

**Харківський авіаційний інститут
ім. М. Є. Жуковського**

На правах рукопису

ДИБСЬКИЙ Павло Олександрович

УДК 539. 3

**КОНТАКТНА ЗАДАЧА ДЛЯ ТІЛ,
РОЗМЕЖОВАНИХ ТОНКОЮ ПРОКЛАДКОЮ**

Спеціальність 05.02.07

Механіка деформівного твердого тіла.

Технічні науки.

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Харків - 1996

339, 3



00757283 (W)

Роботу виконано в Харківсько
ім. М.Є. Жуковського

Науковий керівник : д-р техн. наук, доц. С.В. Шкараєв

Науковий консультант : д-р техн. наук, проф. П.О. Фомічов

Офіційні опоненти : д-р фіз.-мат. наук,
проф. В.С. Проценко,

канд. фіз.-мат. наук,
ст. наук. співроб. Н.Д.Сезова

Провідне підприємство : НВО "Турбоатом"

Захист відбудеться " 27 " грудня 1996 р. о 14.00 на засіданні спеціалізованої ради Д 02.27.05 у Харківському авіаційному інституті ім. М.Є.Жуковського за адресою :

310084, Харків-84, вул. Чкалова, 17, ХАІ

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ХАІ.

Автореферат розіслано " 21 " 11 1996 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради Д 02.27.05

проф.

Г. Л. Корнілов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Знаходження розв'язків прикладних контактних задач є актуальним для багатьох галузей машинобудівництва. Попередні експериментальні дослідження показали, що використання традиційної розрахункової методики обчислення руйнуючих напружень не відповідає результатам експериментів з руйнування керамічних лопаток ротора турбіни. Бажано розраховувати локальні напруження в зоні контакту, зважаючи на такі фактори: зміна дуги контакту, явище сухого тертя між контактуючими тілами та пластичне деформування тонкої прокладки. Проведення параметричних розрахунків втомної довговічності звичайних металевих конструкцій також потребує уточненого визначення напруженого стану контактуючих деталей.

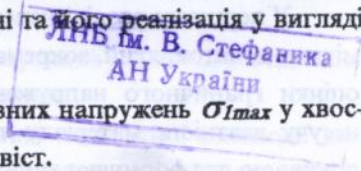
Мета роботи. Розв'язання контактної задачі для замкових з'єднань типу ластівчин хвіст з тонкою прокладкою та розроблення програмного забезпечення для чисельних досліджень напружено-деформованого стану в умовах контактної взаємодії. Дослідження причин, що призводять до руйнування керамічних елементів замкових з'єднань.

Наукова новизна роботи. Розроблено математичну модель двовимірної статичної контактної задачі з урахуванням зміни дуги контакту, явища сухого тертя між стичними тілами та пластичного деформування тонкої прокладки. Досліджено залежність напруженого стану від технологічного відхилення замкового з'єднання. Надано вирази для оцінки максимальних головних напружень σ_{1max} у хвостовику з'єднання.

На захист виносяться:

- математична модель двовимірної статичної контактної задачі, що враховує дію факторів зміни дуги контакту, явища сухого тертя між контактуючими тілами та пластичного деформування тонкої прокладки;
- алгоритм розв'язання контактної задачі та його реалізація у вигляді ітераційного процесу;
- вирази для оцінки максимальних головних напружень σ_{1max} у хвостовику замкового з'єднання типу ластівчин хвіст.

Практична цінність. Розроблено алгоритм та програмне забезпечення розв'язання МСЕ контактної задачі для тіл, розмежованих тонкою проклад-



кою. Встановлено допуск на технологічне відхилення кута хвостовика лопатки, що забезпечує мінімальну неруйнуючу швидкість обертання ротора турбіни, яка дорівнює 3150 рад/с. Визначено коефіцієнт тертя композиції сталь - кераміка з латунною прокладкою. Запропоновано варіант модифікації конструкції поперечного стику крила, що підвищує її втомну довговічність до рівня довговічності регулярної зони.

Результати досліджень та програмне забезпечення були впроваджені та використовуються при проектуванні турбін в Обнінському НВО "Технологія", Рибінському КБ моторобудування, Харківському НВО "Турбоатом".

Апробація роботи. Основні положення даної роботи доповідалися на 12-й Всесоюзній науково-технічній конференції з проблем конструювання виробів з неметалевих матеріалів (Москва, 1990 р.), на Республіканській науково-технічній конференції з проблем математичного моделювання та обчислювального експерименту (Харків, 1990 р.), на I-му Всесоюзному науково-практичному семінарі з автоматизації інженерної праці "Життя та комп'ютер" (Харків, 1990 р.), на IV Всесоюзній науково-технічній конференції з проблем будівельної механіки та міцності (Харків, 1991 р.), на науково-технічному семінарі кафедр міцності Л.А. та систем автоматизованого проектування Харківського авіаційного інституту (Харків, 1996 р.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 6 праць, в яких відзеркалено її основні результати.

