

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Владимира Фёдоровича

Кожевникова

«Аналитические методы расчёта на прочность болтовых соединений летательного аппарата, передающих усилие среза», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности

01.02.06

«Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры»

Актуальность темы диссертации. Болтовые соединения во многих конструкциях современной техники представляют собой основной вид соединений силовых элементов конструкций, например, таких как, планер самолёта. Такие соединения определяют прочностную надёжность конструкции в целом, передавая усилия между элементами конструкций, посредством контакта цилиндрических пар «болт - стенка отверстия» в болтовых соединениях, работающих на срез и выполняемых в большинстве случаев, рядами крепёжных элементов. При этом следует признать недостаточную обоснованность существующих методов расчёта в силу наличия большого числа неопределённых факторов, влияющих на результаты расчёта. Представленная диссертация направлена на повышение достоверности расчётов на прочность болтовых соединений летательных аппаратов, передающих усилие среза, и посвящена разработке аналитического решения о контактном взаимодействии болта со стенками отверстий в соединяемых деталях, что позволяет считать тему диссертации актуальной.

Достоверность и новизна основных результатов диссертации. Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения и списка литературы.

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ
Вх. № 02 09 2019

Во **введении** обоснована актуальность решаемой проблемы, степень её разработанности, сформулированы цель исследования, новизна, практическая и теоретическая ценность, изложены методы исследования, степень их достоверности и перечислены положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан обзор литературы, посвящённой расчётным и экспериментальным методам определения напряжённо-деформированного состояния болтовых соединений, работающих на срез. Обзор показал, что погонная контактная нагрузка определяется на основе изгиба балки на упругом основании, а радиальные контактные напряжения берут из решения задачи о давлении диска на стенку отверстия пластины со свободными от нагрузок кромками. Экспериментальные исследования ограничены только прошинами шарнирно-болтовых соединений. Отсюда следует, что необходима новая постановка как теоретического, так и экспериментального исследования напряжённо-деформированного состояния болтовых соединений, основанная на максимальном приближении расчётной схемы к условиям работы реального болтового соединения, передающего усилие среза.

Во второй главе впервые поставлена и решена проблема контактного взаимодействия о давлении диска на стенку отверстия пластины, произвольно нагруженной по её кромкам, которая моделирует выбранный слой расчётного элемента в окрестности силовой точки многорядного стыка. Содержание главы посвящено установлению аналитической зависимости, связывающей текущие величины взаимных упругих перемещений контактирующих поверхностей диска и стенки отверстия с возникающими при этом радиальными контактными напряжениями. При решении использованы экспериментальные данные о напряжённо-деформированном состоянии зоны контакта, полученные методами фотоупругости и муара, что облегчило получение искомого решения. В итоге получено общее уравнение для расчёта радиальных контактных напряжений, учитывающее соотношение усилий, приложенных к диску и кромкам пластины, различие их материалов и наличие

натяга.

Произведена оценка достоверности полученных аналитических решений путём сопоставления их с экспериментальными результатами, полученными методом фотоупругости на плоских моделях при различных вариантах нагружения кромок пластины, показавшая удовлетворительное совпадение результатов.

В третьей главе рассмотрена пространственная контактная задача, сведённая к задаче о распределении погонной контактной нагрузки по толщине каждого из соединяемых элементов одно - или двухсрезных соединений. Задача решена в условиях контакта болта с реальными стенками отверстий, т.е. без их замены упругими основаниями.

Проведены параметрические исследования по влиянию геометрических и механических характеристик соединения на распределение контактной нагрузки, результаты которых могут быть использованы при проектировании конкретных соединений.

В четвертой главе, обоснована целесообразность применения методов фотоупругости и муаровых полос для экспериментального исследования напряжённо-деформированного состояния соединений на плоских и объёмных моделях. Созданы экспериментальные стенды, позволяющие реализовать одновременное нагружение модели через диск и по кромкам пластины, позволяющие варьировать соотношение нагрузок. Предложен новый способ разделения разностей главных напряжений непосредственно на контактной поверхности диск-стенка отверстия, и методика определения перемещений в зоне отверстия с помощью муаровых полос. Разработана и использована методика исследования напряжений в объёмных моделях болтовых соединений методом «замораживания деформаций».

В пятой главе изложены результаты экспериментального исследования распределения радиальных напряжений по всей поверхности контакта диска со стенкой отверстия при различных вариантах нагружения

кромки пластины и диска. Большая часть исследований выполнена для случая, когда материалы диска и пластины одинаковы, а их радиусы равны, хотя для растягиваемой пластины было исследовано распределение напряжений и при запрессовке диска.

