

С. С. Курєннов, К. П. Барахов

**НАПРУЖЕНИЙ СТАН НАПУСКНОГО КЛЕЙОВОГО З'ЄДНАННЯ
ПЛАСТИНИ З КРУГЛИМ ОТВОРОМ ТА КОНЦЕНТРИЧНОЮ
ПЛАСТИНОЮ-НАКЛАДКОЮ**

*Національний аерокосмічний університет ім. М.С.Жуковського «ХАІ»
вул. Чкалова, 17, 61070, Харків, Україна; e-mail: kurennov.ss@gmail.com*

Abstract. A mathematical model of the stress state of the adhesive connection of the circular axysymmetric plates is proposed. The statement of the problem is given and an appropriate analytical solution is constructed. In the construction of the solution, the classic models of circular plates and a model of the stress state of the adhesive layer working on the shear and bending are used. It is assumed that both plates, the main and reinforcement, are isotropic, made of the same material, and have the same thickness. This problem is a generalization in the case of the circular area of the classical problem of Holland and Reissner. It is considered for the first time. A model problem is solved. The results of calculations are compared with the calculations obtained by the finite elements method.

Key words: adhesive joints, axisymmetric model, analytical solution, circular plate.

Вступ.

Тонкостінні конструкції можуть містити дефекти у вигляді отворів і тріщин, що є дефектами матеріалу, з якого виготовлена конструкція, або з'являються в процесі експлуатації в результаті, наприклад, механічних пошкоджень [16]. Наявність отворів в пластині викликає концентрацію напружень на границі отворів і призводить, у кінцевому підсумку, до передчасного виходу елемента конструкції з ладу. Для підкріплення отворів часто застосовуються так звані ремонтні накладки. З'єднання накладки з основною пластиною може реалізовуватися по всій поверхні накладки (клейові з'єднання внапуск), по лініях (зварні шви) або у системі точок (заклепкові з'єднання). Дослідження напруженого стану пластини з отворами або тріщинами різної форми є класичною задачею механіки і має велику історію [2, 6, 9]. Отвори можуть бути підкріплені внутрішніми пружними вставками [13], або накладками [3, 8, 14], які можуть бути з'єднані з основною пластиною заклепками [1]. Для зменшення концентрації напружень отворами будь якої форми в процесі ремонтних робіт, як правило, надають форму круга. Тому найбільший інтерес представляє дослідження напруженого стану підкріплених круглих отворів. Відомі аналітичні розв'язки задачі про накладку і напружений стан напускних з'єднань, як правило, ґрунтуються на гіпотезах про прямокутну форму накладки і основної пластини та рівномірний розподіл напружень за шириною конструкції [11, 17, 18]. Існує декілька різних наближених двовимірних моделей і відповідних методів розв'язування задач зі знаходження напруженого стану клейового з'єднання [7, 12, 15] та їх розвиток на задачі із дефектами у клейовому шарі [10]. Однак вказані підходи не дозволяють отримати аналітичний розв'язок задачі про пластину з круглим отвором і круглою накладкою. Очевидно, що в даному випадку доцільним буде застосування полярної (циліндричної) системи координат. При цьому, якщо залежність напружень від кутової координати відсутня, задача зводиться до одновимірної.

Ціллю даної роботи є побудова аналітичного розв'язку і дослідження напруженого стану напускного клейового з'єднання круглої пластини, ослабленої круговим отвором, з коаксіальною круглою накладкою при рівномірному розтязі. Така задача розв'язується вперше.

§1. Постановка задачі.

Розглянемо клейове з'єднання двох круглих пластин однакової товщини, яке зображено на рис. 1. Основна пластина навантажена симетричним двоосним розтягом. Радіус отвору в основній пластині дорівнює R_1 , радіус накладки – R_2 . Припустимо, що обидві пластини (основна і накладка) мають однакову товщину δ і виконані з однакового ізотропного матеріалу. Між пластинами знаходиться з'єднувальний (клейовий) шар, товщина якого δ_0 .

