

УДК 539.3

В.А. Баженов, д-р техн. наук

О.І. Гуляр, д-р техн. наук

С.О. Пискунов, канд. техн. наук

В.П. Андрієвський

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НЕРІВНОМІРНОГО РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ НА РЕСУРС ХВОСТОВИКА ЛОПАТКИ ГАЗОТУРБІННОЇ УСТАНОВКИ

Із використанням напіваналітичного методу скінчених елементів (НМСЕ) проведено дослідження впливу нерівномірного розподілу температури на величину основного ресурсу хвостовика лопатки газотурбінної установки в умовах повзучості.

Лопатки є одними з найвідповідальніших елементів газотурбінних установок (рис. 1). Лопатка знаходиться під впливом відцентрового навантаження в неоднорідному, як по висоті, так і в поперечних перерізах полі температур. В лопатці можна виділити дві основні конструктивні частини: хвостовик та перо. Враховуючи складну геометричну форму та конструктивні особливості лопатки, її розрахунок доцільно проводити для пера лопатки та хвостовика окремо. В роботах [1, 3, 4] було проведено детальне дослідження напружено-деформованого стану та визначено основний і додатковий розрахунковий ресурс пера лопатки газотурбінної установки під дією як силового так і термосилового навантажень.

Метою даної роботи є дослідження напружено-деформованого стану та визначення розрахункового ресурсу хвостовика лопатки газотурбінної установки в умовах повзучості з урахуванням пошкодженості матеріалу при постійному та нерівномірному розподілі температури в його перерізі. Розробка методики розв'язання даного класу задач та дослідження ефективності її застосування була здійснена в роботах [2, 3].

Хвостовик лопатки являє собою неоднорідне призматичне тіло, що знаходиться під дією термосилового навантаження (рис. 2). Вплив пера лопатки на хвостовик моделюється нерівномірним розподіленням навантаженням. Зубці хвостовика спираються на відповідні до них вирізи в ободі

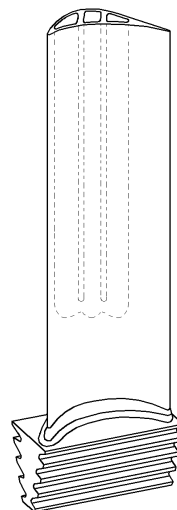


Рис. 1. Загальний вигляд лопатки газотурбінної установки

диска, які деформуються. Таким чином, вздовж поверхонь сполучення зубців хвостовика із диском реалізуються граничні умови у вигляді пружних опор (рис. 2). Розв'язання задачі про деформування хвостовика в такій постановці потребує наявності інформації про жорсткість зубців диска турбіни. З іншого боку, для моделювання таких умов

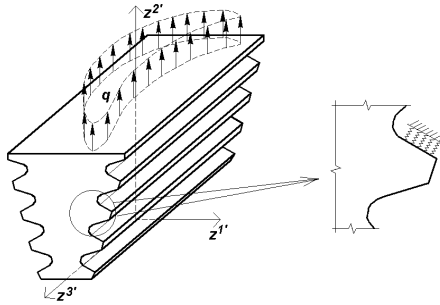


Рис. 2. Хвостовик лопатки газотурбінної установки

обпирання пружні опори доцільно замінити зустрічною деталлю, що за геометрією та умовами роботи відповідає фрагменту обода диска турбіни.

Розрахунок хвостовика проведений для його серединного перетину під впливом рівномірно розподіленого розтягуючого навантаження  $q = 0.5\sigma_0$ , що відповідає дії відцентрових сил пера лопатки. Внаслідок симетрії при розрахунку розглядалася половина поперечного перетину. Граничні умови визначено з умов симетрії та закріплення в радіальному напрямку:  $u^1(z^1 = 0) = 0$ ,  $u^2(z^2 = 0, 0.66R_0) = 0$ ,  $u^2(z^2 = 0) = 0$ .

