

ВПЛИВ ПОДАТЛИВОСТІ З'ЄДНУВАЛЬНОГО ШАРУ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН З'ЄДНАННЯ

Одновимірна модель з'єднання є найбільш придатною для проектування високонавантажених з'єднань деталей із КМ з урахуванням особливостей навантаження. Оскільки у цій моделі використано принцип сил, то як коефіцієнти при невідомих напруженнях у з'єднувальних деталях використовують податливість усіх компонентів з'єднання. У той час, як оцінювання податливості з'єднаних деталей виконується за достатньо обґрунтованою моделлю, що відображає фізичний зміст процесу передачі навантаження, оцінювання податливості компонентів з'єднувального шару можна здійснити, використовуючи різноманітні моделі, що були напрацьовані різними проектними та дослідницькими організаціями. Отримані значення податливості компонентів силових зв'язків суттєво відрізняються між собою та з експериментальними даними. Встановлено нелінійність залежності перерозподілу навантаження між кріпильними елементами від їх податливості. Таким чином, є потреба у визначенні величини довірчого інтервалу значень податливості, за яких максимальні напруження у з'єднувальному шарі будуть змінюватися у наперед заданих межах.

Дослідження виконували в два етапи: перший етап – дослідження клейового з'єднання на основі аналітичної моделі; другий – дослідження механічного з'єднання на основі дискретної одновимірної моделі. Для спрощення аналізу було розглянуто випадок передачі навантаження між деталями однакової жорсткості без урахування впливу зміни температури.

1. Дослідження клейового з'єднання

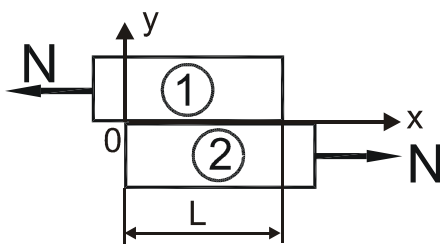


Рисунок 1 – Модель клейового з'єднання

Згідно з прийнятими припущеннями розподіл дотичних напружень у клейовому шарі розглянутого з'єднання (рис. 1) описується такою залежністю [1]:

$$\tau(x) = C_1 \operatorname{sh} kx + C_2 \operatorname{ch} kx, \quad (1)$$

$$\text{де } C_1 = A; \quad C_2 = \frac{B - A \operatorname{ch} kL}{\operatorname{sh} kL};$$

$$A = N \left(\frac{\Pi_{2x}}{k\Pi_c} - k \right); \quad B = N \frac{\Pi_{2x}}{k\Pi_c}; \quad k = \sqrt{\frac{\Pi_{1x} + \Pi_{2x}}{\Pi_c}};$$

Π_c – податливість клейового шару.

Піки напружень у клейовому шарі будуть на кінцях з'єднання:

при $x = 0$

$$\tau(0) = C_2 = \frac{B - AchkL}{shkL}; \quad (2)$$

при $x = L$

$$\tau(L) = \frac{BchkL - A}{shkL}. \quad (3)$$

Таким чином, при фіксованій міцності клею несуча здатність з'єднання залежить від податливостей деталей, клейового шару та довжини стику. Збільшення довжини стику призводить до зменшення максимальних напружень, однак при $L \geq L_{np}$ [2] значення напружень стабілізуються і досягають рівня

$$\tau(0) = -A \text{ та } \tau(L) = B. \quad (4)$$

Цей факт допоможе виключити довжину стику як чинник, що впливає на граничну несучу здатність з'єднання. Для спрощення аналізу було вирішено пов'язати податливість деталей і клейового шару:

$$f = \frac{\Pi_c}{\Pi_{1x}}. \quad (5)$$

У цьому разі граничні значення максимальних напружень у клейовому шарі (4) (з урахуванням припущення $\Pi_{1x} = \Pi_{2x}$) визначають за формулою

$$\tau_{\max} = \tau(0) = \tau(L) = \frac{N}{\sqrt{2f}}. \quad (6)$$

Саме цю залежність і було використано для встановлення залежності максимальних напружень від податливості клейового шару. Можливі два пов'язаних між собою варіанти залежності:

– при зменшенні податливості $f' = f - \xi_1$ максимальні напруження зростуть $\tau'_{\max} = \tau_{\max} + \xi$, у цьому випадку

$$\bar{\xi}_1 = \frac{2\bar{\xi} + \bar{\xi}^2}{(1 + \bar{\xi})^2}; \quad (7)$$

– при збільшенні податливості $f' = f + \xi_1$ максимальні напруження зменшаться $\tau'_{\max} = \tau_{\max} - \xi$, у цьому випадку

$$\bar{\xi}_1 = \frac{2\bar{\xi} - \bar{\xi}^2}{(1 - \bar{\xi})^2}. \quad (8)$$

Тут $\bar{\xi}_1$ – припустиме відносне відхилення (відносна похибка оцінювання) податливості клейового шару; $\bar{\xi}$ – задане відносне відхилення максимальних напружень у клейовому шарі.

Для заданого відхилення значень максимальних напружень $\bar{\xi} = \pm 5\%$ припустиме відносне відхилення значення податливості $\bar{\xi}_1 = -9,3 \dots +10,8\%$. Слід зазначити, що отримане співвідношення між відхиленнями напружень і податливостей не залежить від геометричних і механічних параметрів компонентів клейового з'єднання.

2. Дослідження механічного з'єднання

Отримані під час дослідження клейового з'єднання результати свідчать про те, що залежність між відхиленнями максимальних напружень і відносною похибкою оцінювання податливості компонентів з'єднувального шару індивідуальні до вибору способу з'єднання. Для підтвердження здогадки треба було дослідити механічне з'єднання, але доступна модель дискретна, тому слід змінити підходи до виконання дослідження на відміну від випадку клейового з'єднання.

Суть дослідження полягає у тому, що в заданих умовах (параметрах з'єднаних деталей, кількості рядів КЕ, геометрії КЕ та властивостей матеріалу КЕ, а також вибраної моделі силового зв'язку) оцінюється несуча здатність з'єднання. Після цього, зафіксувавши параметри з'єднання та рівень його навантаження, наприклад через напруження в регулярній зоні з'єднаних деталей, виконуємо варіацію значень податливості КЕ до таких значень, за яких максимальні напруження в КЕ будуть відрізнятися від вихідних значень на наперед задану величину (у даному разі вихідні значення напружень прирівняно до границі міцності матеріалу КЕ на зсув, а задана величина відхилення – $\pm 5\%$). Таким чином, формується залежність припустимого інтервалу значень податливості КЕ від системи параметрів з'єднання.

Слід зазначити, що на практиці абсолютні значення податливості КЕ змінюються в межах $10^{-5} \dots 10^{-8}$ мм/Н, тому для полегшення контролю за ходом дослідження та подальшого аналізу результатів виконуємо нормування податливості КЕ відносно податливості з'єднаних деталей.

Дослідження механічного з'єднання (з'єднані деталі однакові) здійснювалось за умов, наведених в таблиці.

Основні умови проведення досліджень

Параметри	Розмірність	Значення
Товщина з'єднаних деталей δ_d	мм	5,0; 10,0
Модуль пружності деталей E_d	ГПа	50; 100; 150; 200; 250
Діаметр кріпильного елемента d_{KE}	мм	1,0; 6,0; 10,0
Модуль пружності кріпильного елемента E_{KE}	ГПа	70; 100; 200

Для виконання параметричних досліджень було розроблено такий алгоритм:

1. Фіксується система значень параметрів елементів з'єднання, наведених у таблиці, крім того було задано границю міцності на зсув матеріалу КЕ (у даному випадку 600 МПа). Фіксується мінімальна кількість рядів КЕ – 3. Схема розміщення КЕ 3x3 діаметри. Податливість КЕ розраховується послідовно за формулами Boeing та Douglas [3].

2. Напруження в деталях від навантаження підбираються таким

чином, щоб напруження у найбільш навантажених КЕ були на рівні границі міцності на зсув (у дослідженні припустимо відхилення від базового значення $\leq +0,1\%$, що дає можливість побудувати плавну криву). Отримані значення напружень у деталях фіксуються як опорні (фіксується рівень переданого з'єднанням навантаження).