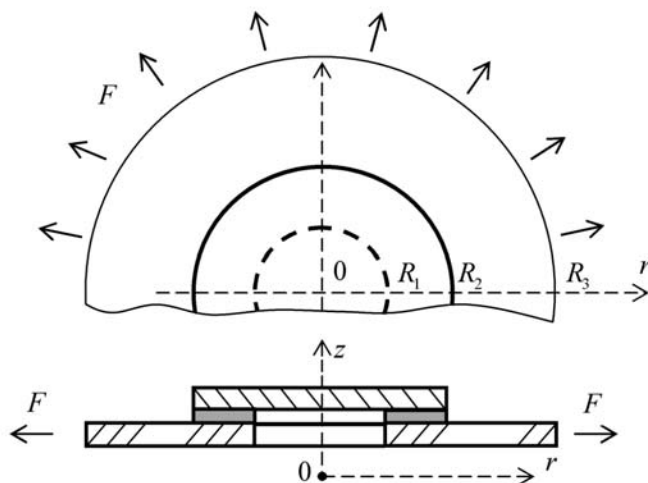


Рис. 1

Завдяки осевій симетрії тангенціальні зусилля в пластинках Q_1 і Q_2 не залежать від кутової координати, дотичні зусилля відсутні. Нижній індекс «1» відповідає основній пластині, а індекс «2» – накладці в межах області склейки $r \in [R_1; R_2]$.

На рис. 2 показані зусилля, напруження і розподілені згинальні моменти, які діють на диференціальний елемент основної пластини в області склейки.

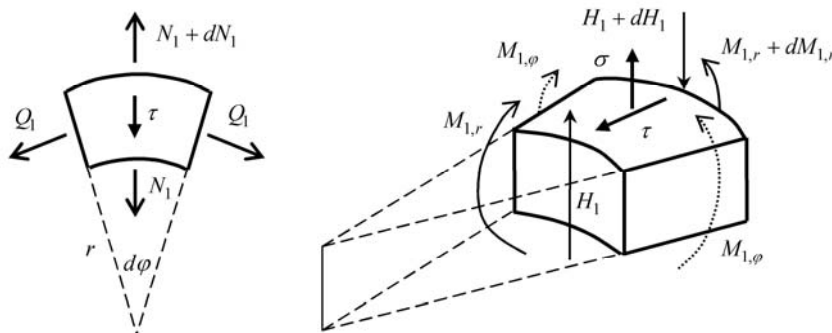


Рис. 2

Рівняння рівноваги сил, які діють на елементи пластин в межах області склейки в напрямку радіальної осі, мають вигляд

$$\frac{N_1 - Q_1}{r} + \frac{dN_1}{dr} - \tau = 0; \quad \frac{N_2 - Q_2}{r} + \frac{dN_2}{dr} + \tau = 0, \quad (1.1)$$

де N_k , Q_k – відповідно, радіальні і тангенціальні нормальні зусилля в пластині k , $k = 1, 2$; τ – дотичні напруження в клейовому шарі в радіальному напрямку.

Рівняння рівноваги моментів мають вигляд:

$$\frac{M_{1,r} - M_{1,\varphi}}{r} + \frac{dM_{1,r}}{dr} - H_1 + \tau \frac{\delta}{2} = 0, \quad \frac{M_{2,r} - M_{2,\varphi}}{r} + \frac{dM_{2,r}}{dr} - H_2 + \tau \frac{\delta}{2} = 0, \quad (1.2)$$

де $M_{k,r}$ і $M_{k,\varphi}$ - розподілені згинальні моменти в шарі k (рис. 2); H_k - перерізує зусилля в пластині k .

Рівняння рівноваги диференціальних елементів в напрямку осі z :

$$-\sigma + \frac{H_1}{r} + \frac{dH_1}{dr} = 0; \quad \sigma + \frac{H_2}{r} + \frac{dH_2}{dr} = 0, \quad (1.3)$$

де σ - нормальні (відривні) напруження в клейовому шарі.

