

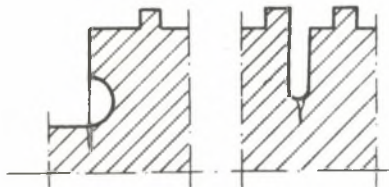
Maria BARYSZ

NIKTÓRE PROBLEMY ZMĘCZENIA MAŁOCYKLICZNEGO
W WIRNIKACH PEŁNOKUTYCH TURBIN AKCYJNYCH

Streszczenie. W pracy wskazano na miejsca i przyczyny małowycyklicznych uszkodzeń wirników pełnokutych turbin akcyjnych. Omówiono istniejące możliwości oceny spiętrzenia naprężeń w obszarze koncentracji - kanałach cieplnych uszczelnień dławnicowych. Przeprowadzono przybliżoną ocenę spiętrzenia naprężeń i działania karbu z porównaniem współczynników koncentracji naprężeń w oparciu o przedstawione formuły.

1. Miejsca i przyczyny uszkodzeń wirników pełnokutych akcyjnych

Nierównomierna praca, mała cykliczność obciążeń i naprzemienne pełzanie materiału są powodem pęknięcia wirników pełnokutych turbin akcyjnych w obszarach najbardziej obciążonych cieplnie.



Rys. 1. Miejsca uszkodzeń przedniej części wirników turbin

Jak wykazały doświadczenia eksploatacyjne [1], najwrażliwsze są okolice stopnia regulacyjnego od strony przedniej dławnicy WP i okolice I stopnia SP, a szczególnie dławnice przednie tego stopnia (rys. 1).

Takie właśnie umiejscowienie się pęknięć wynika z nagłych zmian średnic na długości wirnika, powodujących powstawanie w tych miejscach koncentracji naprężeń. Pęknięcia te mają

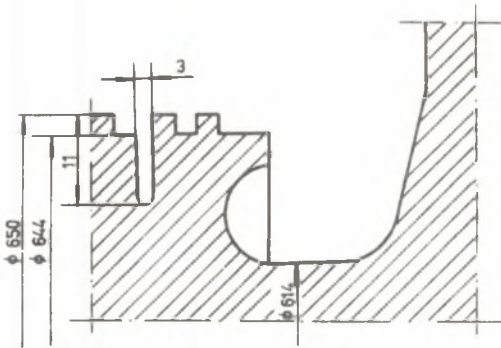
charakter zmęczeniowy a ich głębokość zależy od ilości uruchomień. Bezpośrednią przyczyną tych uszkodzeń jest zmęczenie małowycykliczne i zmęczenie cieplne wywołane różnicą i zmianami temperatury metalu wirnika w warunkach pracy ustalonej. Zmęczenie małowycykliczne powstaje w efekcie wysokich sprężystych i plastycznych, zmieniających się deformacji, pochodzących od wahań temperatury i jej nierównomiernego rozkładu. Zmęczenie cieplne natomiast występuje wskutek jednoczesnego działania zmęczenia małowycyklicznego, pełzania i relaksacji naprężeń podczas pracy ustalonej. O ile w wypadku zmęczenia małowycyklicznego o ilości cykli uruchomień do chwili pojawienia się pęknięcia decyduje wielkość deformacji plastycznych, to w przypadku zmęczenia cieplnego, istotny jest wpływ pełzania uzależniony od roz-

kładu naprężeń szczerpkowych pozostałych po pracy w warunkach niestabilnych.

Tak więc, złożona praca wirnika, a przede wszystkim potrzeba dużej elastyczności cieplnej, zmuszają do wyznaczenia dopuszczalnej, bezpiecznej ilości uruchomień dla bieżącej oceny tych możliwości. Dlatego niezbędne jest przeprowadzenie szczegółowej analizy i obliczeń naprężeń pochodzących od zmieniających się reżimów temperaturowych, ze szczególnym uwzględnieniem miejsc koncentracji.

2. Możliwości oceny spiętrzenia naprężeń w obszarach kanałów cieplnych uszczelnień dławnicowych

Kanały cieplne, jako koncentratory naprężeń na powierzchni czopa dławnicowego wirnika pełnokutego (rys. 2), utrudniają bardzo poważnie prze-



