

Zespół redakcyjny: mgr inż. Jerzy Dobosiewicz, dr inż. Jerzy Trzeszczyński

Jerzy Dobosiewicz

Niektóre przyczyny uszkodzeń łopatek roboczych turbin parowych

Trwałość łopatek roboczych jest trudna a nawet wręcz niemożliwa do jednoznacznej oceny. Istnieje wiele czynników, w tym również przypadkowych, wpływających na stan łopatek. Są one związane z konstrukcją, eksploatacją i remontem poszczególnych turbin. Bardzo często w eksploatacji nie zwraca się uwagi na czynniki obniżające trwałość łopatek, mimo iż odpowiednie informacje podawane są w różnego rodzaju instrukcjach eksploatacyjnych, remontowych oraz DTR.

Łopatki wirnikowe turbin parowych są obciążone:

- ◆ siłami kinetostatycznymi,
- ◆ statycznym naporem czynnika,
- ◆ dynamicznym naporem czynnika.

Warunki, w jakich pracują łopatki mogą prowadzić do obniżenia niezawodności turbin, a tym samym całego bloku energetycznego.

Znaczne naprężenia stałe i zmienne w środowisku pary (nierzadko zanieczyszczonej) powodują wyczerpanie trwałości metalu łopatek, a w konsekwencji ich uszkodzenia.

W czasie pracy turbiny występują zawsze siły wymuszające drgania łopatek. W wyniku drgań w łopatkach powstają naprężenia dynamiczne sprzyjające stopniowemu wyczerpaniu trwałości aż do wystąpienia uszkodzenia zmęczeniowego włącznie. Poziom naprężeń dynamicznych zależy od warunków eksploatacji, czynników konstrukcyjnych i montażowych oraz parametrów pracy części przepływowej turbiny itp.

Najczęściej bezpośrednią przyczyną uszkodzeń jest zmęczenie metalu spowodowane działaniem sił kinetostatycznych oraz dynamicznych wywołanych drganiami łopatek.

Analizując przełom można ustalić jedynie przyczyny bezpośrednie uszkodzenia, złom nagły, zmęczeniowy (wielocykliczny lub małowycykliczny), natomiast o wiele trudniej jest ustalić powód powstania złomu.

Złomy łopatek można podzielić na:

- | | |
|--|-----------------------------|
| ➤ zmęczeniowe | } przyczyny
bezpośrednie |
| ➤ korozyjne – korozja naprężeniowa
korozja zmęczeniowa
korozja postojowa | |
| ➤ mechaniczne – spowodowane
ciałami obcymi. | |

Wieloletnie doświadczenia dowodzą jednoznacznie, że uszkodzenia łopatek spowodowane nieodpowiednią jakością metalu praktycznie nie zdarzają się.

Do ustalenia przyczyny powstania złomu zmęczeniowego w znacznym stopniu pomocne jest określenie:

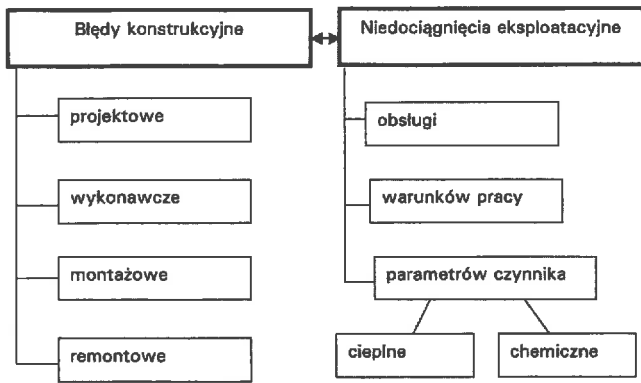
- głębokości pęknięcia zmęczeniowego,
- stopnia i charakteru wyglądzenia przełomu zmęczeniowego,
- miejsca oraz liczby inicjatorów pęknięcia zmęczeniowego,
- charakteru linii spoczynkowych,
- liczby linii spoczynkowych,
- położenia linii spoczynkowych w stosunku do osi poprzecznej łopatek.

Ponieważ otrzymywane do badań złomy są często wtórnie odkształcone nie zawsze dostępna jest informacja na temat wyżej wymienionych cech. To bardzo utrudnia ustalenie przyczyny powstania złomów łopatek.

