

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора ФГУП
«Центральный аэрогидродинамический
институт им. проф. Н.Е.Жуковского» (ЦАГИ),
кандидат технических наук,



М.Ч.Зиченков
« 22» августа 2019 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Кожевникова Владимира Федоровича «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»

В диссертации Кожевникова В.Ф. изложены результаты обширного исследования, посвященного разработке и практической апробации аналитических методов расчета напряженно-деформированного состояния, жесткости и прочности соединений элементов авиационных конструкций. Рассматриваемые методы могут быть эффективно использованы для инженерного анализа и предварительного выбора геометрических параметров ответственных силовых соединений планера, а также при подготовке и расчетном сопровождении статических испытаний конструкции.

Тема исследования является актуальной, так как болтовые соединения, передающие усилие среза, и в настоящее время продолжают оставаться наиболее распространенным видом соединений силовых элементов планера самолета, являясь, зачастую, узлами, определяющими прочность и надежность всей конструкции. В наибольшей степени это относится к узлам стыка панелей крыла большого удлинения с центропланом самолета, шарнирно-болтовым соединениям механизмов управления, а также к целому ряду других типов соединений элементов конструкции летательного аппарата.

Отличительной особенностью таких узлов является то, что максимальные напряжения, которые могут оказаться причиной зарождения усталостных трещин, возникают на кромках болтовых отверстий в плоскости среза соединения, что создает определенные трудности в их своевременном обнаружении. Заметим, что такая проблема является наиболее существенной для соединений достаточно массивных панелей, таких, например, как стык крыла с центропланом фюзеляжа. Это обстоятельство обуславливает необходимость развития и совершенствования наиболее достоверных аналитических методов расчета локального напряженного состояния зоны болтовых отверстий в соединениях, передающих усилие среза.

В настоящее время в проблеме расчета болтовых соединений на прочность наименее разработанной ее составляющей является решение задачи о контактном взаимодействии болта со стенками отверстий в соединяемых элементах, что в равной мере относится как к шарнирно-болтовым соединениям, так и к многорядным стыкам. Получение достоверного аналитического решения о контактном взаимодействии, т.е. о распределении погонной контактной нагрузки и радиальных напряжений по всей поверхности контакта болт-стенка отверстия, дает возможность получить достаточно надежные значения граничных условий, необходимых для более детального расчета локального напряженного состояния зоны болтового отверстия, например, численными методами.

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ

Вх. № 04 29 2019

Кроме того, наличие аналитического решения о контактном взаимодействии болта со стенками отверстий, позволяет решить задачу определения местной податливости связи, что необходимо как для расчета распределения усилий по рядам многорядного стыка, так и для расчета жесткостных характеристик соединения.

Принятая в диссертации В.Ф.Кожевникова расчетная модель максимально приближена к условиям работы реального соединения. В ней рассматривается контакт болта с реальной стенкой отверстия, а также учитывается наличие обтекающего болт усилия, что характерно для многорядных стыков. Это принципиально новый подход к решению поставленной проблемы, способствующий как повышению достоверности расчетов на прочность соединений, так и осуществлению процесса рационального проектирования. Достоверность теоретических решений подтверждена их сопоставлением с результатами экспериментальных исследований, выполненных оптическими методами на плоских и объемных моделях соединений.

Диссертация завершается разработкой рекомендаций по практической реализации полученных результатов, а именно - метода расчета местной податливости связи. На основании чего автором предложена оригинальная методика расчета распределения усилий по рядам многорядных стыков сложной конфигурации.

Диссертация состоит из трех разделов и включает в себя введение, восемь глав, заключение и список литературы. Общий объем работы – 284 страницы, в том числе 206 страниц текста, 94 рисунка, 6 таблиц, список литературы из 108 наименований.

Основное содержание диссертации изложено в двух монографиях и 31 статье, 28 из которых опубликованы в научных изданиях из Перечня ВАК. Кроме того, по теме экспериментального раздела диссертации имеется авторское свидетельство на изобретение.

В первой главе представлен 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 применяется 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 срезных болтовых соединений, основанная на максимальном приближении расчетной схемы к реальным условиям работы.

