

Розрахунок кріплення опорної плити з урахуванням ексцентриситету навантаження

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

Для забезпечення технологічності, кооперації, прийнятного рівня собівартості виготовлення та експлуатації літальних апаратів, виконується конструктивно-технологічне членування на різних рівнях структури конструкції: деталі, збірки, вузли, відсіки, агрегати. Вони об'єднані між собою та взаємодіють у певному порядку за допомогою різних форм з'єднання. Таким чином, можна обґрунтовано стверджувати, що досконалість літальних апаратів у різних проявах, в значній мірі визначаються з'єднаннями. З іншого боку, на етапі формування основної силової схеми конструкції використовують спрощені моделі, де зона кріплення, або зосередженого навантаження представлена у вигляді геометричного місця умовних точок, куди зведені реакції. Таким чином, процедура проектування вузлів навішування, навантаження тощо, є цілком самостійною, де результати попереднього проектування конструкції в регулярних зонах використовуються як вихідні дані. Слід відмітити, що проектування вузлів кріплення проводяться в жорсткіших умовах ніж регулярної конструкції: треба «вкластися» у відведений простір, кріпильні та опорні елементи підбираються згідно стандартів на металеві вироби тощо. Окрему групу проблем створює сам факт використання в силових конструкціях композитів. Ці проблеми пов'язані з особливостями поведінки композиту в перехідних зонах. З іншого боку, розрахунок і проектування з'єднань обмежені обраними моделями.

Наразі найменш пропрацьовано з'єднання опорної плити з базовою конструкцією, при умові навантаження з ексцентриситетом. Рішення проблеми полягає у забезпеченні максимальної універсалізації моделі з'єднання з метою розширення області використання, при умові збереження доступності для інженерних розрахунків та проектування. Запропонована вашій увазі стаття присвячена розробці моделі з'єднання та параметричному дослідженню впливу додаткових параметрів на умови включення компонентів з'єднання в роботу. Дана модель дозволяє розширити перелік проектних параметрів кріплення опорної плити традиційними кріпильними елементами різного складу (діаметра, довжини тіла кріплення, матеріалу). Крім того, модель дозволяє врахувати значення локальної товщини пакету з'єднаних деталей і значень їх місцевої жорсткості.

Ключові слова: механічні з'єднання, кріпильні елементи, навантаження з ексцентриситетом, опорна плита.

Вступ

Моделі, що використовують для розрахунку та проектування з'єднань в зонах кріплення чи навантаження конструктивного елемента пов'язані з ним опосередковано, через навантаження (реакцію) опори та умов локалізації і реалізації кріплення. Для конструктивного елемента (в межах використаної моделі) геометрія і структура кріплення – це «чорна скринька», або «річ у собі», що представляє собою систему геометричних точок, через які на конструктивний елемент діє навантаження у вигляді реакцій опори. Щоб коректно поставити задачу розрахунку і проектування з'єднань необхідно обрати відповідну модель. Загалом вибір моделі з'єднання залежить від використаної класифікації. В роботі [1] приведено варіанти класифікації з'єднань за експлуатаційною, технологічною ознаками, геометрією силових зв'язків тощо. Але для обґрунтованого вибору моделі з'єднання цього недостатньо. Необхідно ще класифікувати з'єднання за

видом навантаження, на яке воно розраховане. У такому сенсі моделі з'єднання можна представити як безмоментні, що враховують лише самі навантаження (стиску, розтягу, зсуву у площині та викликані температурними деформаціями), але не враховують моменти, що викликані ексцентриситетом силового чи конструктивного характеру. Такі моделі з'єднання [1, 3] поєднують у собі достатню точність та простоту, що необхідно для інженерних розрахунків первинного етапу формування конструктивно силової схеми конструкції. Використання таких моделей з'єднання відносно базових моделей конструкцій обмежено наступним чином (доцільно використовувати): для одновимірної моделі конструкції у випадку навантаження вздовж осі (тяга, підкіс), або навколо осі (вал); для двовимірної поверхні тонкостінної конструкції у випадку неперервного кріплення вздовж крайки; для просторових тонкостінних конструкцій у випадку континуального з'єднання по контуру спираання (циліндричні, конічні та інші оболонки) тощо.

У випадку розрахунку і проектування з'єднань, коли знехтувати впливом ексцентриситету навантаження на несучу здатність стику неможливо, використовують іншу групу моделей з'єднання, яка за сутністю є напівбезмоментною. Таке визначення пов'язане з тим, що із всієї сукупності ефектів, викликаних ексцентриситетом відносно умовного центру системи обрано варіант, у якому розглянуто проекцію навантаження на базову площину з'єднаних деталей. Така модель з'єднання може бути використана: для балкових елементів (у одновимірному, чи двовимірному представленні); для тонкостінних поверхонь при умові дискретного спираання; для просторових тонкостінних конструкцій без контурного підсилення силовим шпангоутом.

