

УДК 629.7

Анализ работы конструкции соединения типа «ухо-вилка» с применением метода конечных элементов и решением контактной задачи теории упругости

Туранов Р.А.*, Пыхалов А.А.**

*Иркутский национальный исследовательский технический университет,
ул. Лермонтова, 83, Иркутск, 664074, Россия*

**e-mail: romancheg08@mail.ru*

***e-mail: pikhalov_aa@irgups.ru*

Аннотация

В работе представлен анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) сборной конструкции соединения типа «ухо-вилка», широко применяемого в технологии самолетостроения. Исследование проводится на основе моделирования с применением метода конечных элементов (МКЭ) и решением контактной задачи твердого деформируемого тела. Разработанная расчетная модель позволяет идентифицировать значения распределения напряжений в представленном типе соединения при работе и сборке наиболее ответственного места летательного аппарата - "крыло-фюзеляж". Особенностью предложенного подхода моделирования является применение решения контактной задачи, позволяющей, дополнительно, исследовать условия сопряжения в стыках деталей узла, тем самым, выявлять концентрации (распределение) напряжений при работе и сборке узла. Таким образом, увеличивается степень информативности о работе соединения, подтверждая и уточняя эмпирические методы решений этих задач. Предложенный

подход анализа НДС конечно-элементных моделей значительно снижает прямые материальные затраты на использование в проектировании реальных прототипов изделия, временные затраты, а главное, повышает уровень информации о работоспособности изделия, тем самым, способствует повышению его надежности и долговечности.

Ключевые слова: самолет, соединение ухо-вилка, конечные элементы, напряжённо-деформированное состояние.

Соединение крыла с фюзеляжем является одним из наиболее ответственных узлов любого самолета, где, в большинстве случаев, крыло является основной несущей поверхностью, а фюзеляж грузом. С усложнением конструкции крыла, например кессонного типа, появилась актуальная задача анализа элементов его крепления с фюзеляжем с целью получения наиболее выгодной по массе и надежности их конструкции. Данная задача традиционно решалась с применением эмпирических методов, это решение может быть существенно расширено с применением высокоэффективных теоретических методов, позволяющих анализировать, как напряженно-деформированное состояние (НДС) деталей, так и условия их сопряжения.

Результаты экспериментальных исследований, представленных в работах Э.В. Рыжова [7], показывают, что в сборной конструкции, при её нагружении, из общей величины деформаций, 80% составляют их величины в стыках деталей и только 20%

это деформации самих деталей. Таким образом, работоспособность сборной конструкции, в отличие от её монолитного аналога, определяется как прочностью деталей, так и условиями их сопряжения (компоновкой), направленными на обеспечение минимального уровня концентрации напряжений в стыковочных узлах конструкции самолета.

При эмпирическом подходе, при решении конструкторских задач данного типа, существует необходимость создания большого количества испытательных натуральных образцов, в результате общие и временные затраты достаточно велики. С появлением современных расчетных технологий на основе МКЭ появились и новые расчетные методики, позволяющие наиболее подробно изучать вопросы о восприятии механических нагрузок в элементах конструкции самолета, в том числе в элементах конструкции соединения крыла самолета с фюзеляжем, главным узлом которых является конструкция типа «ухо-вилка», в котором, при определенных условиях работы изделия (самолета), в представленных конструкциях, поле напряжений приобретает неравномерность высокого градиента.

Таким образом, поставленная задача актуальна и её реализация возможна с применением метода конечных элементов и использованием решения контактной задачи твердого деформируемого тела, путем построения конечно-элементной модели и выполнения контактного сопряжения между элементами узла (вилка, ухо, болт, гайка).

Основой проектирования является эмпирический метод расчета напряженно-деформированного состояния неподвижного разъемного соединения типа «Ухо-вилка» (рис. 1.), который в данной работе используется в качестве поверочного.

Напряжения в сечении соединения А-А изменяются неравномерно. Они достигают наибольшего значения на краях отверстия проушины: $\sigma_{\max} = 3\sigma_{cp}$, где $\sigma_{cp} = P/(ab)$; P - действующая сила; a - толщина проушины; b - ширина проушины.

