

Rys. 9. Widoczne spadki temperatury pracy metalu wraz z obniżeniem obciążenia

LITERATURA

- [1] Zbroińska-Szczechura E., Dobosiewicz J.: Wpływ warunków eksploatacji kotła na trwałość wężownic przegrzewaczy pary wtórnej. *Energetyka* 2006, nr 12
- [2] Klepacki F.: Korozja wysokotemperaturowa wężownic przegrzewaczy kotłów, *Energetyka* 2006, nr 3
- [3] Jakubik A.: Uszkodzenia niemechaniczne urządzeń ciepłych elektrowni. WNT, Warszawa 1974

- [4] Sprawozdanie *Pro Novum* nr 131.2090/2007
- [5] Sprawozdanie *Pro Novum* nr 10.2442/2010
- [6] Sprawozdanie *Pro Novum* nr 21.2453/2010



Jerzy Dobosiewicz, Radosław Stanek
Pro Novum Sp. z o.o.

Niektóre uszkodzenia łopatek kadłubów NP przy ograniczonych przepływach czynnika

Selected damages of blades of the LP part of turbines in conditions of limited flow of the factor

Problem niezawodności ostatnich stopni części NP turbin parowych przy niskich wydajnościach turbiny zyskał na aktualności w ostatnich latach wskutek:

- coraz częstszych uszkodzeń usztywnień i żeber części wylotowych NP,
- deformacji części kadłubów,
- uszkodzeń spoin łączących gardziele ze skraplaczem,
- pogorszenia stanu dynamicznego turbiny,
- przemieszczenia punktów stałych,
- odpadania osłon stellitowych łopatek,
- erozyjnego niszczenia krawędzi wylotowych łopatek.

Uszkodzenia te powstają np. w warunkach:

- uruchomienia,
- biegu luzem,
- odstawiania,
- zrzutu obciążenia.

Wszystkie wymienione uszkodzenia powstają w wyniku naruszenia ciepłych warunków układu przepływowego NP wskutek braku przepływu czynnika oraz niesprawności urządzeń układów zrzucających parę do skraplacza, ochładzających gardziel i łopatek ostatnich stopni.

Podwyższenie temperatury wskutek niewystarczającej sztywności kadłuba z wbudowanymi łożyskami powoduje pogorszenie stanu dynamicznego turbiny i może skutkować asymetrycznym przemieszczeniem kadłuba, jego odkształceniem, a nawet pęknięciami. Ponadto w czasie nagrzewania turbiny na wybiegu i uruchomienia zachodzą nagłe przemieszczenia skraplacza w dół.

Wszystkie wyżej wymienione niekorzystne zjawiska są skutkiem zrzutu do skraplacza pary z uszczelnień, a szczególnie znacznej jej ilości z urządzeń rozruchowych i zrzutowych, np. pary wtórnie przegrzanej.

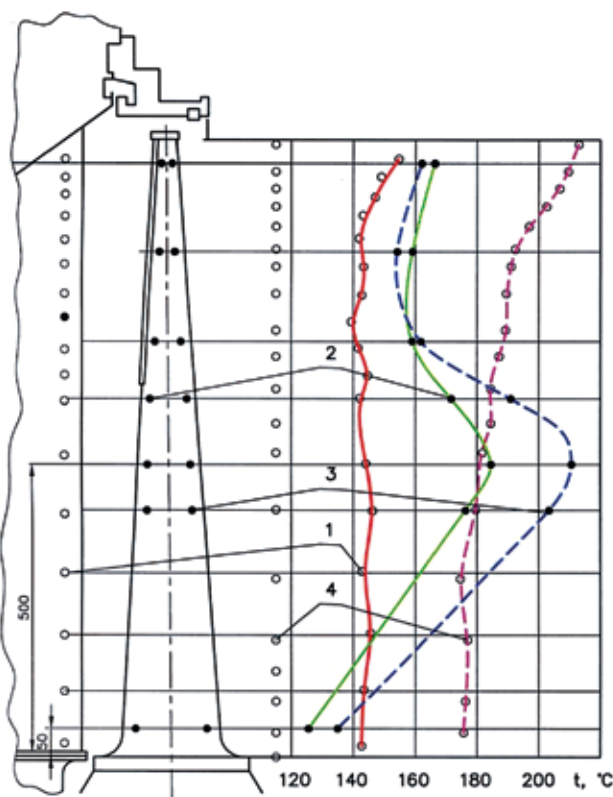
Uszkodzenie ochrony stellite'owej krawędzi wlotowych skraca znacznie trwałość łopatek. W sytuacji gdy zalecana temperatura pary zrzutowej do skraplaczy powinna mieścić się w granicach 120 – 190°C (górną granicą 200°C); rzeczywista jej wartość często dochodzi do 300 – 400°C. W takim przypadku temperatura gardzieli często przekracza 200°C przy dopuszczalnej 120°C.