Напруження в клейовому шарі будемо вважати пропорційними різниці переміщень обернених до клейового шару сторін обох пластин [16 – 18].

$$\tau = P \left(U_1 - U_2 - \frac{\delta}{2} \frac{dW_2}{dr} - \frac{\delta}{2} \frac{dW_1}{dr} \right), \quad \sigma = K(W_2 - W_1), \quad (1.4)$$

де P і K - жорсткості клейового шару на зсув та на відрив, які обчислюються за формулами $P = G_0/\delta_0$ та $K = E_0/\delta_0$, де, відповідно, E_0 та G_0 - модуль пружності і модуль зсуву клею; W_k - переміщення пластин у напрямку осі z ; U_k - поздовжні (радіальні) переміщення пластин, $k = 1, 2$.

Рівняння фізичного закону для пластин мають вигляд:

$$N_k = B(\varepsilon_{k,r} + \mu\varepsilon_{k,\varphi}); \quad Q_k = B(\varepsilon_{k,\varphi} + \mu\varepsilon_{k,r}), \quad (1.5)$$

де $B = \delta E / (1 - \mu^2)$ - мембранна жорсткість пластин; μ - коефіцієнт Пуассона матеріалу пластин; E - модуль пружності матеріалу пластин; $\varepsilon_{k,r}$ і $\varepsilon_{k,\varphi}$ - деформації пластини k у радіальному та тангенціальному напрямках.

Кінематичні співвідношення теорії пружності:

$$\varepsilon_{k,r} = \frac{dU_k}{dr}; \quad \varepsilon_{k,\varphi} = \frac{U_k}{r}. \quad (1.6)$$

Рівняння згину круглих пластин:

$$M_{k,r} = D \left(\frac{d^2 W_k}{dr^2} + \frac{\mu}{r} \frac{dW_k}{dr} \right); \quad M_{k,\varphi} = D \left(\mu \frac{d^2 W_k}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dW_k}{dr} \right), \quad (1.7)$$

де $D = E\delta^3 / 12(1 - \mu^2)$ - жорсткість пластин на згин.

§2. Побудова розв'язку.

Систему рівнянь (1.1) - (1.7) можна звести до двох рівнянь відносно напружень в клейовому шарі:

$$\frac{d^3 \tau}{dr^3} + \frac{2}{r} \frac{d^2 \tau}{dr^2} - \left(\frac{2P}{B} + \frac{P\delta^2}{2D} + \frac{1}{r^2} \right) \frac{d\tau}{dr} + \left(\frac{1}{r^3} - \frac{1}{r} \left(\frac{2P}{B} + \frac{P\delta^2}{2D} \right) \right) \tau = 0; \quad (2.1)$$

$$\frac{d^4 \sigma}{dr^4} + \frac{2}{r} \frac{d^3 \sigma}{dr^3} - \frac{1}{r^2} \frac{d^2 \sigma}{dr^2} + \frac{1}{r^3} \frac{d\sigma}{dr} + \frac{2K}{D} \sigma = 0. \quad (2.2)$$

Ці рівняння мають аналітичні розв'язки:

$$\tau = \frac{C_1}{r} + C_2 I_1(\beta r) + C_3 K_1(\beta r); \quad (2.3)$$

$$\sigma = S_1 J_0(\lambda r) + S_2 Y_0(\lambda r) + S_3 I_0(\lambda r) + S_4 K_0(\lambda r), \quad (2.4)$$

де $\beta = \sqrt{P(\delta^2 B + 4D)/(2BD)}$; $\lambda = \sqrt[4]{-2K/D}$; I_1, K_1, I_0, K_0 , - модифіковані функції Бесселя; J_0, Y_0 - функції Бесселя і Неймана, відповідно; C_1, C_2, C_3 і S_1, \dots, S_4 - довільні константи.

