

Analiza stanu naprężeń i odkształceń metodą elementów skończonych (MES) w łopacie drugiego stopnia turbiny gazowej

Obecnie coraz częściej badaniom diagnostycznym urządzeń towarzyszą obliczenia metodą elementów skończonych stanu naprężeń i odkształceń. Wyniki tych obliczeń wykorzystywane są między innymi do analizy stopnia wyczerpania trwałości od zmęczenia i/lub pełzania oraz warunków propagacji pęknięć wg zasad i kryteriów mechaniki pęknięcia [1], a także w celu optymalizacji konstrukcji czy pracy urządzeń.

Podniesienie sprawności/mocy turbiny gazowej nierozłącznie wiąże się z konstrukcyjnymi zmianami w jej układzie przepływowym, wzrostem temperatury spalania, a także z doбором coraz wytrzymalszych materiałów na elementy turbiny [2, 3]. Łopatki turbiny gazowej pracują w wysokiej temperaturze przez co narażone są na korozję wysokotemperaturową, pełzanie i przegrzanie. Pomimo że na łopatki turbiny stosowano z biegiem czasu coraz bardziej wytrzymalsze stopy niklu i modernizowano ich konstrukcję, to dalej dochodzi do trwałych deformacji w obszarze daszka (bandaża).

Problem ten znany jest już od wielu lat, co wiąże się z potrzebą ciągłego monitorowania (badania endoskopowe, pomiary) wielkości deformacji jako jednego z kryteriów do określenia okresów pomiędzy kolejnymi przeglądami układu przepływowego.

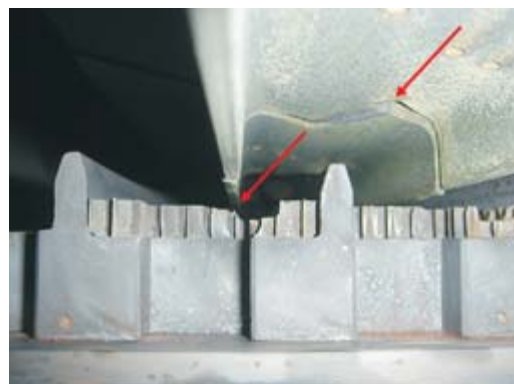
Sprawa wygląda jednak gorzej, gdy trwałe odkształcenie daszków łopatek pojawia się po krótkim czasie eksploatacji turbiny osiągając przy tym wartość krytyczną. Zaistnienie takiej sytuacji skutkować może ograniczeniami w produkcji, złym stanem dynamicznym urządzenia, obniżeniem sprawności, a w skrajnym przypadku może prowadzić do wcześniejszej niż przewidzianej przez producenta, wymiany kosztownych łopatek na nowe.

Przedmiot analizy

Łopatki (różnych stopni) turbin gazowych są obiektami obliczeń numerycznych wielu instytucji [4]. W artykule przedstawiono metodykę i wyniki analizy MES łopatki drugiego stopnia turbiny gazowej, ze względu na to, że w wyniku badań endoskopowych stwierdzono nadmierne deformacje daszków tychże łopatek po stosunkowo krótkim czasie eksploatacji – 16 000 h (rys. 1).

Z kolei podczas oględzin łopatek w czasie postoju turbiny związanej z wymianą łopatek drugiego stopnia stwierdzono dodatkowo powiększone luzy pomiędzy wierzchołka-

mi daszków łopatek a uszczelnieniami (rys. 1), a także odkształcenie plastyczne w miejscu kontaktu łopatek (rys. 2).



Rys. 1. Odształcone daszki łopatek drugiego stopnia turbiny gazowej i powiększone luzy pomiędzy łopatką a uszczelnieniem



Rys. 2. Odształcenie plastyczne w miejscu kontaktu łopatek

Przygotowanie modelu geometrycznego łopatki

Do przygotowania modelu geometrycznego posłużyła jedna z rezerwowych łopatek drugiego stopnia. Ze względu na bardzo skomplikowany kształt łopatkę poddano komputerowemu skanowaniu.

