

Badania metodą ultradźwiękową

Z prób wykonanych przez I. N. Jermołowa [1] wynika, że lepsze wyniki badań metodą ultradźwiękową można uzyskać stosując zanurzeniową odmianę tej metody, a nie głowice z miejscowym sprzężeniem wodnym. Nie chcąc doprowadzać wody do otworu centralnego zdecydowano się na budowę specjalnej uszczelnianej komory głowicy, wypełnionej olejem silikonowym. Komora wraz z głowicą była przemieszczana wzdłuż badanego otworu i obracana o 370°.

Do badań użyto aparatu ultradźwiękowego oraz wykonanej na specjalne zlecenie głowicy z przetwornikiem o wymiarach 7 × 15 mm i częstotliwości 4 MHz. Kąt padania fali mógł być zmieniany, jednak do badań podstawowych użyto fali poprzecznej padającej pod kątem 70°.

Czułość pomiarów ustalano na specjalnym wzorcu tulejowym (z wadami sztucznymi) o średnicy równoważnej d , równej 2 i 5 mm.

Przebieg i wyniki badań

W 1991 r. wykonano badania otworów centralnych dwóch wirników turbin o mocy 200 MW i jednego wirnika turbiny 120 MW. Poszczególne części wirnika były badane następująco:

ogłędziny endoskopowe — wszystkie części wirnika,
metoda prądów wirowych — wszystkie części wirnika,
metoda penetracyjna — część WP i NP,
metoda ultradźwiękowa — część WP (jednego wirnika).

W wyniku badań stwierdzono głębokie rysy obróbcze, powstałe podczas wytaczania otworu, oraz intensywną korozję gazową (plamową i punktową) w otworach centralnych wszystkich części wirników.

Szpecólnie intensywna korozja występowała w otworze części WP, przy czym warstwa zgorzeliny była spękana i charakteryzowała się ostrymi krawędziami.

Badania metodą ultradźwiękową pozwoliły wykryć wady powstałe podczas produkcji wirnika, mające postać wtrąceń lub zażużeń.

Ocena zakresu badań

Badania otworów centralnych w wirnikach turbin energetycznych są prowadzone podczas remontu, toteż muszą być wykonywane bardzo szybko i w sposób nie utrudniający jego przebiegu. Badanie otworów na całej długości i wszystkimi metodami nie jest celowe i to zarówno ze względów technicznych, jak też ekonomicznych i organizacyjnych.

Wydaje się celowe ograniczenie badań do sekwencji: ogłędziny + badania penetracyjne + badania metodą prądów wirowych z tym, że ogłędzinami należy objąć całą długość otworu, a badania penetracyjne i badania metodą prądów wirowych ograniczyć do wybranych obszarów, najbardziej narażonych na pęknięcia.

Proponowana sekwencja badań powinna być uzupełniona pomiarem średnicy otworu w celu wykrycia jego owalizacji bądź miejscowych zmian tej średnicy.

Dobrze wyposażona i przygotowana 2—3-osobowa ekipa badawcza jest w stanie wykonać kompleksowe badania otworu centralnego trzech części wirnika turbiny w ciągu 3—4 dni.

Uwagi końcowe

Rośnie liczba turbin, które ze względu na czas pracy powinny być poddawane kompleksowym badaniom stanu powierzchni otworu centralnego i jego warstwy przysiennej. Dlatego też należy zintensyfikować działania mające na celu objęcie tego typu badaniami możliwie największej liczby turbin.

Działania podjęte w 1991 r. przez PRO NOVUM zmierzają do zainteresowania tym problemem specjalistów z różnych ośrodków naukowo-badawczych, w tym z Instytutu Elektrotechniki. Są one niezwykle potrzebne i stanowią zarazem gwarancję, że ogromny wysiłek, jaki uczyniono dla przygotowania tego rodzaju badań, wykonania oprzyrządowania, zakupienia aparatury itp. nie zostanie zmarnowany.

I choć zabrzmi to paradoksalnie, to trzeba stwierdzić, że zła kondycja finansowa większości placówek badawczych stwarza szansę przyciągnięcia dobrych, uznanych specjalistów z różnych dziedzin badań nieniszczących do rozwiązywania trudnych, a jednocześnie niezwykle istotnych problemów eksploatacyjnych, z jakimi borykają się krajowe elektrownie.