Можна зауважити, що в задачі про напружений стан клейового з'єднання пластин прямокутної форми напруження в клеї описуються лінійною комбінацією експоненціальних функцій, які мають в т.ч. комплексні аргументи [1, 16 - 18]. В осесиметричній задачі аналогом цих функцій є функції Бесселя.

Із рівнянь (1.1), з використанням (1.5) і (1.6), отримаємо рівняння

$$\frac{d^2 U_1}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dU_1}{dr} - \frac{U_1}{r^2} - \frac{\tau}{B} = 0; \quad \frac{d^2 U_2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dU_2}{dr} - \frac{U_2}{r^2} + \frac{\tau}{B} = 0. \quad (2.5)$$

Підставивши в (2.5) дотичні напруження (2.3) і розв'язавши отримані неоднорідні диференціальні рівняння Ейлера, одержимо

$$U_1 = C_1 \left(\frac{r \ln r}{2B} - \frac{r}{4B} \right) + \frac{C_2}{\beta^2 B} I_1(\beta r) + \frac{C_3}{\beta^2 B} K_1(\beta r) + C_4 r + \frac{C_5}{r}; \quad (2.6)$$

$$U_2 = C_1 \left(\frac{r}{4B} - \frac{r \ln r}{2B} \right) - \frac{C_2}{\beta^2 B} I_1(\beta r) - \frac{C_3}{\beta^2 B} K_1(\beta r) + C_6 r + \frac{C_7}{r}.$$

Підставивши (2.4) в друге рівняння (1.4), знайдемо різницю поперечних переміщень $W_2 - W_1$. Підставивши (2.6) в перше рівняння (1.4) і проінтегрувавши, знайдемо суму поперечних переміщень $W_2 + W_1$. Це дає змогу знайти поперечні переміщення пластин в області склейки:

$$W_1 = C_1 f_1(r) + C_2 f_2(r) + C_3 f_3(r) + \frac{r^2}{2\delta} (C_4 - C_6) + \frac{\ln r}{\delta} (C_5 - C_7) + \quad (2.7)$$

$$+ C_8 - S_1 \frac{J_0(\lambda r)}{2K} - S_2 \frac{Y_0(\lambda r)}{2K} - S_3 \frac{I_0(\lambda r)}{2K} - S_4 \frac{K_0(\lambda r)}{2K};$$

$$W_2 = C_1 f_1(r) - C_2 f_2(r) - C_3 f_3(r) + \frac{r^2}{2\delta} (C_4 - C_6) + \frac{\ln r}{\delta} (C_5 - C_7) + \quad (2.8)$$

$$+ C_8 + S_1 \frac{J_0(\lambda r)}{2K} + S_2 \frac{Y_0(\lambda r)}{2K} + S_3 \frac{I_0(\lambda r)}{2K} + S_4 \frac{K_0(\lambda r)}{2K},$$

де

$$f_1(r) = \frac{r^2}{2\delta B} (1 - \ln r) - \frac{\ln r}{\delta P}; \quad f_2(r) = \left(\frac{2}{\delta \beta^2 B} - \frac{1}{2P} \right) \frac{I_0(\beta r)}{\beta};$$

$$f_3(r) = \left(\frac{1}{2P} - \frac{2}{\delta \beta^2 B} \right) \frac{K_0(\beta r)}{\beta}.$$

Знаючи радіальні переміщення (2.6), поперечні переміщення (2.7), (2.8) пластин та напруження в клейовому шарі (2.3) і (2.4), не складає труднощів знайти погонні згинальні моменти, а також радіальні і тангенціальні зусилля в пластинах із співвідношень (1.7), (1.5) та (1.2).

§3. Переміщення і зусилля за межами склейки та крайові умови.