3. Змінюючи податливість КЕ, фіксуємо два його граничних значення, за яких напруження зсуву найбільш навантаженого КЕ більше (менше) границі міцності на 5%, що становить припустиме відхилення при статичному навантаженні.

4. Якщо кількість рядів менше 10, то вона збільшується на один ряд і пункти 2, 3 повторюються, інакше – змінюється набір параметрів елементів з'єднання, наведених в таблиці, і виконуються пункти 1 – 4.

Нижче наведено деякі результати параметричних досліджень (рис. 2–4). Встановлено, що на величину припустимого діапазону значень податливості КЕ впливає нерівномірність розподілу навантажень уздовж стику. При досягненні граничної несучої здатності механічного з'єднання припустиме відносне відхилення податливості КЕ знаходиться в межах $-9,3...+10,8\%P_{KE}$, що збігається з результатами дослідження клеювального з'єднання. Крім того, було встановлено, що у випадку незначної кількості рядів КЕ (у середньому від 3 до 6 рядів) вигідніше використовувати моделі КЕ, які дають завищені значення податливості. В окремих випадках можливе використання лінійного закону розподілу навантаження між рядами КЕ, що відповідає $P_{KE} \rightarrow \infty$ (рис. 5).

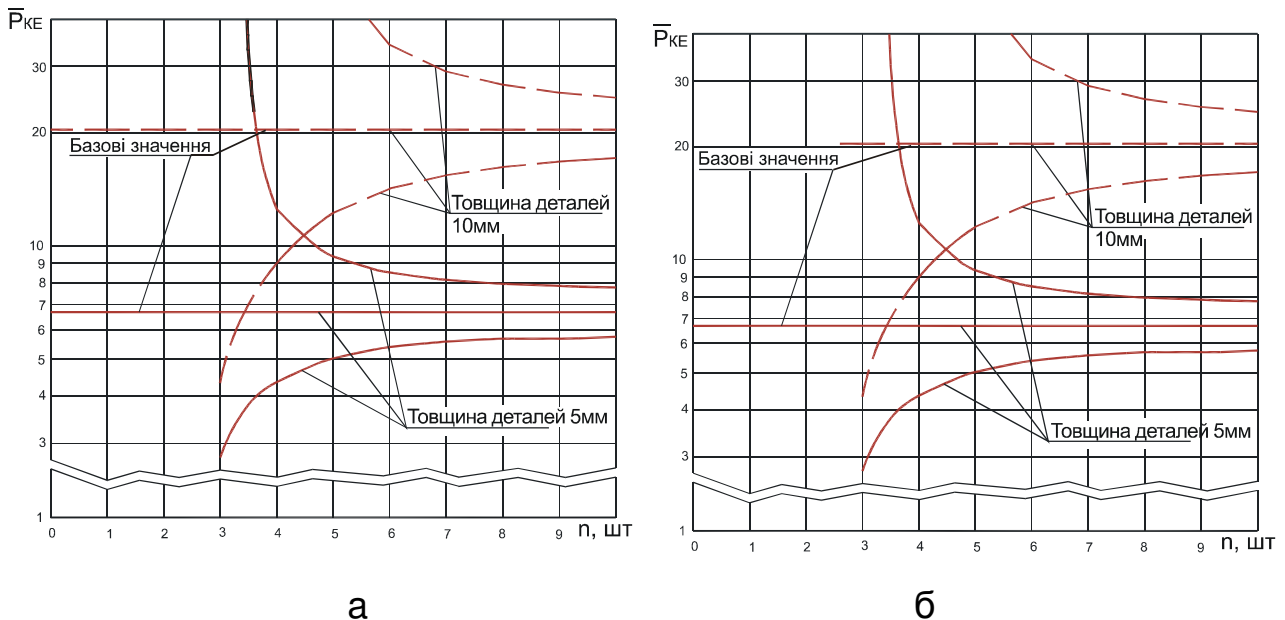


Рисунок 2 – Розподіл граничних значень відносної податливості КЕ залежно від кількості рядів (випадок: $E_d = 50$ ГПа, $E_{KE} = 200$ ГПа, $d_{KE} = 1$ мм): а – базове значення податливості КЕ визначено за моделлю Boeing; б – базове значення податливості КЕ визначено за моделлю Douglas

