином направлении в условиях динамического нагружения (рисунок 5, 6).

Пятая глава посвящена описанию экспериментального комплекса по исследованию контактных взаимодействий при статических и динамических нагрузках (рисунок 7). Для проведения экспериментальных исследований была модернизирована установка, содержащая: неподвижный нижний гладкий образец; верхний подвижный образец, устройство для создания нормального статического поджатия, устройство для фиксации контактных колебаний верхнего штампа.

При рассмотрении вынужденных колебаний вынуждающее усилие создается при помощи устройства, включающего в себя электромагнитную катушку, работающую от генератора и способную создавать вынуждающую динамическую нагрузку заданной амплитуды и частоты.

Процесс контактных колебаний фиксируется бесконтактным методом, для чего используется сканисторный измеритель виброперемещений, построенный по схеме сканисторного фотопотенциометра с компенсирующей положительной обратной связью.

В качестве излучателя светового потока использован полупроводниковый лазер, который через систему линз засвечивает боковую поверхность колеблющегося образца.

Отраженный от боковой поверхности образца сигнал, проходя через систему линз, принимается фотоприемником и через усилитель подается на компьютер.

В качестве практического применения представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований для реального узла, включающего в себя различные соединения, от контактной податливости которых зависит долговечность и работоспособность всего узла.

Составляющие экспериментальной установки (рисунок 7):

1 – основание; 2 – накладная обойма; 3 – нижний неподвижный образец; 4 – верхний подвижный образец; 5 – грузы различной массы; 6 – электромагнитная катушка; 7 – генератор тока; 8 – гибкие нити основания; 9 – стойки основания; 10 – лазер; 11 – система линз; 12 – фотоприемник; 13 – усилитель; 14 – компьютер.

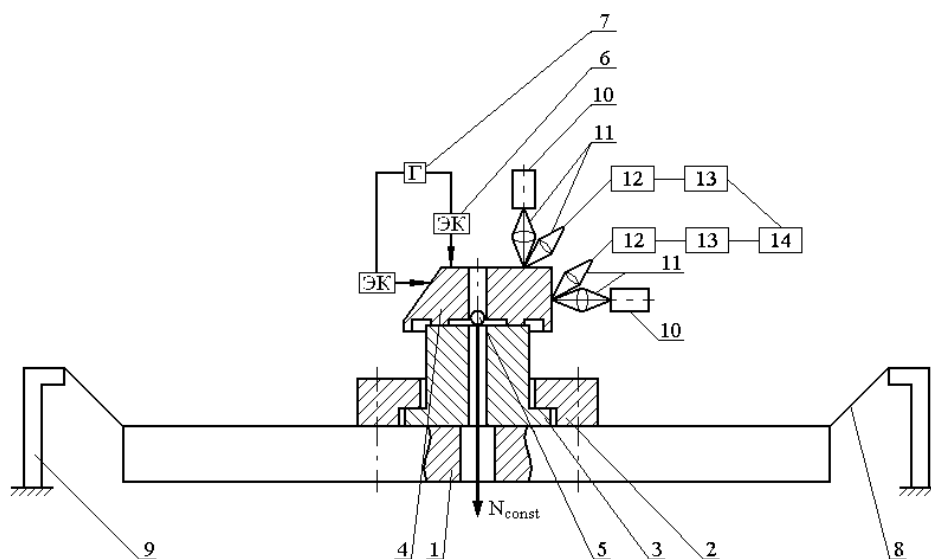


Рисунок 7 - Экспериментальная установка

По результатам теоретических расчетов и проведенному эксперименту были разработаны рекомендации по выбору параметров соединений узла двигателя А-41. Расхождение расчетных и экспериментальных полученных данных не превышало, в среднем, 10 - 15 %. Факт расхождения можно объяснить адгезией, не учтенной в расчетных выражениях.

Проведенные исследования доказывают правильность выбора теоретических предпосылок, динамической модели упругого контактного взаимодействия в пределах трения покоя, а также необходимость использования в уточненных инженерных расчетах на прочность и жесткость соединений разработанной методики.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан численно-аналитический метод определения динамических характеристик контакта деталей заклепочных соединений при различных видах динамического нагружения на основе динамической модели, позволяющей определять характеристики нормального и тангенциального контакта.

2. С помощью полученных амплитудно-частотных характеристик механического контакта заклепочных соединений на основе модели контакта шероховатых сфер и плоскости, а также шероховатых поверхностей, произведена оценка влияния на динамические и диссипативные характеристики контакта параметров динамического контактирования.

3. Разработана методика и прикладная программа расчета динамической контактной податливости сопряжений заклепочных соединений с учетом физико-механических и микрогеометрических параметров шероховатости и применена к инженерным расчетам соединений.

4. Рассчитаны потери механической энергии в условиях затухающих колебаний в контакте заклепочных соединений при различных параметрах контактирования.

5. Модернизирована экспериментальная установка для исследований поведения контактных пар при различных видах нагружения.

6. С помощью разработанной методики расчета, учитывающей динамическую контактную податливость сопряжений деталей, проведен уточненный инженерный расчет соединений узла двигателя А-41 и разработаны рекомендации по конструированию соединений с повышенной работоспособностью (ОАО «Алтайдизель»).

