

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию
Кожевникова Владимира Федоровича на тему
«Аналитические методы расчета на прочность болтовых соединений
летательного аппарата, передающих усилие среза», представленную к защите
на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности
01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры»

Вопросы «местной» прочности авиационных конструкций, концентрации напряжений в соединениях и особенно болтовых соединениях, работающих на срез, находятся под постоянным вниманием разработчиков и эксплуатантов ЛА.

По данным ИКАО до 85% всех разрушений в эксплуатации ЛА приходится на зону соединений. Поэтому работы, связанные с совершенствованием методов расчета соединений представляют значительный интерес.

Работы профессоров С.А.Вигдорчика, А.И.Ярковца, А.Ф.Селихова, И.А.Биргера, Н.М.Киселева и других исследователей посвящены решению проблем теории и практики создания высокоресурсных болтовых соединений.

Диссертационная работа Кожевникова В.Ф. посвящена решению актуальной научно-технической проблемы повышения точности расчетов зон концентрации напряжений в соединениях, работающих на срез.

Полученные диссертантом решения основаны на применении уравнений механики твердого деформируемого тела и дополнены экспериментальными закономерностями напряженно-деформированного состояния зоны отверстия пластины, нагружаемой через диск, с применением оптических методов исследования. В работе получены аналитические зависимости между величинами взаимного деформирования контактных поверхностей обоих тел, определение которых разработано в диссертации, и возникающими при этом радиальными контактными напряжениями. Кроме того, получена зависимость между текущими значениями прогиба оси болта и погонной контактной нагрузки.

Все это позволило автору разработать решения о распределении погонной контактной нагрузки и радиальных напряжений по всей поверхности контакта болт-стенка отверстия.

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ
Вх. № 05 / 09 20 19 г.

На основании этих решений в диссертации получены: 1) выражение для определения местной податливости связи и 2) разработана методика расчета распределения усилий по рядам многорядных стыков сложной конфигурации.

В работе также выполнен большой объем экспериментальных исследований напряженного состояния соединений на их плоских и объемных моделях оптическими методами, позволивших, с одной стороны, получить необходимые данные для разработки приближенного решения о контактном взаимодействии, а с другой – оценить степень достоверности полученных в диссертации аналитических решений.

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения и списка цитируемой литературы, насчитывающего 108 источников, из них 19 иностранных, что говорит о том, что рассматриваемая проблема является **актуальной** как в России, так и за рубежом. Вводная часть содержит обоснование актуальности проблемы, степень ее разработанности к настоящему времени, формулируется цель исследования, новизна, практическая и теоретическая ценность, излагаются методы исследования, степень их достоверности и перечисляются положения, выносимые на защиту.

Практическая ценность состоит в том, что разработанные в диссертации математические модели, сведены к уравнениям, представленным в явном виде, а все входящие в них параметры включают в себя заданные геометрические и механические характеристики соединения, что позволяет конструктору пользоваться полученными решениями, не имея специальной подготовки.

Достоверность полученных результатов основывается на достаточной корректности математических моделей и строгости математических решений, а также на сравнении полученных решений с результатами экспериментальных исследований.

Научная новизна обосновывается тем, что разработанные в диссертации решения о контактном взаимодействии получены при максимально возможном приближении расчетной модели к условиям работы натурального стыка. Эти решения получены впервые, а подавляющее большинство экспериментальных исследований также выполнено впервые.

В первой главе выполнен достаточно подробный обзор литературы, посвященной расчетным и экспериментальным методам определения напряженного состояния болтовых соединений, работающих на срез. Из этого обзора следует, что, для расчета распределения погонной контактной нагрузки используется теория балки на упругом основании, а для расчета радиальных контактных напряжений применяют решение задачи о давлении диска на стенку отверстия пластины со свободными от нагрузок кромками. Расчет распределения усилий по рядам многорядных стыков ограничен только случаем двусрезного симметричного соединения.