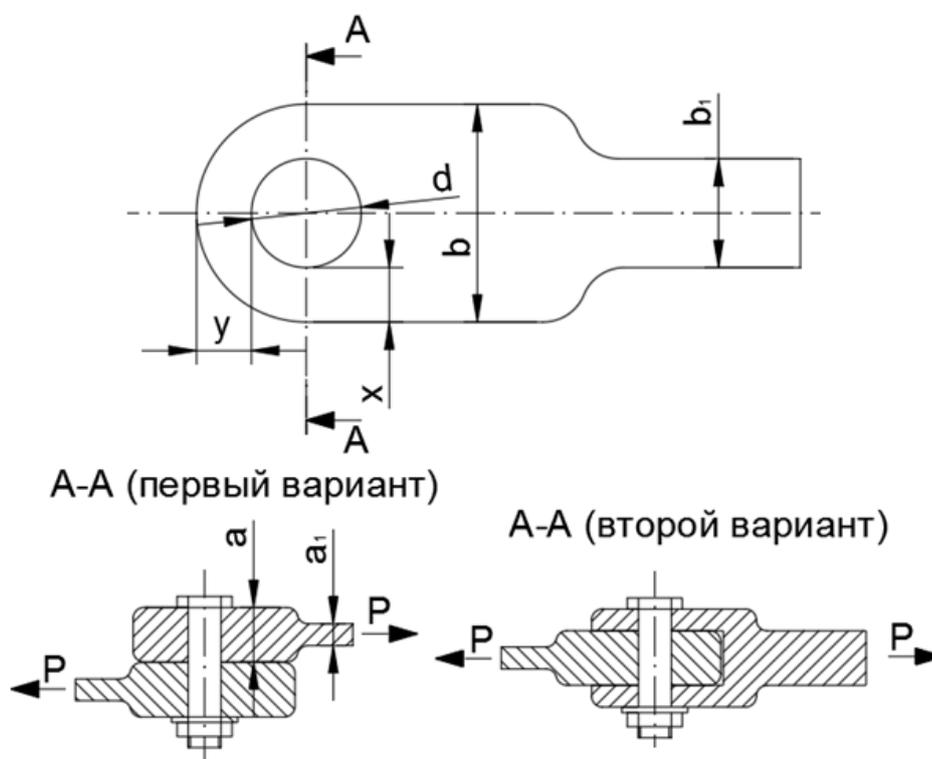


Рис. 1 - Вильчатое соединение

Статический расчет по эмпирическому методу представлен в работе [3]. Соединение «Ухо-вилка» (рис. 1.), с двумя поверхностями среза болта (второй вариант сечения А-А, см. рис. 1.), находится под воздействием растягивающей силы $P=10000\text{ кгс}$, вызывающей разрыв проушины. Материалом всех элементов соединения является сталь 30ХГСА.

Таблица 1 – Параметры необходимые для построения расчетной конечно – элементной модели

Наименование параметра	Формула	Полученное значение
Площадь среза	$F = \frac{P}{\tau_B m}$	84 мм ²
Диаметр болта	$d = \sqrt{\frac{4P}{\tau_B m \pi}}$	11 мм
Толщина проушины	$a = \frac{P}{d \mu \sigma_B}$	7 мм
Ширина проушины b	значение b/d в пределах 2...3	25 мм
Расстояние от болта до края проушины x	$x = \frac{b-d}{2}$	7 мм
Расстояние от болта до края проушины x	$y = x(0,208 \frac{b}{d} - 1,177) + \frac{P}{0,96a \sigma_B}$	7 мм

Из вычисленных значений размеров получено вильчатое соединение (рис. 2).