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. Эта задача моделирует произвольный слой расчетного элемента многорядного стыка, выделенного в окрестности силовой точки соединения. Такая задача поставлена и решена впервые. Основная часть главы 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 методы механики твердого деформируемого тела, дополненные характерными данными о некоторых закономерностях в распределении напряжений и деформаций вблизи зоны контакта диска со стенкой отверстия. Эти данные были получены экспериментально на пластине, нагружаемой через диск, методами фотоупругости и муара соответственно, что позволило существенно упростить искомое решение проблемы.

В итоге выведено общее уравнение для расчета распределения радиальных контактных напряжений, учитывающее соотношение усилий, приложенных к диску и кромкам пластины, состоящих из различных материалов при наличии натяга. Для конкретных типов стыков, путем задания условий нагружения кромок пластины, это уравнение преобразуется к достаточно простым расчетным формулам. Для различных вариантов нагружения кромок пластины и запрес-

сованного диска сформулированы условия, при которых возникает так называемое раскрытие стыка, имеющее большое практическое значение в расчетах и проектировании соединений тонкостенных конструкций, обеспечивающих их герметичность.

Приводится анализ достоверности полученных аналитических решений сравнением их с экспериментальными данными, полученными методом фотоупругости на плоских моделях при различных вариантах нагружения кромок пластины, показавшее довольно хорошее совпадение.

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

На основе зависимостей, полученных во второй главе, установлена связь между текущими значениями прогиба оси болта и контактной нагрузки. В качестве второго уравнения, связывающего эти же величины, принято известное дифференциальное уравнение изогнутой оси короткой балки. В результате некоторых преобразований выведено 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 итоге получено 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 указанные решения, полученные впервые, представлены в явном виде и замкнуты на толщине каждого из соединяемых элементов, что имеет важное практическое значение при использовании их в расчетах на прочность и долговечность.

Приводятся результаты параметрических исследований по влиянию геометрических и механических характеристик соединения на распределение контактной нагрузки, которые могут быть использованы при проектировании соединений. В частности, представлены рекомендации по рациональному выбору соотношения толщин стыкуемых элементов и диаметра болта. Проведена оценка достоверности полученных решений о распределении контактной нагрузки в различных типах соединений на основе сравнения с экспериментальными результатами, полученными методом фотоупругости на объемных моделях соединений. Также как в предыдущей главе, согласования расчетных и экспериментальных данных можно признать достаточно хорошим для практического применения.

В четвертой главе, открывающей раздел экспериментальных исследований как напряженно, так и 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 созданы стенды, позволяющие реализовать одновременное нагружение модели через диск и по кромкам пластины, а также варьировать соотношение величин нагрузок. С целью повышения достоверности получаемых значений радиальных контактных напряжений, В.Ф. Кожевниковым предложен новый способ разделения разностей главных напряжений (измеряемая величина) непосредственно на контактной поверхности диск-стенка отверстия. Предложена также 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».

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 радиусы их окружностей и отверстий равны, причем в случае растягиваемой пластины было исследовано распределение напряжений и в условиях запрессовки диска. Основное назначение этих исследований – это оценка

достоверности теоретических результатов. Кроме этого были получены графические зависимости коэффициентов концентрации напряжений на кромке отверстия от соотношения ширины пластины и диаметра диска при различных вариантах нагружения моделей. Представленные зависимости могут быть использованы на практике при проектировании различного типа соединений.

Диссертанту не удалось создать стенд, позволяющий одновременно осуществлять нагружение диска и сжатие пластины. Однако он нашел рациональный способ решения этой задачи, 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 усилие 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 и определена их равнодействующая, которая была принята в качестве текущей величины контактной нагрузки, действующей в срединной плоскости среза. По этим данным для каждой модели было построено экспериментальное распределение контактной нагрузки, которое затем сопоставляли с теоретическим решением, полученным для этой же модели.

Помимо указанной весьма трудоемкой операции определения контактной нагрузки, диссертантом была разработана упрощенная методика. Методика основана на установленной автором устойчивой корреляции между текущими величинами контактной нагрузки и максимальными значениями разностей главных напряжений на кромке отверстия в каждом из срезов.

Указанные экспериментальные исследования напряженного состояния болтовых соединений 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 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) деформацией 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. Приведенные в диссертации расчеты показали, что эти составляющие существенно меньше составляющей, обусловленной деформациями смятия.