LITERATURA

- [1] Van Drunen G.: Recognizing limitations in eddy-current testing. *NDT INTERNATIONAL* 1994, nr 1
- [2] Jermołow I. N.: Dostizhenija w ultrazvuhowom kontrole w eniergomaszynostrojenii SSSR. Nodestruktiwna Kontrola Materialu. Bratysława 1982
- [3] Patent nr 63764: Sposób badania elementów rurowych
- [4] Prospekty firmy OLYMPUS
- [5] Prospekty firmy VETCO Inspection

pronovum

Mgr inż. Jerzy Dobosiewicz

UKD 621.165.004.64

Pro Novum — Katowice

Wpływ eksploatacji na zmiany własności mechanicznych metalu kadłubów turbin parowych

Kadłuby turbin parowych dużej mocy z reguły są wykonane ze staliwa stopowego „trójskładnikowego” typu CrMoV. W czasie eksploatacji na materiał turbin działają ciągłe wysokie temperatury i naprężenia stałe oraz okresowo naprężenia zmienne. Powoduje to stopniowe degradowanie struktury materiału, które prowadzi do jego zniszczenia. Degradacja jest wywołana procesami fizykochemicznymi, takimi jak: pełzanie, relaksacja, zmęczenie cieplne, korozja,

erozja, zmiany własności materiału (przesunięcie punktu krytycznego kruchości). Dopuszczalne zmiany wielkości kryterialnych dla poszczególnych procesów są różne. Istotne jest więc określenie stanu kadłubów oraz ich dalszej przydatności do eksploatacji.

Wyróżnia się następujące kryteria utraty przydatności kadłubów do dalszej eksploatacji:

- koniec przydatności projektowanej (z reguły 100 tys. h),

- koniec przydatności dopuszczalnej (suma ułamków wyczerpania przydatności peizaniowej i zmęczeniowej),
- przekroczenie dopuszczalnego odkształcenia,
- wystąpienie degradacji struktury metalu (spadek wytrzymałości i plastyczności),
- wystąpienie pęknięć.

Doświadczenia eksploatacyjne oraz wyniki badań laboratoryjnych wykazują, że w przypadku kadłubów zmiany własności, deformacje i pęknięcia metalu nie są równoznaczne z całkowitym wyczerpaniem ich przydatności do dalszej eksploatacji. Kadłuby nawet w dużym stopniu uszkodzone mają minimalny wpływ na bezpieczną i niezawodną pracę turbiny, natomiast ich naprawa bądź regeneracja są zawsze możliwe i nie wymagają dużego nakładu sił i środków.

Uszkodzenia eksploatacyjne kadłubów występują najczęściej w strefie działania maksymalnych temperatur oraz naprężeń stałych i zmiennych. Praktycznie rozróżnia się następujące uszkodzenia:

▲ odkształcenia

- kołnierzy płaszczyny podziałowej,
- przekroju poprzecznego;

▲ pęknięcia

- technologiczne (rozmyślczone przypadkowo),
- eksploatacyjne (rozmyślczone w strefie maksymalnych temperatur, zwłaszcza na powierzchni wewnętrznej);

▲ zmiany materiałowe

- zmiany własności mechanicznych metalu,
- zmiany jego struktury.

Aby ocenić stan kadłuba należy poddać go badaniom niszcącym i nieniszczącym w celu ustalenia:

- stopnia odkształceń,
- lokalizacji i wymiarów pęknięć,
- zmian własności plastycznych,
- zmian struktury.

W artykule opisano zmiany własności mechanicznych oraz struktury metalu kilkudziesięciu kadłubów turbin parowych o mocy 120 i 200 MW wykonanych ze stali typu HMF. Badania przeprowadzono na próbkach pobranych z wlotowych i wylotowych części kadłubów WP i SP, które przepracowały od 50 do 180 tys. h. Z niektórych kadłubów próbki pobierano kilkakrotnie, po różnych czasach eksploatacji.

