

АНАЛИЗ НДС КАРКАССИРОВАННОЙ ПАНЕЛИ ФЮЗЕЛЯЖА С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ НЕРАЗЪЁМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Б.В. Ильченко, В.Н. Шлянников
ilchenkoboris@gmail.com

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Казанского научного центра Российской академии наук

Ключевые слова: панель фюзеляжа, двухосное нагружение, неразъёмное соединение, когезионная зона, метод конечных элементов

Аннотация

Проведен расчет типовой криволинейной панели фюзеляжа аэробуса с иллюминаторами, продольным и поперечным силовым набором. Рассмотрены три типа неразъёмных соединений обшивки с подкрепляющими элементами. В разработанные расчетные схемы МКЭ панели введены специальные области для моделирования заклепочных, клеезаклепочных и когезионных неразъёмных соединений. Все расчеты выполнены для условий наддува фюзеляжа внутренним давлением. Представлена оценка влияния свойств соединения обшивки со стрингерами при двухосном нагружении на общее и локальное напряженно-деформированное состояние.

Введение

Напряженно-деформированное состояние элементов планера ЛА с подкрепляющими элементами имеет свои особенности, связанные с конструктивным расположением силового набора и типом неразъёмного соединения обшивки с элементами каркаса. Для современных авиационных конструкций актуальной является задача наиболее рационального выбора типа неразъёмного соединения исходя из противоречивых требований весовой эффективности, надежности и ресурса [1]. Новые свойства материалов соединений и современные технологии позволяют решать эти задачи, составляющими которых являются вопросы оптимизации по параметрам напряженно-деформированного состояния. При этом одна из основных позиций прочностного расчета относится к наиболее полному воспроизведению конструктивных особенностей соединений и эксплуатационных условий нагружения.

Такие элементы конструкций планера летательного аппарата как панели герметических фюзеляжей и многие другие подвержены в эксплуатации действию двухосных статических и переменных нагрузок различной интенсивности. Предметом настоящей работы являлся сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния каркасированной панели широкофюзеляжного

аэробуса от действия внутреннего наддува для различных свойств неразъемного соединения элементов силового набора. Рассмотрены заклепочные, клеезаклепочные и когезионные типы соединений.

Объект исследования

Объектом исследований являлась панель фюзеляжа с иллюминаторами и с продольным и поперечным силовым набором. Прототипом силового набора панели фюзеляжа послужил фрагмент конструкции планера самолета А-330 [1]. На рис.1 приведена модель панели фюзеляжа, содержащая пять стрингеров и четыре шпангоута соединенных с обшивкой посредством заклепочного соединения. Рис. 2 иллюстрирует конечно-элементную детализацию принятого твердотельного моделирования области пересечения шпангоутов и стрингеров, а также заклепочного соединения.