Переміщення у внутрішній ($r < R_1$) та зовнішній ($r > R_2$) областях, тобто за межами склейки, описуються відомими рівняннями згину круглих пластин за відсутності перерізуючих сил

$$\frac{d^2U}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dU}{dr} - \frac{U}{r^2} = 0; \quad \frac{d^3W}{dr^3} + \frac{1}{r} \frac{d^2W}{dr^2} - \frac{1}{r^2} \frac{dW}{dr} = 0.$$

Позначимо радіальні і поперечні переміщення накладки у внутрішній частині з'єднання (над отвором) U_3 і W_3 , а переміщення основної пластини за межами склейки U_4 і W_4 . Наведені вище рівняння мають загальні розв'язки

$$U_3 = c_1 r + \frac{c_2}{r}; \quad U_4 = c_3 r + \frac{c_4}{r}; \quad W_3 = s_1 + s_2 \ln r + s_3 r^2; \quad W_4 = s_4 + s_5 \ln r + s_6 r^2.$$

Згинальні моменти, радіальні й тангенціальні зусилля знаходимо за (1.7) і (1.5). Перерізуючі зусилля в пластинах

$$H_m = D \frac{d}{dr} \left(\frac{d^2 W_m}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dW_m}{dr} \right),$$

де $m = 3, 4$.

Константи $C_1, C_2, \dots, C_8, S_1, \dots, S_4$ і c_1, \dots, c_4 та s_1, \dots, s_6 можна знайти із крайових умов, а також умов спряження переміщень і зусиль на границях областей.

Будемо вважати, що основна пластина має зовнішній радіус R_3 . Нехай крайові умови на зовнішній границі основної пластини мають вигляд:

$$N_4(R_3) = F; \quad W_4(R_3) = 0; \quad \left. \frac{dW_4}{dr} \right|_{r=R_3} = 0.$$

Умови на зовнішній границі області склейки і основної пластини:

$$U_1(R_2) - U_4(R_2) = 0; \quad W_1(R_2) - W_4(R_2) = 0; \quad \left. \frac{dW_1}{dr} \right|_{r=R_2} - \left. \frac{dW_4}{dr} \right|_{r=R_2} = 0;$$

$$M_{1,r}(R_2) - M_{4,r}(R_2) = 0; \quad N_1(R_2) - N_4(R_2) = 0;$$

$$H_2(R_2) = 0; \quad M_{2,r}(R_2) = 0; \quad N_2(R_2) = 0.$$

Умови на внутрішній границі області склейки і на отворі:

$$U_2(R_1) - U_3(R_1) = 0; \quad W_2(R_1) - W_3(R_1) = 0; \quad \left. \frac{dW_2}{dr} \right|_{r=R_1} - \left. \frac{dW_3}{dr} \right|_{r=R_1} = 0;$$

$$M_{2,r}(R_1) - M_{3,r}(R_1) = 0; \quad N_2(R_1) - N_3(R_1) = 0; \quad H_2(R_1) = 0;$$

$$H_1(R_1) = 0; \quad M_{1,r}(R_1) = 0; \quad N_1(R_1) = 0.$$

Ще дві константи знаходимо із умов рівності нулеві радіальних переміщень накладки і скінченної величини її поперечних переміщень при $r = 0$:

$$c_2 = 0; \quad s_2 = 0.$$

Таким чином, маємо систему із двадцяти лінійних рівнянь відносно двадцяти невідомих констант.

§4. Модельна задача.

При дослідженні напруженого стану з'єднання бажано мінімізувати вплив на напружений стан клейового шару умов на зовнішній границі основної пластини. Тому припустимо, що основна пластина має відносно великий радіус R_3 .

Параметри задачі: $R_1 = 40$ мм; $R_2 = 60$ мм; $R_3 = 5R_2$; $\delta = 3$ мм; $\delta_0 = 0,1$ мм; $E = 70$ ГПа (алюмінієвий сплав); $\mu = 0,28$; $E_0 = 0,8$ ГПа; $G_0 = 0,3125$ ГПа. Радіальне розтягуюче зусилля F , прикладене вздовж периметру основної пластини.