Обсяг дисертації. Дисертаційна робота включає вступ, чотири розділи, висновок та перелік літератури, що складається із 102 найменувань. Робота містить 162 сторінки тексту, 61 рисунок, 8 таблиць.

ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ включає стислу характеристику роботи, обґрунтування актуальності теми, мету виконання роботи, відомості про наукову новизну та практичну цінність роботи.

У першому розділі наведено аналіз результатів натурних іспитів керамічних лопаток, який, зокрема, показав, що методика, використовувана для оцінки граничного напруженого стану, не може адекватно співвіднести несучу здатність матеріалу та контактну міцність хвостовика. Це стало підставою для формулювання мети дослідження.

Подано огляд аналітичних розв'язків задач зовнішнього контакту ци-

ліндричних тіл (В.М. Александров, В.О. Бабешко, І.І. Ворович, Л.А. Галін, М.І. Мухелішвілі, Г.Я. Попов, В.С. Проценко, В.Л. Рвачов, Б.М. Рьомаліс, Я.С. Уфлянд, І.Я. Штаерман та ін.). Основна увага приділена можливості використання результатів перелічених праць для розв'язання контактних задач із замковим з'єднанням. Слід відзначити ефективність вживання аналітичних розв'язків відповідних контактних задач для визначення умов використання наближених чисельних методів.

Серед чисельних способів розв'язання контактних задач значне поширення має МСЕ. Розглянуто праці П.П. Гонтаровського, Б.М. Кіркача, Ю.І. Матюхіна, О.Б. Овсієнко, О.М. Підгорного, Г.Л. Хавіна, Беше, Боддінгтона, Руза, Ченга та ін., в яких досліджено МСЕ напружено-деформівний стан (НДС) в контактних задачах для замкових з'єднань. Проте відсутність методики дослідження точності скінченно-елементної апроксимації та збіжності ітераційних алгоритмів не дає можливості поширити результати, одержані цими авторами, на окремі задачі прикладного змісту. У зв'язку з цим необхідно створити нові моделі та алгоритми для вирішення питань, що виникли в практиці моторобудування.

Огляд експериментальних методів виявив можливість вибрати для вимірювання деформованого стану замкового з'єднання метод спекл-фотографії, який має перевагу над іншими оптичними способами вимірювання завдяки, з одного боку, простоті реалізації схеми запису та розшифрування та незначним вимогам до захисту від зовнішніх динамічних завад, а з іншого — можливості одержання кількісної та якісної інформації про деформування об'єкта досліджень.

У зв'язку з наведеним підкреслюється необхідність дослідження та практичне значення таких задач, що розглядаються у роботі:

1. Розробка математичної моделі контактної взаємодії з урахуванням тертя, зміни довжини дуги контакту, пластичного деформування прокладки, дії відцентрових сил інерції.

2. Розробка алгоритму чисельного розв'язання задачі контактної взаємодії та визначення умов його застосування.

3. Експериментальне дослідження деформування замкового з'єднання та перевірка результатів теоретичного моделювання.

4. Розробка блоків опису та моделювання контактної взаємодії для спеціалізованого програмного комплексу аналізу напруженого стану замкових з'єднань.

5. Дослідження НДС замкового з'єднання, одержання наближених виразів для оцінки НДС.

6. Аналіз причин руйнування елементів замкового з'єднання та дослідження втомної довговічності панельної конструкції.

Другий розділ присвячено розробці математичної моделі двовимірної задачі статичного контакту, побудові її скінченно-елементної апроксимації та алгоритму чисельного розв'язання з урахуванням тертя, зміни довжини дуги контакту, пластичного деформування прокладки та відцентрових сил інерції.

Основна система рівнянь теорії пружності доповнена умовою взаємного непроникнення стичних тіл, законом Ньютона про рівність сил дії та протидії, умовою натискання на поверхні контакту та зв'язком нормальних і дотичних розподілених зусиль на поверхні контакту у формі закону Кулона - Амонтона.

Особливістю математичної моделі контактної задачі є опис деформаційних властивостей прокладки. Товщина прокладки припускається малою порівняно з характерними розмірами поверхні контакту; матеріал прокладки — ідеальний пружнопластичний. З області Ω_3 (рис.1), де міститься матеріал прокладки, виділяється підобласть Ω'_3 , навантажена уздовж контурів Γ_{K1} , Γ_{K2} та $t=t_1$, $t=t_2$ рівномірно розподіленими самоврівноваженими зусиллями $p_n(t \in \Gamma_{K1}) = p_n(t \in \Gamma_{K2})$, $p_t(t \in \Gamma_{K1}) = p_t(t \in \Gamma_{K2})$ та компонентами тензора напружень $\sigma_I(t=t_1) = \sigma_I(t=t_2)$. У цьому випадку доведено, що всі компоненти тензора напружень будуть незмінними в усій області Ω'_3 і дорівнюють своїм граничним значенням.