Zgodnie z danymi doświadczalnymi przy temperaturze 150°C i obciążeniu odpowiadającym naprężeniom eksploatacyjnym można zaobserwować obniżenie wytrzymałości spoiwa, a przy temperaturze 200°C w spoiwie powstają pęknięcia.

Parametrem eksploatacyjnym określającym stan cieplny części NP turbiny jest temperatura pary na ostatnim rzędzie łopatek roboczych lub w gardzieli.

W czasie pracy w układzie przepływowym stan cieplny łopatek zależy od strumieni pary: wewnętrznych i zewnętrznych, skraplaczy i ciepłego strumienia strat wentylacyjnych.

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki badań LMZ na biegu jałowym przy uruchamianiu ze wzrostem ciśnienia w skraplaczu. Strumienie wewnętrzne potęgują się i są proporcjonalne do gęstości pary, co jest charakterystyczne dla procesów wentylacyjnych i określają cieplny stan łopatek roboczych.

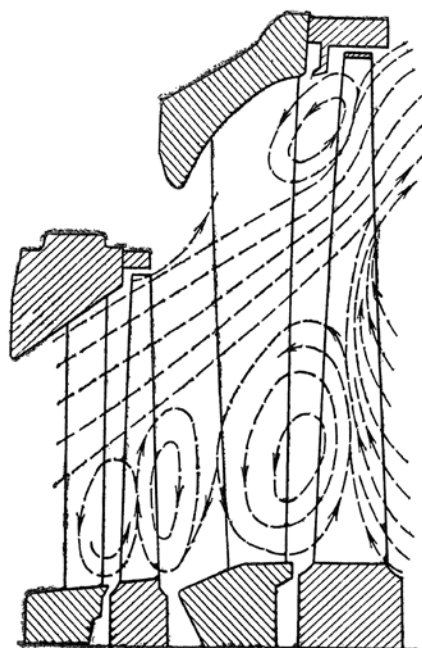


Rys. 1. Rozkład temperatury w łopatkach roboczych w czasie biegu jałowego, przepływ pary przez stopień 13t/h, ciśnienie w skraplaczu 3,4 KPa.

1. Temperatura pary w przestrzeni międzywieńcowej.
- 2,3. Temperatura metalu odpowiednio na wlotowej i wylotowej krawędzi
4. Temperatura pary za łopatkami roboczymi w stanie bez ochłodzenia [1].

Wewnętrzne strumienie wytwarzają w łopatkach roboczych ostatniego stopnia charakterystyczny obraz. Przy utrzymywaniu temperatury pary w gardzieli na poziomie 80 – 100°C temperatura metalu krawędzi wlotowych i wylotowych waha się w granicach 190 – 200°C.

Przy temperaturze pary w gardzieli niższej od 120°C wzrasta liczba kropeł wilgoci zawieszonych w parze „porywanej” ze skraplacza, a tym samym powstaje niebezpieczeństwo korozji krawędzi wylotowych (rys. 2).



Rys. 2. Schemat przepływu pary w ostatnich stopniach NP podczas biegu jałowego

Przy zmianie temperatury czynnika, za ostatnimi stopniami w zakresie 50 – 300°C, temperatura przestrzeni międzywieńcowej zmienia się nieznacznie. W związku z powyższym, w celu zmniejszenia natężenia erozji na krawędziach wylotowych wskazany jest schładzać parę w gardzieli do 100 – 120°C.

Ekstremalne warunki temperaturowe łopatek powstają w czasie zrzutu obciążenia i następnie pracy na biegu jałowym. Praca na biegu jałowym, wskutek zachodzenia procesów wentylacyjnych, powoduje w łopatkach wzrost temperatury, która w dużym stopniu jest zależna od wielkości próżni w skraplaczu. Rozkład temperatur na powierzchni łopatek, z uwagi na ich kształt oraz niejednorodny rozptył czynnika, może być różny, co przyczynia się do ich deformacji (rys. 3).