Uszkodzenia zmęczeniowe

Przyczyny pośrednie wywołujące uszkodzenia łopatek można podzielić na dwie główne grupy:

- spowodowane błędami eksploatacyjnymi,
- spowodowane błędami konstrukcyjnymi.



Rys. 1. Przyczyny pośrednie uszkodzeń łopatek

Wpływ warunków pracy

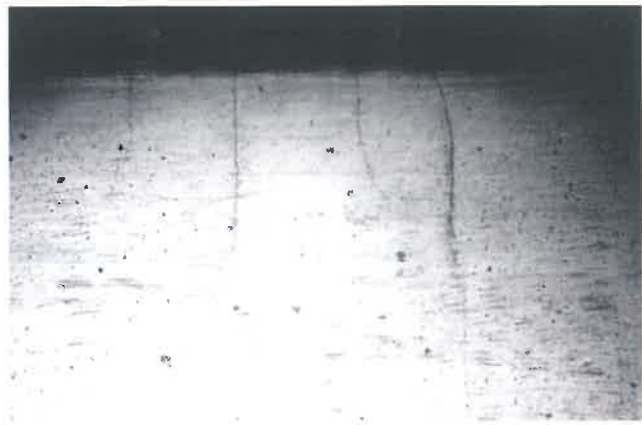
Poziom naprężeń dynamicznych zależy od warunków eksploatacji i cech konstrukcyjnych części przepływowej. W przypadku łopatek ostatnich stopni NP podstawową rolę odgrywa ciśnienie w skraplaczu, które istotnie wpływa na natężenie drgań. W stopniach przyupustowych dodatkowe wiry, powstające w wyniku znacznej stacjonarnej nierównomierności strumienia oraz nadmiernego spadku ciśnienia przy nadmiernym poborze pary, powodują wzrost naprężeń statycznych i dynamicznych (parametry pracy) — rysunek 2.



Rys. 2. Pęknięcie zmęczeniowe. Stopień przed nieregulowanym upustem; turbina 55 MW
Przyczyna uszkodzenia: niejednorodny i nadmierny pobór pary z upustu

W strefie fazowego przejścia (strefa Wilsona) łopatki otrzymują dodatkowe bodźce dynamiczne, gdyż kondensacja pary zachodzi niejednocześnie w całej objętości. Zwiększa to nierównomierność pola ciśnienia w stopniu. Zmęczenie, zwłaszcza małowyciskowe, może być wywołane również naprężeniami zginającymi występującymi przy przywieraniu łopatek do nieruchomej części turbiny, np. w przypadku nieodpowiedniej próżni w czasie uruchomienia lub przy uderzaniu o wodę gromadzącą się w dolnych częściach kadłuba (błędy obsługi) — rysunek 3.

Zmiany parametrów pracy turbiny mogą prowadzić do zwiększania sił wzbudzających drgania i ich uszkodzeń. Obniżenie temperatury pary bez obniżenia jej ciśnienia lub stałej mocy wymaga zwiększania przepływu pary, co doprowadza do przeciążenia układu łopatkowego. Podobny efekt występuje przy elektrycznych przeciążeniach bloku.



Rys. 3. Pęknięcia od zmęczenia małowyciskowego na krawędzi wylotowej; ostatni stopień NP; turbina 200 MW
Przyczyna uszkodzenia: zacieranie czołowych krawędzi łopatek z powodu dużego ciśnienia w skraplaczu

Obniżenie częstości prądu w sieci elektrycznej powoduje zmniejszenie prędkości obrotowej wirnika, która jest źródłem zmian częstości sił wymuszających w turbinie. Niektóre stopnie odstrojone zadowalająco dla prędkości znamionowej mogą w tym przypadku wpaść w drgania rezonansowe.

Nie bez znaczenia są występujące na krawędziach łopatek nieciągłości odgrywające rolę koncentratorów naprężeń zapoczątkowujących pęknięcia zmęczeniowe. Przyczyną ich powstawania mogą być drobne cząstki stałe (zgorzelina) niesione z czynnikiem z kotła lub korozja punktowa (nieodpowiednia czystość czynnika — rysunek 4).