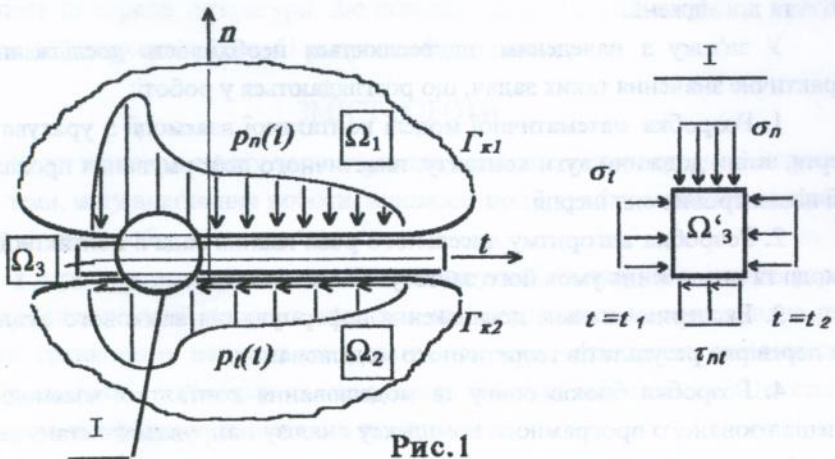


Рис.1

Розглядаються два випадки розподілу однорідного тензора напружень уздовж прокладки. Перший випадок — відсутність тангенціальних напружень ($\sigma_t=0$) — відповідає прокладці, виготовленій у вигляді сітки, між ячейками якої не має ніякої взаємодії. Другий випадок — відсутність тангенціальних деформацій ($\varepsilon_t=0$) — відповідає суцільній прокладці в умовах стисненого деформування. Залежно від розподілу компонент тензора напружень уздовж прокладки визначається розподіл головних нормальних напружень. Виникнення пластичної течії матеріалу прокладки знаходиться за допомогою критерія Треска - Сен-Венана.

На підставі прийнятих припущень про геометрію прокладки і шляхом аналізу її напруженого стану приймаються спрощуючі співвідношення, що описують НДС прокладки при навантаженні контактуючих тіл. Вважається, що прокладка не має товщини, а її форма цілком визначається геометрією контактуючих тіл в зоні контакту. Зведений коефіцієнт тертя вздовж контактної поверхні припускається таким: $K_{Tp}=0.5(K_{Tp1}+K_{Tp2})$, де K_{Tp1} і K_{Tp2} — коефіцієнти тертя, відповідно, на контурах Γ_{K1} і Γ_{K2} . Кінематичні та статичні умови на контурах Γ_{K1} і Γ_{K2} трансформуються на підставі означених вище припущень в еквівалентні умови вздовж спільної дуги контакту, що передбачає нібито відсутність розмежувальної прокладки. Закон тертя задається у цьому разі таким співвідношенням для дотичного зусилля $P_t(t)$:

$$P_t(t) = \left\{ \begin{array}{l} \tau_{nt}(t), \quad \text{якщо } |\tau_{nt}| \leq K_{Tp} |\sigma_n| \text{ та } \tau_{\max} < \tau_s; \\ K_{Tp} |\sigma_n(t)| \operatorname{Sign}(\Delta u_t(t)), \quad \text{якщо } |\tau_{nt}| \leq K_{Tp} |\sigma_n| \text{ та } \tau_{\max} < \tau_s; \\ \frac{K_{Tp} \tau_s}{\sqrt{1+4K_{Tp}^2}} \quad \text{- 1-й випадок} \\ \text{або} \quad \frac{K_{Tp} \tau_s (1-\nu)}{\sqrt{(1-2\nu)^2 + 4K_{Tp}^2 (1-\nu)^2}} \quad \text{- 2-й випадок} \end{array} \right\}, \quad \text{якщо } \tau_{\max} > \tau_s, \quad (1)$$

де $\sigma_n, \sigma_t, \tau_{nt}$ — компоненти тензора напружень у точці t прокладки;

Δu_t — відносне зміщення точок контакту;

τ_{\max} — максимальне дотичне напруження у точці t прокладки;

τ_s — границя текучості матеріалу прокладки.