W wyniku skanowania otrzymano tzw. chmurę punktów, z której następnie utworzono powierzchnie łopatki.

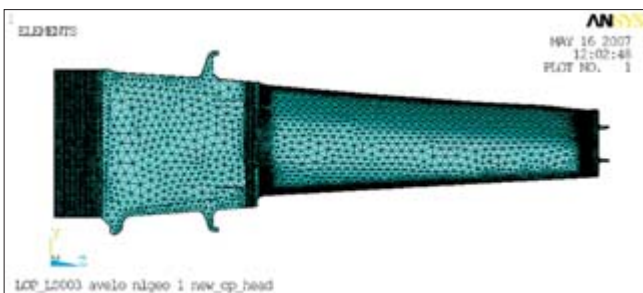
Domykając wszystkie powierzchnie uzyskano model geometryczny (CAD) łopatki do obliczeń (rys. 3).



Rys. 3. Model geometryczny łopatki drugiego stopnia turbiny gazowej

Wyniki obliczeń MES

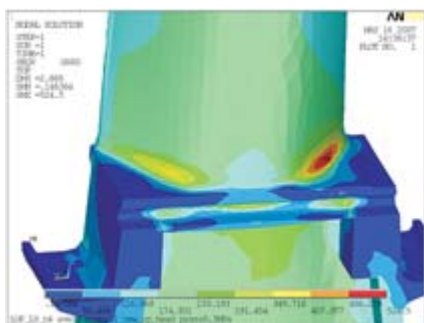
Analizę wytrzymałościową łopatki turbiny gazowej drugiego stopnia wykonano w programie ANSYS 11. Po zaimportowaniu modelu łopatki utworzono siatkę elementów skończonych łopatki (rys. 4). Następnie model obciążono strukturalnie temperaturą, prędkością obrotową, ciśnieniem przy założeniu cykliczności.



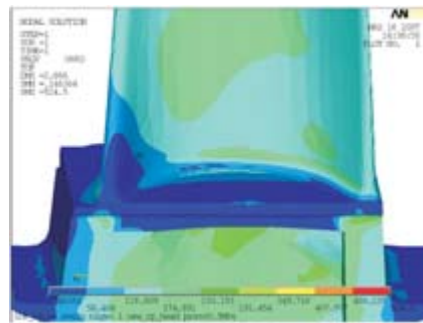
Rys. 4. Siatka elementów skończonych łopatki

Wyniki naprężeń zredukowanych

Naprężenia zredukowane swoją największą wartość (ok. 525 MPa) uzyskują w okolicach przekroju krytycznego łopatki, tzn. przy przejściu stopy łopatki w pióro po stronie wypukłej łopatki (rys. 5). Po stronie wklęsłej łopatki naprężenia zredukowane osiągają poziom 290 MPa (rys. 6).

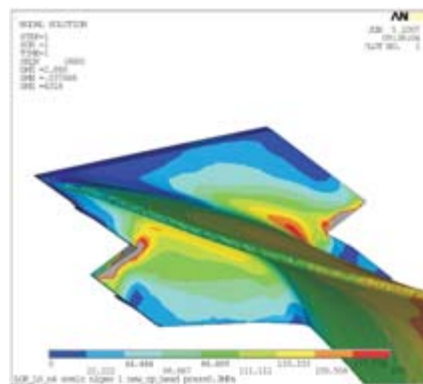


Rys. 5. Naprężenia zredukowane przy stopce łopatki – strona wypukła łopatki, MPa

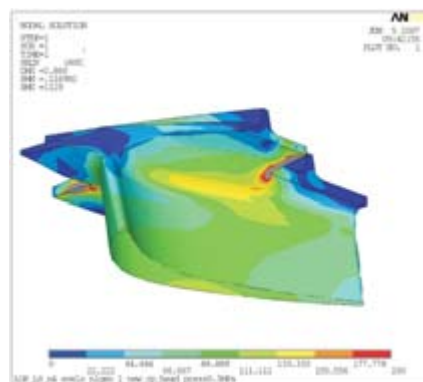


Rys. 6. Naprężenia zredukowane przy stopce łopatki – strona wklęsła łopatki, MPa

Na daszku łopatki, na powierzchniach jego styku z sąsiednimi łopatkami także występują wysokie wartości naprężeń. Ponieważ model był liczony jako liniowy wartości tych naprężeń należy odrzucić. Jednakże fakt ich występowania może tłumaczyć powstanie odkształcenia plastycznego w tych obszarach (rys. 7 i 8).