Rys. 4. Nieciągłości na krawędzi wlotowej łopatki; turbina 120 MW
Przyczyna uszkodzenia: zanieczyszczenie pary cząstkami stałymi

Wpływ technologii wykonania i montażu łopatek

Częstą przyczyną zmęczeniowych uszkodzeń łopatek jest nadmierna twardość materiału, powstała na skutek samohartowania materiału łopatki w czasie lutowania lub usuwania drutów pakietowych oraz stellite'ów (błędy montażowe).

W tym przypadku uszkodzenie łopatki zaczyna się w miejscach utwardzonych przy otworze lub, rzadziej, na jego wysokości na krawędzi spływowej (rys. 5 a, b, c).

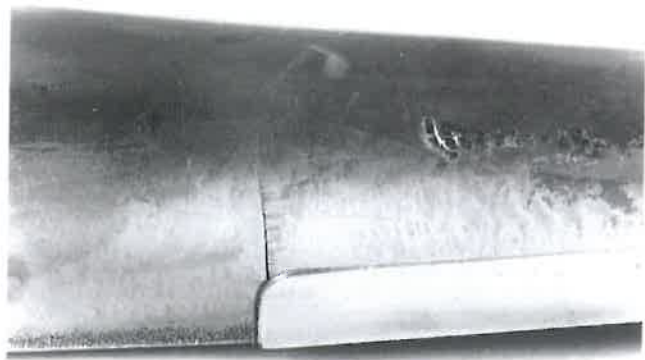
Utwardzenie materiału działa negatywnie z dwóch powodów:

- wystąpienia karbu strukturalnego,
 - obniżenia podatności metalu na odkształcenie.
- Ma to istotny wpływ na obniżenie wytrzymałości zmęczeniowej i podwyższenie naprężeń, szczególnie od dynamicznego zginania łopatki strumieniem pary. W zależności od stopnia twardości, łopatka może przepracować do uszkodzenia od kilku do kilkudziesięciu tysięcy godzin (rys. 6).

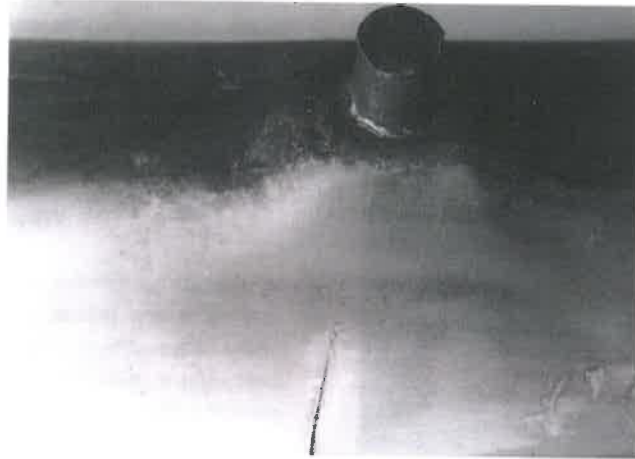
a)