Розв'язання контактної задачі виконується за допомогою ітераційного алгоритму, який складається з трьох циклів, що вкладені один у одний. Перший (зовнішній) цикл відтворює розв'язок задачі неперервного навантаження контактуючих тіл у вигляді суми розв'язків, одержаних для заданої скінченної множини сталих зростаючих рівнів навантаження. Цикл задається скінченною множиною рівнів навантаження. Тоді для компонент вектора еквівалентних вузлових зусиль (P_x, P_y) на I_p -му прирості навантаження виконуються такі співвідношення: $P_{M_p} = K_{P, I_p} P_{M_0} - P_{M_p - 1}$, де $I_p = 1, \dots, M_p$; $m = x, y$, P_{M_0} — початкові значення сил, K_{P, I_p} — скінченна множина рівнів навантаження. Рівні навантаження K_{P, I_p} визначаються з міркувань оптимальної залежності між витратами часу та необхідною точністю моделювання.

На кожному кроці I_p першого циклу реалізується другий цикл ($I_k = 1, M_k$), що задає перехід від НДС, знайдений на попередньому рівні $K_{P, I_p - 1}$ навантаження, до НДС, що визначається поточним рівнем навантаження K_{P, I_p} та зведеним значенням коефіцієнта тертя K_{T_p} :

$$\begin{aligned} K_{T_p \max} &= \max_{T \in M_0} (P_t(T) / P_n(T)) - \delta; \\ \Delta K_{T_p} &= (K_{T_p \max} - K^*_{T_p}) / M_k; \\ K_{T_p I_k} &= \begin{cases} K_{T_p \max}; I_k = 1, \\ K_{T_p I_k} + \Delta K_{T_p}; I_k > 1, \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

де $P_n(T), P_t(T)$ — нормальна та дотична компоненти сили у вузлі T (з рівняння МСЕ)

ΔK_{T_p} — зміна коефіцієнта тертя за одну ітерацію I_k ;

δ — припускається $\delta > 0$, якщо $K_{T_p \max} > K_{T_p}$, або $\delta < 0$, якщо $K_{T_p \max} < K_{T_p}$; $|\delta| = \Delta K_{T_p}$;

M_0 — множина, яка визначається як множина пар вузлів, що задають дійсну дугу контакту (див.рис. 1).

У третьому (внутрішньому) циклі для заданого у першому циклі сталого рівня зовнішнього навантаження $(P_{x I_p}, P_{y I_p})$ та для заданого в другому циклі сталого значення коефіцієнта тертя ($K_{T_p I_k}$) здійснюється мінімізація функції похибки $\varepsilon(P_n, P_t)$ для розподілу контактних сил:

$$\varepsilon(P_n, P_t) = \max_{T \in M_0} (|P_{t I_k} - P_{t I_k - 1}| + K_{T_p} |P_{n I_k} - P_{n I_k - 1}|) < \varepsilon_p \quad (3)$$

де ε_p — задана стала ($\varepsilon_p < 1$).

Збіжність алгоритму фактично визначається збіжністю внутрішнього

циклу, що теоретично впливає із збіжності альтернуючих ітерацій для задачі контакту пружних тіл з урахуванням скінченного тертя (Главачек І. та ін. Решение вариационных неравенств в механике.-М.: Мир,1987).

Особливості полів напружень контактних задач, оцінка точності скінченно-елементної апроксимації та питання практичної збіжності алгоритму були досліджені за допомогою чисельних експериментів. Для цього розглянуто двовимірні модельні задачі:

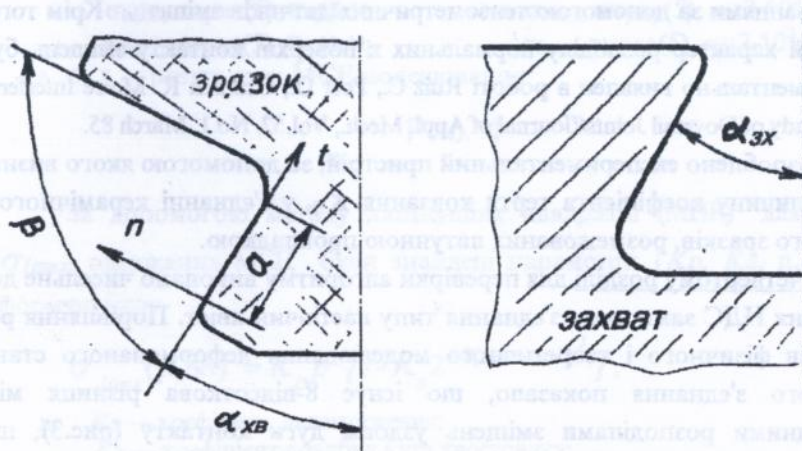
- 1) гладкий пружний контакт циліндра і напівпростору;
- 2) пружний контакт циліндра і основи при наявності тертя.

