

Modernizacja bloków 200 MW

Wydłużanie czasu eksploatacji oraz poprawa efektywności turbiny parowej

Robert Nowak, Radosław Wiśniewski

TurboCare Sp. z o.o.

Turbozespoły o mocy 200 MW stanowią podstawę możliwości wytwórczych polskiej energetyki. Większość z kilkudziesięciu zainstalowanych w naszym kraju maszyn tego typu przekroczyła czas pracy 200 tysięcy godzin. Wymaga to zrewidowania ich stanu technicznego oraz określenia możliwości dalszej, bezpiecznej eksploatacji i poprawy efektywności.

Na przykładzie projektu zrealizowanego w ENEA Wytwarzanie S.A. przez firmę TurboCare Sp. z o.o. z Wrocławia zaprezentowana zostanie jedna z możliwości modernizacji turbozespołu 200 MW. Głównymi celami postawionymi przed wykonawcą modernizacji były:

- Wydłużenie czasu eksploatacji turbozespołu o dodatkowe 85-100 tysięcy godzin,
- Zwiększenie mocy elektrycznej turbozespołu o co najmniej 3 MW,
- Obniżenie jednostkowego zużycia ciepła o co najmniej 100 kJ/kWh,
- Uzyskanie sprawności wewnętrznej części WP równej co najmniej 85%.

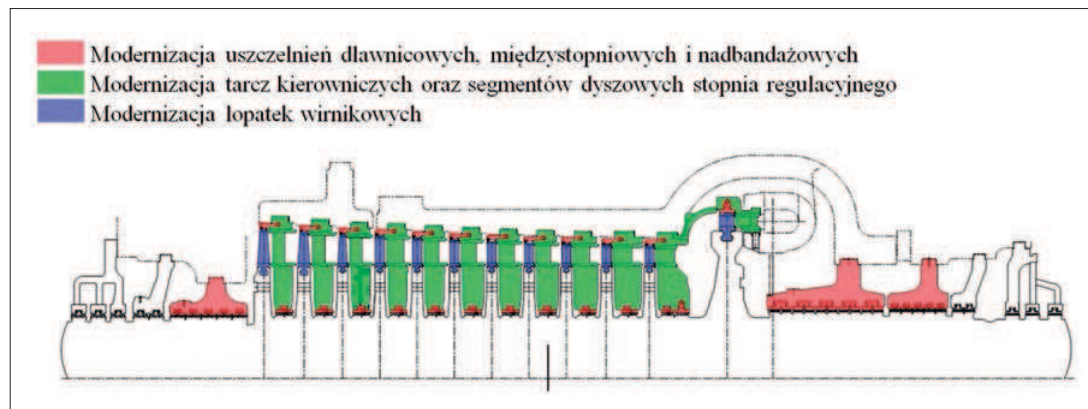
Obecnie w ENEA Wytwarzanie S.A. eksploatowanych jest 10 turbozespołów o łącznej mocy 2820 MW. Osiem turbozespołów stanowią jednostki 200 MW typu 13K215 oraz dwa jednostki 500 MW typu K-5-166-2. Obecny program modernizacji i przedłużania czasu pracy turbozespołów typu 13K215 rozpoczęto od bloku nr 4 [1].

Charakterystyka turbozespołu typu 13K215

Oryginalnie, turbozespół typu 13K215 składa się z trzykadłubowej, kondensacyjnej turbiny parowej z układem przepływowym typu akcyjnego. Nominalne parametry pary wlotowej wynoszą 12.75 MPa, 535°C i 650 t/h. Przed wlotem do części średnioprężnej (SP) para wylotowa z części wysokoprężnej (WP) kierowana jest do przegrzewacza wtórnego, gdzie uzyskuje nominalną temperaturę 535°C. Dwuprzepływowa część niskoprężna (NP) wyposażona jest w stopień Baumana. Nominalne ciśnienie w kondensatorze oraz temperatura wody zasilającej wynoszą 3.6 kPa i 245°C. Turbina parowa napędza chłodzony wodorem generator. Sprawności wewnętrzne części WP, SP i NP kształtują się na poziomie 81%, 89% i 73% w nominalnym punkcie pracy.