Rys. 7. Naprężenia zredukowane przy daszku łopatki. Widok od krawędzi wylotowej. Dodatkowo widoczne miejsca kontaktu łopatek, w których nastąpiło odkształcenie plastyczne

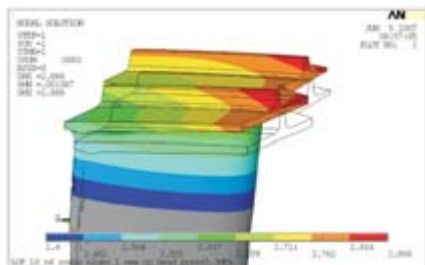


Rys. 8. Naprężenia zredukowane przy daszku łopatki. Widok od krawędzi wlotowej. Dodatkowo widoczne miejsca kontaktu łopatek, w których nastąpiło odkształcenie plastyczne

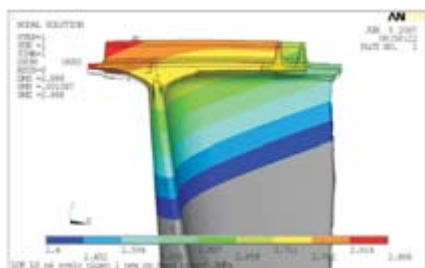
Wyniki odkształceń

Równocześnie z analizą naprężeń przeprowadzono obliczenia odkształceń łopatki. Największe odkształcenia zaobserwowano na daszku łopatki i wyniosło ono blisko 3 mm.

Szczegółowe wyniki obliczeń odkształceń pokazano na rysunkach 9 i 10.



Rys. 9. Odształcenia rzeczywiste daszka łopatki, mm

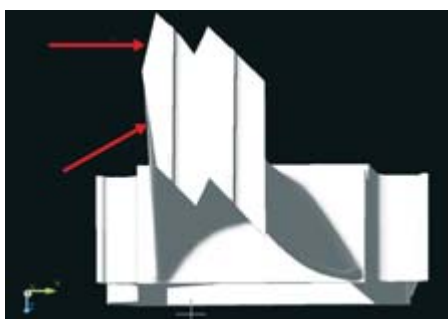


Rys. 10. Odształcenia rzeczywiste daszka łopatki. Widok od krawędzi wlotowej, mm

Podsumowanie obliczeń MES

Pomimo zastosowania optymalizacji kształtu daszka łopatki poprzez odpowiednie jego ścięcia (rys. 11), które wg producenta turbiny mają obniżyć o 25% wartość naprężeń w tym rejonie oraz wyrównać jego naprężenia i odkształcenia na całej powierzchni, obserwowane deformacje wskazują, że założony efekt został osiągnięty częściowo.

Trwałe deformacje pokrywają się z wyliczonymi naprężeniami i odkształceniami. Należy pamiętać, że warunki brzegowe temperatur pracy łopatki są wartościami pochodzącymi z termopar umieszczonych w okolicach stopek łopatek drugiego stopnia. Oznacza to, że rzeczywiste naprężenia i odkształcenia prawdopodobnie będą większe od obliczeniowych ze względu na możliwość pracy łopatek w wyższej temperaturze, zwłaszcza przy powiększonych luzach pomiędzy daszkiem łopatki a uszczelnieniami. By potwierdzić to założenie przeprowadzono pomiary odkształcenia łopatki po eksploatacji [5].



Rys. 11. Profil daszków łopatek drugiego stopnia

Wyniki pomiarów odkształcenia łopatki po eksploatacji

Pomiar odkształcenia łopatki po eksploatacji przeprowadzono na współrzędnościowej maszynie pomiarowej LINEA NMP 10.7.5. Maszyna ta, między innymi, brała udział przy odwzorowaniu kształtu łopatki nowej.