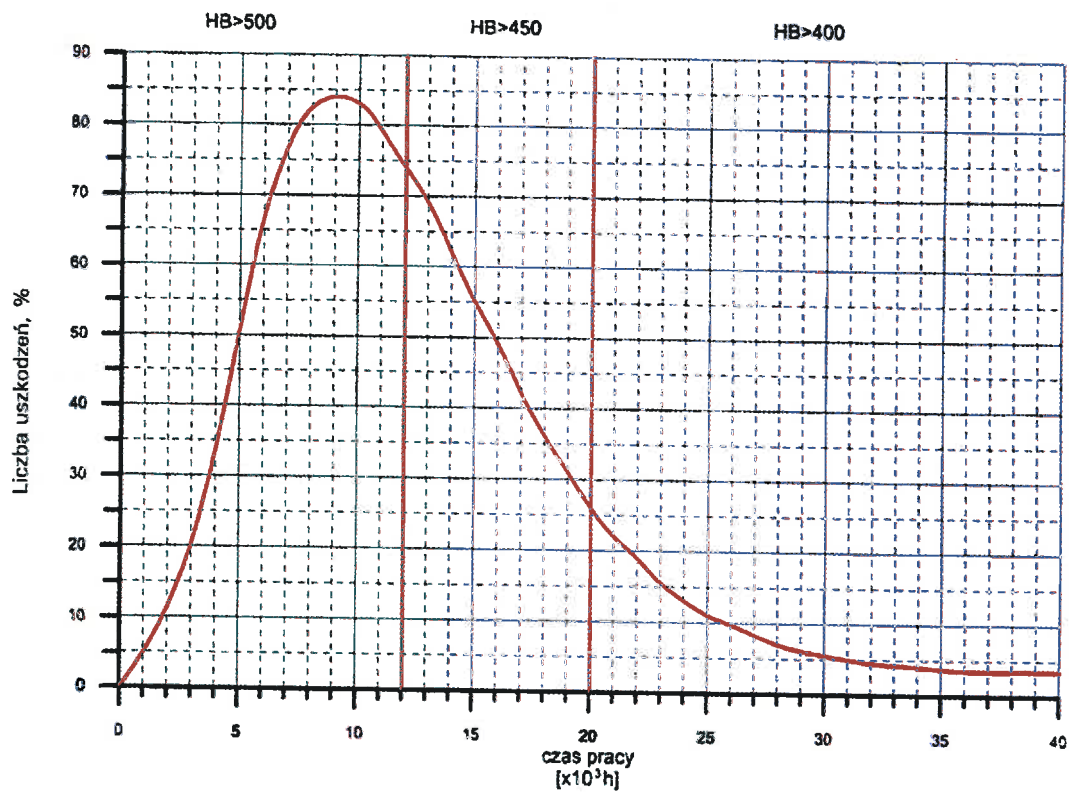
b)



c)

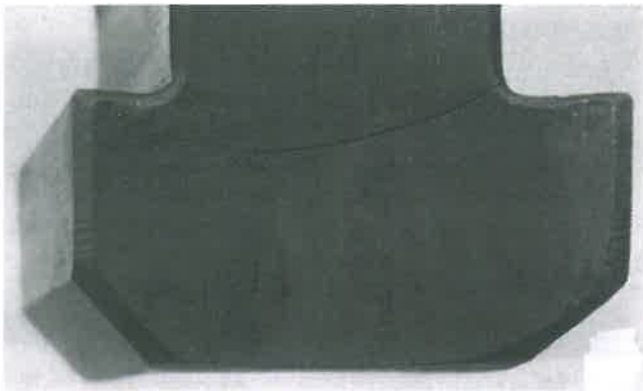


Rys. 5 a, b, c. Pęknięcia zmęczeniowe łopatek w utwardzonych miejscach turbin o mocy 200 MW i 120 MW

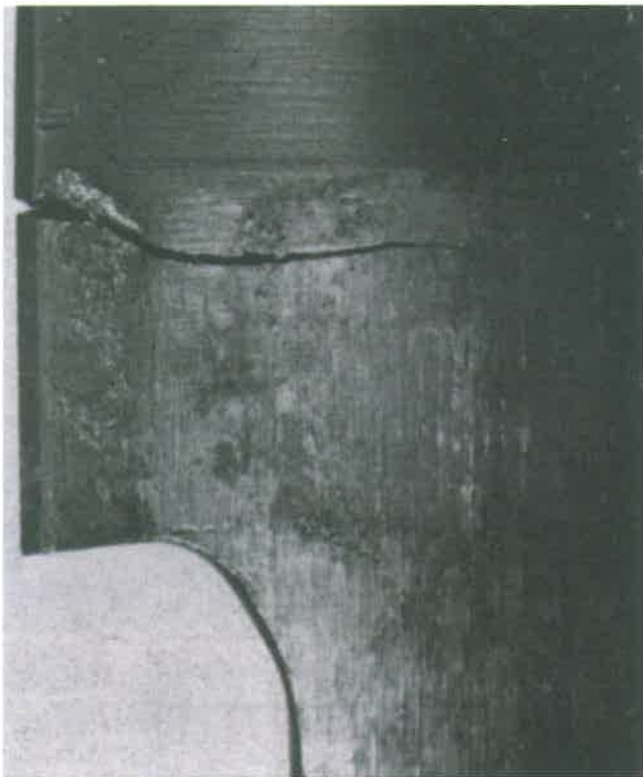


Rys. 6. Prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzenia w zależności od twardości w miejscu zahartowanym-utwardzonym