Чисельне моделювання показало таке:

1. Розмір 0.2δ (де δ - приріст дуги контакту) скінченного елемента у кінцевій зоні дуги контакту забезпечує точність не гірше ніж 5%.

2. Похибка скінченно-елементної апроксимації напружень на поверхні контакту, менша від 5%, для розглядуваного класу задач може бути досягнута при зростанні зовнішнього навантаження за δ і більше рівномірних приростів. При цьому збіжність ітераційного процесу є можливою не більше ніж за 10 ітерацій на кожному рівні навантаження.

Третій розділ присвячено експериментальним дослідженням. Метрологічне вимірювання зразків показало 2-відсотковий розкид кута розкриття $\alpha_{ХВ}$ хвостовика керамічних зразків (рис. 2).



$\Delta\alpha = \alpha_{зх} - \alpha_{ХВ}$; $\beta = 90^\circ$; $\alpha_{ХВ} = \alpha_{зх} = 60^\circ$ — номінальне значення
 $a = 3.5$ мм - дуга контакту

Рис. 2

Спекл-фотографії з'єднання "зразок—захват" одержані у випадку приросту рівня навантаження 7500Н. X -, Y -компоненти зміщень були відновлені, що дозволило визначити проєкції деформаційних зміщень на осі n і t , повернуті відносно осей X , Y (рис. 3). Розподіл нормальних зміщень свідчить про

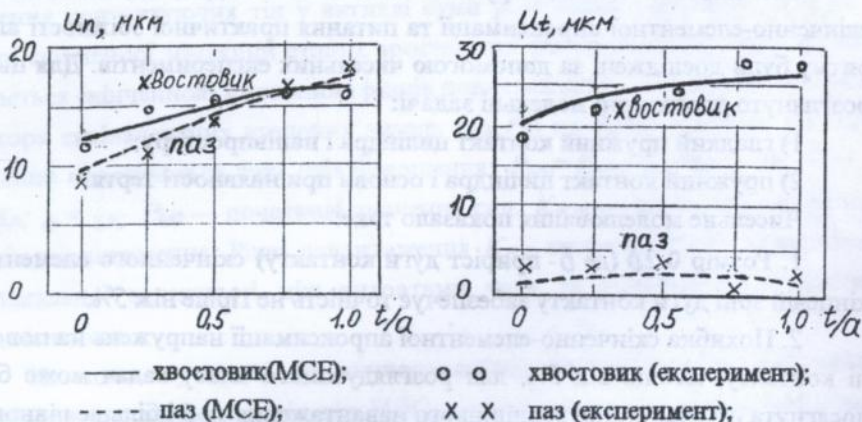


Рис. 3

нерівномірне навантаження контактних поверхонь та про розкриття дуги контакту поблизу клиноподібних виступів паза з'єднання типу "ластівчин хвіст". Вірогідність результатів оптичних вимірювань була підтверджена вимірюваннями за допомогою тензометричних датчиків зміщень. Крім того, подібний характер розподілу нормальних к поверхні контакту зміщень був експериментально виявлен в роботі Ruiz C., Post D., Czarnek R. Moire Interferometric Study of Dovetail Joints//Journal of Appl. Mech., Vol.52, No.1, March 85.

Розроблено експериментальний пристрій, за допомогою якого визначено величину коефіцієнта тертя ковзання $K_{\text{тр}}$ у з'єднанні керамічного і сталюого зразків, розмежованих латунною прокладкою.

У четвертому розділі для перевірки алгоритму виконано чисельне дослідження НДС замкового з'єднання типу ластівчин хвіст. Порівняння результатів фізичного і теоретичного моделювання деформованого стану замкового з'єднання показало, що існує 8-відсоткова різниця між відповідними розподілами зміщень уздовж дуги контакту (рис.3), що підтверджує вірогідність розробленого алгоритму розв'язання контактної задачі. Характерний розмір скінченно-елементного розподілу в зоні збільшення дуги контакту був визначений за допомогою модельної задачі

контакту двох циліндрів (Александров В.М., Ромаліс Б.М. Контактные задачи в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1986. — 186с.).

Завдяки дослідженням МСЕ НДС замкових з'єднань була визначена залежність максимального головного напруження $\sigma_{I\max}$ від відхилення кута хвостовика $\Delta\alpha$ керамічного зразка для різних рівнів навантаження (рис. 4).