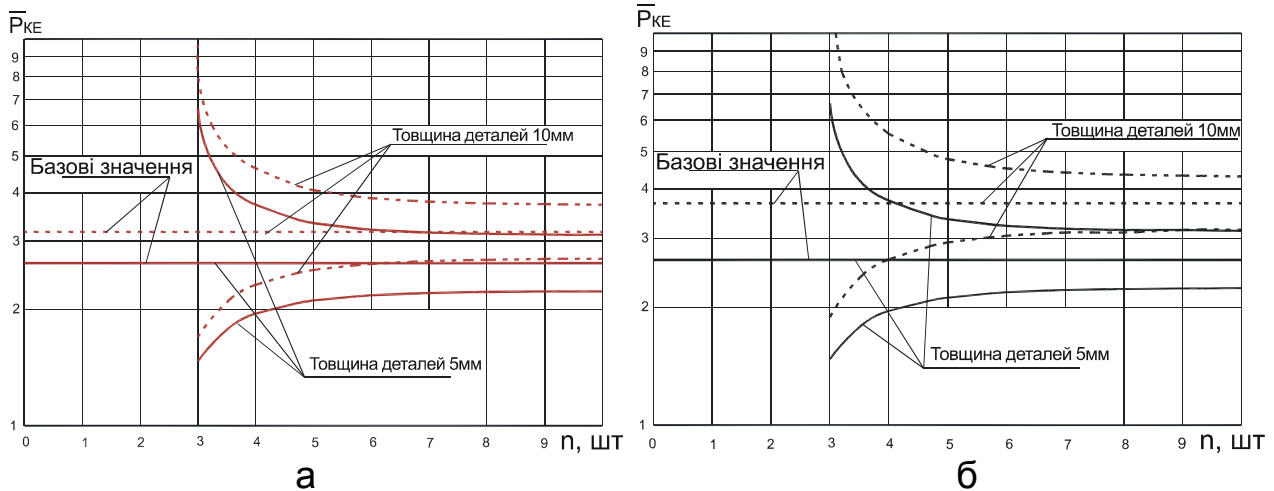


Рисунок 3 – Розподіл граничних значень відносної податливості КЕ залежно від кількості рядів (випадок: $E_D = 50$ ГПа, $E_{KE} = 200$ ГПа, $d_{KE} = 6$ мм): а – базове значення податливості КЕ визначено за моделлю Boeing; б – базове значення податливості КЕ визначено за моделлю Douglas