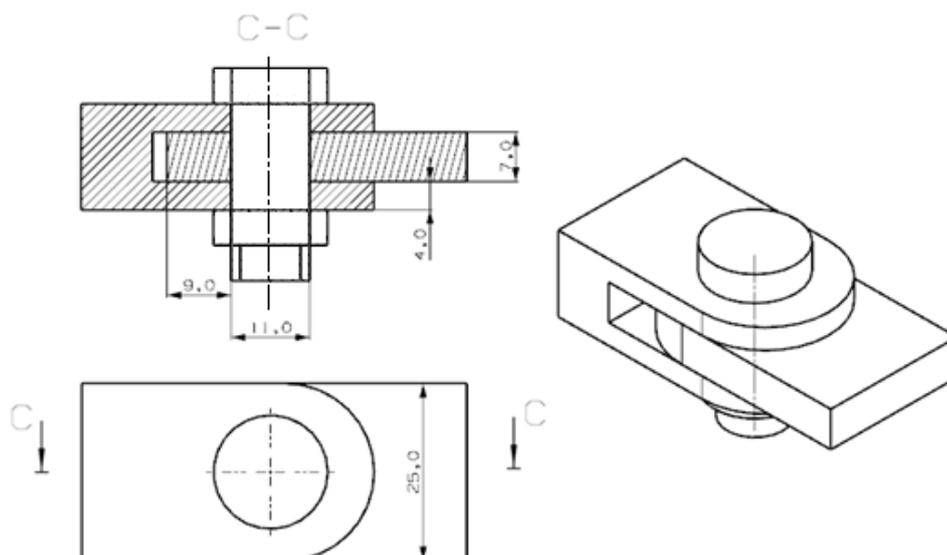


Рис. 2 - Проектирование соединения уxo-вилка

По представленным геометрическим данным, используя результаты поверочного эмпирического метода расчета [3], проводится анализ на основе МКЭ с решением контактной задачи теории упругости.

Геометрическая модель (рис. 3) деталей и элементов соединения построена в системе NX для последующего использования в КЭ модели. Центральная часть болта и другие цилиндрические части параметризованы на специальные дуги, по которым проведена генерация сетки к конечно-элементной модели.

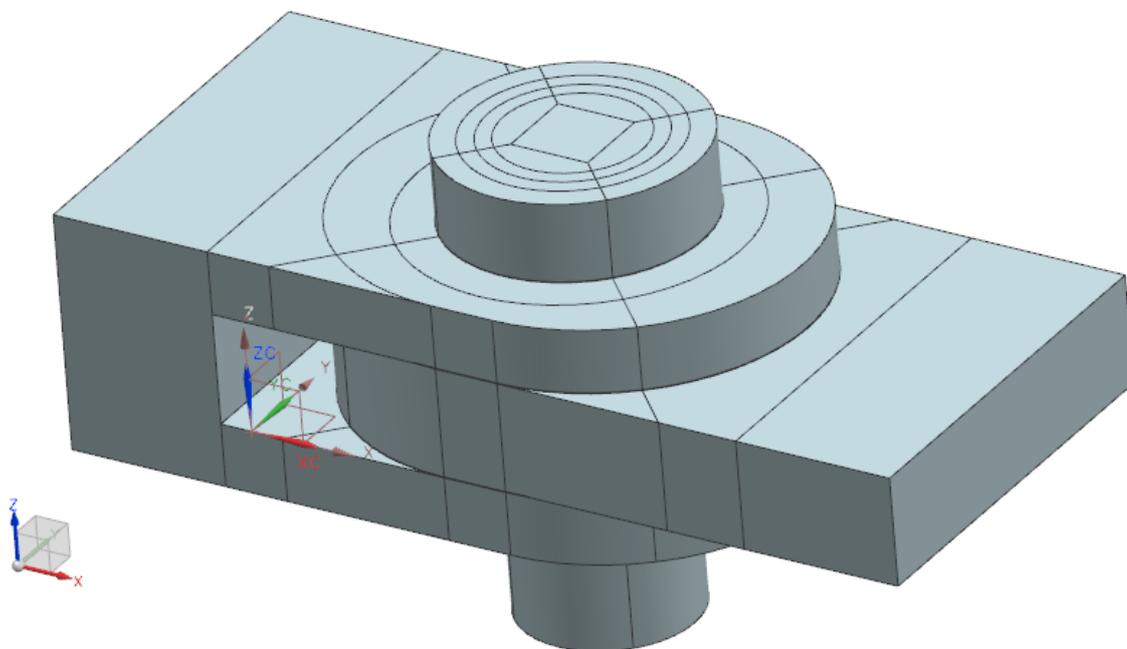


Рис. 3 – Твёрдотельная геометрическая модель соединения ухо-вилка

Геометрическая модель была экспортирована в систему препроцессор Patran, для последующего анализа КЭ модели. Детали соединения и крепежные элементы разбили на конечные элементы типа HEX, а также небольшое количество типа Wedge [6] (рис. 4).