Окрему групу проблем створює сам факт використання в силових конструкціях композитів. Ці проблеми пов'язані з особливостями поведінки композиту в перехідних зонах. По-перше, в зоні з'єднання спостерігається просторове збурення силових потоків (особливо в традиційних механічних з'єднаннях), що призводить до локальної невідповідності структури композиту (системи армування) умовам навантаження. До того ж доступні варіанти структури композиту суттєво залежать від директивної технології виготовлення композиту та форми поставки компонентів. По-друге, низька контактна міцність композиту навколо просвердленого отвору у сукупності з крихким характером руйнування привело до обмеження параметрів посадки кріпильних елементів (КЕ) в межах композиту прохідною посадкою, в той час як в межах металевої деталі реалізується посадка з натягом. По-третє, різниця в температурних деформаціях може спричинити додаткові напруження, які можуть суттєво спотворити навантаження системи КЕ.

Огляд і аналіз відповідних джерел показав, що наразі знайшли розповсюдження два варіанти реалізації моделі:

- навантаження передається за рахунок зминання контактних поверхонь; з'єднані деталі з постійними параметрами (товщина, механічні характеристики матеріалів); стик реалізовано системою однакових КЕ [4];
- більш загальний варіант: навантаження передається за рахунок зминання контактних поверхонь; з'єднані деталі з постійними параметрами (товщина, механічні характеристики матеріалів); стик реалізовано системою КЕ з одного й того ж матеріалу, але різного калібру [2, 5].

В роботі [5] розглянуто моделювання з'єднання з різнокаліберними КЕ, встановленими з зазором, та попередньо розтягнутих, в результаті чого

реагування стику на навантаження можна розкласти на етапи: 1) спочатку кінематичного характеру в умовах супротиву тертям попередньо розтягнутих КЕ, аж до моменту вибирання зазорів між КЕ і отворами в деталях; 2) силовий супротив зминанням контактних поверхонь в межах пружної поведінки матеріалу; 3) силовий супротив зминанням пружно-пластичного характеру.

Стосовно запропонованих в роботі [5] етапів навантаження слід зауважити, що практичний інтерес представляє етап №2, бо при реалізації етапу №1 конструкція в деякій мірі не заплановано веде себе як механізм, що в більшості випадків не припустимо, а початок етапу №3 свідчить про досягнення розрахункових навантажень, і появі незворотних деформацій конструкції. У всіх згаданих варіантах моделювання стику, навантаженого силою і крутним моментом використано однакові базові припущення:

- умова рівноваги вузла навішування; сили і моменти (в проекції на площину роз'єму стику) викликає в системі КЕ, що фіксують опорну плиту, відповідні реакції так, що вузол навіски знаходиться в рівновазі від сил та моментів – $\sum F = 0$; $\sum M = 0$;

- сумісність деформації; з'єднані деталі під навантаженням здійснюють плоско-паралельне переміщення як абсолютно жорсткі «диски».

Найпростіший варіант моделі з'єднання [4] дозволяє підібрати за максимальним рівнем реакції калібр КЕ (згідно відповідних стандартів), а також товщину опорної плити та місцевої товщини стінки за умовою недопущення зминання контактних поверхонь. Недоліком проектування за цією моделлю є значна нерівномірність навантаження, тобто і КЕ і опорна плита суттєво недовантажені.

У варіанті моделі, запропонованій в роботах [2, 5], опосередковано враховується вплив жорсткості КЕ на включення їх у роботу. В моделі прийнято, що жорсткість КЕ на зсув пропорційна їх площі поперечного перерізу, тобто квадрату діаметра тіла (матеріал кріплення прийнято незмінним). Таким чином, ця модель дозволяє у деякій мірі скорегувати розподіл навантаження між КЕ за рахунок підбору діаметрів тіла згідно відповідного стандарту. Товщина опорної плити, як і в попередній моделі, оцінюється по максимальному значенню контактного напруження, але товщина скрізь однакова (що є недоліком). Тобто, жодна із згаданих моделей не враховує включення опорної плити в роботу, що призводить до завищення маси стику.

В цій роботі запропоновано модель яка дозволяє розрахувати з'єднання опорної плити, під навантаженням, прикладеним з ексцентриситетом відносно центроїда з'єднувального шару. Особливістю моделі є можливість використання КЕ не тільки різного діаметру, але й з різного матеріалу і довжиною тіла (відповідно до товщини пакету скріплених деталей в межах розглянутого КЕ). Урахування товщини деталей дозволяє більш коректно забезпечити включення вузла у роботу, та вирівняти навантаження у КЕ. Ускладнення моделі не заважає використовувати її в інженерних розрахунках при формуванні конструктивно-силової схеми стику.