Rys. 3. Odształcenie cieplne łopatek

W czasie szybkiego nagrzewania i ochładzania powstają na powierzchniach łopatek gradienty temperatur, w czasie których swobodnemu wydłużaniu się warstw zewnętrznych przeszkadzają warstwy wewnętrzne elementu. W związku z powyższym w zewnętrznych i wewnętrznych warstwach powstają naprężenia, które w przypadku przekroczenia granicy plastyczności metalu mogą okazać się odkształceniami trwałymi (rys. 2).

Jeszcze gorsza sytuacja występuje, gdy nagrzane łopatki poddane są nagłemu schłodzeniu (udar cieplny), wtedy nie tylko powstają trwałe odkształcenia, lecz również mogą powstać pęknięcia (rys. 4).



Rys. 4. Łopátka pęknięta przy stopce, krawędź wylotowa, pęknięcie termiczne

Jedynym sposobem uniknięcia wysokich temperatur w ostatnich stopniach warunkach uruchomienia i na biegu jałowym jest utrzymywanie ciśnienia w skraplaczu na minimalnie możliwym do osiągnięcia poziomie.

Na biegu turbiny z małym przepływem pary lub jej brakiem wzrasta temperatura czynnika, który można uważać za mieszaninę gazów zasysanych ze skraplacza. Ponieważ ze wzrostem temperatury lepkość gazów rośnie i tym samym wzrastają opory tarcia, może to skutkować nagrzewaniem się i odginaniem łopatek w stronę przekroju o mniejszej bezwładności (odwrotnie niż przy przepływie pary nasyconej). W przypadku gdy powstające naprężenia przekraczają wartość granicy plastyczności metalu łopatki, dla panującej temperatury, odkształcenia te mogą przyjąć postać trwałą.

Erozja wylotowych krawędzi łopatek ostatnich stopni NP bardzo często powoduje konieczność wymiany łopatek. Powstawanie erozji wynika z powodu wieloletniej pracy turbiny na obniżonych parametrach oraz częstych uruchomień.

Bezpośrednie działanie wilgoci z dużymi kroplami powoduje: wilgotność eksploatacyjną odseparowaną na powierzchniach układu przepływowego, również wilgotność od różnych zrzutów wody do kondensatora, kondensatu podawanego na ochłodzenie gardzieli wylotowej i przestrzeni wirnika NP oraz pary zrzutowej, wtrysków ze stacji redukcyjno – schładzającej, jak również wilgotność pochodzącą z uszczelnień końcowych oraz z górnych rzędów rurek skraplacza. Strefa krawędzi wylotowych podlegającej erozji, zazwyczaj, zajmuje 30 – 60% długości łopatek od stopki 10 – 16 mm szerokości (rys.5).



Rys. 5. Erozja krawędzi wylotowej

Intensywność erozji zależy od wylotowego kąta łopatek roboczych oraz ich odległości od wylotów łopatek kierowniczych.

Zrzut pary, z włączonym wtryskiem, powoduje intensywne rozpylanie wody, której część pod działaniem zawirowań osiada na gardzieli i spływa na przystopkowa część łopatek potęgując erozję (rys.6).



Rys. 6. Erozja – krawędzie wlotowe

Zasysanie wilgotności z górnych części skraplacza, gdzie umieszczone są urządzenia zrzutowe pary, może być powodowane zawirowywaniem strumienia pary, szczególnie na biegu jałowym i przy małych obciążeniach oraz wskutek rozbryzgu strumienia wody ochładzającej i podnoszenia kropli spływającego strumienia pary z gardzieli, unoszenia kropli przez wiry, które powstają wskutek odrywania się od łopatek roboczych.

W czasie małych obciążeń przepływ pary przy stopce związany jest z pojawieniem się ujemnego stopnia reakcyjności, to jest w czasie, gdy dolna połówka koła pracuje jako wentylator promieniowy. Wtedy ciśnienie w kanałach międzyłopatkowych jest mniejsze od ciśnienia w przestrzeni między kołami, co powoduje rozrzedzenie czynnika z gardzieli, tzw. wilgotność „wtórna”.

W zasadzie wilgotność „wtórna” jest wysysana na tych reżimach z kołem roboczym ostatniego stopnia z gardzieli i skraplacza i jest główną przyczyną erozji krawędzi wylotowych, a przy nadmiernej ilości może powodować rozwój erozji na krawędziach wlotowych (rys.6).