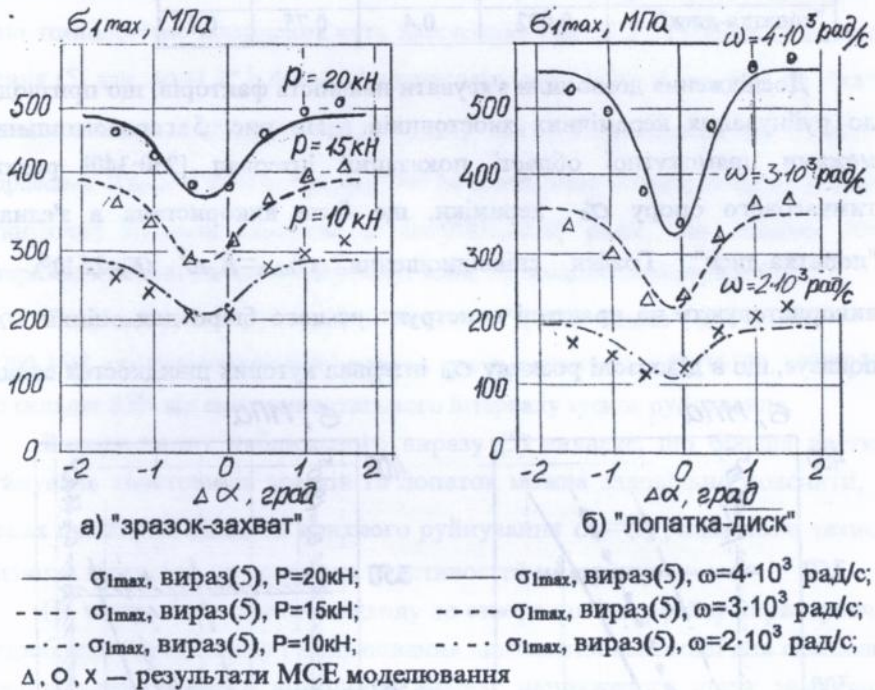


Рис. 4

За допомогою методу найменших квадратів (МНК) для значень $\sigma_{I\max}$, одержаних МСЕ, були знайдені параметри $\{K_p, K_a, n, \Delta\alpha_0\}$ у формулі виду

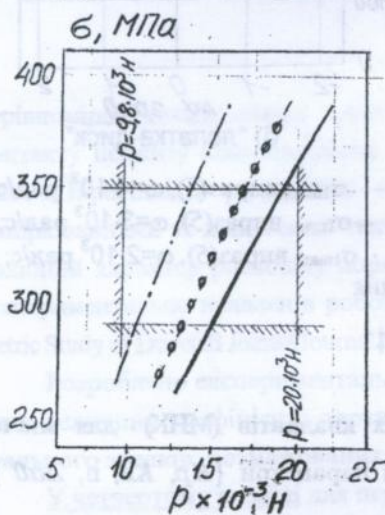
$$\sigma_{I\max}(P, \Delta\alpha) = K_p P^n [1 - K_a \Sigma^{-4}(\Delta\alpha - \Delta\alpha_0)^2], \quad (5)$$

де K_p — коефіцієнт навантаження;
 K_a — коефіцієнт похибки кута хвостовика;
 $\Delta\alpha_0$ — оптимальне відхилення кута хвостовика;
 P — фактор навантаження (для "зразка-захвата" P — величина сили, для "лопатки-диска" $P = \omega^2$ — квадрат швидкості обертання)

Значення параметрів для сили, вираженої у ньютонках, та швидкості обертання в радіанах на секунду, наведені у таблиці (відповідні графіки співвідношення (5) для σ_{1max} показані на рис. 4).

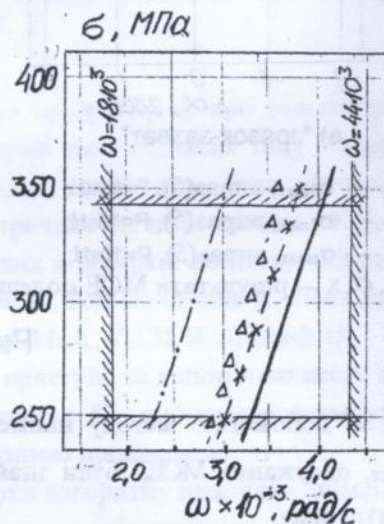
Вид з'єднання	K_p	K_a	n	$\Delta\alpha 0$
"зразок-захват"	0.18	0.25	0.8	-0.25
"лопатка-диск"	0.002	0.4	0.75	-0.1

Дослідження дозволили з'ясувати наявність факторів, що призводять до руйнування керамічних хвостовиків. На рис. 5 горизонтальними межами прямокутної області показаний інтервал [250;340] розкиду тимчасового опору σ_B кераміки, що була використана в з'єднанні "лопатка-диск". Графік співвідношення $\sigma_{1max} = K_p \omega^2$ ($K_p = 2.5 \cdot 10^{-5}$), що використовують на практиці конструкторського бюро для оцінки σ_{1max} , показує, що в діапазоні розкиду σ_B інтервал куткових швидкостей складає