Для анализа НДС соединения, проводимого с решением контактной задачи твердого деформируемого тела, используется специальный контактный конечный элемент (типа Gap), устанавливаемый между узлами контактирующих поверхностей КЭ модели. Для болта эти поверхности расположены в его осевом и радиальном направлении. Для соединения гайки с болтом, используется Glue-контакт.

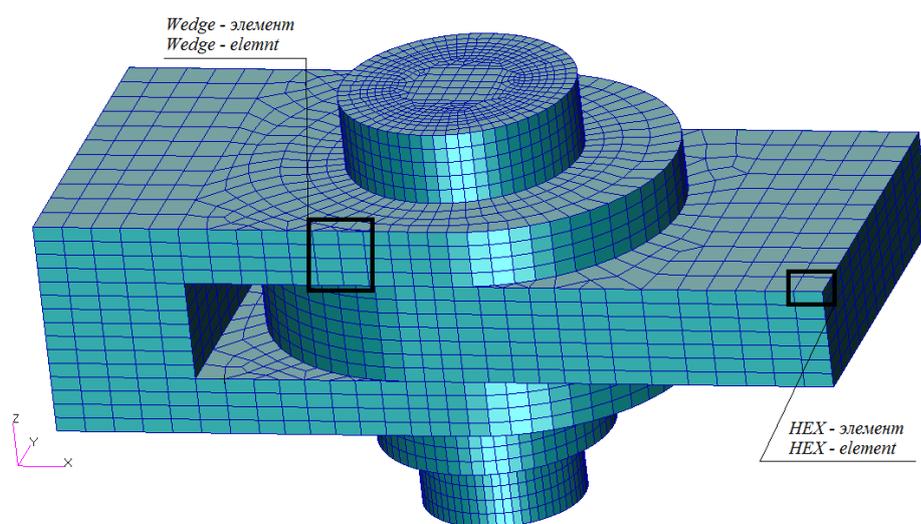


Рис. 4 - Конечно-элементная модель соединения ухо-вилка

В рассматриваемой КЭ модели между всеми контактирующими поверхностями и по всем направлениям используется нулевая посадка. В целом условия сопряжения можно изменять. Данная (нулевая) посадка выбрана для сравнения значений КЭ решения с эмпирическим решением задачи по Войту [3].

Граничные условия по перемещениям [9] установлены на торце вилки, по осям X, Y и Z (рис. 5.). Данная схема выбрана для того, чтобы реакции от граничных узлов были максимально приближены к реальным условиям. Внешняя нагрузка на

модель [9] выполнена в виде приложения расчетного усилия в 10000 кгс к торцу проушины в виде силы P (рис. 5).

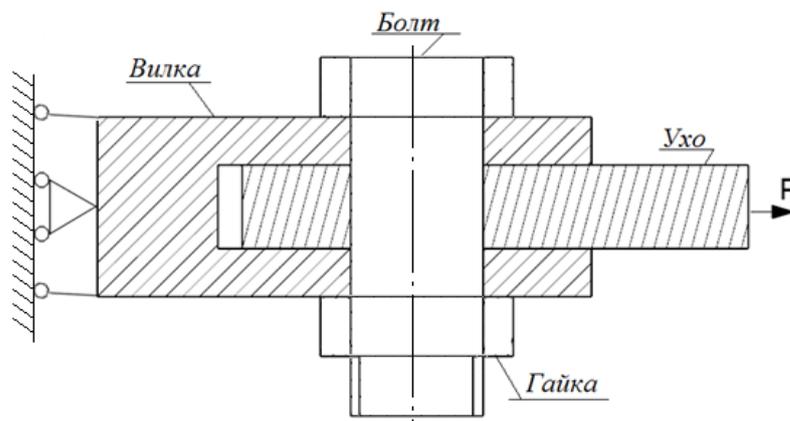


Рис. 5 - Схема нагружения и граничных условий для соединения «Ухо-Вилка»

После построение КЭ модели, проведен анализ НДС представленной конструкции в программном комплексе MSC.Nastran и получена картина распределения напряжений рассматриваемой сборной конструкции (рис. 6).