На рис. 3 показано графіки дотичних τ (суцільна лінія) і відривних σ (штрихова лінія) напружень у клейовому шарі (1.4), які розраховано за запропонованою моделлю. Напруження показано у безрозмірній формі як відношення до деяких гіпотетичних напружень $\tau^* = F/(R_2 - R_1)$. Безрозмірна координата горизонтальної осі графіка обчислюється за формулою $\bar{r} = (r - R_1)/R_2 - R_1$.

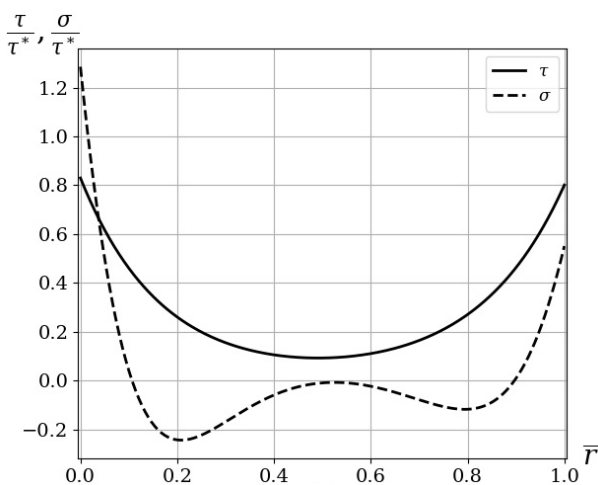


Рис. 3

З рисунка видно, що дотичні і нормальні напруження в клеї максимальні на границі області склейки. Ця особливість напруженого стану клейових з'єднань стержнів добре відома [4, 5, 11] і, як бачимо, присутня також і при передачі зусиль з пластини на круглу накладку.

З'єднання забезпечує передачу зусиль з основної пластини на накладку, що забезпечує розвантаження основної пластини. Але конструкція несиметрична і, внаслідок ексцентриситету сил, при навантаженні зазнає згину, який впливає на напружений стан обох пластин.

Нормальні напруження в пластинах в радіальному ($\sigma_{k,r}$) і коловому ($\sigma_{k,\varphi}$) напрямках за теорією Кірхгофа – Лява описуються залежностями

$$\sigma_{k,r}(r, z) = \frac{N_k(r)}{\delta} - \frac{12z}{\delta^3} M_{k,r}(r); \quad \sigma_{k,\varphi}(r, z) = \frac{Q_k(r)}{\delta} - \frac{12z}{\delta^3} M_{k,\varphi}(r).$$

На границі отвору напруження $\sigma_{1,r}$ дорівнюють нулеві. Тому, за відсутності накладки напруження $\sigma_{1,\varphi}$ будуть вдвічі більші за напруження на зовнішній віддаленій границі пластини $\sigma_0 = F/\delta$. На рис. 4 показані графіки напружень $\sigma_{1,r}$ (а) і $\sigma_{1,\varphi}$ (б) в основній пластині у серединній площині ($z = 0$) і на зовнішніх поверхнях пластини ($z = \pm 0,5\delta$) в околі клейового з'єднання. Напруження показані в безрозмірній формі у вигляді відношення до напружень на зовнішній границі σ_0 . Область склеювання відповідає інтервалу $\bar{r} \in [0; 1]$.