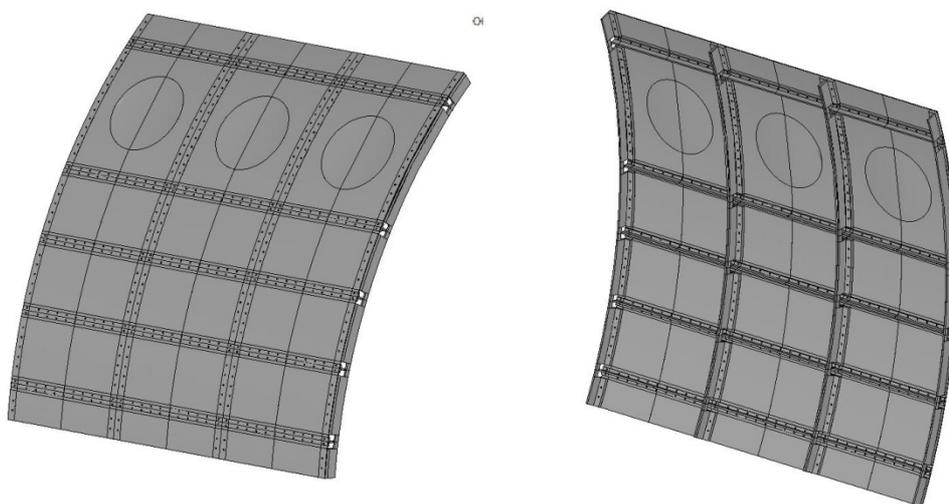


Рис.1. Модель панели фюзеляжа

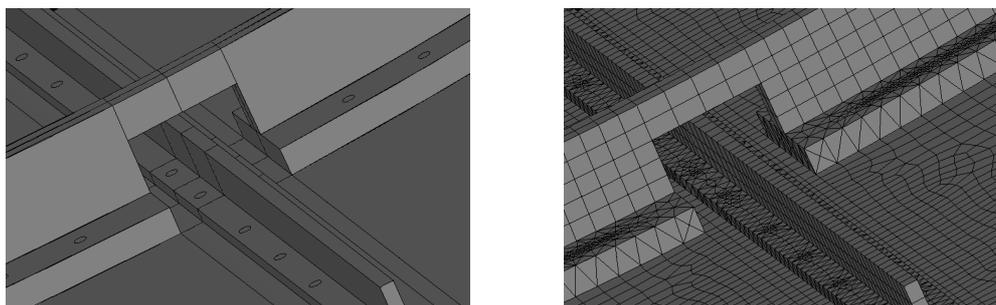


Рис.2. Пересечение силового набора и конечно-элементная модель соединения

В качестве основного материала всех элементов конструкции использован алюминиевый сплав Д16Т со стандартными механическими свойствами $\sigma_0 = 410 \text{ МПа}$, $E = 72 \text{ ГПа}$, $\bar{G}_T = 1120$, $\nu = 0.3$. В настоящей работе рассмотрены три типа соединения обшивки со стрингером. Первый тип представляет собой монолитное соединение обшивки со стрингерами и шпангоутами с моделированием заклёпочного соединения элементов. На рис.3 показана схема моделирования заклёпочного соединения.

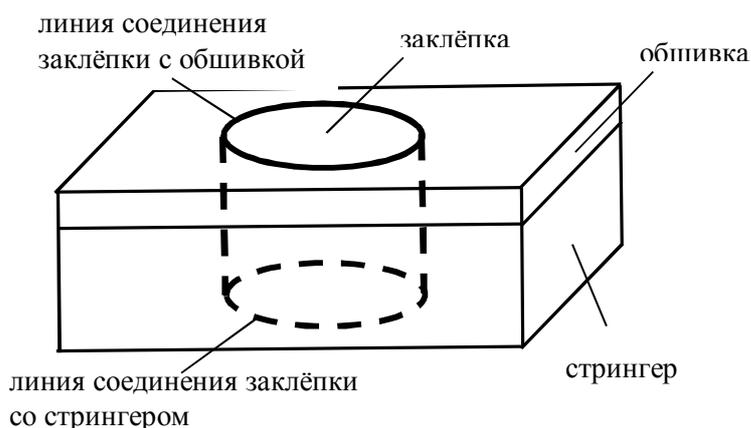


Рис.3. Схема моделирования заклёпочного соединения

Тело заклёпки соединяется с обшивкой по общей линии с внешней стороны обшивки и со стрингером по общей линии с внешней стороны стрингера. Второй тип соединения – клеезаклепочный, который предполагает введение между обшивкой, стрингерами и шпангоутами специального промежуточного слоя толщиной $t=0.7$ мм, наделенного свойствами клея ($\sigma_0 = 50 \text{ МПа}$, $E = 25 \text{ ГПа}$, $\bar{G}_T = 50$). Пакет соединения силовой набор – клеевой слой – обшивка в «разобранном» состоянии схематично показан на рис.4.