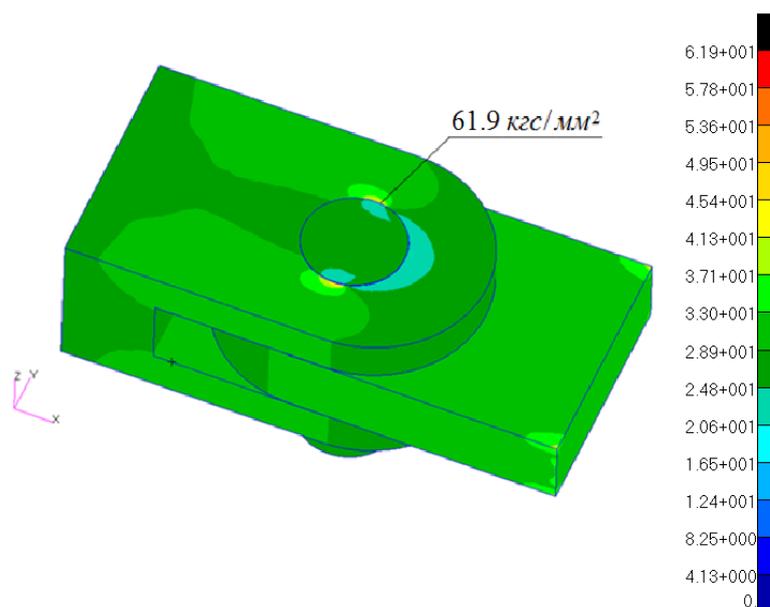


Рис. 6 - Картина распределения эквивалентных напряжений в соединении ухо-вилка

Главными сечениями с точки зрения величин напряжений являются 2 сечения относительно оси болта, поперечное (рис. 7) и продольное (рис. 8).