Характерні розміри хвостовика подані у відносних величинах, пов'язаних із величиною  $R_0$ , що визначає відстань від вісі обертання диска до перерізу пера лопатки в якому відбувається руйнування [1, 3, 4]. Також у відносних величинах в подальшому подані всі дані про напружено-деформований стан хвостовика. Застосована при цьому величина  $\sigma_0$  являє собою усереднене значення інтенсивності напружень в перерізі, що знаходиться на відстані  $R_0$  від вісі обертання.

Опис деформування матеріалу хвостовика лопатки в умовах повзучості здійснюється рівняннями вигляду

$$\frac{d\varepsilon_c}{dt} = \frac{B\sigma^n}{(1-\omega)^r}, \quad \frac{d\omega}{dt} = C \left( \frac{\sigma}{1-\omega} \right)^m \frac{1}{(1-\omega)^q}, \quad (1)$$

де  $B=B(T)$ ,  $C=C(T)$ ,  $m=m(T)$ ,  $n=n(T)$ ,  $r=r(T)$ ,  $q=q(\sigma, T)$  – константи матеріалу,  $T$  – температура,  $\omega$  – параметр пошкоженості Качанова-Работнова  $0 \leq \omega \leq 1$  [5],  $t$  – час,  $\varepsilon_c$  – інтенсивність деформацій повзучості,  $\sigma$  – інтенсивність нормальних напружень.

Враховуючи складну конфігурацію розрахункової схеми, що включає хвостовик і фрагмент обода диска турбіни, для побудови скінченоелементної моделі доцільно їх розбити на фрагменти (рис. 3).

На першому етапі дослідження було проведено розрахунок хвостовика лопатки газотурбінної установки при постійному розподілі температур в його поперечному перерізі.

Дослідження збіжності отримуваних результатів моделювання пружного деформування в залежності від кількості невідомих скінченоелементної моделі проведено шляхом співставлення розподілів безрозмірної інтенсивності напружень для сіток з кількістю невідомих 1074, 3344 та 9596 (рис. 4).

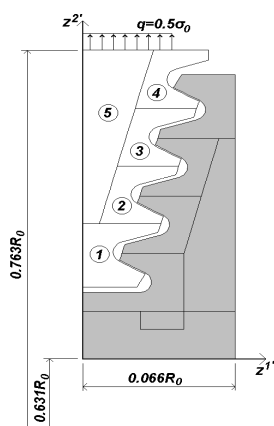


Рис. 3. Розрахункова модель хвостовика і фрагмента обода диска турбіни

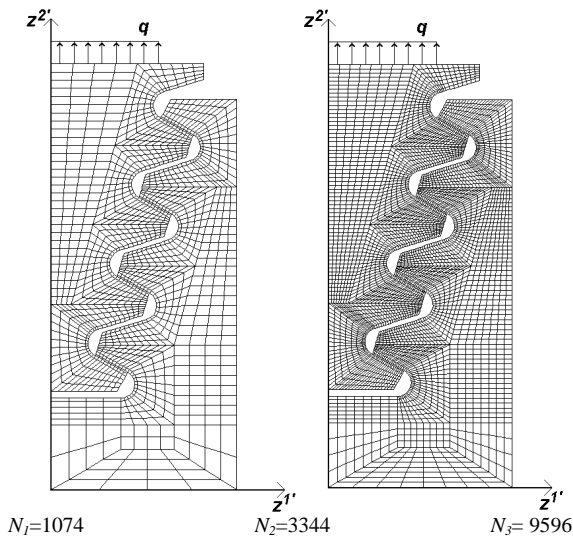


Рис. 4. Скінченоелементні моделі хвостовика і фрагмента обода диска турбіни

Отримані розподілення безрозмірної інтенсивності напружень наведено на рис. 5. Як видно, характер розподілення безрозмірної інтенсивності напружень для всіх наведених сіток однаковий. Максимальні напруження виникають на галтелях хвостовика та зустрічної деталі.