Badania własności mechanicznych

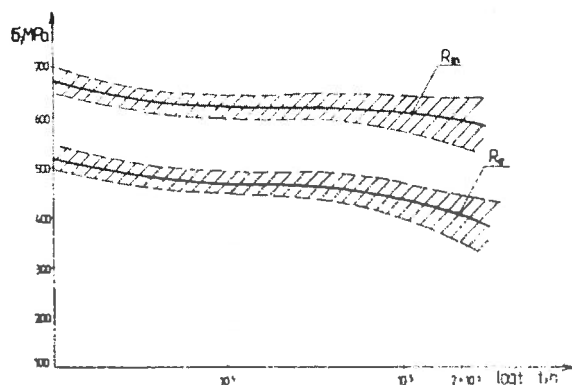
Na pobranych próbkach sprawdzono wytrzymałość dołączną (R_e i R_m) oraz udarność (KCU). Zmiany własności mechanicznych, tj. granicy plastyczności R_e i wytrzymałości R_m , w zależności od czasu eksploatacji kadłubów przedstawiono na rysunku 1. W początkowym okresie obserwuje się nieznaczny spadek wartości R_e i R_m ; zmiany te nie odbiegają jednak od określonych w normach i mieszczą się w granicach dopuszczalnego rozrzutu. Nie stwierdzono również istotnych różnic w tym zakresie w odniesieniu do próbek pobranych z wylotu bądź wlotu kadłubów. Stwierdzono natomiast, że już w początkowym okresie eksploatacji różnice te mogą być znaczne, zarówno na plus jak i na minus. Z upływem lat ten rozrzut własności mechanicznych ulega zmniejszeniu, zwłaszcza dla próbek pobranych z miejsc narażonych na działanie temperatury przekraczającej 500°C .

Z upływem czasu eksploatacji ulegają zmianie wielkości opisujące plastyczność materiału; dotyczy to przede wszystkim wydłużenia i udarności KCU (rys. 2). I tak, udarność maleje, a już szczególnie wyraźnie po przekroczeniu przez

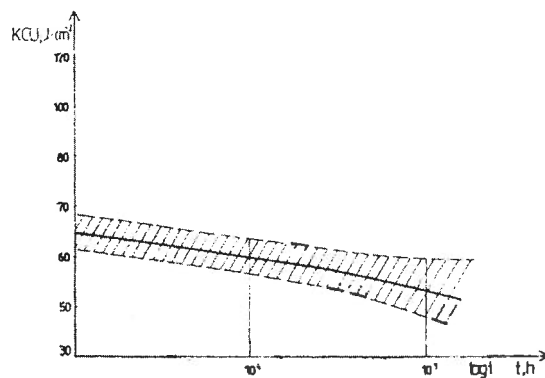
turbinę 160—180 tys. h pracy. Wraz z tymi zmianami w strefę wyższych temperatur przesuwa się temperatura przejścia metalu w stan kruchy (T_{k50}), co pokazano na rysunku 3.

Można zatem stwierdzić, że zmiany własności mechanicznych (R_e i R_m) — największe na początku eksploatacji turbiny i po 160—180 tys. h — mieszczą się w granicach dopuszczalnych przez normy. Intensywniej zmieniają się własności plastyczne materiału, zwłaszcza jego udarność KCU. Maleje ona wyraźnie z czasem eksploatacji, a temperatura przejścia metalu w stan kruchy przesuwa się wtedy w zakres wyższych temperatur (nawet ponad 100°C).

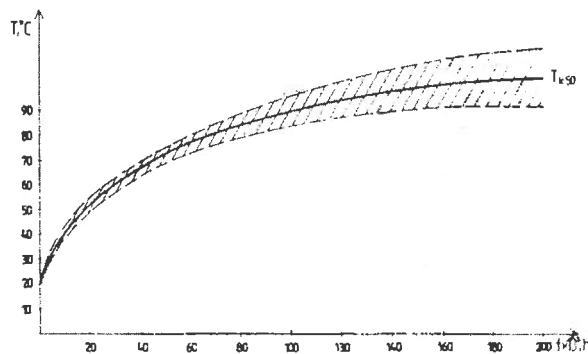
Według danych literaturowych współczynnik intensywności naprężeń dla tego rodzaju stali wynosi od 30 do 80 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{0,5}$.



Rys. 1. Zmiany R_e i R_m metalu kadłubów turbin parowych w zależności od czasu ich eksploatacji



Rys. 2. Zmiany udarności KCU metalu kadłubów turbin parowych w zależności od czasu ich eksploatacji



Rys. 3. Przesunięcie temperatury przejścia metalu w stan kruchy (T_{k50}) w zależności od czasu eksploatacji

Badania struktury

Duży wpływ na własności mechaniczne metalu kadłubów turbin, i to już w stanie wyjściowym, ma jego struktura, która bardzo wyraźnie zależy od sposobu obróbki cieplnej kadłuba, przede wszystkim zaś od szybkości chłodzenia po obróbce cieplnej. Z powodu różnych grubości ścianki szybkość chłodzenia jest zazwyczaj zróżnicowana. Ponadto na wyraźne zmiany (wraz z grubością ścianki) struktury, a tym samym własności mechanicznych stali typu HMF wpływa jej umiarkowana hartowność. Jeżeli jeszcze na dodatek elementy będą miały wady technologiczne, to wówczas nieodpowiednia wytrzymałość materiału lub wzrost naprężeń mogą przyczynić się do powstania warunków sprzyjających pękaniu (pęknięcie technologiczne).