Podsumowanie

Przyczyną występowania tego rodzaju erozji jest grubo rozpylona wilgotność, której sprzyjają powrotne strumienie czynnika w warunkach pracy na małych przepływach i uruchomieniach i na biegu jałowym. Zużycie erozyjne wylotowych krawędzi obniża trwałość łopatek.

Przyczyną erozji w turbinach pracujących w pogorszonej próżni i pełnym zamknięciem diafragm jest praca z urządzeniami schładzającymi – wtryskami.

Jak już wspomniano źródłem tej wilgotności są różnego rodzaju zrzuty wody do skraplacza oraz kondensat podawany na schładzaniu części wylotowej, wilgotność pochodząca z końcowych uszczelnień i górnych rurek skraplacza, jak również praca skraplacza z włączonymi parowymi schładzaczami.

Pęknięcia krawędzi łopatek części NP zaczynają się na krawędzi wylotowej i mają charakter zmęczeniowy. Przyczyną może być pogorszona próżnia oraz ochłodzenie gardzieli, jak również amplituda drgań, a tym samym wielkość naprężeń wibracyjnych, które są wprost proporcjonalne do gęstości pary i jej objętościowego przepływu.

LITERATURA

- [1] Jakowicz, Woropajew, Chaimow: Tęplotowe zastożanie CND turbin K-800-240-5 na mało rozchodnych reżimach, *Elektroczeskiye Stanciji* 2010, nr 5
- [2] Kuliczochin: O niekatoricijh pricinach erozji wychodnych kromok ..., *Tieptoenergiyka* 1978, nr 5
- [3] Pollard D., Lord D.: An Evaluation of Low Pressure Steam turbine blade erosion, *J.Mech E* 1979, p. 413-419
- [4] Somm E.: A mens of estimating the erosion hazard in Low pressure steam turbine, *BBC* vol. 58 p. 458 – 472



Ewald Grzesiczek, Wojciech Murzynowski, Radosław Stanek
Pro Novum Sp. z o. o.

Wybrane problemy obliczeniowej analizy trwałości łopatek części niskoprężnych turbin

Selected issues concerning the computation analysis of the service life of the blading in lp turbine sections

Diagnostyka materiałowa, jak powszechnie wiadomo, służy do zdobywania wiedzy o stanie technicznym elementów urządzeń ciepłno-mechanicznych. Kompletna diagnostyka urządzeń powinna zawierać zarówno wiedzę pochodzącą z badań podczas postojów urządzeń jak i możliwą do zdobycia podczas ich pracy [1, 2]. Bardzo często interpretacja wyników badań wymaga wykonywania obliczeń stanu naprężeń m.in. po to, aby rzeczywiste lub potencjalne uszkodzenia kojarzyć z ewentualnym wpływem cech konstrukcyjnych. W artykule przedstawiono wybrane przykłady takiego postępowania w zastosowaniu do analizy pęknięć łopatek ostatnich stopni wirników części niskoprężnych turbin.

Model geometryczny jako podstawa obliczeń

Obliczenia polegające na analizie stanu naprężenia/odkształceń, które mają na celu zarówno sprawdzenie wielkości naprężeń w stosunku do poziomu uznanego przez konstruktora

za dopuszczalny (szczególnie w miejscach ich koncentracji), jak również w celu dalszego wykorzystania do analizy stopnia wyczerpania trwałości od zmęczenia i/lub pęczania oraz warunków propagacji pęknięć wg zasad i kryteriów mechaniki pęczania, wymagają dokładnego odwzorowania analizowanej konstrukcji [3]. Upraszczenie modelu geometrycznego do obliczeń numerycznych dopuszczalne jest dla obiektów o dużych gabarytach, dla których wyznacza się globalny rozkład naprężeń, np. kadłuby turbin. Jeżeli jednak w konstrukcji elementu analizuje się miejsca, które mogły ulec lub uległy uszkodzeniom, a przy tym wszystkim są stosunkowo niewielkich rozmiarów, wtedy całkowicie zasadnym staje się dążenie do jak najbardziej dokładnego odwzorowania geometrycznego takiego elementu. Takimi elementami są m.in. łopatki ostatnich stopni części niskoprężnych turbin, które są przedmiotem artykułu.

Stosunkowo prostym i oczywistym wydaje przygotowanie modelu geometrycznego 3D elementu do obliczeń w powszechnie używanych programach, jak np. AUTO CAD czy Pro/ENGINEER posiłkując się dokumentacją rysunkową. Należy jednak pamiętać,