Rys. 2. Typowe rozwiązanie części przedniej wirnika SP

prowadzenie szczegółowej analizy naprężeń cieplnych w tych obszarach. O ile bowiem ocenę uszkodzeń prowadzi się w oparciu o metody konwencjonalne, to w przypadku karbów, jakimi są kanały cieplne na powierzchni czopa, metody te zawodzą przede wszystkim z powodu małej cykliczności obciążeń. Poza tym trudne jest określenie rozkładu temperatur w tych miejscach, szczególnie na dnie kanału cieplnego. Stąd przy obliczaniu naprężeń w tych ob-

szarach stosuje się współczynniki koncentracji naprężeń i deformacji. Można je wyznaczyć w oparciu o empiryczne zależności spotykane w literaturze [2, 3]. Istnieją również nomogramy [4], z których przy znanych geometriach elementów można łatwo odczytać współczynnik kształtu czy współczynnik działania karbu. Jednakże, zarówno formuły jak i nomogramy zostały wyznaczone w oparciu o badania zmęczeniowe próbek znormalizowanych i dotyczą jednoosiowego stanu naprężeń. Można co prawda stosować je z powodzeniem do obliczania elementów w warunkach dwu lub trójosiowego stanu naprężeń, jednakże należy dobrać odpowiednią hipotezę wyęczenia materiału, a żadna ze znanych nie jest adekwatna do warunków rzeczywistych z wyjątkiem może kryterium wyęczenia maksymalnego odkształcenia postaciowego.

Jak wynika z powyższego, współczynniki, którymi można się obecnie posłużyć w obliczeniach zmęczeniowych w obszarach koncentracji, dają wartości w dużym stopniu przybliżone. Stąd zawsze konieczność wyznaczenia współ-

czynników dla kanałów cieplnych czopów dławnicowych pracujących w warunkach złożonego, wieloosiowego stanu naprężeń.

Obecnie przygotowany jest algorytm obliczeń stanu naprężeń i deformacji dla osiowo-symetrycznego zagadnienia w obciążeniu przednich uszczelnień dławnicowych turbin akcyjnych w warunkach pracy nieustalanej. Pozwoli to wyznaczyć współczynniki koncentracji naprężeń i deformacji, a z tego współczynnik działania karbu dla przypadku obciążeń zmiennych. Tak otrzymane wyniki będzie można skonfrontować z wynikami otrzymanymi z zależności przybliżonych.

3. Przybliżona ocena spiętrzenia naprężeń i działania karbu

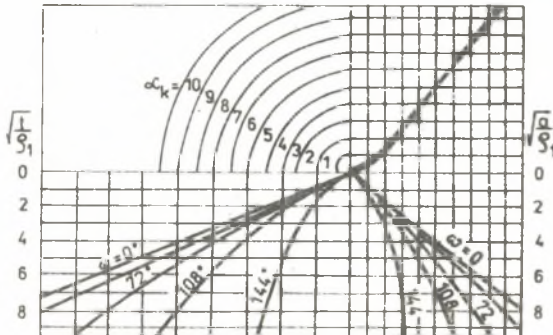
Miarą spiętrzenia naprężeń u podstawy karbu jest współczynnik kształtu α_k dotyczący idealnie sprężystego materiału; wyraża zależność między naprężeniem maksymalnym σ_{\max} w przekroju niebezpiecznym, a wartością naprężenia nominalnego σ_{nom} otrzymanego z klasycznej teorii sprężystości.

Dla tak zdefiniowanych naprężeń, wzór na współczynnik kształtu α_k ma postać:

$$\alpha_k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{nom}}} \quad (1)$$

Zależy on od kształtu elementu, jego wymiarów i w pewnym stopniu od sposobu obciążenia. Graficznie przedstawiono go na rys. 3 przy czym:

ρ - promień zaokrąglenia dna karbu,



Rys. 3. Współczynniki kształtu α_k dla prętów zginanych

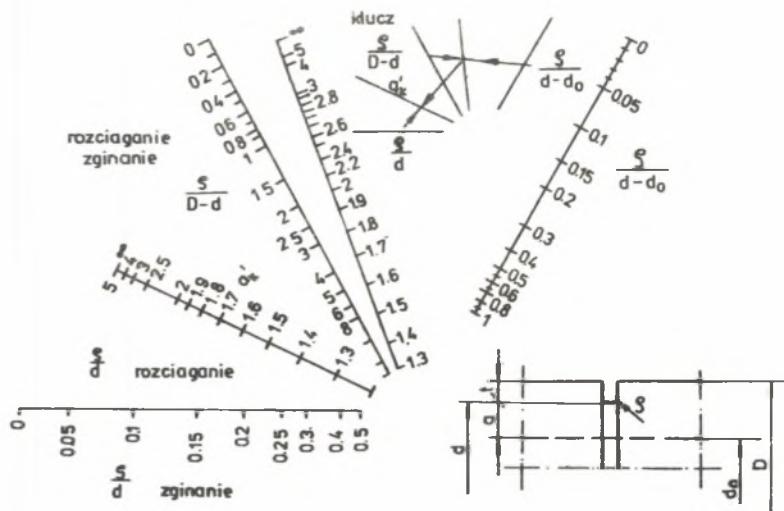
r - promień dna karbu,

R - promień zewnętrzny czopa dławnicowego,

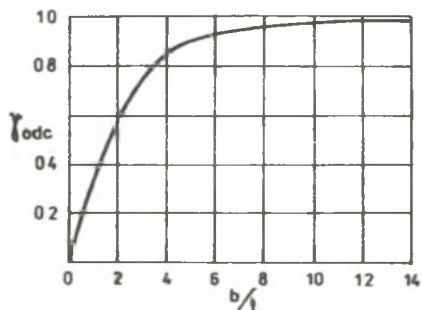
ω - kąt rozwarcia karbu (w przypadku kanału cieplnego $\omega = 0^\circ$).