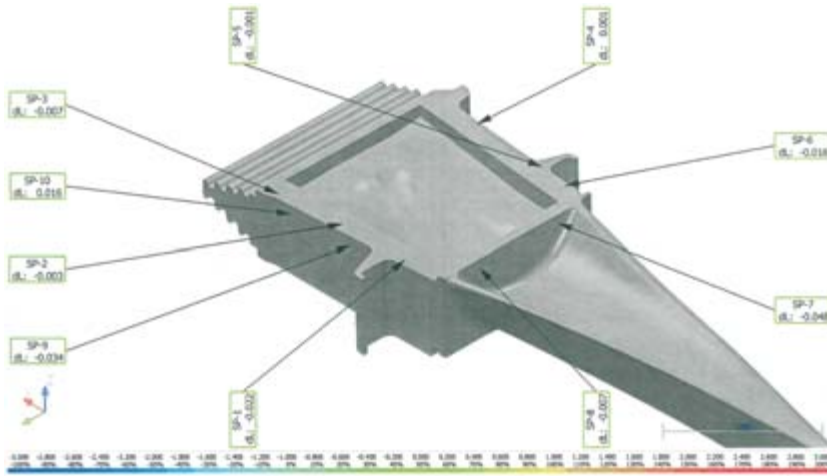
Wyniki pomiarów odkształcenia łopatki przedstawiono na rysunkach 12 – 20. Przed przystąpieniem do głównych pomiarów odkształcenia pióra łopatki i daszka pomierzono stopkę łopatki w celu kontroli bazy pomiarowej. Należało na zdemontowanej łopatce wyznaczyć takie miejsca, które posiadają zerową lub bliską zeru odchyłkę w stosunku do modelu łopatki nowej. Uznano, że najlepszym do tego miejscem będzie stopka łopatki. Wynik kontroli bazowania po stronie wklęsłej łopatki pokazano na rysunku 12. Kontrole bazowania przeprowadzono w dziesięciu punktach pomiarowych i względem nich ustalono układ współrzędnych. Pomiar pióra, po stronie wklęsłej łopatki, przeprowadzono wzdłuż dwóch tworzących.

Pierwsza tworząca (rys. 13) została pomierzona w 68 punktach. Największa zarejestrowana na niej odchyłka względem modelu nowej łopatki wynosi 1,489 mm, a najmniejsza 0,038 mm. Należy zaznaczyć, że znak „+” przy wartości odkształcenia oznacza wypuklenie się elementu, a znak „-” jego zapadnięcie się. Kolor zielony oznacza, że odchyłka jest bliska zeru, a zważywszy na to, że model nowej łopatki został wykonany z dokładnością 0,1 mm można stwierdzić, że obszary o kolorze zielonym pozostały nieodkształcone. Maksymalna odchyłka drugiej tworzącej po stronie wklęsłej łopatki wynosi 0,365 mm, a minimalna -0,464 mm (rys. 14). Druga tworząca została pomierzona w 67 punktach.

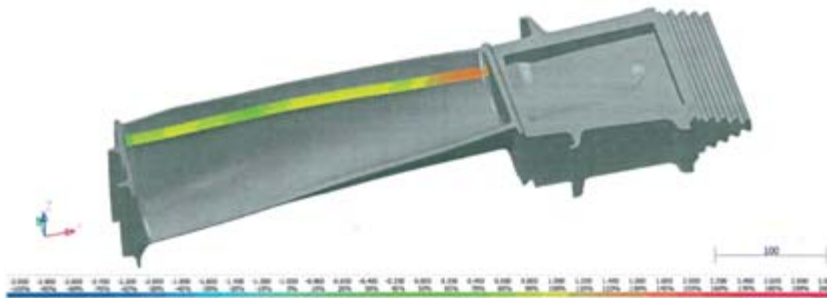
Pomiarów odkształcenia daszka dokonano wykorzystując tę samą bazę pomiarową jak dla tworzących części wklęsłej pióra łopatki. Na rysunku 15 pokazano wyniki pomiarów spodu daszka po stronie wypukłej łopatki.