В шестой главе даны результаты экспериментальных исследований распределения погонной контактной нагрузки в объёмных моделях болтовых соединений методом «замораживания деформаций» с последующей разрезкой моделей на тонкие срезы в различных плоскостях. Найдено распределение радиальных контактных напряжений с вычислением их равнодействующих, которые были приняты, в качестве текущей величины контактной нагрузки в срединной плоскости среза, которая затем сопоставлялась с теоретическим решением, полученным для этой же модели.

Одновременно с этим разработана упрощённая методика, основанная на корреляции текущей величины контактной нагрузки с максимальными разностями главных напряжений на кромке отверстия.

В седьмой главе получено аналитическое решение о местной податливости связи в односрезных соединениях, обусловленной деформациями взаимного упругого смятия контактирующих поверхностей диска и стенки отверстия. Помимо этого, предложено также учитывать ещё две составляющие местной податливости, обусловленные депланацией поперечного сечения стыкуемого элемента по оси ряда, вызванной давлением болта, как сосредоточенной силы и овализацией болтового отверстия, которая возникает только при растяжении стыка. Однако, проведённые расчёты показали, что эти составляющие значительно меньше обусловленных деформациями смятия.

В восьмой главе разработан метод расчёта распределения усилий по рядам многорядных односрезных поперечных стыков, стыкуемые элементы которых имеют плоскую, ступенчатую и клиновидную конфигурацию. Введённая расчётная схема привела к тому, что расчётный элемент представлен в виде $(K - 1)$ раз статически неопределимой стержневой системы,

где K - число рядов в стыке. Решение основано на использовании уравнений совместности деформаций участков стыка, расположенных между двумя соседними рядами и ранее полученного решения о местной податливости. Выполненные расчёты показали справедливость предложенной модели.

Приведённые в заключении выводы по результатам диссертационной работы сомнений не вызывают.

Достоверность полученных результатов основывается на общеизвестной корректности математических моделей механики сплошной среды, строгости математических решений, а также на сравнении полученных расчётно-теоретических решений с результатами экспериментальных исследований.

Практическая ценность состоит в том, что разработанные в диссертации расчётно-математические модели, сведены к уравнениям, включающими в себя известные геометрические параметры соединения и механические свойства, что позволяет конструктору без затруднений производить необходимые расчёты.

Научная новизна состоит в том, что разработаны новые постановки задач о контактном взаимодействии цилиндрических конструктивных пар при максимально возможном приближении расчётной модели к работе натурального стыка, причём представленные решения и большинство экспериментальных исследований получены впервые.

Оценка содержания диссертации. Текст диссертации написан достаточно подробно, чётко, хорошим стилем. По содержанию диссертации можно сделать следующие **замечания**.

1. На стр. 81 для измерения зазора использован термин «промилле», не применяемый в технической практике.

2. стр. 61 сказано, что силы, действующие на диск и пластину независимы, вследствие чего возникает вопрос о соблюдении условий

равновесия.

3. В формуле на стр. 125 слева от знака равенства число комплексное, а справа действительное.

4. В уравнении 3.3 на стр. 122 величина $\Delta_0(0)$ не зависит от $q(z)$ как сказано в тексте, а зависит от усилия среза.

5. Поскольку речь идёт о приближении расчёта к реальной работе соединений, то были бы желательными рекомендации о классах точности при механической обработке отверстий (т.е. допуски на размеры), о степени шероховатости контактирующих поверхностей и о способах центрирования расстояний между отверстиями в сопрягаемых пластинах.

Однако, сделанные замечания не отражаются на общем положительном заключении по представленной работе.

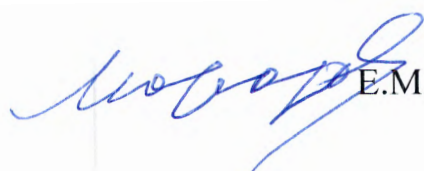
Заключение. Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, имеющую важное народнохозяйственное значение, а именно, проведена разработка методов обеспечения прочностной надёжности болтовых соединений, работающих в условиях среза, находящихся широкое применение в различных областях современной техники, в частности в авиационной отрасли. Разработанные методы расчёта дают научно обоснованные технические рекомендации, вносящие значительный вклад в техногенную безопасность технических сооружений страны.

Содержание работы опубликовано в периодических изданиях, доложено на конференциях и семинарах. Автореферат правильно и полно отражает основное содержание диссертации.

В целом, диссертация В.Ф. Кожевникова выполнена на высоком научном уровне и соответствует всем критериям положения «О порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09,2013 г.

На основании изложенного считаю, что представленная диссертация отвечает требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор, Владимир Фёдорович Кожевников, по своей научной квалификации заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 01.02.06 - "Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры".

Профессор кафедры физики прочности
Национального исследовательского ядерного университета МИФИ,
доктор технических наук,
Почётный профессор МИФИ,
Заслуженный деятель науки РФ



Е.М. Морозов

Москва, 115409, Каширское шоссе, 31, НИЯУ МИФИ

Evgeny.morozof@gmail.ru

8 906 7932196