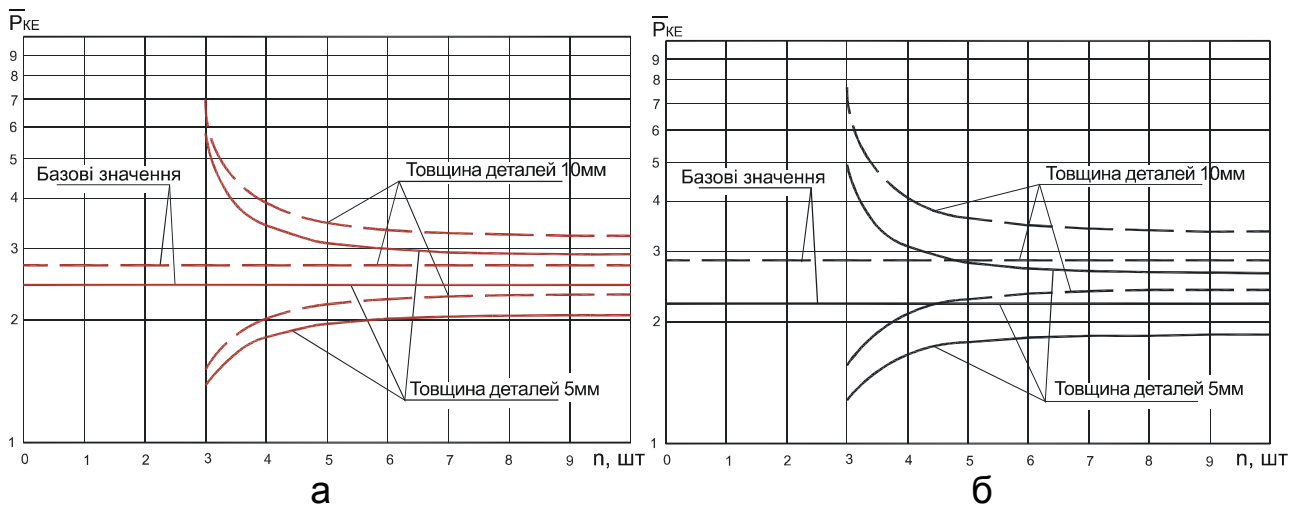


Рисунок 4 – Розподіл граничних значень відносної податливості КЕ залежно від кількості рядів (випадок: $E_D = 50$ ГПа, $E_{KE} = 200$ ГПа, $d_{KE} = 10$ мм): а – базове значення податливості КЕ визначено за моделлю Boeing; б – базове значення податливості КЕ визначено за моделлю Douglas

На основі виконаних досліджень було зроблено такі висновки:

1. У випадку оцінки граничної несучої здатності з'єднання припустимий діапазон значень податливості з'єднувального шару оцінюється в межах $-9,3...+10,8\%$ від базового значення незалежно від вибраного способу з'єднання.

2. Основним комплексним параметром, що впливає на ширину довірчого інтервалу у визначенні податливості КЕ є значення його відносної податливості.