Niejednorodność struktury metalu kadłubów utrudnia jej właściwą ocenę. W badanych próbkach stwierdzono występowanie wielu struktur: od ferrytyczno-perlitycznych aż po czysto bainityczne. Zależnie od rodzaju mikrostruktury zmienia się dyspersyjność wydzielonych węglików oraz ich podział między ferrytem a granicami ziarna.

Ziarna ferrytu i perlitu są stosunkowo duże, a ich granice otoczone węglnikami już na początku eksploatacji. Struktura bainityczna charakteryzuje się większą jednorodnością, a poszczególne granice wyraźnie rozdzielają płytki, chociaż i na tych granicach nierzadko występują węgliki. Są one jednak bardziej rozdrobnione, a zajęta przez nie powierzchnia jest mniejsza.

Poszczególne struktury zachowują się różnie podczas wieloletniej eksploatacji. W każdym przypadku dochodzi jednak do wzrastania wymiarów węglików oraz czasem do rozpuszczenia cementytu i zastąpienia go węglnikami wanadu, chromu i molibdenu.

W strukturach ferrytyczno-perlitycznych i ferrytyczno-bainitycznych zauważa się dyfuzję węgla na większe odległości, co przejawia się, zwłaszcza w ziarnach ferrytu, postępującym wytrącaniem się wymienionych węglików.

Pogorszenie własności plastycznych metalu można tłumaczyć rosnącym z czasem wydzielaniem się węglików, zwłaszcza na granicach ziarna. Może to mieć również wpływ na przesunięcie w prawo temperatury przejścia metalu w stan kruchy.

Udarność stali typu HMF zależy bardzo wyraźnie od jej struktury wyjściowej. Najwyższą udarnością charakteryzują się stale o strukturze bainitycznej, najmniejszą — o strukturze ferrytyczno-perlitycznej. Z upływem czasu eksploatacji różnice te zanikają, zwłaszcza gdy metal pracuje w temperaturze wyższej niż 500°C.

Nie wszystkie zmiany strukturalne zachodzące w czasie eksploatacji powodują degradację metalu kadłuba. Na początku eksploatacji zmiany polegają na precypitacji węglików, która najszybciej pojawia się w strukturze ferrytyczno-perlitycznej, później w strukturze ferrytyczno-perlityczno-bainitycznej. Może to wywołać dostrzegalne zwiększenie wytrzymałości doraźnej.

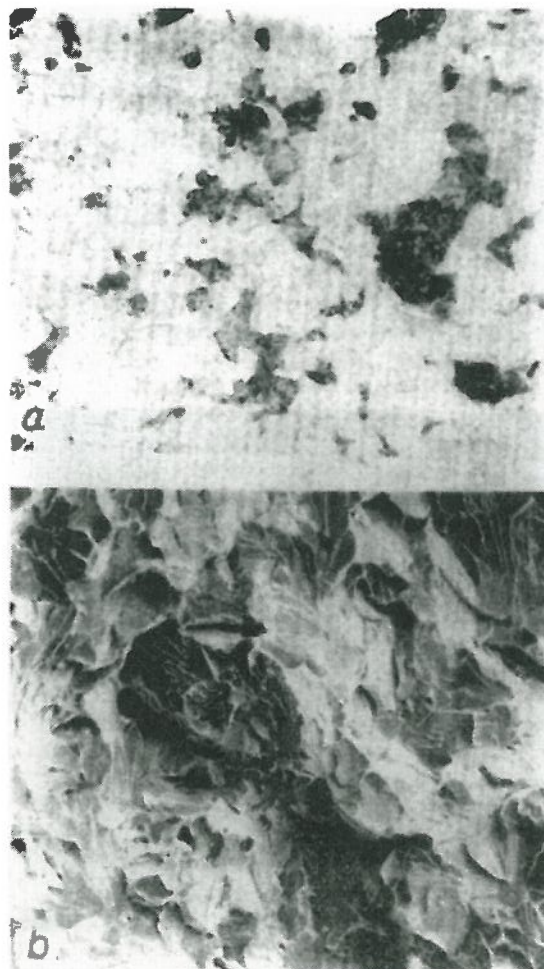
Z biegiem lat eksploatacji dochodzi do ujednoczenia struktur wskutek rozpuszczenia się cementytu i zamiany go innymi węglnikami, przede wszystkim w ziarnie ferrytu. Proces ten zachodzi podczas wieloletniej eksploatacji i powoduje zmianę plastyczności metalu. Istotne procesy degradacyjne rozpoczynają się po 160—180 tys. h i polegają m.in. na gromadzeniu się węglików na granicy ziarna oraz różnego rodzaju zanieczyszczeń (fosfor, siarka itp.). Najszybciej proces ten zachodzi w bainicie, gdyż jest to struktura nietrwała i zmiany strukturalne polegające m.in. na zwiększeniu wymiarów węglików są w niej szybsze. Struktura