1. Методи моделювання. Розрахункова схема кріплення опорної плити довільної конфігурації

Припущення, які використовуємо для побудови розрахункової схеми, базуються на наступному:

1. З'єднані деталі в площині стику ведуть себе як «жорсткий диск», який під навантаженням виконує «жорсткий» поворот без деформації у площині стику та без деформації із площини – депланації.

2. Поворот опорної плити відбувається навколо нормалі до площини стику і яка проходить через центроїд системи КЕ.

3. Матеріал скріплених деталей ізотропний (в більшості випадків це метали і сплави), або квазіізотропний (шаруваті композити зіркоподібних структур, які в осях окремого шару ортотропні, а загалом по всій товщині пакету ізотропні).

4. Взаємодія КЕ зі скріпленими деталями за рахунок зминання контактних поверхонь (без зазору та прослизання).

5. Рівень навантаження відповідає пружно-лінійному фізичному закону.

6. Умови рівноваги зовнішніх сил і реакцій сил $\sum F_i = 0$ і моментів $\sum M_i = 0$ відносно центроїду системи КЕ.

7. Податливість КЕ (силових зв'язків) визначається з урахуванням локальної геометрії всіх компонентів (з'єднаних деталей та КЕ), а також пружних властивостей відповідних матеріалів [6].

Модель з'єднання (рис. 1) дозволяє оперувати наступними параметрами:

- кількість задіяних для фіксації плити КЕ (n);
- координати КЕ у площині стику відносно наперед обраного початку відліку (x_i, y_i);
- місцева, в межах установки КЕ, товщина опорної плити (δ_i) і композитної стінки (δ_{KM});
- геометричні параметри КЕ ($d_i, l_i = \delta_i + \delta_{KM}$);
- модулі пружності матеріалів компонентів з'єднання: кріпильних елементів (E_{KEi}), опорної плити (E_1), композитної стінки (E_{KM}).

У якості силових обмежень прийнято несучу здатність КЕ при зрізі в одній площині (інформація про несучу здатність КЕ приведено у відповідних нормативних документах), та зминання слабшої поверхні контакту на рівні опорної плити та композитної стінки [1].

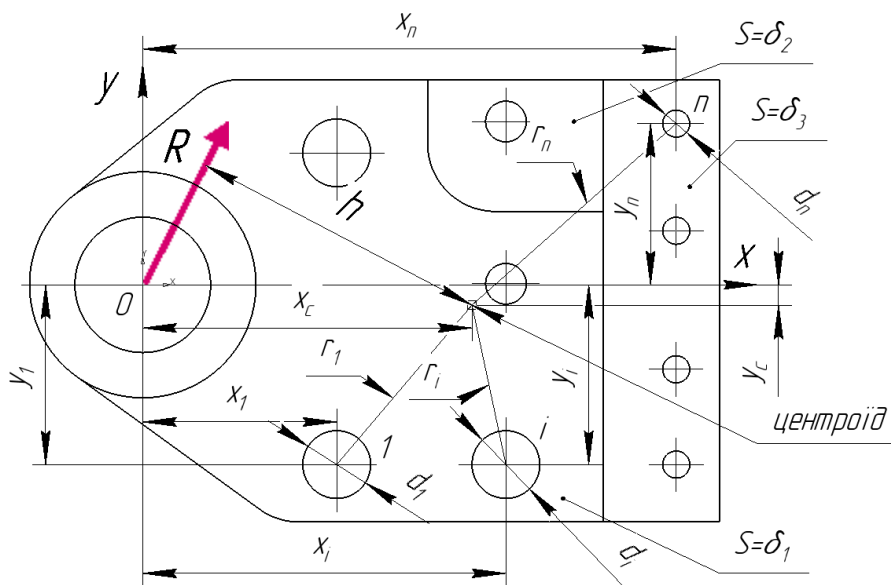


Рис. 1. Модель з'єднання із змінними параметрами, навантаженого з ексцентриситетом

Порядок проведення розрахунку з'єднання при відомих значеннях перелічених параметрах:

1) визначення положення центрів:

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i x_i}{\sum_{i=1}^n \Delta_i}; \quad y_c = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i y_i}{\sum_{i=1}^n \Delta_i}, \quad (1)$$

де $\Delta_i = \frac{1}{P_{KEi}}$, P_{KEi} – податливість кріпильних елементів за довільною відомою формулою, наприклад, Douglas (2) чи Boeing (3) [6]:

$$P_{KEi} = P_{KEi}^D = \frac{5}{d_i \cdot E_{KEi}} + 0,8 \left(\frac{1}{\delta_i \cdot E_1} + \frac{1}{\delta_{KMi} \cdot E_{KM}} \right); \quad (2)$$

$$P_{KEi} = P_{KEi}^B = \frac{1,25^{\lambda_i}}{\delta_i} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{3}{8 \cdot E_{KEi}} \right) + \frac{1,25^{\lambda_{KMi}}}{\delta_{KMi}} \left(\frac{1}{E_{KM}} + \frac{3}{8 \cdot E_{KEi}} \right), \quad (3)$$

$$\lambda_i = \frac{\delta_i}{d_i}; \quad \lambda_{KMi} = \frac{\delta_{KMi}}{d_i}.$$