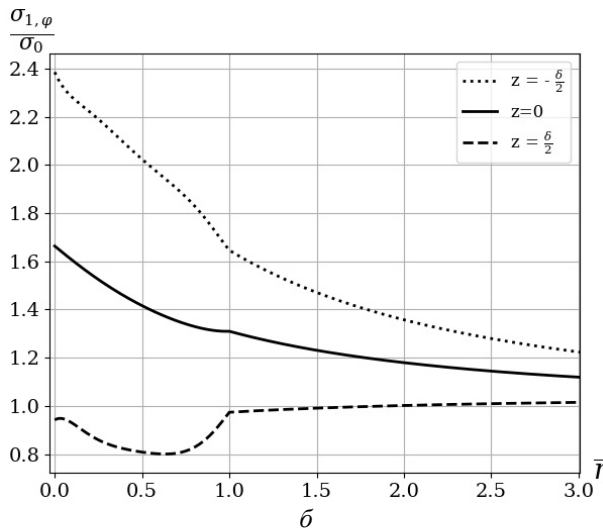
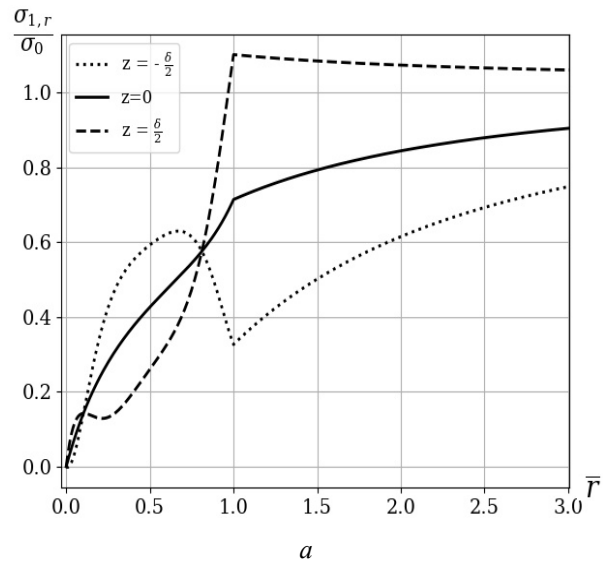


Рис. 4

Напруження в коловому напрямку в основній пластині $\sigma_{1,\phi}$ досягають максимальних значень на границі отвору. При цьому, завдяки передачі зусиль на накладку напруження у серединній площині $\sigma_{1,\phi}(R_1, 0)$ менші, ніж $2\sigma_0$. Але, внаслідок згину конструкції на протилежній до накладки стороні пластини ($z = -\delta/2$), напруження $\sigma_{1,\phi}$ майже у 2,4 рази перевищують σ_0 .

Висновок.

Запропоновано математичну модель осесиметричного напруженого стану конструкції, яка складається з пластини, що містить круглий виріз, та приклеєної внапуск коаксіальної круглої накладки. Задачу зведено до лінійних диференціальних рівнянь відносно дотичних і нормальних напружень в клейовому шарі, які мають аналітичні розв'язки в функціях Бесселя. Особливістю задачі є те, що на відміну від з'єднань стержнів [4, 5, 8, 17], не всі зусилля з основної пластини передаються на накладку; накладка лише частково розвантажує основну пластину біля отвору. Частка навантаження, яку приймає накладка, залежить від піддатливості клею. Встановлено, що згин конструкції під дією навантаження має суттєвий вплив на напружений стан пластини

та накладки. Для зменшення впливу згину доцільно застосовувати дві накладки з обох сторін основної пластини [18]. Запропонована модель є розвитком класичної моделі напруженого стану клейового з'єднання двох стержнів Голанда і Рейсснера [16, 17] на осесиметричну область склейки. У подальшому модель може бути розвинута на одно-вісне навантаження.

РЕЗЮМЕ. Запропоновано математичну модель напруженого стану клейового з'єднання кругових осесиметричних пластинок. Дана постановка задачі і побудовано відповідний аналітичний розв'язок. При побудові розв'язку використовуються класичні моделі круглих пластин та модель напруженого стану клейового шару, що працює на зсув та згин. Передбачається, що обидві пластини, основна і накладна, є ізотропними, виготовленими з одного матеріалу і такі, що мають однакову товщину. Ця задача є узагальненням на випадок кругової області класичної задачі Голанда і Рейсснера і розглядається вперше. Розв'язано модельну задачу. Результати розрахунків порівняно з розрахунками, отриманими за методом скінченних елементів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: клейові з'єднання, осесиметрична модель, аналітичний розв'язок, кругла пластина.