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Перфильева, Н. В. Упругопластическая модель контактного взаимодействия в условиях свободных колебаний [Текст] / Н. В. Перфильева, Н. В. Котенева, А. Д. Перфильева // Известия вузов. Машиностроение. – 2009. – №1. – С. 35 – 43.

2. Максименко, А. А. Исследование нормальных напряжений при упругопластическом контактном взаимодействии [Текст] / А. А. Максименко, Н. В. Котенева, А. Д. Перфильева // Ползуновский вестник. – 2009. – № 1–2. – С. 264 – 266.

3. Максименко, А. А. Упругие контактные смещения в заклепочных соединениях при динамическом нагружении [Текст] // А. А. Максименко, А. Д. Перфильева // Ползуновский вестник. – 2009. – № 4. – С. 65 – 68.

4. Максименко, А. А. Нормальные контактные взаимодействия в упруго-пластической зоне [Текст] / А. А. Максименко, Н. В. Котенева, А. Д. Перфильева // Ползуновский вестник. – 2010. – № 4/2. – С. 144–146.

Авторские свидетельства

5. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Расчет на устойчивость [Текст] / Ю. Г. Барабаш, А. Д. Перфильева, В. И. Животягина, А. Т. Зиновьев– № 2006612787; опубл. 04.08.2006, Бюл. № 3.

6. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Расчет соединений с натягом с учетом контактной податливости в динамике [Текст] / Н. В. Перфильева, А. М. Щербакова, А. Д. Перфильева. – № 2009614049; опубл. 30.07.2009, Бюл. № 3.

7. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Расчет динамических характеристик механического контакта в упруго-пластической зоне [Текст] / Н.В. Котененва, А. Д. Перфильева. – № 2010614873; опубл. 27.07.2010, Бюл. № 3.

8. Барабаш, Ю. Г. Программа расчета на устойчивость сжатого стержня [Электронный ресурс] / Ю. Г. Барабаш, А. Д. Перфильева, В. И. Животягина, А. Т. Зиновьев. – Электрон. текст дан. – Барнаул, 2006. – Режим доступа : [http:// edu.secna.ru/main/review./](http://edu.secna.ru/main/review/) – Загл. с экрана.

9. Котенева, Н. В. Упруго-пластическая контактная задача для однородных твёрдых тел [Электронный ресурс] / Н. В. Котенева, А. Д. Перфильева. – Барнаул, 2006. – Режим доступа : [http:// edu.secna.ru/main/review./](http://edu.secna.ru/main/review/) – Загл. с экрана.

10. Перфильева, А. Д. Разработка аппаратно-программного комплекса «Трибодин» по расчету и проектированию условно-неподвижных соединений с заданными свойствами [Текст] / А. Д. Перфильева // Материалы Всероссийской научно-практической конференции по совместной программе Министерства образования и науки Российской Федерации и Государственного Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере «Студенты, аспиранты и молодые ученые – малому наукоемкому бизнесу – «Ползуновские гранты» / под ред. Максименко А. А.; Алт. гос. тех. ун-т им. И. И. Ползунова. – г. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. – С. 101 – 103.

11. Перфильева, А. Д. Учет контактной податливости в инженерных расчетах соединений на прочность [Текст] / А. Д. Перфильева, А. М. Щербакова, Р. В. Клипа // XI городская научно-практическая конференция молодых ученых «Молодежь-Барнаулу» Алт.гос. Техн. Ун-т им. И.И. Ползунова. – г. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. – С. 161 – 163.

12. Котенева, Н. В. Упругопластический контакт нормального направления твердых тел [Текст] / Н. В. Котенева, А. Д. Перфильева, Е. В. Ледовская // XI городская научно-практическая конференция молодых ученых «Молодежь-Барнаулу» Алт.гос. Техн. Ун-т им. И.И. Ползунова. – г. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. – С. 164 – 166.

13. Перфильева, А. Д. Динамические упругие контактные смещения в заклепочных соединениях [Текст] / А. Д. Перфильева, А. М. Щербакова, В. И. Животягина // 67-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и ППС технического университета. Часть 2. – г. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. – С. 85 – 88.

14. Максименко, А. А. Исследование динамических процессов контактного взаимодействия в пределах трения покоя [Текст] / А. А. Максименко, Н. В. Перфильева, А. Д. Перфильева // Отчет о научно-исследовательской работе АлтГТУ, № гр. 012005.03513; инв. 02200601711. – Барнаул, 2006. – 50с.

15. Максименко, А. А. Исследование динамических процессов упруго-пластического контактного взаимодействия в пределах трения покоя [Текст] / А. А. Максименко, Н. В. Перфильева, А. Д. Перфильева // Отчет о научно-исследовательской работе АлтГТУ, № гр. 012006.05505; инв. 02200850004. – Барнаул, 2007. – 67с.

16. Максименко, А. А. Создание научно-образовательного центра Алтайского государственного технического университета на базе межвузовского Инновационного технологического центра (ИТЦ) «Алтайский технополис» для динамических исследований контактных взаимодействий [Текст] / А. А. Максименко, А. Д. Перфильева // Отчет по НИР по аналитической ведомственной целевой программе «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)»; № госрегистрации 01200951591. – Барнаул, 2010.