Экспериментальные исследования, за исключением единственного случая, касаются только проушин шарнирно-болтовых соединений. Сформулирована новая постановка как теоретического, так и экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния болтовых соединений, основанная на максимальном приближении расчетной схемы к условиям работы реального болтового соединения, передающего усилие среза.

Во второй главе проблема контактного взаимодействия представлена в плоской постановке и сведена к решению задачи о давлении диска на стенку отверстия пластины, произвольно нагруженной по ее кромкам, которая моделирует произвольный слой расчетного элемента, выделенного в окрестности произвольной силовой точки многорядного стыка. Такая задача поставлена и решена впервые. Эта глава посвящена установлению аналитической зависимости, связывающей текущие величины взаимных упругих перемещений контактирующих поверхностей диска и стенки отверстия с возникающими при этом радиальными контактными напряжениями. Для этой цели использованы известные выражения механики твердого деформируемого тела, дополненные необходимыми данными о некоторых закономерностях в распределении напряжений и деформаций в зоне контакта, полученными экспериментально на пластине, нагружаемой через диск, методами фотоупругости и муара соответственно, что позволило существенно упростить искомое решение.

В итоге получено общее уравнение для расчета распределения радиальных контактных напряжений, учитывающее соотношение усилий, приложенных к диску и кромкам пластины, различие их материалов, а также наличие натяга.

Для конкретных типов стыков, путем задания соответствующих условий нагружения кромок пластины, это уравнение преобразуется в расчетные формулы. В главе приведены результаты параметрических исследований по влиянию соотношений нагрузок на диск и на кромки пластины, различия модулей упругости их материалов, а также наличия натяга, выполненных на расчетных элементах, соответствующих конкретным типам стыков. Для различных вариантов нагружения кромок пластины и запрессованного диска получены условия, при которых возникает так называемое раскрытие стыка, что имеет большое практическое значение для расчета и проектирования соединений тонкостенных конструкций, обеспечивающих их герметичность.

В главе осуществлена оценка достоверности полученных аналитических решений путем сопоставления их с экспериментальными результатами, полученными методом фотоупругости на плоских моделях при различных вариантах нагружения кромок пластины, показавшая удовлетворительный результат.

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

На основании зависимостей, полученных во второй главе, установлена связь между текущими значениями прогиба оси болта и контактной нагрузки. В качестве второго уравнения, связывающего эти же величины, использовано известное дифференциальное уравнение изогнутой оси короткой балки.

В результате некоторых преобразований получено дифференциальное уравнение изогнутой оси болта в соединении, работающем на срез. Выполнено решение этого уравнения, найдены константы интегрирования из граничных условий, одно из которых не тривиально и получено диссертантом экспериментально-аналитическим способом.

В результате сформировано общее уравнение для расчета распределения контактной нагрузки по толщине каждого из соединяемых элементов односрезного соединения, которое может быть также использовано и для накладок двусрезных соединений. Для среднего элемента двусрезного стыка, как симметричного, так и не имеющего симметрии относительно срединной плоскости, получены отдельные решения. Все эти решения, полученные впервые, представлены в явном виде и замкнуты на толщине каждого из соединяемых элементов, что имеет важное практическое значение при использовании их для выполнения расчетов на прочность.

В этой главе осуществлены параметрические исследования по влиянию геометрических и механических характеристик соединения на распределение контактной нагрузки, результаты которых могут быть использованы при проектировании соединений. В частности, представлены рекомендации по рациональному выбору соотношения толщин стыкуемых элементов и диаметра болта. Осуществлена оценка достоверности полученных решений о распределении контактной нагрузки в различных типах соединений путем их сопоставления с экспериментальными данными, полученными методом фотоупругости на объемных моделях соединений, показавшая удовлетворительные результаты.

В четвертой главе, открывающей раздел экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния болтовых соединений, обоснована целесообразность применения для этой цели методов фотоупругости и муаровых полос соответственно. Разработаны методики проведения исследований на плоских и объемных моделях соединений. Для исследования плоских моделей разработаны и созданы стенды, позволяющие реализовать одновременное нагружение модели через диск и по кромкам пластины, позволяющие варьировать соотношение этих нагрузок.