В восьмой главе разработан метод расчета распределения усилий по рядам многорядных односрезных поперечных стыков, соединяемые элементы которых имеют плоскую, ступенчатую и клиновидную конфигурацию. При этом расчетный элемент, при расположении болтов в линию, выделяется двумя продольными сечениями между соседними болтами в ряду, а при шахматном или произвольном расположении болтов расчетный элемент следует ограничить, исходя из конструктивных особенностей, например, в крыльевых стыках, межстрингерным расстоянием. В обоих случаях расчетный 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, полученного в предыдущей главе в результате решения задачи о местной податливости. Диссертантом выводится обобщенное уравнение совместности деформаций для всех рассмотренных типов стыков, различающееся только

содержанием коэффициентов. На основе этого уравнения построена 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. В результате подтверждена достоверность предложенной системы уравнений.

По диссертации можно сделать следующие замечания:

1. На странице 26 автор не совсем корректно заявляет, что при использовании метода конечных элементов при решении трехмерных контактных задач «контактная поверхность соединительного элемента принимается *недеформируемой*». Также не совсем корректное заявление автора, что «расчет распределения радиальных напряжений по дуге контакта ... до настоящего времени выполняли только в *плоской* постановке». Однако в работах [66-68] (О.С. Сироткин и др.) из списка литературы автора с применением метода конечных элементов при решении учитывается как деформирование контактной поверхности, так и определяются радиальные напряжения при моделировании контактных задач в трехмерной постановке.
2. Разработанные автором аналитические методы расчета напряженно-деформированного состояния соединений, а также используемый им для экспериментальной проверки поляризационно-оптический метод, применимы лишь к изотропным материалам. Они не позволяют проводить расчеты деталей из композитных материалов, обладающих существенной ортотропией.
3. При решении пространственных задач о контактном взаимодействии деталей соединений автор пренебрегает затяжкой болтов, которая на практике является эффективным средством повышения статической прочности соединений.
4. Результаты предложенных автором аналитических выражений для оценки местной податливости крепежных точек не сравниваются с результатами, используемыми на европейских и американских авиационных фирмах при проектировании соединений.
5. Отсутствуют подписи к рисункам, что затрудняет понимание работы.
6. На страницах 8, 26, 31, 116, 162, 223 допущены опiski.

Результаты исследования В.Ф.Кожевникова, изложенные в диссертации, имеют высокую значимость для развития науки о прочности соединений элементов и агрегатов авиационных конструкций. На основе аналитических и экспериментальных исследований автором разработан новый метод расчета местной жесткости дискретных соединений, необходимый для расчета распределения усилий в крепеже многоболтовых соединений. Работа по созданию такого метода требует от ученого-исследователя высокой квалификации знаний, а также кропотливого многолетнего труда. Кроме этого, следует отметить и ряд новых научных результатов, полученных соискателем. К ним относятся: установление аналитической зависимости между величинами взаимных упругих радиальных перемещений контактирующих поверхностей и возникающих при этом радиальных напряжений на поверхности контакта; получение общего аналитического решения о распределении радиальных напряжений по поверхности контакта диска со стенкой отверстия, в том числе и при наличии радиального натяга; проведены экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния болтовых соединений оптическими методами на их плоских и объемных моделях, основанные на новых методических разработках, связанных с изготовлением и нагружением моделей, а также с выполнением оптических измерений и их обработкой.

Диссертация В.Ф.Кожевникова полностью соответствует критериям, установленным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 Сентября 2013 г. №642) с изменениями и дополнениями от 28 августа 2017 г.) «О порядке присуждения ученых степеней» для диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.

Результаты диссертации и опубликованные по ее теме работы Кожевникова В.Ф. могут быть использованы в учебном процессе технических высших учебных заведений аэрокосмического профиля, в практической работе опытных конструкторских бюро Сухого, Туполева, Ильюшина.

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 ".

Отзыв ведущей организации обсужден и одобрен на заседании НТС комплекса прочности ФГУП «ЦАГИ», протокол №5 от 14 августа 2019 г.

Заместитель начальника
отделения «Статическая и тепловая
прочность» ФГУП «ЦАГИ»,
к.т.н.

Михаил Валерьевич Лимонин

Главный научный сотрудник
отделения «Статическая и тепловая
прочность» ФГУП «ЦАГИ»,
профессор, д.т.н.

Вячеслав Иванович Гришин

Подписи М.В.Лимонина,
В.И.Гришина удостоверяю.
Ученый секретарь
диссертационного совета Д 403.004.01
д.ф.-м.н., доцент



М.А.Брутян