Innym wykresem, pozwalającym wyznaczyć wartość tego współczynnika jest nomogram przedstawiony na rys. 4. Wyznaczone go w oparciu o ogólne współczynniki kształtu przyjęte z teorii Neubera, uwolnione od wpływu warstwy powierzchniowej i struktury materiału [4].

Naprężenia nominalne σ_{nom} rozpatrywanego niebezpiecznego przekroju ulegają zmianie w zależności od liczby karbów. W przypadku czopa dławnicowego, na którego powierzchni rozmieszczony jest szereg kanałów cieplnych, należy rozpatrzyć ich wzajemne, wypadkowe działanie. Może ono łago-



Rys. 4. Teoretyczne wartości współczynników kształtu



Rys. 5. Współczynnik odciążający dla karbów wielokrotnych

γ_{odc} - współczynnik odciążający, który można wyznaczyć z wykresu na rys. 5.

Wpływ niejednorodności kształtu elementu na wytrzymałość zmęczeniową w porównaniu z jednorodnym, ujmuje wzór na współczynnik działania karbu β_k :

$$\beta_k = \frac{Z_{gk}}{Z_k}, \quad (3)$$

gdzie:

Z_{gk} - wytrzymałość zmęczeniowa próbki gładkiej,

Z_k - wytrzymałość zmęczeniowa próbki z karbem.

dzić śpiętrzenie naprężeń lub wzmacnić w porównaniu z karbem pojedynczym. Czysto teoretyczna zależność (dla nieskończenie wielu jednakowych karbów) w ciele doskonale sprężystym w przypadku rozciągania i zginania ma postać

$$\alpha_k = 1 + 2\sqrt{\frac{t_w}{s}}, \quad (2)$$

gdzie:

t_w - czynna głębokość karbu $t_w = \gamma_{odc} \cdot t$,

Wyraża on zależność pomiędzy działaniem karbu w przedmiocie rzeczywistym, a działaniem karbu w ciele doskonale sprężystym. W warunkach zmiennych obciążeń określa on wielkość obniżenia wytrzymałości zmęczeniowej wskutek działania karbu. Współczynnik β_k zależy jest od:

- stosunku miejscowego zwiększenia największego naprężenia głównego do jego wartości nominalnej,
- wielkości i stosunku naprężeń głównych,
- odmiennych własności warstwy powierzchniowej w miejscu zmiany kształtu,
- wielkości przedmiotu w miejscu występowania karbu,
- rodzaju i własności materiału.

Jak wynika z powyższego, działanie karbu uzależnione jest od bardzo wielu czynników i jednoczesne uwzględnienie ich wszystkich jest bardzo trudne.

Według Thoma i Buchmanna [3] współczynnik działania karbu ma postać

$$\beta_k = 1 + \eta_k (\alpha_k - 1), \quad (4)$$

gdzie:

η_k - współczynnik wrażliwości materiału na działanie karbu,

α_k - współczynnik kształtu.

Zawarty we wzorze (4) współczynnik wrażliwości η_k zależy od kształtu karbu, rodzaju obciążenia, twardości materiału, wielkości ziaren, asymetrii cyklu obciążenia i zawiera się w granicach $0 \leq \eta_k \leq 1$ ($\eta_k = 0$ dotyczy materiału nie wrażliwego na działanie karbu, a $\eta_k = 1$ - materiału doskonale sprężystego).

Typowym wykresem ilustrującym zależność współczynnika wrażliwości materiału od geometrii karbu i wytrzymałości materiału jest wykres zamieszczony w pracy [3].

Poza zależnością (4), korzysta się ze wzorów wywodzących się z teorii Neubera. Jedną z nich jest zależność podana przez Kuhna i Hardratha:

$$\beta_k = 1 + \frac{\alpha_k - 1}{1 + \sqrt{\frac{A}{\sigma}}}, \quad (5)$$

gdzie:

A - stała materiałowa.

Zależność tę wykorzystuje się do wykreślania zmodyfikowanych wykresów $\eta_k = f(R_m, \sigma)$, a z tego wykresów do wyznaczenia współczynnika działania karbu $\beta_k = f(\alpha_k, \eta_k)$.