С целью повышения достоверности получаемых экспериментальных значений радиальных контактных напряжений, диссертантом предложен новый способ разделения разностей главных напряжений (измеряемая величина) непосредственно на контактной поверхности диск-стенка отверстия. Предложена методика определения перемещений в зоне отверстия с помощью метода муаровых полос. Разработана и применена методика исследования напряжений в объемных моделях болтовых соединений с применением метода «замораживания» деформаций. Разработаны меры по повышению достоверности, как при измерении оптических величин, так и при их обработке.

В пятой главе изложены результаты экспериментального исследования распределения радиальных напряжений по всей поверхности контакта диска со стенкой отверстия при различных вариантах нагружения кромок пластины и диска. Большая часть исследований выполнена при условии, что материалы диска и пластины одинаковы, а их радиусы равны, впрочем, в случае растягиваемой пластины было исследовано распределение напряжений и в условиях запрессовки диска. Основное назначение этих исследований – это оценка достоверности теоретических результатов, однако попутно, были получены графические зависимости коэффициентов концентрации напряжений на кромке отверстия от соотношения ширины пластины и диаметра диска при различных вариантах нагружения моделей, которые могут быть использованы при проектировании соединений.

Диссертант признается, что ему не удалось создать стенд, позволяющий одновременно нагружать диск и сжимать пластину. Однако он нашел удачный, на наш взгляд, выход, применив для этой цели составную трехрядную модель поперечного стыка при нагружении ее сжатием, второй и третий ряды которой находятся в требуемом состоянии и при этом соотношения усилий на болт и обтекающего его в этих рядах различны.

В шестой главе выполнено экспериментальное исследование распределения погонной контактной нагрузки в объемных моделях болтовых соединений, имеющих различную конфигурацию и геометрически подобных натурным прототипам. Исследование осуществлено методом «замораживания» деформаций с последующей разрезкой моделей на тонкие срезы в различных плоскостях, перпендикулярных оси болта. В этих срезах было найдено распределение радиальных контактных напряжений, вычислена их равнодействующая, которая и была принята, в качестве текущей величины контактной нагрузки, действующей в срединной плоскости среза. По этим данным в каждой модели строили экспериментальное распределение контактной нагрузки, которое затем сопоставляли с теоретическим решением, полученным для этой же модели.

Помимо такой весьма трудоемкой операции нахождения контактной нагрузки, диссертантом была разработана упрощенная методика, основанная на обнаруженной им устойчивой корреляции между текущими величинами контактной нагрузки и максимальными значениями разностей главных напряжений на кромке отверстия в каждом из срезов.

Такие экспериментальные исследования напряженного состояния болтовых соединений на их объемных моделях выполнены впервые.

В седьмой главе, открывающей раздел диссертации, посвященный практической реализации полученных во второй и третьей главах аналитических решений о контактном взаимодействии болта со стенками болтовых отверстий, получено аналитическое решение о местной податливости связи в односрезных соединениях. Это решение представлено как в виде уравнений, так и в виде графических зависимостей, позволяющих, исходя из геометрических и механических характеристик соединения, определять величину местной податливости связи, обусловленную деформациями взаимного упругого смятия контактирующих поверхностей диска и стенки отверстия.

Предложено также учитывать еще две, ранее не учитываемые составляющие местной податливости, обусловленные: 1) депланацией поперечного сечения стыкуемого элемента по оси ряда, вызванной давлением болта, как сосредоточенной силы в плоскости, и 2) овализацией болтового отверстия, которая возникает только при растяжении стыка. Впрочем, как показывают приведенные в диссертации расчеты, эти составляющие существенно меньше составляющей, обусловленной деформациями смятия.