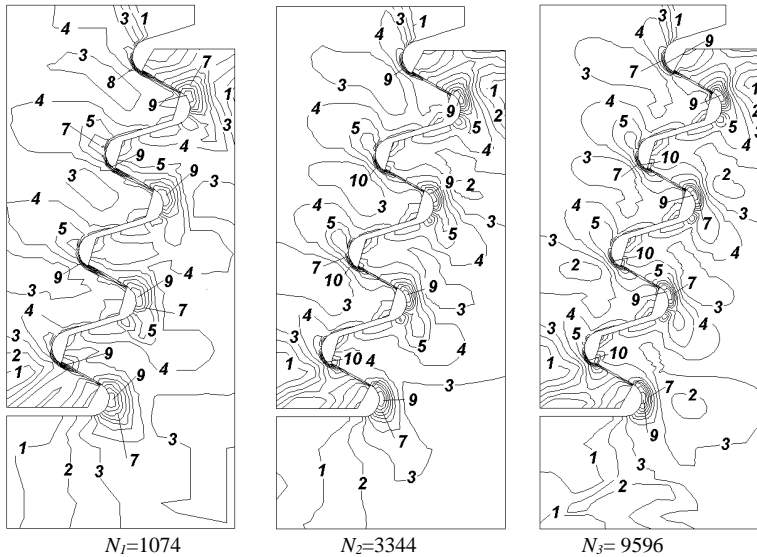


Рис. 5. Розподілення безрозмірної величини інтенсивності напружень  $\sigma_i / \sigma_0$  при пружному деформуванні (1 – 0.12; 2 – 0.24; 3 – 0.36; 4 – 0.48; 5 – 0.60; 6 – 0.72; 7 – 0.84; 8 – 0.95; 9 – 1.07; 10 – 1.19)

Для більш детального аналізу побудуємо графіки розподілення безрозмірної інтенсивності напружень вздовж кривих, що проходять через зони максимальних напружень вздовж поверхонь зубців хвостовика (рис. 6). Як видно з наведених графіків, результати, отримані при застосуванні скінченоелементних моделей з кількістю невідомих 3344 та 9596 майже повністю співпали (похибка менше 1%), в той же час на сітці з кількістю невідомих 1074 максимальні напруження є меншими майже на 10%.

Також було проведено дослідження збіжності отримуваних результатів в залежності від кількості невідомих скінченоелементних моделей при визначенні розрахункового ресурсу хвостовика лопатки і фрагмента обода диска турбіни. З цією метою проведено порівняння перебігу процесу накопичення пошкодженості з часом в точці  $B$  фрагмента  $I$  для кожної сітки, де значення параметра пошкодженості є найбільшими. Отримані результати свідчать, що похибка визначення ресурсу при застосуванні сіток з кількістю невідомих 3344 та 9596 складає менше 5%, тоді як застосування сітки з кількістю невідомих 1074 дає завищені на понад 20% значення ресурсу (рис. 7). Для подальшого аналізу і порівняння результатів значення розрахункового ресурсу отримане на сітці з кількістю невідомих 3344 прийнято за  $t_0$ .

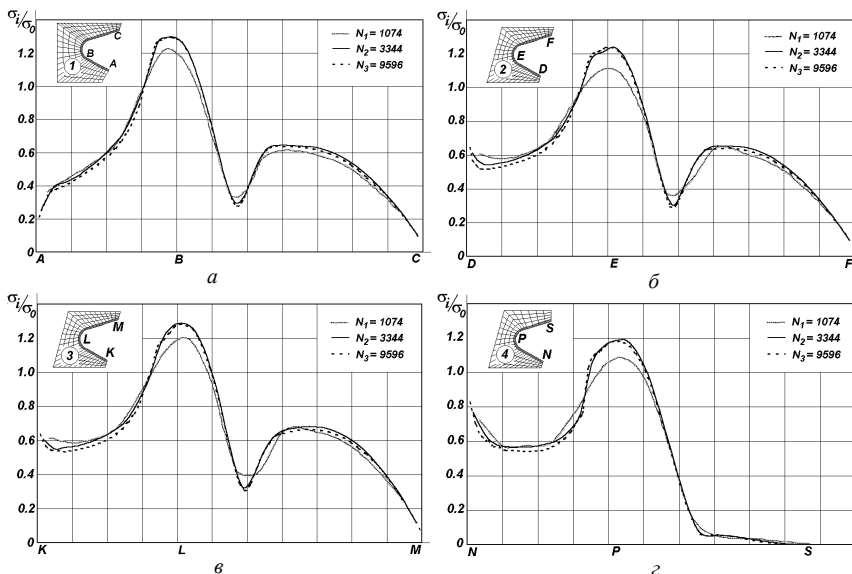


Рис. 6. Розподілення безрозмірної інтенсивності напружень при пружному деформуванні