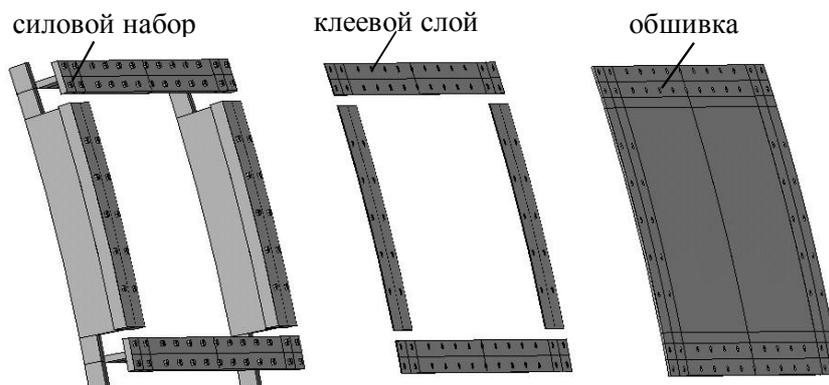


Рис.4. Схема введения промежуточного клеевого слоя

При этом также сохраняется описанное выше заклёпочное соединение обшивки с силовым набором. Третий тип соединения – это комбинация когезионного и заклёпочного соединения обшивки, стрингеров и шпангоутов.

При формировании расчётных схем использовались квадратичные объёмные конечные элементы. При выполнении численных исследований в нелинейной постановке задавалось эксплуатационное нагружение панели фюзеляжа - внутренний наддув с величиной давления $p = 0.1$ МПа.

Описание когезионной модели сцепления

Разрушение или расслоение вдоль поверхности раздела между средами играет важную роль в ограничении прочности и пластичности многофазных материалов, таких как композитные структуры. Поэтому за последние годы проведён значительный объём исследований процессов разрушения поверхностей раздела. Расслоение поверхности раздела можно моделировать с помощью традиционных методов механики разрушения, таких как методика «освобождения» узлов. Как альтернативу, можно использовать методы, которые напрямую вводят механизм разрушения, задавая смягчающие соотношения между силой сцепления и разделением, в которые в свою очередь вводится критическая энергия разрушения, требуемая для разрушения поверхности раздела [2-10]. Такой подход предполагает использование модели зоны сцепления (когезионной зоны). Общая концепция модели зоны сцепления предложена Баренблаттом [11], который для устранения нефизической особенности в линейной упругой механике разрушения ввел в трещину когезионную зону в которой происходит деградация материала. Поверхности раздела могут быть представлены с помощью специального набора элементов поверхности раздела или контактных элементов, а модель зоны сцепления может быть использована для описания конституционного поведения поверхности раздела.

Для конечных элементов расстояние между поверхностями раздела определяется как скачок перемещений δ , то есть:

$$\delta = u^{TOP} - u^{БОТТОМ} = \text{расстояние между поверхностями раздела.}$$

Отметим, что определение разделения базируется на локальной системе координат (рис.5).

Нормаль к поверхности обозначается как локальное направление n , и локальное тангенциальное направление обозначается как t .

Таким образом:

$$\delta_n = n \cdot \delta = \text{нормальное расстояние между поверхностями раздела}$$

$$\delta_t = t \cdot \delta = \text{тангенциальное расстояние между поверхностями раздела}$$

В настоящей работе использована экспоненциальная форма когезионной модели сцепления, первоначально предложенная Ху и Ниделманом [12]. Данная модель использует потенциал поверхности в следующем виде:

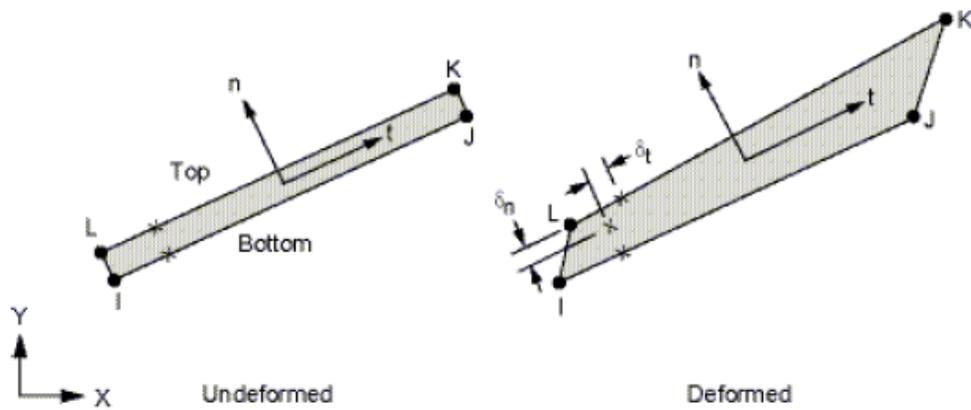


Рис. 5. Системы координат на поверхности раздела

$$\phi(\delta) = e\sigma_{\max}\bar{\delta}_n \left[1 - (1 + \Delta_n)\exp(-\Delta_n)\exp(-\Delta_t^2) \right] \quad (1)$$

где $\phi(\delta)$ - потенциал поверхности, $e = 2,7182818$, σ_{\max} - максимальная нормальная сила сцепления поверхности раздела, $\bar{\delta}_n$ - нормальное расстояние между поверхностями раздела, когда максимальная нормальная сила сцепления достигается при $\delta_t = 0$, $\bar{\delta}_t$ - тангенциальное расстояние между поверхностями раздела, когда максимальное сдвиговое усилие достигается при

$$\bar{\delta}_t = \frac{\sqrt{2}}{2}\bar{\delta}_n, \quad \Delta_n = \frac{\delta_n}{\bar{\delta}_n}, \quad \Delta_t = \frac{\delta_t}{\bar{\delta}_t}.$$

Сила сцепления в общем виде определяется как

$$T = \frac{\partial\phi(\delta)}{\partial\delta} \quad (2)$$

Из уравнения (2) можно получить нормальную T_n и касательную T_t силы сцепления поверхности раздела:

$$T_n = \frac{\partial\phi(\delta)}{\partial\delta_n} \quad T_n = e\sigma_{\max}\Delta_n e^{-\Delta_n} e^{-\Delta_t^2} \quad (3)$$

$$T_t = \frac{\partial\phi(\delta)}{\partial\delta_t} \quad T_t = e\sigma_{\max}\frac{\bar{\delta}_n}{\bar{\delta}_t}\Delta_t(1 + \Delta_n)e^{-\Delta_n} e^{-\Delta_t^2} \quad (4)$$

Нормальная составляющая работы формулируется следующим образом:

$$\phi_n = e\sigma_{\max}\bar{\delta}_n, \quad (5)$$

тогда как сдвиговая составляющая работы разрушения, из условия подобия нормальной компоненте ϕ_n , определяется как:

$$\phi_t = \sqrt{2e}\tau_{\max}\bar{\delta}_t. \quad (6)$$

Для трёхмерного напряжённого состояния сдвиговые или тангенциальные перемещения и силы сцепления имеют две компоненты δ_{t1} и δ_{t2} в тангенциальной плоскости:

$$\delta_t = \sqrt{\delta_{t1}^2 + \delta_{t2}^2} \quad (7)$$

В этом случае силы сцепления определяются как:

$$T_{t1} = \frac{\partial\phi(\delta)}{\partial\delta_{t1}} \quad T_{t2} = \frac{\partial\phi(\delta)}{\partial\delta_{t2}} \quad (8)$$

При формировании расчетной схемы, зона раздела, описывающая когезионное соединение обшивки со стрингерами или шпангоутами, моделировалась специальными когезионными объемными квадратичными элементами. Данные когезионные конечные элементы наделялись следующими свойствами [13]:

$\sigma_{\max} = 25$ Мпа - максимальная нормальная сила сцепления поверхности раздела,

$\bar{\delta}_n = 0.004$ мм - нормальное смещение перпендикулярно поверхности раздела, когда максимальная нормальная сила сцепления достигается при $\delta_t = 0$,

$\bar{\delta}_t = 1000$ мм - сдвиговое смещение, когда максимальное сдвиговое усилие достигается при $\delta_t = \frac{\sqrt{2}}{2}\bar{\delta}_t$.