W latach 90. ub. w., obok standardowo wykonywanych remontów, większość użytkowników tego typu turbozespołów w Polsce realizowało program modernizacji części NP. Ze względu na niskosprawną stopień Baumana w oryginalnym rozwiązaniu konstrukcyjnym możliwe było znaczne zwiększenie sprawności wewnętrznej maszyny,

Rys. 1. Rysunek przekroju zmodernizowanej części WP turbozespołu typu 13K215 (z zaznaczonym zakresem modernizacji)





Głębokość pęknięcia mm [% grubości ścianki]	Pęknięcie przed naprawą	Pęknięcie po naprawie
40 [35%]		
35 [15%]		

skutkujące polepszeniem wskaźników eksploatacyjnych turbozespołu. Również grupa Siemens, w skład której wchodzi firma TurboCare, aktywnie uczestniczyła w tym programie modernizacji, oferując nowoczesne, wysokosprawne rozwiązania, które zostały z sukcesem zastosowane na kilkunastu turbozespołach w polskich elektrowniach (m.in. na rozważanym turbozespołe nr 4 w ENEA Wytwarzanie S.A.).

Modernizacja części WP turbozespołu nr 4

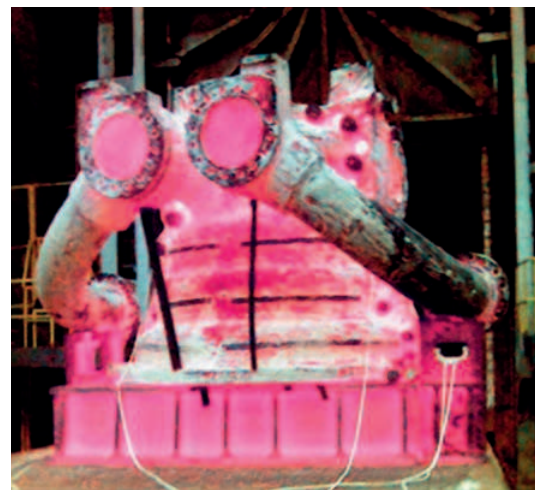
Dostępna obecnie technologia umożliwia również znaczną poprawę efektywności oryginalnej części WP turbozespołu typu 13K215. Na rys. 1 przedstawiono zrealizowany zakres modernizacji. Obejmuje on modernizację uszczelnień dławnicowych, międzystopniowych i nadbandażowych, modernizację tarcz kierowniczych stopni 2-12, segmentów dyszowych stopnia regulacyjnego oraz modernizację łopatek wirnikowych wszystkich stopni. Wykorzystywane są istniejące korpusy oraz wał wirnika, które poddane zostały ocenie stanu, zabiegom remontowym oraz kwalifikacji do dalszej eksploatacji.

Korpusy i komory zaworowe części WP

Istniejące korpusy i komory zaworowe części WP poddane zostały oczyszczeniu, pomiarom geometrii oraz szczegółowym badaniom, które obejmowały: badania wizualne, badania magnetyczne, badania z wykorzystaniem penetrantów, badania ultradźwiękowe, badania metalograficzne metodą replik oraz pomiary twardości materiału.

Po wykonaniu badań sporządzana została mapa stwierdzonych uszkodzeń. Dla każdego uszkodzenia opracowano technologię jego naprawy. Firma TurboCare dysponuje własną, wielokrotnie sprawdzoną technologią napraw spawalniczych korpusów, która umożliwia naprawy nawet bardzo rozległych uszkodzeń, również w obszarach pracujących w wysokich temperaturach

i ciśnieniach. Przykłady uszkodzeń korpusu części WP zakwalifikowanych do napraw spawalniczych przedstawiono w tabeli 1. Dla każdego uszkodzenia opracowywana jest technologia naprawy spawalniczej obejmująca m.in. usunięcie uszkodzenia, obróbkę cieplną, proces spawania oraz badania wykonanej naprawy.