У якості альтернативи була запропонована модель «KhAl», яка в собі об'єднує модель, що описана в джерелі [2] та модель Volkersen [1]:

$$\Delta_i = \left(\frac{1}{P_{KEi}^{Kh1}} + \frac{1}{P_{KEi}^{Kh2}} \right);$$

$$P_{KEi}^{Kh1} = \frac{4}{\pi \cdot d_i^2} \left(\frac{\delta_i}{2 \cdot (G_{KEi} \nu_{KE} + (1 - \nu_{KE}) G_1)} + \frac{\delta_{KMi}}{2 \cdot (G_{KEi} \nu_{KE} + (1 - \nu_{KE}) G_{KM})} \right); \quad (4)$$

$$P_{KEi}^{Kh2} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot d_i^2} \left(\frac{\delta_i}{2 \cdot (G_{KEi} \nu_{KE} + (1 - \nu_{KE}) G_1)} + \frac{\delta_{KMi}}{2 \cdot (G_{KEi} \nu_{KE} + (1 - \nu_{KE}) G_{KM})} \right),$$

де ν_{KE} – відносна площа кріпильних елементів в межах їх відповідальності;

2) перерахувати координати КЕ відносно центрів та відстань до нього

$$x1_i = x_i - x_c; \quad y1_i = y_i - y_c;$$

$$r_i = \sqrt{x1_i^2 + y1_i^2}. \quad (5)$$

3) оцінити реакцію КЕ на навантаження вузла з ексцентриситетом (рис. 2) по компонентам:

на силу R

$$Q_i^R = R \frac{\Delta_i}{\sum_{j=1}^n \Delta_j}; \quad (6)$$

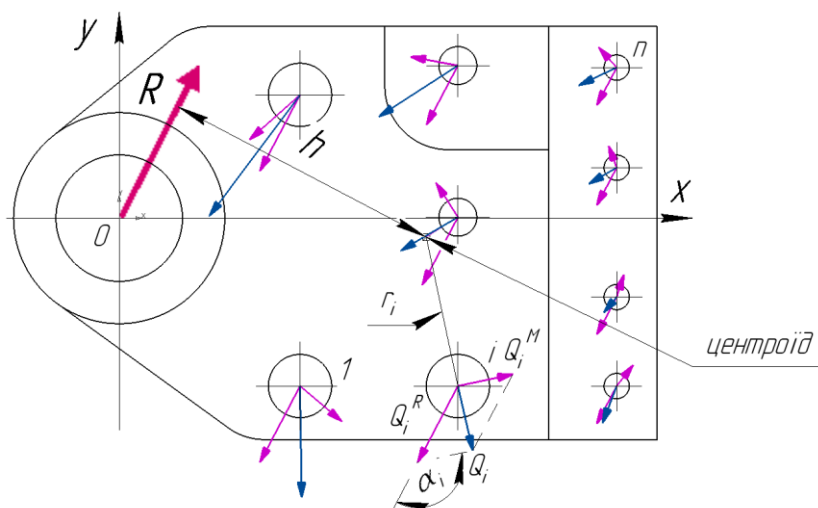


Рис. 2. Характер реакцій КЕ на навантаження вузла

на момент $M = R \cdot h$

$$Q_i^M = R \frac{h \cdot r_i \cdot \Delta_i}{\sum_{j=1}^n r_j^2 \Delta_j}. \quad (7)$$

4) сумарна реакція кожного КЕ визначається векторним сумуванням компонентів (5), (6) (див. рис. 2)

$$Q_i = \sqrt{(Q_i^R)^2 + (Q_i^M)^2 + 2 \cdot Q_i^R \cdot Q_i^M \cdot \cos \alpha_i}. \quad (8)$$

5) отримане значення КЕ порівнюється з обмеженням на зріз:

$$\tau_{KEi} = \frac{4 \cdot Q_i}{\pi \cdot d_i^2} \leq \tau_{ei}; \text{ або } Q_i \leq [Q]_{зрі}, \quad (9)$$

де $[Q]_{зрі}$ – припустиме значення сили на КЕ згідно нормативним документам при навантаженні з однією площиною зрізу;
та змінання поверхонь контакту:

$$\sigma_{1i} = \frac{Q_i}{\delta_i \cdot d_i} \leq \begin{cases} [\sigma]_{KEi} \\ [\sigma]_1 \end{cases};$$

$$\sigma_{KM i} = \frac{Q_i}{\delta_{KM i} \cdot d_i} \leq \begin{cases} [\sigma]_{KEi} \\ [\sigma]_{KM} \end{cases}, \quad (10)$$

де $[\sigma]_{KEi}$, $[\sigma]_1$, $[\sigma]_{KM}$ – припустиме значення напружень змінання тіла КЕ, стінки отвору опорної плити (металевої деталі) та матеріалу отвору композитної стінки відповідно.