Na rysunku 16 przedstawiono wyniki pomiarów odkształcenia spodu daszka po stronie wklęsłej łopatki. Największa odchyłka zarejestrowana na spodzie daszka po stronie wypukłej łopatki wynosi 3,893 mm, a wartość minimalna to -3,510 mm i występuje w górnej części daszka łopatki (rys. 17). Pomiary daszka łopatki wykonano w 66 punktach.

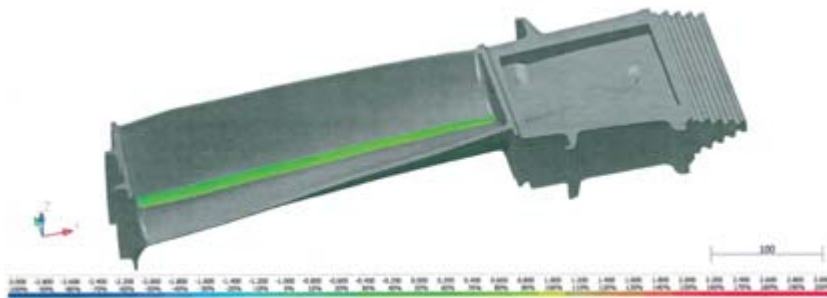
Na części wypukłej łopatki wykonano pomiary odkształcenia wzdłuż dwóch tworzących. W tym celu wykonano ponowną kontrolę bazowania łopatki w 14 punktach pomiarowych (rys. 18) i określono układ współrzędnych. Wyniki pomiarów odchyłek pierwszej tworzącej przedstawiono na rysunku 19. Maksymalna odchyłka pierwszej tworzącej wynosi 0,465 mm, a minimalna -0,523 mm. Skrajny wynik pomiaru o wartości 1,143 tej tworzącej należy zaliczyć już jako odchyłkę spodu daszka łopatki. Pomiarów pierwszej tworzącej wykonano w 68 punktach. Wyniki pomiarów odchyłek wzdłuż drugiej tworzącej po stronie wypukłej łopatki przedstawiono na rysunku 20. Pomiarów dokonano w 66 punktach. Maksymalna zarejestrowano odchyłka wyniosła -1,869 mm, a minimalna -2,447 mm [6].



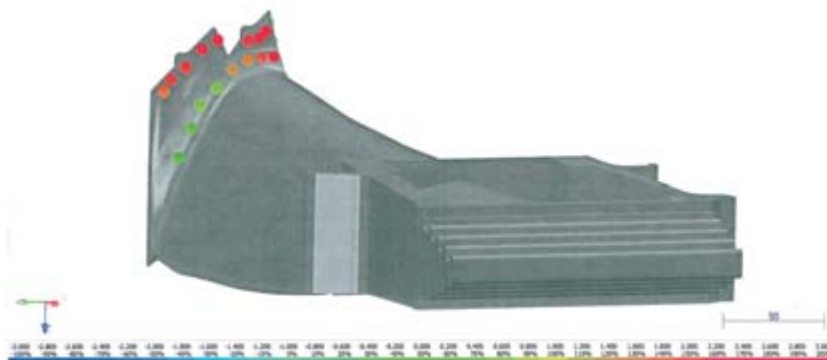
Rys. 12. Wyniki pomiarów kontrolnych bazowania po stronie wklęsłej łopatki



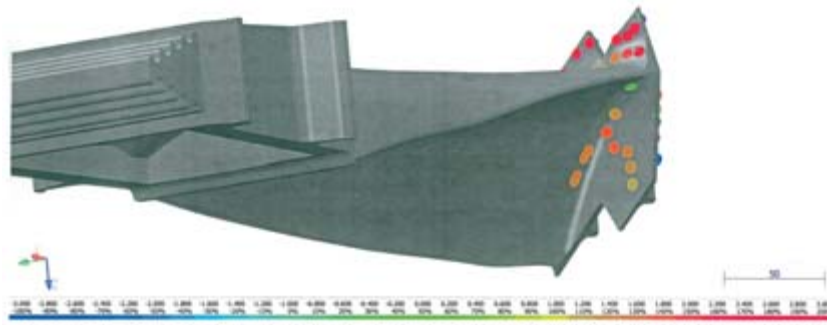
Rys. 13. Wyniki pomiarów kontrolnych odkształcenia wzdłuż pierwszej tworzącej po stronie wklęsłej łopatki