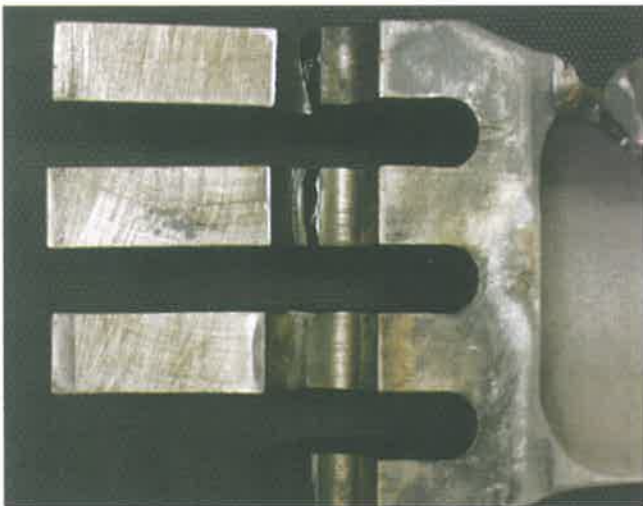
a)



b)



c)



Rys. 7 a, b, c. Pęknięcia zmęczeniowe łopatek w obszarze stopiek; ostatni stopień turbin o mocy 50 i 60 MW
Przyczyna uszkodzenia: nadmierny luz między stopkami łopatek

Istotną przyczyną uszkodzeń są również błędy montażowe, które mogą obniżyć częstotści własne drgań układu łopatkowego do wartości rezonansowych. Z praktyki eksploatacyjnej wiadomo, że źle zmontowany układ łopatkowy zmienia z czasem swoją charakterystykę drganiową, co bardzo często jest powodem wystąpienia nadmiernych drgań i powstania zmęczeniowego uszkodzenia łopatek. Tego typu uszkodzenia występują po przepracowaniu kilkudziesięciu tysięcy godzin, a ich najczęstszą przyczyną jest niedotrzymanie wymaganych luzów między stopkami łopatek a wrębem łopatkowym w kole roboczym (błędy montażowe) — rysunek 7a, b i c.

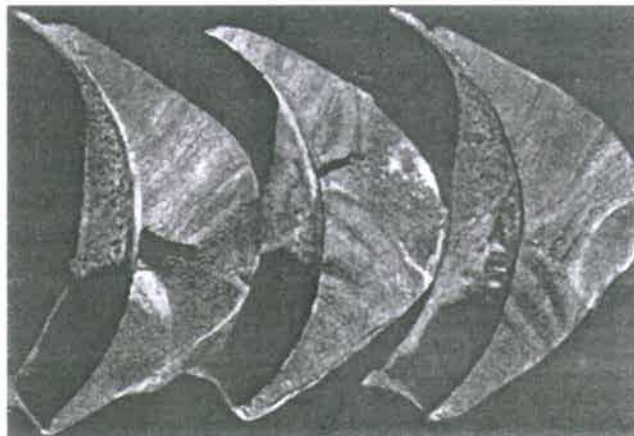
Wraz z czasem pracy obniża się współczynnik tłumienia drgań metalu oraz całego układu łopatkowego co z reguły przyczynia się do wzrostu amplitudy drgań łopatek.

Nierzadko przyczyną powstawania pęknięć zmęczeniowych są błędy wykonawcze łopatek, zwłaszcza gdy mają one postać ostrych nierówności powierzchni powstałych wskutek niedbałej obróbki mechanicznej u producenta. Powierzchnia łopatek powinna być gładka — wypolerowana.

Wpływ konstrukcji

Często spotykaną przyczyną zmęczeniowych uszkodzeń jest rezonans jednej z postaci drgań własnych z siłami wymuszającymi w turbinie. Określenie charakterystyki wibracyjnej w czasie projektowania łopatek jest prawie niemożliwe. Nawet doświadczone firmy mogą wyprodukować turbinę, w której są stopnie nie dostrojone do rezonansu z parowymi siłami wymuszającymi.