Розглянуту модель можна використати для попереднього вирішення наступних трьох задач: 1) при заданій структурі, геометрії та навантаженні оцінити, в межах моделі, напружено-деформованого стану компонентів (пряма задача механіки деформованого твердого тіла); 2) при заданій структурі та

геометрії компонентів оцінити припустимий рівень навантаження (пряма задача механіки деформованого твердого тіла, модифікована); 3) використовуючи обмеження по структурі і геометрії компонентів з'єднання, а також рівня навантаження, спроектувати з'єднання заданої несучої здатності (зворотна задача механіки деформованого твердого тіла).

2. Параметричні дослідження та порівняльний аналіз параметрів механічного з'єднання, отриманого за різними моделями

Запропонована модель дозволяє оперувати значно більшою кількістю проектних параметрів ніж відомі моделі [2, 4, 5]. Тому, в першу чергу, бажано визначити ступінь розбіжності результатів розрахунку в межах області використання кожної моделі (рис.3).

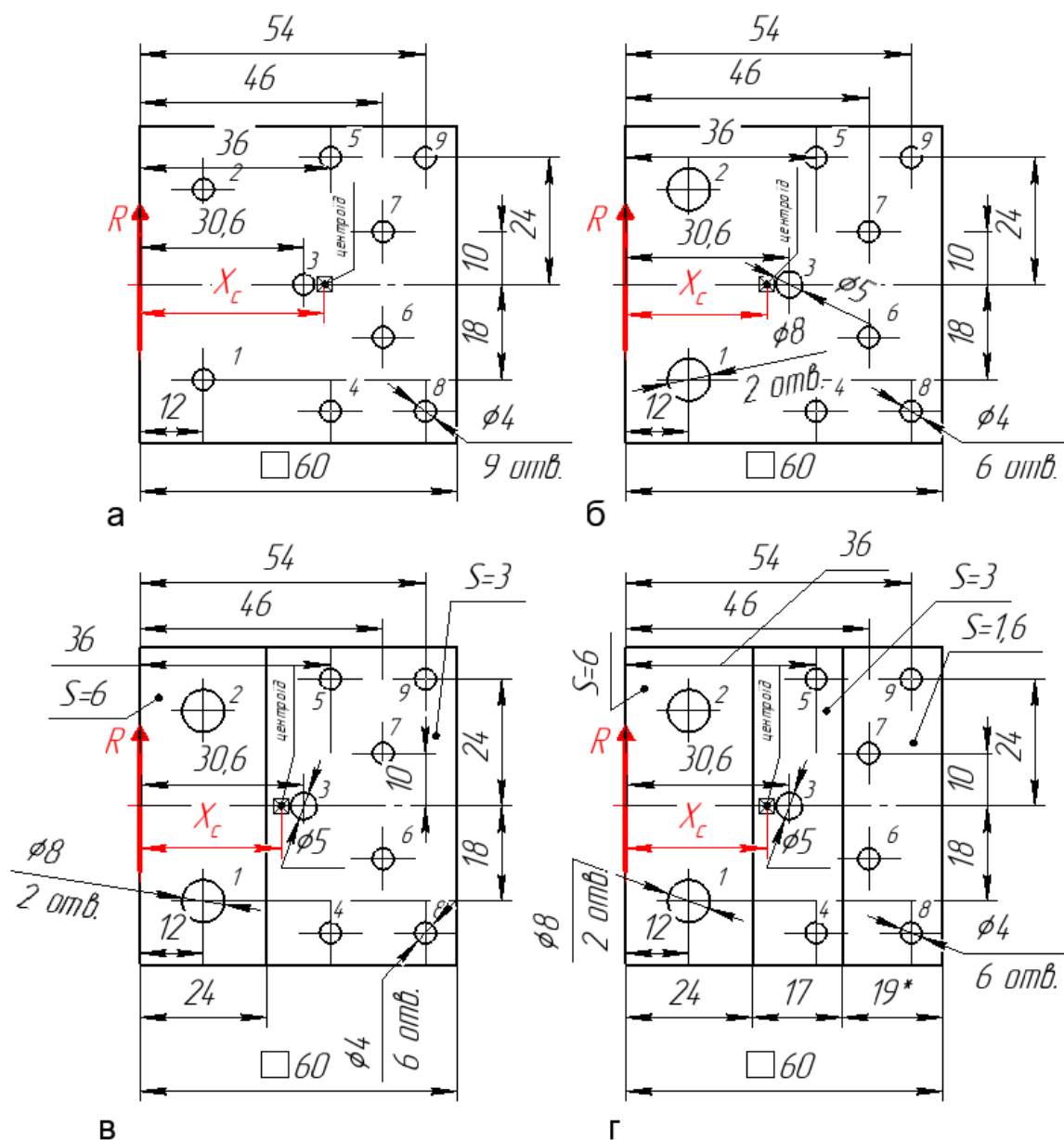


Рис. 3. Варіанти кріплення плити з різними обмеженнями на використання моделей: а – доступно моделям №1, №2, №3.1, №3.2, №3.3; б – доступно моделям №2, №3.1, №3.2, №3.3; в, г – доступно моделям №3.1, №3.2, №3.3