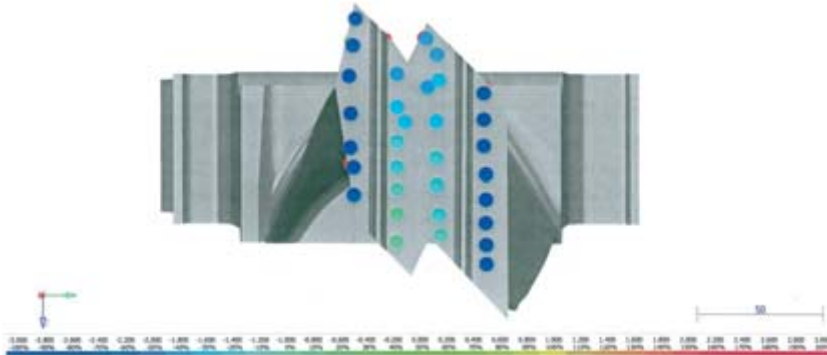
Rys. 14. Wyniki pomiarów kontrolnych odkształcenia wzdłuż drugiej tworzącej po stronie wklęsłej łopatki



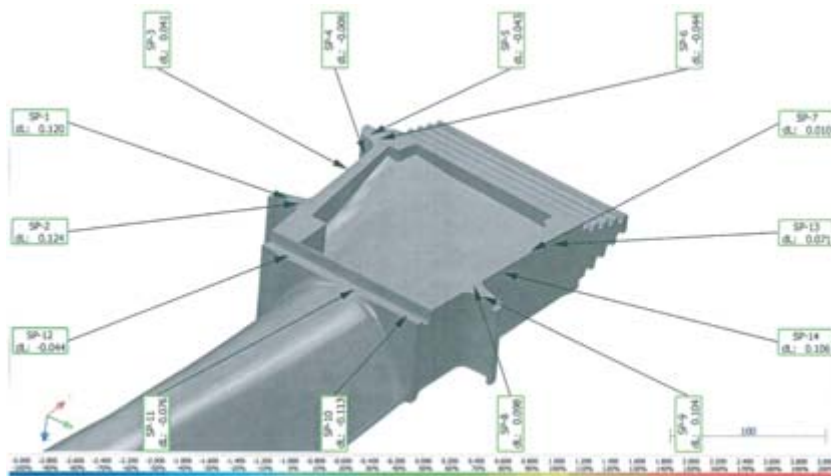
Rys. 15. Wyniki pomiarów kontrolnych odkształcenia spodu daszka po stronie wypukłej łopatki



Rys. 16. Wyniki pomiarów kontrolnych odkształcenia spodu daszka po stronie wklęsłej łopatki



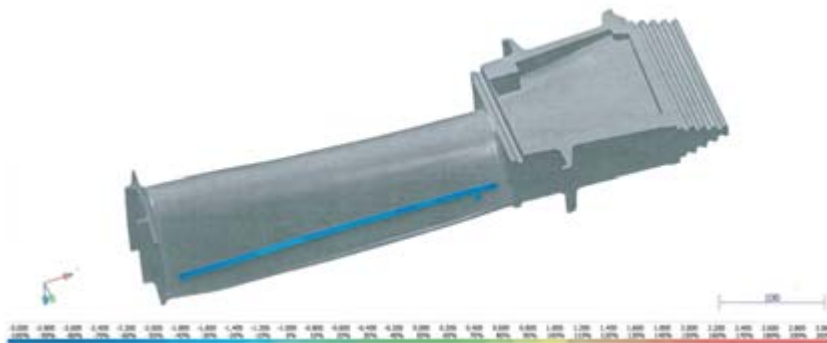
Rys. 17. Wyniki pomiarów kontrolnych odkształcenia góry daszka łopatki