Oprócz wzoru (5) jest jeszcze wzór podany przez Heywooda [3]:

$$\beta_k = \frac{\alpha_k}{1 + 2 \frac{\alpha_k - 1}{\alpha_k} \sqrt{\frac{3,54a}{\sigma}}}$$

przy czym

a - stała materiałowa przyjmowana w zależności od granicy zmęczenia próbki gładkiej.

4. Porównanie współczynników koncentracji naprężeń

Kanały cieplne dławnicy przedniej części SP turbiny traktuje się jako płytkie w porównaniu ze średnicą wirnika. Współczynnik spiętrzenia naprężeń w obszarze kanału cieplnego przyjmuje się równy współczynnikowi koncentracji przy zginaniu. Dla takiego założenia i wymiarów jak na rys. 2 zostały wyznaczone następujące zależności: $\sqrt{a/\rho_1} = 11,75$, $\sqrt{t/\rho_1} = 2,28$, gdzie $\rho_1 = \rho + 2\varepsilon = \rho + 0,06 = 1,56$ mm. Z wykresu na rys. 3 został wyznaczony dla zginania współczynnik teoretyczny koncentracji $\alpha'_k = 5,8$. Dla $a/t = 26$ z wykresu pomocniczego wyznaczono α_k dla wałów drążonych z karbem pierścieniowym, uzyskano wartość rzeczywistego współczynnika α_k rzecz = 5,45 i dla $\rho = 1,5$ mm z wykresu [3, rozdz. XIII, 4], odczytano wielkość współczynnika wrażliwości na działanie karbu $\eta_k = 0,8$, a stąd współczynnik działania karbu $\beta_k = 4,6$.

Wykorzystując nomogramy podane przez Nöecea (rys. 4), dla $\rho/2r = 0,0024$, $\rho/(d - d_0) = 0,0026$ i $\rho/(D - d) = 0,0682$, teoretyczny współczynnik koncentracji naprężeń $\alpha'_k = 5,4$.

Uwzględniając wpływ wzajemnego oddziaływania kilku kanałów cieplnych na stan naprężeń cieplnych czopa dławnicowego, wyznaczono z rys. 5 wartość współczynnika odciążającego $\eta_{odc} = 0,8$. Dla takiego obciążenia, przy $b/t = 3,63$, gdzie b - odległość między kanałami cieplnymi, współczynnik kształtu $\alpha_k = 5,5$.

5. Analiza wyników

Jak wynika z powyższego, w obliczeniach prowadzonych zarówno pierwszą jak i drugą metodą, wartości współczynnika koncentracji α_k mają wartości bardzo zbliżone, jednakże nieco niższą wartość daje druga metoda (metoda Nöecea). Uwzględnienie wpływu szeregu kanałów na rozkład naprężeń w czopie dławnicowym wskazuje na wyraźne obniżenie współczynnika koncentracji naprężeń u podstawy kanału cieplnego, czyli kilka po sobie następujących rowków działa odciążająco na stan naprężeń u podstawy jednego.

Obliczony w pierwszym przypadku współczynnik działania karbu ma wartość wyraźnie niższą niż współczynnik kształtu.

LITERATURA

- [1] Dobosiewicz J.: Zmęczenie cieplne wirników turbin parowych o mocy 200 MW, Energetyka nr 3, 1977.
- [2] Niezgodziński M.: Wzory, wykresy i tablice wytrzymałościowe. PWN, Warszawa 1975.
- [3] Poradnik inżyniera Mechanika, WNT, Warszawa 1968.
- [4] Némec J.: Wytrzymałość i sztywność części stalowych. WNT, Warszawa 1968.
- [5] Barycz M.: Graniczna liczba cykli nagrzewania wirników w warunkach nieizotermicznych, cyklicznych obciążań. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Energetyka z. 66, 1978.

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ
ЦЕЛЬНОКОВАННЫХ РОТОРОВ АКТИВНЫХ ТУРБИН

Р е з ю м е

В статье указаны места и причины малоцикловых повреждений цельнокованных роторов активных турбин. Обсуждены существующие возможности оценки концентрации напряжений в зоне концентрации - в тепловых канавках лабиринтовых уплотнений.

Проведена приближенная оценка концентрации напряжений и действия насечки со сравнением коэффициентов концентрации напряжений на основании представленных формул.

SOME ASPECTS OF LOW - CYCLIC FATIGUE IN THE FULL FORGED ROTORS
OF IMPULSE TURBINES

S u m m a r y

In this paper the places and reason of the low-cyclic defects in a full-forged rotors of thermal impulse turbines was pointed. The existing possibility of stress concentration estimate for the concentrate regions - the thermal graves of the labyrinth scales was also discussed. The approaching estimate of the stress concentration and notch effect with comparison of the stress concentration coefficients based on the presented formulae was taken.