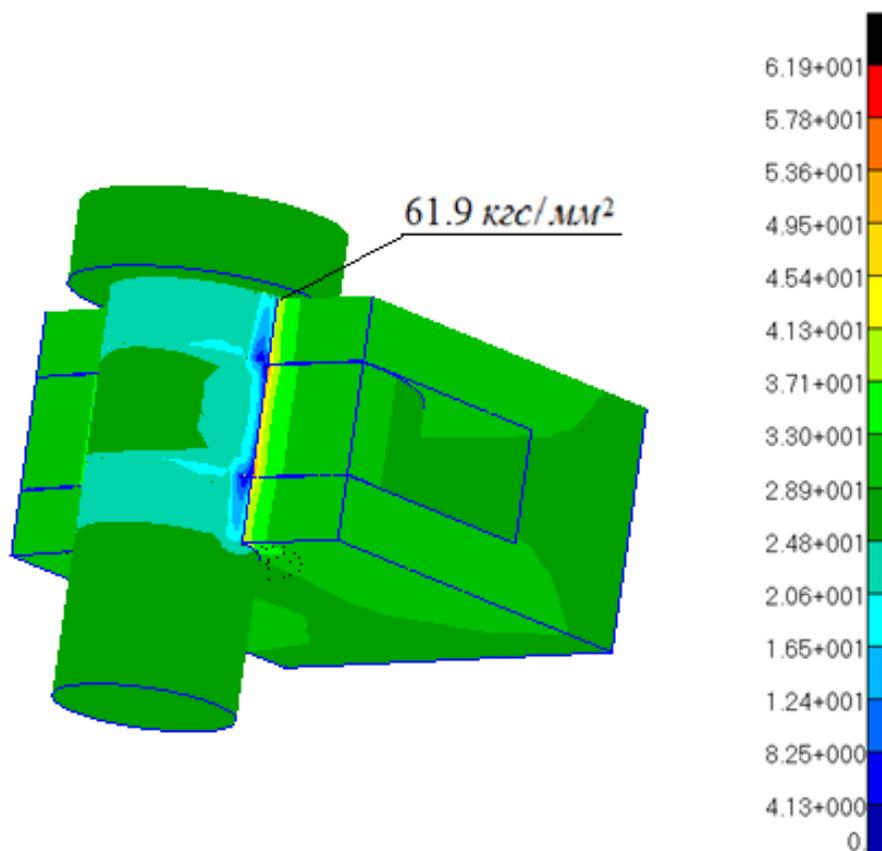


Рис. 7 - Картина распределения эквивалентных напряжений
в поперечном сечении соединения ухо-вилка

Полученные результаты анализа, в виде напряжений, показывают, что максимальное их значение равно $\sigma = 61,9 \text{ кгс} / \text{мм}^2$. При расчете эмпирическим методом (таблица 1) среднее значение напряжения равно: $\sigma_{\text{cp}} = P / (ab) = 10000 / (7 \cdot 25) = 57,1 \text{ кгс} / \text{мм}^2$, тогда погрешность составляет:

$$\left| \frac{\sigma_{\text{cp}} - \sigma}{\sigma_{\text{cp}}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{57,1 - 61,9}{57,1} \right| \cdot 100\% = 8,41\%.$$

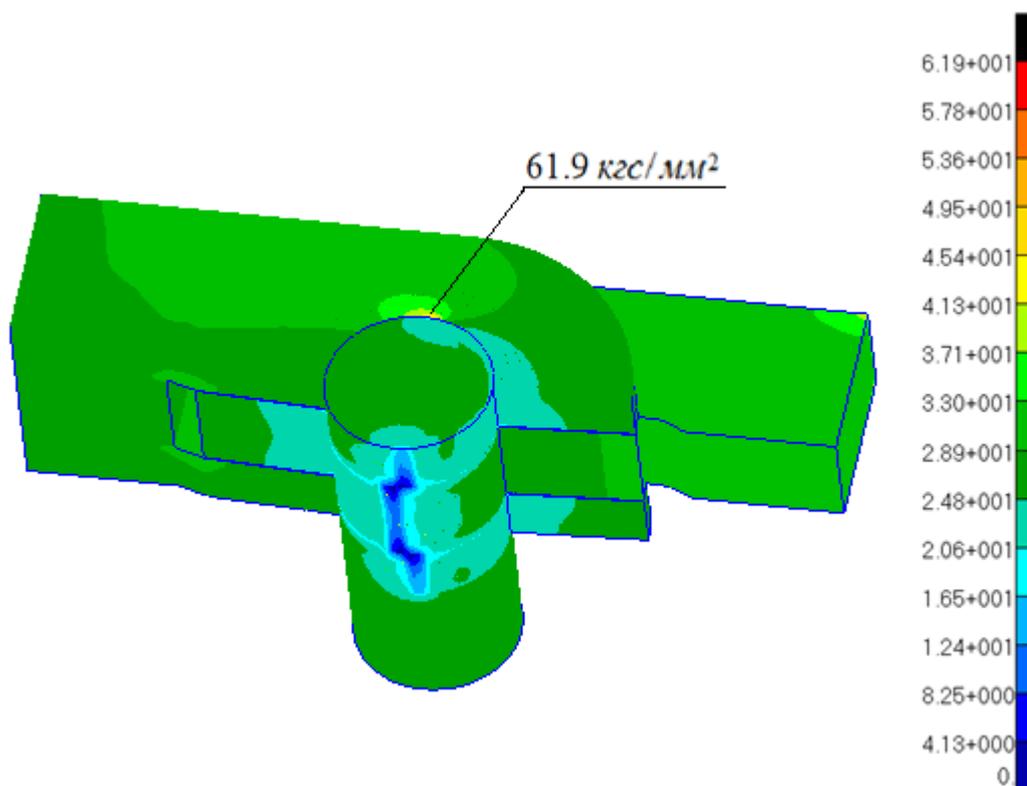


Рис. 8 - Картина распределения эквивалентных напряжений

В продольном сечении соединения ухо-вилка

Получено НДС сборной конструкции соединения типа «Ухо-Вилка», которое позволяет судить о характере распределения напряжений между элементами.