Анализ влияния типов неразъёмных соединений на НДС каркасированной панели фюзеляжа

Расчёты панели фюзеляжа при внутреннем наддуве проведены для трёх типов неразъёмных соединений обшивки с подкрепляющими элементами. В первом варианте моделировалось заклёпочное соединение элементов. Распределение интенсивности напряжений по Мизесу σ_i в обшивке и силовом наборе для данного расчётного случая приведено на рис. 6а.

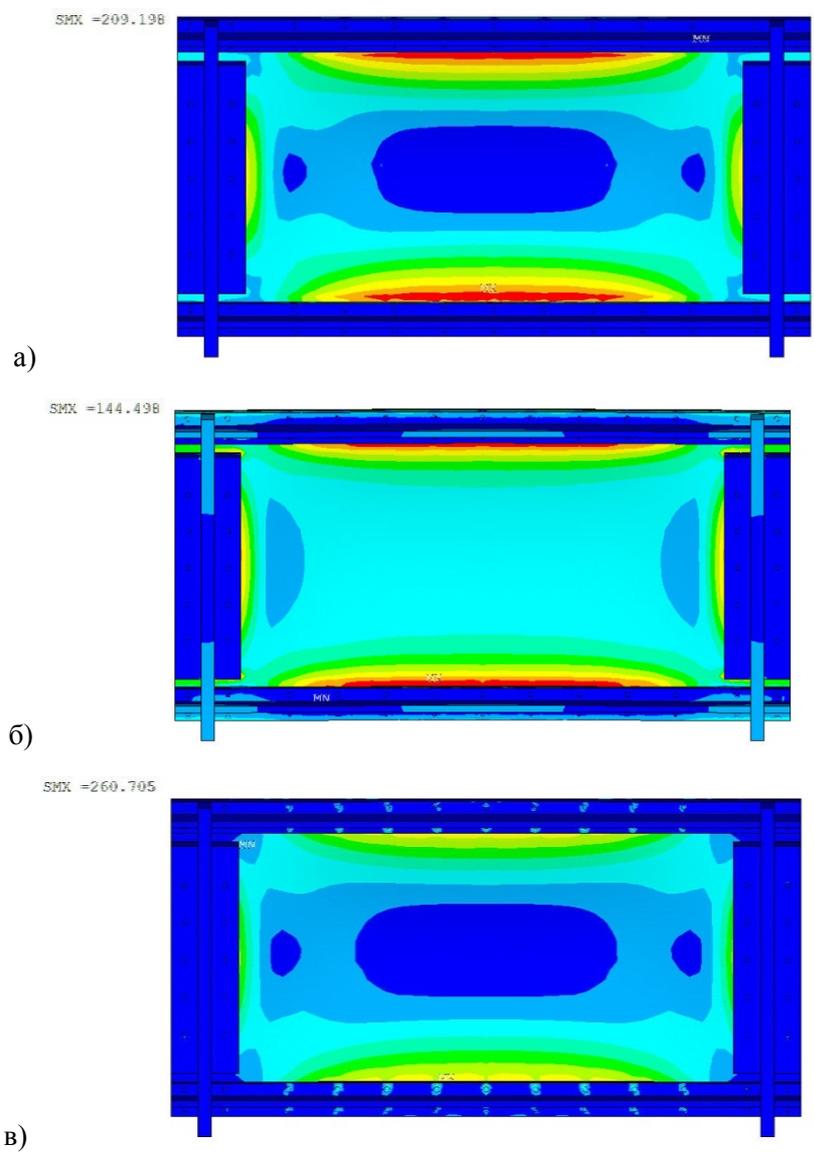


Рис. 6. Интенсивность напряжений по Мизесу σ_i

Максимальные напряжения действуют с внутренней стороны конструкции в зонах соединения обшивки и стрингеров и составляют 209 МПа. В местах присоединения обшивки к шпангоутам наблюдаются локальные максимумы напряжений. Имеет место существенное различие в распределении полей напряжений на внутренней и внешней поверхностях конструкции. Если с внутренней стороны концентраторами напряжений являются зоны соединения обшивки и силового набора, то с наружной стороны экстремальные напряжения действуют в центральной части обшивки и составляют 139 Мпа. На соответствующей внутренней стороне обшивки напряжения снижаются до 3 Мпа. Заклёпочное соединения не вносит заметного влияния в характер распределения