ferrytyczno-perlityczna jest bardziej stabilna, gdyż jest strukturą równowagi i powstaje w temperaturach wyższych od temperatury eksploatacji.

Najkorzystniejsze własności mechaniczne w początkowym okresie eksploatacji ma struktura ferrytyczno-perlityczno-bainityczna (rys. 4). Charakteryzuje ją drobnoziarnistość, jednorodność i równomierne rozmieszczenie węglików w ziarnie i po granicach ziarna. W osnowach pobainitycznych gęstość węglików jest z reguły większa niż w pozostałych miejscach. Struktura ta charakteryzuje się przełomami transkryształicznymi łupliwymi ze śladami pęknięć ciągłych.

Grupę drugą stanowią struktury ferrytyczno-perlityczne charakteryzujące się średnią wielkością ziarna, obecnością bainitu i perlitu oraz wyraźną siatką węglików na granicy ziarna. Obok wydzieleni globularnych dyspersyjnych występują w nich węgliki iglaste (rys. 5). Struktura ta daje przełomy niejednorodne o zróżnicowanej wielkości płaszczyzn łupliwości z występowaniem pęknięć ciągłych i międzyziarnistych.

Wreszcie do grupy trzeciej zalicza się struktury ferrytyczne z udziałem węglików. Są to struktury najbardziej niekorzystne, charakteryzujące się obecnością ferrytu, rzadziej perlitu, oraz zaawansowanymi procesami koagulacji. Spotyka się w nich płytkowo-iglaste układy węglików na granicach ziarn oraz osnowy. Przy granicach ziarn ferrytu nie występują wydzielenia (rys. 6). Przełomy tych próbek mają charakter łupliwy o dużych powierzchniach rozdziału ze śladami pęknięć ciągłych.



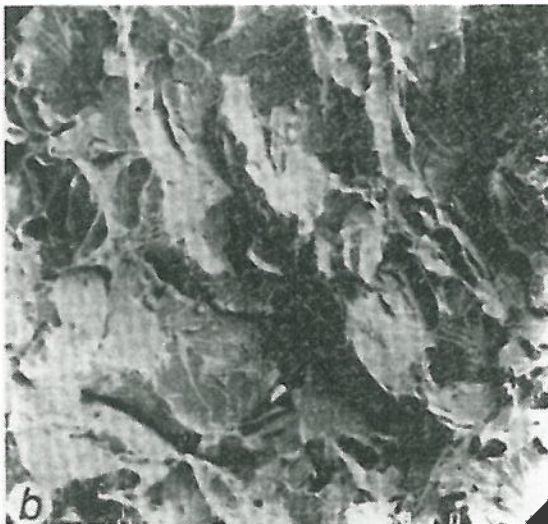
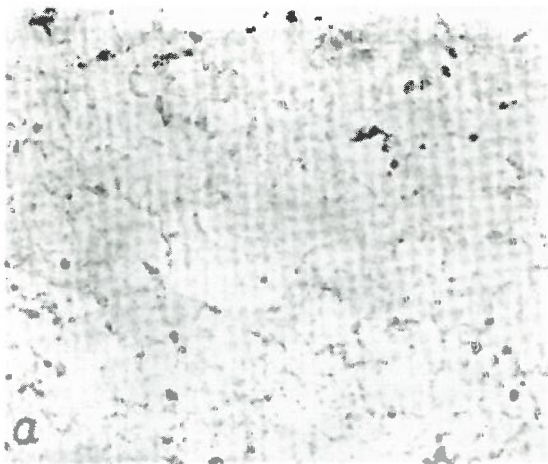
Rys. 4. Struktura ferrytyczno-perlityczno-bainityczna o udarności 81,5 J/cm² (a) oraz przełom transkryształiczny łupliwy ze śladami pęknięć kruchych (b)