Базові формули для розрахунку положення центроїда системи КЕ та величини компонентів навантаження на кожний елемент по значенню приведені в табл. 1

Таблиця 1

Базові формули для оцінки положення центроїда та компонентів реакції КЕ на навантаження

Номер моделі	Координати положення центроїда	Компоненти реакції КЕ*
№1 [4]	$X_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; Y_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$	$Q^R = \frac{R}{n}; Q_i^M = R \cdot X_c \cdot r_i / \sum_{i=1}^n r_i^2$
№2 [2]	$X_c = \sum_{i=1}^n x_i \cdot d_i^2 / \sum_{i=1}^n d_i^2;$ $Y_c = \sum_{i=1}^n y_i \cdot d_i^2 / \sum_{i=1}^n d_i^2$	$Q_i^R = R \cdot d_i^2 / \sum_{i=1}^n d_i^2;$ $Q_i^M = R \cdot X_c \cdot d_i^2 \cdot r_i / \sum_{i=1}^n r_i^2 \cdot d_i^2$
№3.1	див. (1), де $\Delta_i = 1/P_{KEi}^D$ (2)	див. (6) та (7), де $\Delta_i = 1/P_{KEi}^D$ (2)
№3.2	див. (1), де $\Delta_i = 1/P_{KEi}^B$ (3)	див. (6) та (7), де $\Delta_i = 1/P_{KEi}^B$ (3)
№3.3	див. (1), де Δ_i (4)	див. (6) та (7), де Δ_i (4)

* – загальна реакція КЕ для всіх розглянутих моделей розраховується по формулі (8)

Отримані за різними моделями значення координат центроїда приведені в табл. 2. Сумарне значення реакцій КЕ порівнюємо із припустимими значеннями (ОСТ 1 3110-80). КЕ у яких відношення діючих сил (реакцій) до припустимих сил найменше, визначають несучу здатність з'єднання по умові зрізу тіла КЕ. Номера найбільш навантажених КЕ і величина навантаження R (див. рис. 3) приведено в табл. 3.

Аналіз наведених в табл. 2 і табл. 3 результатів показав наступне: повне співпадіння результатів для випадку постійних параметрів з'єднаних деталей та КЕ (див. рис. 3, а) пов'язано з фактичним виродженням впливу компонентів жорсткості елементів за рахунок їх скорочення в заданих умовах. Розрахунок показав, що за рахунок ексцентриситету навантаження на КЕ суттєво відрізняється по поверхні стику. В результаті чого, по умові зрізу критично навантажених КЕ (КЕ №1 та №2 рис. 3,а), несуча здатність стику не перевищує 36% від ідеального варіанту (одночасного повного навантаження всіх КЕ стику). Для даної структури єдиним способом оптимізації стику є зміна калібру всіх КЕ одночасно, кількості КЕ, та їх розміщення.

Таблиця 2

Координати центроїда системи КЕ відповідно структури стика,
та використаній моделі

Параметри	Значення							
Схема стика	Рис. 3, а		Рис. 3, б		Рис. 3, в		Рис. 3, г	
Номер моделі	X_c , мм	Y_c , мм	X_c , мм	Y_c , мм	X_c , мм	Y_c , мм	X_c , мм	Y_c , мм
№1	36,29	0	—	—	—	—	—	—
№2	36,29	0	26,72	0	—	—	—	—
№3.1	36,29	0	33,223	0	32,688	0	31,887	0
№3.2	36,29	0	34,597	0	33,236	0	31,399	0
№3.3	36,29	0	26,72	0	26,907	0	26,979	0

Таблиця 3

Номера найбільш завантажених (критичних) КЕ та максимальне припустиме навантаження на стик

Параметри	Значення							
Схема стика	Рис. 3, а		Рис. 3, б		Рис. 3, в		Рис. 3, г	
Номер моделі	№ КЕ	Мах значення R , Н	№ КЕ	Мах значення R , Н	№ КЕ	Мах значення R , Н	№ КЕ	Мах значення R , Н
№1	№1, №2	27058	—	—	—	—	—	—
№2	№1, №2	27058	№1, №2	72233	—	—	—	—
№3.1	№1, №2	27058	№4, №5	55254		58117	№4, №5	57119
№3.2	№1, №2	27058	№4, №5	48435	№4, №5	55086	№4, №5	52925
№3.3	№1, №2	27058	№1, №2	72233	№1, №2	72596	№1, №2	72664