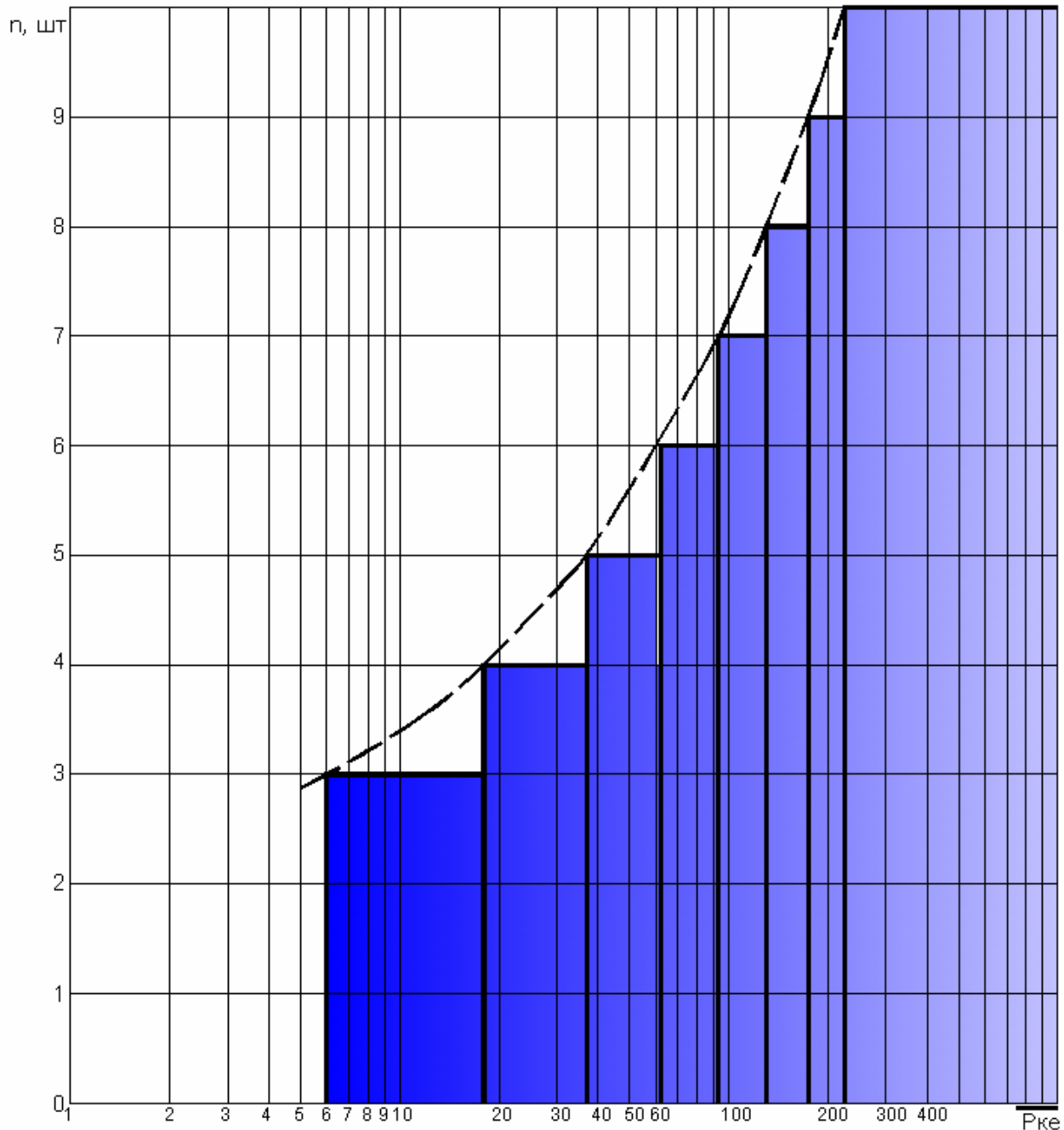


Рисунок 5 – Залежність між відносною податливістю KE \bar{P}_{KE} та кількістю рядів KE n , за якою припустимо використовувати рівномірний розподіл зусиль уздовж стику із заниженням напружень в KE у межах 5% (зафарбована область)

3. Визначено умови, за яких можна прийняти податливість KE нескінченно великою (лінійний розподіл зусиль уздовж стику), занижуючи максимальні напруження в KE у межах 5% (рис. 5).

4. Визначено характер впливу параметрів компонентів з'єднання на відносну податливість KE – збільшення діаметра KE або модуля пружності матеріалу KE призводить до зменшення його відносної податливості; а збільшення товщини або модуля пружності з'єднаних деталей (збіль-

шення жорсткості з'єднаних деталей) – до збільшення відносної податливості КЕ. З'єднання податливих деталей жорсткими зв'язками потребує більш ретельного визначення податливості цих зв'язків.

5. Використані в дослідженні формули Boeing та Douglas дали подібні результати (в межах припустимої похибки). Крім того, було встановлено, що при розрахунках з'єднання з досить жорсткими КЕ ($d_{KE} \geq 6$ мм) відносну податливість КЕ можна виразити через коефіцієнт незалежно від товщини з'єднаних деталей, тоді податливість КЕ буде визначатися простою залежністю

$$P_{KE} = \frac{k}{E_d \delta_d}, \quad (9)$$

де $k = 2,7 \dots 3,2$ – коефіцієнт відносної податливості, менше значення відповідає $d_{KE} = 10$ мм, а більше – $d_{KE} = 6$ мм.

Список використаних джерел

1. Царахов Ю.С. Конструирование соединений элементов ЛА из композиционных материалов (адгезионные соединения): учеб. пособие / Ю.С. Царахов. – М.: МФТИ, 1980. - 80 с.
2. Карпов Я.С. Проектирование и конструирование соединений деталей из композиционных материалов: учеб. пособие по курсовому и дипломному проектированию / Я.С. Карпов, С.П. Кривенда, В.И. Рябков. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1997. - 201 с.
3. S. Postupka, A. Kühweg, F.J. Arends, J.A. Worobjow. Berechnung von Bolzenverbindungen in CFK. Proceedings of Sixth international conference "New leading-edge technologies in machine building", Collection of scientific papers, Vol. 6, Rybachie, Ukraine, September 3-7, 1997, pp.181-188.

*Поступила в редакцію 20.04.2009 г.
Рецензент: д-р техн. наук, проф. П.А. Фомичев,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*