Z przeprowadzonych badań wynika, że zmiany własności mechanicznych, zwłaszcza zaś plastycznych, metalu kadłubów turbin następują wskutek przejścia struktury metalu w bardziej trwałą dla danej temperatury, o ile oczywiście nie powstały w nim zmiany związane z wpływem pełzania.

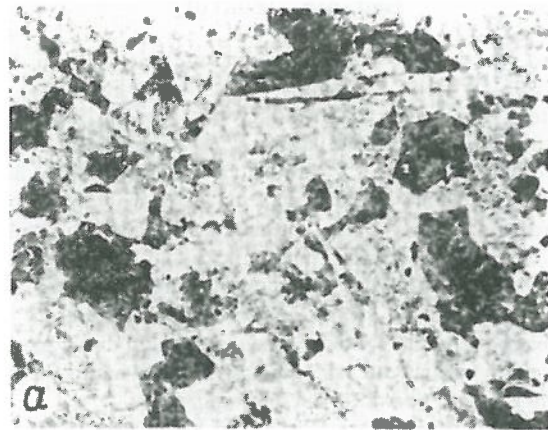
Zmiany własności metalu zachodzą najszybciej po 50 tys. h pracy. W miarę upływu czasu eksploatacji ich szybkość maleje, aby po przekroczeniu 160—180 tys. h pracy ponownie wzrosnąć.

Uzyskane wyniki wskazują, że między 100—200 tys. h eksploatacji w strukturze metalu nie zachodzą istotne zmiany, a tym samym i zmiany jego własności mechanicznych. Z upływem czasu eksploatacji obserwuje się natomiast systematyczne pogarszanie się własności plastycznych metalu, zwłaszcza przesunięcie w stronę wyższych temperatur krytycznej temperatury kruchości, co można tłumaczyć nie tylko niekorzystnymi zmianami w strukturze po 180 tys. h, lecz również wydzieleniem się na granicach ziarn zanieczyszczeń znajdujących się w stali, takich jak S, P itp. Zjawisko to obniża znacznie odporność metalu kadłubów na obciążenia dynamiczne.

Doświadczenia wykonane na kilku kadłubach wykazały, że przez zastosowanie odpowiedniej obróbki cieplnej-regeneracyjnej można wyraźnie poprawić odporność stali na obciążenia dynamiczne.



Rys. 5. Struktura ferrytyczno-perlityczna o udarności 41 J/cm² z widoczną siatką węglików na granicach ziarn (a) oraz przełom niejednorodny o zróżnicowanej łupliwości z pęknięciami ciągliwymi i kruchymi (b)



Rys. 6. Struktura ferryt + skoagulowany cementyt + płytkowo-iglaste układy węglików, o udarności 11,6 J/cm² (a) oraz przełom łupliwy o dużych powierzchniach rozdzielu (b)

Wnioski

1. Między 100—200 tys. h eksploatacji w metalu kadłubów turbin nie zachodzą istotne zmiany strukturalne mogące obniżyć ich przydatność do dalszej eksploatacji.
2. Własności mechaniczne metalu kadłubów zależą w dużym stopniu od jego struktury wyjściowej, która z reguły jest różnorodna wskutek zastosowania nieodpowiedniej obróbki cieplnej, zwłaszcza niewłaściwej szybkości chłodzenia.
3. Z upływem czasu eksploatacji, zwłaszcza po 180 tys. h, spada odporność metalu na obciążenia dynamiczne. Turbiny, których kadłuby są objęte tego rodzaju zmianami powinny być uruchamiane ze stanu zimnego przez odpowiednie nagrzewanie, tak aby temperatura metalu była wyższa od 100°C.
4. Kadłuby są elementami, których nawet poważne uszkodzenie nie limituje ich dalszej przydatności do eksploatacji. Można je bowiem regenerować przez prostowanie, spawanie i odpowiednią obróbkę cieplną, zwłaszcza gdy wykryte uszkodzenia są pochodzenia zmęczeniowego.

panavum