З'єднання структури, приведеної на рис. 3, б, не може бути описане за допомогою моделі №1, тому у якості референтної обрано модель №2. У цьому випадку координата центроїда вздовж горизонтальної осі буде зміщена праворуч: для моделі №3.1 на 24,34%; для моделі №3.2 на 29,48%; для моделі №3.3 – 0%. Відповідно, прогнозована несуча здатність з'єднання опорної плити, відносно несучої здатності референтного варіанту зміниться: для моделі №3.1 на «мінус» 23,51%; для моделі №3.2 на «мінус» 32,95%; для моделі №3.3 – 0%. Сам факт залежності результатів розрахунку від вибору моделі КЕ не є критичним. Неприйнятним є факт зміни гранично навантажених КЕ (№4, №5 натомість №1 і №2) в супереч діючій системі сил (див. рис. 2).

Сам перехід до з'єднання із змінною жорсткістю КЕ дозволяє підвищити ефективність стика по навантаженню. Так, несуча здатність варіанту (рис. 3, б) у 2,67 рази більше ніж вихідного варіанту (рис. 3, а). Досягнуте значення несучої здатності стика (рис. 3, б) складає 54,7% від максимально можливого значення по умові зрізу КЕ (132040Н).

Для прогнозування несучої здатності з'єднання ступінчастої деталі була

запропонована модель з'єднання, яка була реалізована з використанням різних моделей КЕ (№3.1, №3.2 та №3.3). Згідно табл. 2 і табл. 3. наразі найбільш перспективним варіантом реалізації запропонованої моделі стику є варіант №3.3. У розрахункових випадках, для яких є контрольні моделі (рис3, а, б) запропонований варіант дає повне співпадіння по положенню центроїда системи, по визначенню критично навантажених КЕ та по прогнозу несучої здатності стику. При аналізі ступінчастого стику: одноступінчастого (рис. 3, б), для якого є контрольні результати; двоступінчастого (рис. 3, в), для якого контрольних значень немає; триступінчастого (рис. 3, г), також без контрольних значень, – було встановлено, що модель №3.3 дає монотонну функціональну залежність по розміщенню центроїда (табл. 2), прогнозу несучої здатності стику (табл.3). Тому отримані за допомогою №3.3 результати наразі вважаємо адекватними.

Варіанти стику (рис. 3, в, г) дозволяють отримати ще більшої ефективності за рахунок зміни локальної геометрії з'єднаних деталей (у нашому випадку це двоступінчаста і триступінчаста конфігурація сталеві опорної плити). Ефект досягається за рахунок корекції несучої здатності стику та зміни (зменшення) маси з'єднаних деталей. Відношення несучої здатності стику до маси з'єднаних деталей – це питома несуча здатність, одна з найпростіших оцінок якості з'єднання. Приймавши вихідний стик (рис. 3, а) за базовий легко провести оцінку питомої несучої здатності інших варіантів стику відносно бази (табл. 4).

Таблиця 4

Питома відносна несуча здатність варіантів стику

Параметри	Значення			
Схема стику	рис. 3, а (база)	рис. 3, б	рис. 3, в	рис. 3, г
Відносна несуча здатність	1	2,67	3,41	3,66

Висновки

На основі наведених матеріалів були сформульовані наступні висновки:

1. Стосовно області використання запропонованої моделі стику:
 - з'єднання металевих деталей, а також металеві деталі з композитною квазіізотропною структурою;
 - деталі постійної та змінної (ступінчастої) товщини;
 - фізичний закон матеріалів з'єднаних деталей і КЕ пружно-лінійного характеру;
 - взаємодія компонентів без люфту і прослизання.
2. Стосовно використання альтернативних варіантів моделей КЕ. Адекватність моделей №3.1 і №3.2 не доведено. Найбільш перспективним є варіант №3.3.
3. Стосовно використання моделі стику при його проектуванні (забезпечення заданої несучої здатності) рекомендується поетапно:
 - спроектувати стик з постійними параметрами з'єднаних деталей і КЕ в межах відведених геометричних параметрів (розміру опорної плити на виді в плані);
 - скорегувати діаметри найбільш навантажених КЕ в більшу сторону, а

менш навантажені в сторону меншого діаметру (аж до повного виродження КЕ; можливо використання КЕ з різних матеріалів;

- скорегувати місцеву товщину опорної плити.

4. Стосовно подальшого розвитку:

- продовжити визначати області адекватності застосованих моделей КЕ (експериментально і з використанням МСЕ);

- продовжити відпрацювання алгоритму проектування стику.