напряжений. Напряжения в заклёпках в местах соединения обшивки и шпангоута составляют 23-47 МПа. Окружные напряжения σ_θ распределяются подобно интенсивности напряжений по Мизесу, изменяются лишь абсолютные значения напряжений. Так максимальное значение σ_θ в зоне соединения обшивки и стрингера составляет 249 МПа. В центральной части обшивки, на её наружной поверхности реализуется 147 МПа, на внутренней - 4 МПа. Таким образом, все компоненты напряжений демонстрируют подобное поведение. Максимальные значения наблюдаются в зонах соединения силового набора и обшивки. Внешняя часть центральной зоны обшивки, удалённой от силового набора растянута, внутренняя – практически не нагружена или сжата.

Характер распределения полей компонент напряжений для второго рассматриваемого типа соединения – клеезаклёпочного, существенно не изменился по сравнению с заклёпочным соединением (рис 6,б). При этом значительно снизились максимальные значения напряжений. Величина интенсивности напряжений по Мизесу в зонах соединения обшивки и стрингеров уменьшилась до 144 МПа. Такая «релаксация» напряжений связана со снижением жесткости соединения обшивки и силового набора, которое в свою очередь обусловлено введением клеевого слоя, механические свойства которого практически на порядок отличаются от свойств основного материала. Интенсивность действующих напряжений в заклёпках в местах соединения обшивки и шпангоута увеличилась до 46-64 МПа. Сравнение экстремальных значений напряжений, действующих на внутренней и наружной сторонах конструкции, приведены в таблице 1.

В третьем расчётном случае когезионные конечные элементы моделировали слой клея со своими специфическими свойствами. Характер распределения полей напряжений (рис. 6,в) не изменился по сравнению с рассмотренными выше способами соединения обшивки и силового набора. Увеличились максимальные напряжения на внешней поверхности панели фюзеляжа, значения которых приведены в таблице 1. Введение когезионного слоя привело к тому, что заклёпочное соединение стало более существенно влиять на картину распределения напряжений. Напряжения в заклёпках шпангоута выросли до 58-87 МПа. Свойства когезионного слоя, определённые экспериментально для реального соединения обшивки с силовым набором, позволят получить более достоверную картину распределения напряжений и деформаций в конструкции.

Анализ общего напряженно-деформированного состояния в регулярных зонах для трёх вариантов соединения обшивки и силового набора показал, что максимальные напряжения всегда действуют с внутренней стороны конструкции в зонах соединения обшивки и стрингеров. Имеет место существенное различие в распределении полей напряжений на внутренней и внешней поверхностях конструкции. С внутренней стороны концентраторами напряжений являются зоны соединения обшивки и силового набора, с наружной стороны экстремальные напряжения действуют в центральной части обшивки, максимальные - с наружной стороны (растянутой), минимальные - с внутренней стороны (ненагруженной или сжатой). Введение клеевого слоя приводит к уменьшению напряжений, связанного со снижением жесткости соединения обшивки и силового набора. Моделирование когезионного слоя позволяет оценить влияние заклёпочного соединения на картину распределения напряжений.

Таблица 1. Максимальные значения компонент напряжений действующих в панели фюзеляжа

	заклёпочное соединение элементов	клеезаклёпочное соединение элементов	заклёпочное и когезионное соединение элементов
	внутренняя поверхность		
интенсивность напряжений по Мизесу σ_i , МПа	209	144	261
окружные напряжения σ_θ , МПа	249	179	244
	внешняя поверхность		
интенсивность напряжений по Мизесу σ_i , МПа	139	76	138
окружные напряжения σ_θ , МПа	157	87	158