а) "зразок - захват"
фактор "р" = Р

- σ_{1max} , вираз (5), $\alpha = -0.25^\circ$;
- - - σ_{1max} , вираз (5), $\alpha = -0.1^\circ$;
- o o σ_{1max} , вираз (5), $\alpha = -0.6^\circ$;
- - - σ_{1max} , вираз (5), $\alpha = 1.2^\circ$;



б) "лопатка-диск"
фактор "р" = ω^2

- $\triangle \triangle$ σ_{1max} , використовує КБ;
- σ_{1max} , вираз (5), $\alpha = -0.1^\circ$;
- - - σ_{1max} , вираз (5), $\alpha = 0.2^\circ$;
- x x σ_{1max} , вираз (5), $\alpha = 0.4^\circ$;
- - - σ_{1max} , вираз (5), $\alpha = 1.2^\circ$;

Рис. 5.

18% від інтервалу кутових швидкостей руйнування [1800;4460], одержаного при обробці результатів експерименту (рис. 5, вертикальні межі прямокутної області).

Запропоноване співвідношення (5) показує $\sigma_{I\max}$ як функцію від ω і $\Delta\alpha$. Під час метрологічних досліджень випробуваної партії зразків було виявлено технологічне відхилення кута хвостовика $\Delta\alpha = \pm 1.2^\circ$. Графіки співвідношення (5) для $\Delta\alpha = 1.2^\circ$ і $\Delta\alpha = -0.1^\circ$ визначають межі області, до якої належать криві залежностей $\sigma_{I\max}(\omega, \Delta\alpha)$ для $\Delta\alpha \in [-1.2, 1.2]$. Перетинання цієї області з відрізками $\sigma_{I\max} = 250$ Мпа і $\sigma_{I\max} = 340$ Мпа визначає розрахунковий інтервал руйнуючих кутових швидкостей $\omega \in [2200, 4070]$ рад/с, що складає 70% інтервалу кутових швидкостей руйнування, отриманих з експерименту.

Подібний аналіз руйнування з'єднання "зразок-захват", для якого $\sigma_B \in [290, 350]$, дав розрахунковий інтервал зусиль руйнування $P \in [10500, 19000]$ Н, що складає 85% від експериментального інтервалу зусиль руйнування.

Використання наближеного виразу (5) виявляє, що більша частка руйнувань хвостовиків зразків та лопаток можна задовільно пояснити, в межах прийнятої гіпотези крихкого руйнування $\sigma_I = \sigma_B$, наявністю технологічних відхилень та розкидом властивостей матеріалу.

На підставі загального підходу до створення інтерфейсу користувача розроблено блоки опису і моделювання контактної взаємодії для спеціалізованого програмного комплексу аналізу напруженого стану замкових з'єднань (СКАЗ).

Розроблене алгоритмічне та програмне забезпечення було використано при проведенні розрахунково-проектних робіт, що спрямовані на підвищення довговічності поперечного стику нижньої поверхні крила. Для реальної конструкції була змодельована МСЕ задача контакту обшивки та болта в найбільш небезпечному місці з'єднання, а потім, відповідно до процедури методу розрахунку довговічності по локальному НДС, визначено кількість циклів до зародження тріщини в точці максимальної концентрації напружень, яка виявилась рівною 6800. Середня кількість циклів з експерименту є 7100. На підставі чисельних досліджень НДС була запропонована модифікація конструкції поперечного стику, що забезпечила підвищення довговічності до рівню регулярної зони крила, який дорівнює 30000 циклів.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено математичну модель контактної взаємодії, яка враховує тертя між контактуючими тілами, збільшення або зменшення довжини дуги контакту, пластичне деформування прокладки, дію відцентрових сил інерції.

2. Розроблено ітераційний алгоритм розв'язання задачі контактної взаємодії методом скінченних елементів. За допомогою модельних контактних задач визначено умови застосування алгоритму.

3. Використовуючи метод спекл-фотографії виявлено особливість деформування замкового з'єднання типу "ластівчин хвіст", яка полягає у нерівномірному НДС на поверхні контакту та розриви дуги контакту поблизу клиноподібних виступів паза.

4. Розроблено методику експериментального вимірювання коефіцієнта тертя $K_{\text{тр}}$ і для композиції сталь — кераміка, розмежованих латунною прокладкою визначено $K_{\text{тр}}$, що дорівнює 0,43.

5. Розроблено блоки опису і моделювання контактної взаємодії для спеціалізованого програмного комплексу аналізу напруженого стану замкових з'єднань.