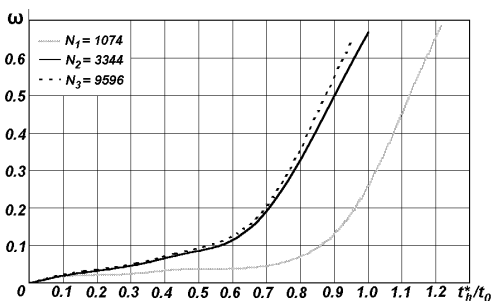


Рис. 7. Залежність зміни параметра пошкодженості з часом для різних скінченоелементних моделей

Таким чином, аналізуючи величини похибок, отриманих на різних сітках, можна зробити висновок, що збіжність результатів як при пружному деформуванні так і в умовах повзучості досягається при використанні сітки з кількістю невідомих 3344.

В подальшому був проведений більш детальний аналіз отриманих результатів при постійній температурі на сітці з кількістю невідомих 3344. На рис. 8 проілюстровано залежність зміни параметра пошкодженості з

часом для характерних точок всіх чотирьох галтелей хвостовика. Як видно з графіка максимальні значення пошкодженості виникають в точці  $B$ , що знаходиться на галтелі фрагмента  $I$ . Також на рис. 9 проілюстровано зміну безрозмірної інтенсивності напружень з часом в характерних точках хвостовика. Проаналізувавши отримані результати можна зробити висновок, що при постійній температурі максимальні значення пошкодженості в хвостовику виникають в тій самій точці, де в початковий момент часу виникають максимальні значення напружень.

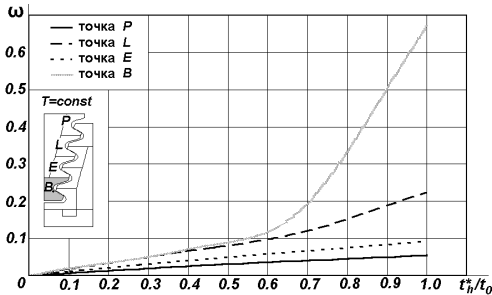


Рис. 8. Залежність зміни параметра пошкодженості з часом

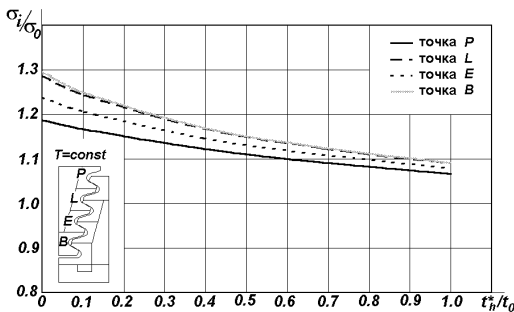


Рис. 9. Залежність зміни безрозмірної інтенсивності напружень з часом

На другому етапі розв'язання даної задачі проведено дослідження впливу неоднорідного температурного поля на еволюцію параметрів напружено-деформованого стану і розрахунковий ресурс хвостовика лопатки. Зміна температури по висоті поперечного перерізу хвостовика лопатки описується лінійним законом, максимальні і мінімальні значення лежать в межах  $\pm 0.5\%$  від значення температури в перерізі, що знаходиться на відстані від вісі обертання диска  $0.713R_0$ .

Проведений розрахунок хвостовика показав, що врахування нерівномірного розподілення температури майже не впливає на загальний напружено-деформований стан. Відповідна якісна картина розподілення напружень як в цілому в поперечному перерізі так і вздовж галтелей, що наведена відповідно на рис. 5 і рис. 6, не змінюється. В той же час, температура суттєво відображається на фізико-механічних характеристиках матеріалу (константах повзучості) (1), що призводить до зміни величини ресурса. Для даного розподілення температури значення розрахункового ресурсу становить  $t_h^{*T} = 0,9t_h^*$ .