Выводы

В результате проведенного анализа получен проектный вариант методики расчета узла «Ухо-Вилка», который позволяет судить о характере поведения силовых элементов летательных аппаратов на этапе проектирования, что позволит снизить прямые и временные затраты.

Анализ напряжений в узле крепления конструкции «Ухо-Вилка» показывает, что максимальные их значения наблюдаются на поверхностях отверстий "Уха" и "Вилки", в местах их контактного взаимодействия с болтом.

Погрешность полученных расчетов МКЭ с использованием решения контактной задачи и расчетов, полученных эмпирическим методом, составляет 8%. Это объясняется тем, что эмпирический метод использует осреднение напряжений в сечении деформируемых деталей "Уха" и "Вилки". Решение контактной задачи в этом случае позволяет увидеть полную картину распределения напряжений в рассматриваемом соединении.

Библиографический список

1. Александров В.М., Чебаков М.И. Аналитические методы в контактных задачах теории упругости. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 304 с.
2. Астахов М.Ф., Каравальцев А.В. и др. Справочная книга по расчету самолета на прочность. – М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1954. – 648 с.
3. Войт Е.С., А.И. Ендогур и др. Проектирование конструкций самолетов. – М.: Машиностроение, 1987. – 416 с.
4. Егер С.М., Мишин В.Ф., Лисейцев Н.К. и др. Проектирование самолетов. – М.: Машиностроение, 1983. – 616 с.

5. Майнсков В.Н., Глушков С.В., Савельев Л.М. и др. Расчет и проектирование проушин. - Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева, 2011. – 28 с.
6. Ендогур А.И. Проектирование авиационных конструкций. – М.: МАИ-ПРИНТ, 2009. – 540 с.
7. Рудаков К.Н. FEMAP 10.2.0. Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций. – Киев: КПИ, 2011. – 317 с.
8. Шульженко М.Н. Конструкция самолетов. – М.: Машиностроение, 1971. - 416 с.
9. Рыжов Э.В. Контактная жесткость деталей машин. – М.: Машиностроение, 1966. - 196 с.
10. Тимошенко С.П., Гудьер Д. Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 576 с.
11. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Изд-во МИР, 1979. – 393 с.
12. Сироткин О.С., Гришин В.И., Литвинов В.Б. Проектирование, расчет и технология соединений авиационной техники. – М.: Машиностроение, 2006. - 331 с.
13. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRANforWindows. – М.: ДМК Пресс, 2003. – 447 с.
14. Образцов И.Ф., Булычев Л.А., Васильев В.В. и др. Строительная механика летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1986. – 536 с.
15. Русланцев А.Н., Думанский А.М., Алимов М.А. Модель напряженно-деформированного состояния криволинейной слоистой композитной балки // Труды МАИ. 2017. № 96. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=85659>

16. Попов В.В., Сорокин Ф.Д., Иванников В.В. Разработка конечного элемента гибкого стержня с отдельным хранением накопленных и дополнительных поворотов для моделирования больших перемещений элементов конструкции летательных аппаратов // Труды МАИ. 2017. № 92. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=76832>
17. Горшков А.Г., Тарлаковский Д.В. Динамические контактные задачи с подвижными границами. – М.: Наука. Физматлит, 1995. – 351 с.
18. Комаров В.А., Кузнецов А.С., Лаптева М.Ю. Оценка эффекта учета деформаций крыла на ранних стадиях проектирования // Труды МАИ. 2011. № 43. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=24759>
19. Авдонин А.С., Фигуровский В.И. Расчет на прочность летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1985. – 439 с.
20. Хазанов Х.С., Савельев Л.М. Метод конечных элементов в приложении к задачам строительной механики и теории упругости. - Куйбышев: КуАИ, 1975. – 128 с.

Статья поступила в редакцию 18.12.2019