Список літератури

1. Проектування і конструювання виробів із композитних матеріалів. Теорія і практика [Текст]: підручник / П. М. Гагауз, Ф. М. Гагауз, Я. С. Карпов, С. П. Кривенда; під загал. ред. Я.С. Карпова. – Х.: Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», 2015. – 672 с. ISBN 978-966-662-441-6

2. Michael C.Y. Niu Airframe Stress Analysis and Sizing. Second edition. Hong Kong Conmilit Press LTD. 1999. – 802p. ISBN 962-7128-08-2

3. Michael C. Y. Niu Composite Airframe Structures. Practical Design Information and Data. Hong Kong Conmilit Press LTD, 1992. – 664p. ISBN 962-7128-06-6

4. Richard T. Barret Fastener Design Manual// NASA Reference Publication 1228. Lewis Research Center Cleveland, Ohio. 1990. 98 p.

5. Space engineering. Threaded fasteners handbook// ECSS-E-HB-E-32-23 Rev. 1. ESA-ESTEC Requirements & Standards Section. Noordwijk, The Netherlands. 2023. 245 p.

6. Berechnung von Bolzenverbindungen in CFK/ S. Postupka, A. Kühwed, F. J. Arends, J.A. Worobjow / Proceedings of Sixth International Conf. «New leading-edge technologies in machine building». - Rybachie (Ukraine), 1997. – Vol. 6. - P. 181-185.

References

1. Proektuvannia i konstruiuvannia vyrobiv iz kompozytnykh materialiv. Teoriia i praktyka [Tekst]: pidruchnyk / P. M. Hahauz, F. M. Hahauz, Ya. S. Karpov, S. P. Kryvenda; pid zahal. red. Ya.S. Karpova. – Kh. : Nats. ae-rokosm. un-t im. M.Ie. Zhukovskoho «Khark. aviats. in-t» , 2015. – 672 s. ISBN 978-966-662-441-6

2. Michael C.Y. Niu Airframe Stress Analysis and Sizing. Second edition. Hong Kong Conmilit Press LTD. 1999. – 802p. ISBN 962-7128-08-2

3. Michael C.Y. Niu Composite Airframe Structures. Practical Design Information and Data. Hong Kong Conmilit Press LTD, 1992. – 664 p. ISBN 962-7128-06-6

4. Richard T. Barret Fastener Design Manual// NASA Reference Publication 1228. Lewis Research Center Cleveland, Ohio. 1990. 98 p.

5. Space engineering. Threaded fasteners handbook// ECSS-E-HB-E-32-23 Rev. 1. ESA-ESTEC Requirements & Standards Section. Noordwijk, The Netherlands. 2023. 245 p.

6. Berechnung von Bolzenverbindungen in CFK/ S. Postupka, A. Kühwed, F. J. Arends, J.A. Worobjow / Proceedings of Sixth International Conf. «New leading-edge technologies in machine building». - Rybachie (Ukraine), 1997. - Vol. 6. - P. 181 – 185.

Надійшла до редакції 22.08.2025, розглянута на редколегії 22.08.2025

Analysis of supporting plate fastening considering loading eccentricity

To ensure manufacturability, cooperation, and an acceptable level of cost of aircraft manufacturing and operating, structural and technological sectioning is performed at different levels of a structure: parts, assemblies, units, bays etc. They are interrelated with each other and interact in a certain order using various forms of joints. Thus, it can be reasonably stated that perfection of aircraft in various appearances is largely determined by joints. On the other hand, at the stage of developing the main load-carrying scheme of a structure, simplified models are used, where the attachment zone or concentrated load is represented as a geometric locus of conditional points, where the reactions are summed up. Thus, the procedure for attachment designing, loads, etc. is completely independent, where the results of preliminary structure design in regular zones are used as initial data. It should be noted that the design of fastening units is carried out under more severe conditions than in regular structures: it is necessary to "fit" into the allowed space, fastening and supporting elements are selected according to standards for metal products, etc. A separate group of problems is created by the fact of using composites in load-carrying structures. These problems are associated with the distinctions of composites behavior in transition zones. On the other hand, the calculation and design of joints are limited by selected models.

Currently, fittings of support plate connection with main structure is least studied, especially under condition of loading with eccentricity. The solution of this problem is to ensure maximum universalization of joint model in order to expand the area of use, while maintaining accessibility for engineering calculations and design. The article presented to your attention is devoted to the development of joint model and parametric research of influence of additional parameters on conditions for including joint components in operation. This model allows to expand the list of design parameters for base plate attachment with conventional fasteners of various compositions (diameter, length of fastener body, material). In addition, the model allows to consider the value of the local thickness of composite package of joining parts and values of their local stiffness.

Key words: mechanical joints, fasteners, loading with eccentricity, supporting plate.

Відомості про автора:

Кривенда Сергій Петрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри композитних конструкцій та авіаційного матеріалознавства Національного аерокосмічного університету «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: s.kryvenda@khai.edu. ORCID 0009-0001-7095-6919.

About the author:

Kryvenda Serhii – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Composite Structures and Aviation Materials Science, National Aerospace University "Khai", Kharkiv, Ukraine, e-mail: s.kryvenda@khai.edu. ORCID 0009-0001-7095-6919.