Выводы

Разработаны расчётные схемы и вычислительная процедура моделирования заклепочных, клеезаклепочных и когезионных соединений элементов силового набора каркасированной панели фюзеляжа при двухосном нагружении. По параметрам напряженно-деформированного состояния проведена сравнительная оценка трех типов неразъемных соединений при нагружении панели фюзеляжа внутренним давлением. Получено, что введение клеевого слоя приводит к уменьшению напряжений, которое обусловлено снижением жесткости соединения обшивки и силового набора. Минимальные значения напряжений соответствуют клеезаклепочному соединению. По толщине стенки криволинейной обшивки имеет место градиент параметров НДС, который зависит от типа неразъемного соединения. Вариация в промежуточных слоях соединения свойств клея или когезионной поверхности раздела позволяет оптимизировать локальное НДС каркасированной конструкции. При моделировании композиционных материалов с использованием концепция когезионной зоны важной задачей является идентификация параметров закона сцепления.

Поступила 25.02.2015г.

Литература

1. R.Citarella, A.Apicella, Advanced design concepts and maintenance by integrated risk evaluation for aerostructures // SDHM, 2006, 3:183-196.
2. G. Maier, M. Bocciarelli, G. Bolzon and R. Fedele: Inverse analyses in fracture mechanics. Int. J. Fracture. 2006, Vol. 138, 47-73.

3. A. Needleman, Continuum model for void nucleation by decohesion debonding, J. Appl. Mech. 1987, Vol. 54, 525-531.
4. J. Koplik and A. Needleman, Int. J. Solids Struct. Void growth and coalescence in porous plastic solids. 1988, Vol. 24, 835-853.
5. R. Estevez, M.G.A. Tijssens and E. van der Giessen, Thermo-mechanical analysis of glassy polymers fracture J. Mech. Phys. Solids. 2000, Vol. 48, 2585-2617.
6. A. Corigliano and M. Ricci, Rate-dependent interface models: formulation and numerical applications Int. J Solids Struct. 2001, Vol. 38, 547-576.
7. P. Rahul-Kumar, A. Jagota, S.J. Bennison, S. Saigal and S. Muralidhar, Polymer Interfacial Fracture Simulations Using Cohesive Elements. 1999, Acta Mater. Vol. 47, 4161.
8. D.H. Allen and C.R. Searcy: Int. J. Fract. Stress Waves and Cohesive Failure in a Finite Strip Subjected to Transient Loading. 2001, Vol. 107, 159-176.
9. B. Yang and K. Ravi-Chandar: Int. J. Fract. A single-domain dual-boundary-element formulation incorporating a cohesive zone model for elastostatic cracks. 1998, Vol. 93, p. 115-144.
10. B. Yang, S. Mall and K. Ravi-Chandar, A cohesive zone model for fatigue crack growth in quasibrittle materials. 2001, Int. J. Solids. Struct. Vol. 38), p.3927.
11. G.I. Barenblatt, On equilibrium cracks formed in brittle fracture. General concepts and hypotheses. Axisymmetric cracks. Appl. Math. Mech. 1959, Vol. 23, 3, 622-6363.
12. X-P Xu and A. Needleman: Journal of the Mechanics and Physics of Solids. Vol.42. (1994), p. 1397-1434.
13. G. Alfano and M. A. Crisfield Finite Element Interface Models for the Delamination Analysis of Laminated Composites: Mechanical and Computational Issues, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 50, pp. 1701-1736 (2001).

B.V. Ilchenko, V.N. Shlyannikov

STRESS STRAIN STATE ANALYSIS OF FUSELAGE PANEL WITH DIFFERENT TYPES OF PERMANENT CONNECTIONS // Transactions of Academenergo. - 2015. – N 1. – P.P. 83-92.

e-mail: ilchenkoboris@gmail.com, shlyannikov@mail.ru

Russian Academy of Sciences

Keywords: fuselage panel, biaxial loading, permanently connections, cohesive zone, finite element method

Abstract

The calculation of standard curved airbus fuselage panels with portholes, longitudinal and transverse power set is performed. Three types of permanent joints plating with reinforcing elements are considered. Fuselage panel FEM models have specific area for modeling riveting, riveting and adhesive, cohesive permanent connections. All calculations of the fuselage were carried out under conditions of inner pressure. The influence of the impact properties of the compound plating with stringers under biaxial loading on the general and local stress-strain state is presented.