Rys. 18. Wyniki pomiarów kontrolnych, kontrolne bazowania po stronie wypukłej łopatki



Rys. 19. Wyniki pomiarów kontrolnych odkształcenia wzdłuż pierwszej tworzącej po stronie wypukłej łopatki



Rys. 20. Wyniki pomiarów kontrolnych odkształcenia wzdłuż drugiej tworzącej po stronie wypukłej łopatki

Wnioski

1. Wykonane obliczenia wykazały, że występujące odkształcenia w czasie pracy przy obciążeniu i biegu luzem pokrywają się z występującymi trwałymi deformacjami daszków łopatek.
2. Rzeczywiste deformacje łopatek są większe od obliczeniowych ze względu na możliwość okresowej pracy łopatek w temperaturze wyższej od projektowanej.
3. Zastosowana metodyka, w tym analiza MES, okazały się poprawnym, inżynierskim podejściem do monitorowania na drodze obliczeniowej zjawisk deformacji łopatek turbin gazowych. Wykazano dobrą zgodność modelu obliczeniowego z rzeczywistością.

Literatura

- [1] Murzynowski W., Grzesiczek E.: „Wpływ geometrii i modeli obliczeniowych MES na rezultaty analizy stanu naprężeń w obrzeżach tarcz wirnikowych”, VIII Sympozjum Informacyjno-Szkoleniowe „Diagnostyka i remonty długoeksploatowanych urządzeń energetycznych”, październik 2006
- [2] Schilke P. W., „Advanced Gas Turbine Materials and Coatings”, 08/04
- [3] Johnson J. R., „Performance and Reliability Improvements for Heavy – Duty Gas Turbines”, 10/00
- [4] Arnal M., Precht C., Sprunk T.: „Fluid Structure Interaction Makes for Cool Gas Turbine Blades”, Advantage – Excellence in engineering simulation, Vol.1, 2007
- [5] Sprawozdanie Pro Novum Nr 022.1981/2007, czerwiec 2007
- [6] Sprawozdanie Pro Novum Nr 051.2010/2007, lipiec 2007

Filip Klepacki

Wpływ zmiany kształtu otworów na stan naprężeń w elementach walcowych

Najważniejszym elementem walcowym znajdującym się w zakładzie produkującym energię elektryczną jest walczak. Walczaki podczas eksploatacji wystawiane są na działanie dwóch obciążeń: obciążenia powierzchniowego pochodzącego od ciśnienia czynnika w walczaku oraz obciążenia cieplnego wynikającego z wysokiej temperatury wody zasilającej. Wymienione obciążenia powodują powstawanie odpowiednich naprężeń: naprężeń mechanicznych oraz naprężeń cieplnych wynikłych z różnicy temperatur między powierzchniami zewnętrzną i wewnętrzną walczaka.

Naprężenia cieplne oraz mechaniczne są naprężeniami składowymi naprężeń zredukowanych, które wyznaczone na podstawie odpowiednich hipotez wyężeniowych np. energii odkształcenia postaciowego (Huber) czy maksymalnych naprężeń stycznych (Tresca) wykorzystywane są w obliczeniach

wytrzymałościowych. Upraszczając można napisać, iż naprężenia całkowite wynoszą:

$$\sigma_t + \sigma_p = \sigma \quad (1)$$

σ_t - naprężenia cieplne,
 σ_p - naprężenia mechaniczne,
 σ - naprężenia całkowite.

Omówione naprężenia są zależne od konstrukcji walczaka i jego eksploatacji. W trakcie eksploatacji podlegają one okresowej zmianie, co w konsekwencji prowadzi do zmęczenia materiału (na te naprężenia mamy bardzo ograniczony wpływ, gdyż nawet poprawna eksploatacja nie powoduje ich stabilizacji czy obniżania).

W przeciwieństwie do eksploatacji, zmiany konstrukcji umożliwiają znaczny spadek maksymalnych naprężeń, zwłaszcza mechanicznych.