Wymiary podziałek i przekrojów wylotowych elementów ekspansyjnych i łopatek wirnikowych często wykazują odchyłki rzeczywistych wartości od konstrukcyjnych. Zjawiska te są przyczyną zróżnicowania natężenia przepływu w poszczególnych kanałach i powodują zmianę ciśnienia działającego na łopatkę. Wskutek tego zmienia się napór czynnika na łopatkę. Powstała w ten sposób siła wymuszająca przyjmuje takie same wartości przy każdym obrocie wirnika, a więc jest okresową funkcją prędkości obrotowej „n”. Tego rodzaju zjawiska mogą spowodować powstanie uszkodzeń zmęczeniowych po przepracowaniu kilku tysięcy godzin (rys. 8).



Rys. 8. Pęknięcia zmęczeniowe łopatek turbiny o mocy 70 MW
Przyczyna uszkodzenia: niewłaściwe odstojenie od rezonansu z siłami wymuszającymi

Poza omówionymi w układzie przepływowym mogą również wystąpić inne powody wzbudzenia drgań łopatek. Może to być np. nieprawidłowo wykonany podział między górną a dolną połówką tarczy kierowniczej lub kształt stopki łopatki.

Uszkodzenia korozyjne

Uszkodzenia tego rodzaju występują we wszystkich typach turbin i mogą mieć różny charakter. Przyczyną uszkodzeń korozyjnych są zawarte w parze agresywne chemiczne związki, do których należą chlorki, siarczany oraz krzemiany metali alkalicznych (nieodpowiednie parametry chemiczne czynnika).

Agresywne związki najczęściej wypadają z pary w strefie tuż przed strefą kondensacji oraz w strefie jej zapoczątkowania.

Związki te rozpuszczają się w niewielkich ilościach wilgoci tworząc stężone roztwory, które pod postacią błony pokrywają powierzchnię łopatki. W przypadku wahania obciążenia turbiny z błony, w wyniku podsuszenia, powstają twarde osady nasycone stężonymi roztworami związków agresywnych. Porowate osady tworzą „porowate elektrolity” powodujące korozję.

Niektóre zanieczyszczenia osadzają się na łopatkach daleko od strefy Wilsona. Jeżeli są one higroskopijne (np. Na_2O), to pochłaniają wilgoć kondensując ją z pary. Ponieważ wraz ze zmianą obciążenia „linia” Wilsona przemieszcza się w kierunku przepływu czynnika, to strefa niebezpieczna może obejmować kilka stopni. Ponadto na mikronierównościach łopatek para może kondensować się przy nieznacznym przechłodzeniu oraz względnie niskim zawilgoceniu pary.

Agresywne sole powodują uszkodzenia łopatek różnych rodzajów:

- **pęknięcia wskutek korozji naprężeniowej**; powstają one w przypadku działania na metal łopatki nadmiernych naprężeń stałych w środowisku agresywnym (ten stan często występuje na wieńcach umiejscowionych przed upustem — rysunek 9),



Rys. 9. Pęknięcie wskutek korozji naprężeniowej; stopień przed upustem; turbina o mocy 55 MW
Przyczyna uszkodzenia: nieodpowiednia czystość pary oraz nadmierne naprężenia statyczne

- **pęknięcia wskutek zmęczenia korozyjnego**; powstają one w przypadku działania na metal łopatki nadmiernych naprężeń sumarycznych (zmiennych i stałych — rysunek 10).



Rys. 10. Pęknięcia wskutek zmęczenia korozyjnego; turbina o mocy 70 MW
Przyczyna uszkodzenia: nieodpowiednia czystość pary oraz nadmierne amplitudy drgań

Oprócz agresywnego środowiska i nadmiernych naprężeń istotny wpływ na powstawanie pęknięć korozyjnych mają mechaniczne własności stali. Stale o wysokiej granicy plastyczności są bardziej podatne na tego rodzaju uszkodzenia. Zmęczeniowa i naprężeniowa korozja łopatek mogą zachodzić w przypadku jednoczesnego wystąpienia:

- nadmiernych naprężeń (zmiennych lub stałych),
- czynnika agresywnego.

Około 40% wszystkich uszkodzeń łopatek wywołuje działanie korozji zmęczeniowej.

Korozja wżerowa

Urządzenia energetyczne podczas postojów trwających dłużej niż 10 dni bez konserwacji są zagrożone wystąpieniem uszkodzeń wywołanych korozją postojową.

Uszkodzenia tego rodzaju mogą być równomierne lub wżerowe.