В восьмой главе разработан метод расчета распределения усилий по рядам многорядных односрезных поперечных стыков, стыкуемые элементы которых имеют плоскую, ступенчатую или клиновидную конфигурацию. Расчетный элемент, при расположении болтов в линию, выделен двумя продольными сечениями между соседними болтами в ряду, а при шахматном или произвольном расположении болтов расчетный элемент, по предложению диссертанта, следует ограничить, исходя из конструктивных особенностей, например, в крыльевых стыках – это расстояние между двумя соседними стрингерами. В обоих случаях расчетный элемент следует представлять 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 полученного в предыдущей главе решения о местной податливости. Диссертантом представлено обобщенное уравнение совместности деформаций пригодное для всех рассмотренных типов стыков, различающееся только содержанием коэффициентов, определенных в работе для каждого типа стыка.

На основе этого уравнения получена универсальная система уравнений для расчета распределения усилий по рядам поперечных односрезных стыков. Выполнен тестовый расчет распределения усилий по рядам трех регулярных образцов стыков, имеющих одинаковые геометрические и механические характеристики, но различающиеся только тем, что стыкуемые элементы в них имели соответственно плоскую, ступенчатую и клиновидную конфигурации. Выполненный расчет показал справедливость предложенной системы уравнений.

Достоверность полученных теоретических результатов обоснована вполне достаточной для приближенных решений строгостью математических формулировок задач, а также подтверждается сопоставлением выполненных в диссертации теоретических расчетов с экспериментальными данными, полученными на плоских и объемных моделях методами фотоупругости и муаровых полос.

Практическая значимость разработанных математических моделей и методов состоит в том, что они составляют основу для осуществления наиболее достоверных расчетов на прочность болтовых соединений летательного аппарата, передающих усилие среза и имеющих сложную геометрию, а также осуществлять рациональное их проектирование.

В заключении приведены основные выводы по работе.

По диссертации имеются следующие **замечания**:

1. При постановке задачи о контактном взаимодействии диска и стенок отверстия пластины происходит смещение диска в отверстии, что вызывает на поверхности контакта силы трения. Особенно при переходе из упругой в упруго-пластическую область. Хотелось бы знать их влияние на распределение напряжений около отверстия.

2. Реальные болтовые соединения, кроме натяга в БС, имеют и повышенную затяжку БС. Влияние натяга в работе представлено. Влияние затяжки болтов хорошо бы оценить, т.к. затяжка снижает усилие среза болтов.

3. При эксплуатации конструкций с применением БС, работающих на срез, основным видом разрушения является разрушение листа в зоне максимальной концентрации напряжений около отверстий. Следовало бы дать рекомендации конструкторам по снижению концентрации напряжений около отверстий.

4. Имеется ряд замечаний по тексту и терминам.

Тем не менее, указанные замечания не снижают научной ценности представленной научной работы. В целом, диссертация Кожевникова В.Ф. выполнена на высоком научном уровне и соответствует всем критериям положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г.

В работе получены результаты, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области постановки и решения проблемы пространственного контактного взаимодействия тел с круговыми границами контакта, которая является актуальной не только для авиастроения, но и для многих других отраслей машиностроения.

Основные результаты диссертации опубликованы в 31-й работе, 28 из которых – в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК.

Автореферат достаточно полно и правильно отражает содержание диссертации.

Кожевников Владимир Федорович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 01.02.06 – "Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры".

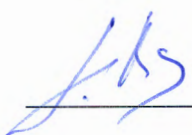
Официальный оппонент,
член-корреспондент РАН
доктор технических наук,
профессор, президент
Национальной технологической
палаты


Сироткин Олег Сергеевич

119334, Москва, ул. Бардина, д. 4, стр. 3, оф. 1.
Телефон: +7 985-765-81-54.
E-mail: osirotkin@yahoo.com.

Подпись Сироткина Олега Сергеевича удостоверяю.

Статс-секретарь,
сопредседатель правления НП НТП, к.т.н.


Волостнов Б.И.

М.П.