6. Отримано наближені вирази для оцінки σ_{Imax} на поверхні контакту хвостовика замкового з'єднання ластівчин хвіст. Встановлено, що для допуска на відхилення кута хвостовика від $-0,4$ до $0,2$ градусів величина мінімальної неруйнуючої швидкості обертання ротору турбіни складає 3150 рад/с.

7. Чисельні дослідження показали, що руйнування хвостовиків керамічних зразків узгоджується з теорією крихкого руйнування, а значний розкид руйнуючого навантаження можна пояснити технологічними відхиленнями форми хвостовиків і пазів з'єднання.

8. Дослідження контактної взаємодії болтового з'єднання дозволило за допомогою метода локального НДС вибрати такий варіант модифікації конструкції поперечного стику, який забезпечує потрібну довговічність.

Список праць з теми дисертації:

1. Дыбский П.А., Сергеев Б.А., Шкараев С.В. Исследование напряженного состояния замкового соединения// Прочность конструкций летательных аппаратов. Харьков, 1990. С. 30 - 39.

2. Булавин А.П., Дыбский П.А., Капустин А.А Исследование напряженного состояния замкового соединения методом голографической интерферометрии//Тез.докл. 12-й Всесоюз. науч.-техн. конф. "Конструкции и

технология получения изделий из неметаллических материалов". М., ВИМИ, 1990. С. 15.

3. Дыбский П.А., Сергеев Б.А., Шкараев С.В. Программный комплекс анализа элементов турбомашин методом конечных элементов // Тез. докл. Респ. науч.-техн. конф. "Математическое моделирование и вычислительный эксперимент для совершенствования энергетических турбоустановок". Харьков, ИПМ АН УССР, 1990. С.67.

4. Дыбский П.А. Теоретико-экспериментальное исследование напряженного состояния соединения типа "ласточкин хвост" // Тез. докл. 4-й Всесоюз. науч.-техн. конф. "Современные проблемы строительной механики и прочности ЛА". Харьков, Харьк. авиац. ин-т, 1991. С. 45.

5. Дыбский П.А., Сергеев Б.А., Шкараев С.В. и др. Создание вычислительной системы для комплексной автоматизации расчетно-конструкторских работ при проектировании соединений из керамики: Техн. отчет. Деп. в ВИНТИ, янв. 1992.

6. Фомичев П.А., Грубчанин И.Ю., Дыбский П.А. и др. Метод расчета долговечности панельных конструкций // Тез. докл. международной научно-методической конференции "Подготовка специалистов к работе в условиях открытых информационных и компьютерных интегрированных технологий" Харьков, ХАИ, 1996, стр. 48.

АННОТАЦИЯ

Дыбский Павел Александрович "Контактная задача для тел, разделенных тонкой прокладкой". Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07 "Механика деформируемого твердого тела. Технические науки", Харьковский авиационный институт им. Н.Е. Жуковского, 1996 год.

Построена двумерная механическая модель статической задачи контакта двух упругоизотропных тел, разделенных тонкой прокладкой. Произведена аппроксимация механической модели контактной задачи изопараметрическими конечными элементами и разработан итерационный алгоритм решения поставленной задачи. Оценены точность аппроксимации и практическая сходимость алгоритма решения задачи. Разработана экспериментальная установка и проведены тензометрические и голографические измерения полей смещений на замковом соединении. Выполнено исследование

437801

МКЭ напряженно-деформированной

Получена приближенная оценка макс

в хвостовике заданного конструктивного исполнения. Исследована усталостная долговечность поперечного стыка крыла.

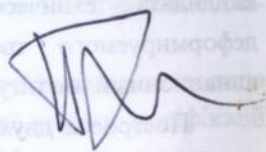
ABSTRACT

Dibsky P. The contact problem for two bodies which are separated by slim plate. The thesis for an academic degree of candidate of technical sciences of the speciality 05.02.07 "Mechanics of Deformable Solid Body. Technical sciences", Kharkov Aviation institute named after N.E. Zhukovsky, 1996.

Two dimensional mechanical model of static contact problem was built for two elasticizotrophical bodies which is separated by slim plate. Finite element approximation of mechanical model was made and algorithm for solution was developed. Accuracy of approximation and algorithm convergence was evaluated. The experimental equipment was designed; tensiometer and holography measurement of dovetail joint displacement field was executed. Finite element investigation of stressed state of dovetail joint was performed. Estimation of maximum main stress σ_{1max} in given root was achieved. The fatigue life of wing structure was investigated.

КЛЮЧОВІ СЛОВА

Контактна задача, турбіна, замкове з'єднання, коефіцієнт тертя, пружнопластичне деформування, скінченно-елементна апроксимація, метод спекл-інтерферометрії.



Підписано до друку

1996

Умовн. друк. арк. 1. Замовлення

прим. Безкоштовно

Віддруковано в типографії ХАІ