Proces korozyjny zachodzi przy jednoczesnej obecności wilgoci — soli (osady na łopatkach) oraz tlenu. Korozja postojowa jest szczególnym przypadkiem korozji elektrochemicznej, a czynnikiem przewodzącym nieodzownym do zachodzenia procesu są cienkie warstwy elektrolitów, które powstają na skutek kondensacji pary (podczas zatrzymania turbiny) zawierającej sole przynieszone z wody kotłowej.

Należy podkreślić, że skład chemiczny powstałego w ten sposób roztworu może mieć charakter bardzo agresywny w stosunku do metalu (nawet dla stali nierdzewnych), szczególnie jeżeli zawiera sole typu NaCl , KCl , Na_2SO_4 .

Najczęściej tego rodzaju korozji ulegają wieńce łopatek umieszczone w pobliżu odwodnień upustów oraz ostatnich stopni — rysunek 11.



Rys. 11. Korozja postojowa łopatek wieńca umiejscowionego w okolicy upustu; turbina o mocy 35 MW

Uszkodzenia erozyjne

Na krawędziach wlotowych roboczych łopatek części NP (szczególnie ostatnich stopni) występują często ubytki erozyjne.

Erozja łopatek związana jest z obecnością wilgoci w parze i może być pogłębiana obniżoną temperaturą pary wlotowej przy utrzymaniu ciśnienia znamionowego w kotle.

Uszkodzenia erozyjne, szczególnie w postaci poprzecznych ubytków na całej grubości, mogą powodować koncentrację naprężeń, a tym samym zapoczątkowanie złomu zmęczeniowego. Ubytki erozyjne na krawędzi, podobnie jak korozyjne, mogą obniżyć o połowę wytrzymałość łopatki na zmęczenie w porównaniu z łopatkami nowymi.

Uszkodzenia mechaniczne

Niezależnie od miejsca położenia koła roboczego w układzie przepływowym czasami powstają uszkodzenia mechaniczne. Mogą być one powodowane obecnością ciał obcych, przypadkowo znajdujących się w turbinie po remoncie lub części, które uległy uszkodzeniom podczas eksploatacji, jak również rozdrobnionych tlenków pochodzących z rurociągów.

Szczególnie niebezpieczne są ostre wgłębienia na krawędziach, które mogą się stać koncentratorami naprężeń na częściach umiejscowionych w strefie maksymalnego obciążenia łopatki.

Podsumowanie

- ◆ Główną przyczyną uszkodzeń łopatek wirników turbin parowych są naprężenia zmienne i agresywne środowisko, będące źródłem procesu zmęczeniowego lub zmęczenia korozyjnego.

- ◆ Podstawowe przyczyny uszkodzeń można podzielić na kilka grup:

- nieprawidłowa konstrukcja układu przepływowego, która może być przyczyną nadmiernych sił wymuszających, zwiększających naprężenia w łopatkach;
- obciążone znacznym błędem metody obliczeniowe oraz doświadczalne; dopiero sprawdzenie łopatek w czasie eksploatacji może dostarczyć dokładniejszych danych o ich stanie dynamicznym;
- błędy montażowe powodujące nadmierne naprężenia dynamiczne w łopatkach, takie jak:
 - brak właściwego przylegania stopek do krawędzi wpustu,
 - utwardzenie metalu łopatek w czasie operacji lutowania lub rozklepywanie nitów;

- ◆ błędy eksploatacyjne.

Wszelkie zmiany parametrów pracy mogą prowadzić do zwiększenia agresywności środowiska oraz sił wzbudzających drgania łopatek. Groźnym procesem występującym we wieńcach przy upustach oraz części niskoprężnej turbiny jest korozja zmęczeniowa i naprężeniowa, na powstawanie której istotny wpływ ma nie tylko czystość pary, lecz również parametry pracy turbiny oraz wytężenie metalu łopatek.

Wieloletnie doświadczenia eksploatacyjne wskazują, że w czasie każdego otwarcia turbiny łopatki (nie tylko robocze) powinny być poddawane badaniom nieniszczącym.

Najczęściej stosowaną metodą badania i jednocześnie najbardziej skuteczną jest metoda fluoromagnetyczna. Przed wykonaniem badań łopatki należy oczyścić z osadów, najlepiej przez piaskowanie.