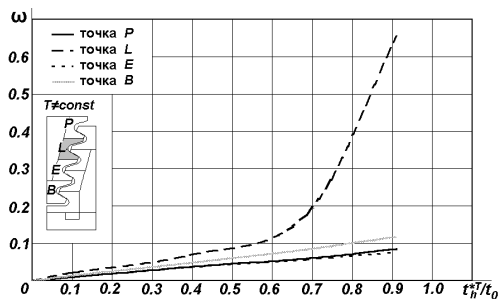


Рис. 10. Залежність зміни параметра пошкодженості з часом

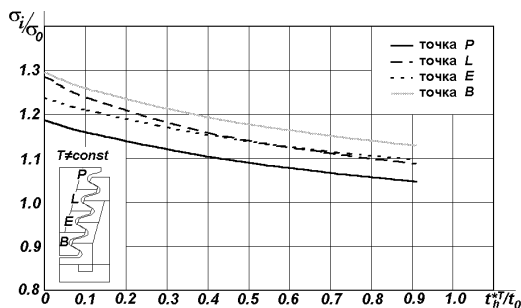


Рис. 11. Залежність зміни безрозмірної інтенсивності напружень з часом

З графіка залежності зміни параметра пошкодженості з часом (рис. 10) видно, що врахування нерівномірного розподілення температури в хвостовику приводить до зміни розташування точки, де виникають максимальні значення пошкодженості порівняно з розрахунком при постійній температурі: максимальні значення напружень в початковий

момент часу виникають в точці  $B$ , що знаходиться на галтелі фрагмента  $I$ , а максимальні значення пошкодженості виникають в точці  $L$  фрагмента  $3$ .

Таким чином, проведене визначення ресурсу до початку руйнування хвостовика лопатки газотурбінної установки в умовах термосилового навантаження показало, що врахування нерівномірного розподілення температур по висоті дозволяє уточнити величину розрахункового ресурсу приблизно на 9%.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Баженов В.А., Гуляр А.И., Пискунов С.О., Шкрель А.А.* Определение ресурса лопатки газовой турбины в условиях ползучести на основе континуальной механики разрушения // Проблемы прочности. – 2006. – №4. – С. 87-93.
2. *Баженов В.А., Гуляр О.И., Пискунов С.О., Андриевский В.П.* Алгоритм розв'язання просторової задачі термов'язкопружнопластичності призматичних тіл з урахуванням пошкодженості//Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-тех. збірн. - К.: КНУБА, 2006 р.
3. *Баженов В.А., Гуляр О.И., Пискунов С.О., Андриевский В.П.* Вплив температурного навантаження на основний та додатковий ресурс лопатки газотурбінної установки // Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2007. – Вип. 81. – С.3–32.
4. *Баженов В.А., Гуляр О.И., Пискунов С.О., Сахаров О.С.* Напіваналітичний метод скінчених елементів в задачах руйнування просторових тіл: Монографія – К.: КНУБА, 2005. – 298 с.
5. *Работнов Ю.Н.* Ползучесть элементов конструкций.– М., Наука, 1966. – 732 с.

Отримано 25.06.09

*В.А.Баженов, А.И. Гуляр, С.О. Пискунов, В.П. Андриевский*

#### **Исследование влияния неравномерного распределения температуры на ресурс хвостовика лопатки газотурбинной установки**

С использованием полуаналитического метода конечных элементов (ПМКЭ) проведено исследование влияния неравномерного распределения температуры на величину основного ресурса хвостовика лопатки газотурбинной установки в условиях ползучести.

*V.A.Bazhenov, A.I. Gulyar, S.O. Pyskunov, V.P. Andryevsky*

#### **Research of impact of irregular temperature distribution on lifetime of gasturbine unit blade batt**

The research of impact of irregular temperature distribution on lifetime of gasturbine unit blade batt under creep loading condition using semianalytical finite element method (SFEM) has been made.