1. Максименко В.Н., Тягний А.В. Расчет напряженного состояния клееклепанных слоистых пластин с трещиной // Ученые записки ЦАГИ. – 1990. – 5. – С. 92 – 101.
2. Савин Г.Н. Распределение напряжений около отверстий. – Киев: Наук. думка, 1968. – 891 с.
3. Сильвестров В.В., Землянова А.Ю. Ремонт пластины с круговым вырезом посредством заплатки // ПМТФ. – 2004. – 45, № 4. – С. 176 – 183.
4. da Silva L.F.M., das Neves P.J. C., Adams R.D., Spelt J.K. Analytical models of adhesively bonded joints. Part I: Literature survey // Int. J. Adhesion and Adhesives. – 2009. – 29. – P. 319 – 330.
5. Grigorenko A.Y., Los' V.V., Malanchuk V.A., Tormakhov N.N. Stress State of a Threaded Joint in a Dental Implant-Bone System // Int. Appl. Mech. – 2020. – 56, N 1. – P. 33 – 39.
6. Guz A.N. Establishing the Foundations of the Mechanics of Fracture of Materials Compressed Along Cracks (Review) // Int. Appl. Mech. – 2014. – 50, N 1. – P. 1 – 57.
7. Kessentini R., Klinkova O., Tawfiq I., Haddar M. Transient hydro-thermo-mechanical stresses analysis in multi-layers bonded structure with coupled bidirectional model // Int. J. Mech. Sci. – 2019. – 150. - P. 188 – 201.
8. Khan M.A., Kumar S. Interfacial stresses in single-side composite patch-repairs with material tailored bondline // Mech. Adv. Mater. Struct. – 2017. – 25, N 4. - P. 304 – 318.
9. Khoma I.Yu., Dashko O.G. Stress State of a Nonthin Transversely Isotropic Plate with a Curved Hole // Int. Appl. Mech. – 2015. – 51, N 4. – P. 461 – 473.
10. Kurenov S.S. Determining Stresses in an Adhesive Joint with a Longitudinal Unadhered Region Using a Simplified Two-Dimensional Theory // J. of Appl. Mech. and Technical Physics. – 2019. – 60, N 4. – P. 740 – 747.
11. Kurenov S.S. Longitudinal-Flexural Vibrations of a Three-Layer Rod. An Improved Model // J. of Mathematical Sci. – 2016. – 215. – P. 159 – 169.
12. Kurenov S.S., Barakhov K.P. The Stressed state of the double-layer rectangular plate under shift. The Simplified two-dimensional model // PNRPU Mechanics Bulletin. - 2019. – 3. – P. 166 – 174.
13. Maksimyuk V.A., Storozhuk E.A., Chernyshenko I.S. Stress-Strain State of Flexible Orthotropic Cylindrical Shells with a Reinforced Circular Hole // Int. Appl. Mech. – 2015. – 51, N 4. – P. 425 – 433.
14. Okafor A.C., Singh N., Enemuoh U.E., Rao S.V. Design, analysis and performance of adhesively bonded composite patch repair of cracked aluminum aircraft panels // Comp. Struct. – 2005. – 71. – P. 258 – 270.
15. Rapp P. Mechanics of adhesive joints as a plane problem of the theory of elasticity. Part II: Displacement formulation for orthotropic adherends // Archives of Civil and Mechanical Engng. – 2015. – 15. – N. 2. – P. 603 – 619.
16. Rodichev Yu. M., Smetankina N. V., Shupikov O. M., Ugrimov S. V. Stress-strain assessment for laminated aircraft cockpit windows at static and dynamic loads // Strength of Materials. – 2018. – 50. – P. 868 – 873.
17. Wong E.H., Liu J. Interface and interconnection stresses in electronic assemblies – A critical review of analytical solutions // Microelectronics Reliability. – 2017. – 79, – P. 206 – 220.
18. Zhang Y., Zhang K., Zhao H., Xin J., Duan M. Stress analysis of adhesive in a cracked steel plate repaired with CFRP // J. of Constructional Steel Research. – 2018. – 145. – P. 210 – 217.

Надійшла 04.11.2020

Затверджена до друку 09.12.2021