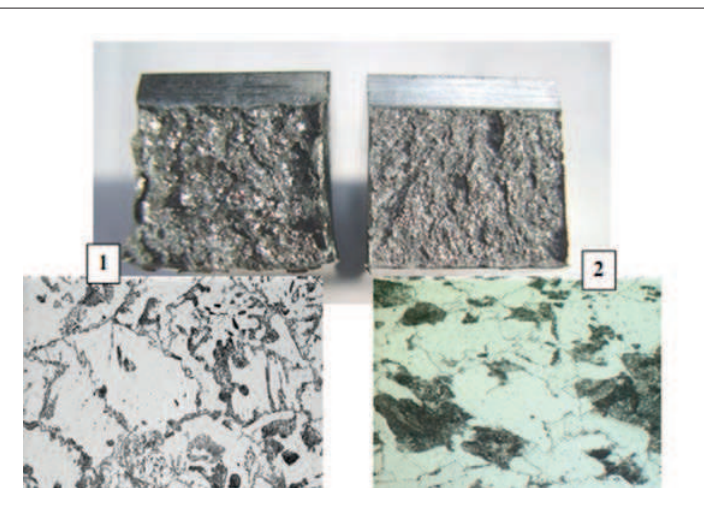


Fot. 1. Proces rewitalizacji korpusu części WP

Kolejnym etapem była rewitalizacja korpusów części WP oraz komór zaworowych. Proces rewitalizacji spełnia w tym przypadku dwa zadania. Stanowi końcową obróbkę cieplną usuwającą naprężenia powstałe po naprawach spawalniczych oraz daje poprawę struktury materiału zdegradowanego wcześniejszą eksploatacją w warunkach pełzania oraz zmęczenia cieplnego. Na fot. 1 przedstawiono proces rewitalizacji korpusów części WP turbozespołu typu 13K215. Rozpoczęcie procesu rewitalizacji korpusów poprzedza szereg czynności przygotowawczych, w tym zabezpieczenie elementów przed deformacją. Opracowywana jest technologia procesu obejmująca etapy kontrolowanego grzania i chłodzenia elementów. Na fot. 1 przedstawiono etap przyspieszonego

Tab. 1. Przykłady pęknięć korpusu części WP zakwalifikowanych do napraw spawalniczych

Fot. 2. Przykładowe przełomy i mikrostruktura staliwa przed (1) i po (2) procesie rewitalizacji





technologie w energetyce

go studzenia korpusów. Widoczne są również przewody termopar służących do precyzyjnej kontroli temperatury, która jest porównywana „on-line” z wymogami opracowanej wcześniej technologii.

Na fot. 2 przedstawiono rezultaty przeprowadzenia procesu rewitalizacji korpusów części WP. Jak widać, przed rewitalizacją materiał po 200 tysiącach godzin eksploatacji wykazywał się znaczną degradacją widoczną na zdjęciach (1). W mikrostrukturze materiału stwierdzano węgliki skoagulowane, często w łańcuchach na granicach ziaren. Po rewitalizacji, zdjęcia (2), nastąpiła znacząca poprawa struktury materiału. Obserwowano perlit płytkowy bez węglików na granicy ziaren. Charakteryzując ilościowo skuteczność rewitalizacji, przykładowo, w miejscu, gdzie uderność materiału przed procesem wynosiła 1.9 daJ/cm^2 , po rewitalizacji uzyskano wartość 4.8 daJ/cm^2 .

Wirnik części WP

Wykorzystanie istniejącego wału wirnika wymagało przeprowadzenia jego szczegółowych badań. Ponieważ modernizacja obejmuje zastosowanie nowych, wysoko-sprawnych profili łopatek wirnikowych badania wału wirnika przeprowadzone zostały w stanie po rozłopatkowaniu. Obejmowały one:

- Przygotowanie wirnika do pomiarów, w tym honowanie otworu centralnego,
- Badania wizualne i pomiary geometryczne powierzchni wirnika oraz badania powierzchniowe otworu centralnego,
- Badania magnetyczno-proszkowe 100% powierzchni wirnika, 100% wrębów oraz otworu centralnego,
- Badania ultradźwiękowe wolumenu wirnika od strony otworu centralnego.

Na fot. 3 przedstawiono przygotowania otworu centralnego do badań oraz badanie za pomocą skanera ultradźwiękowego. Wyniki badań rozważanego wału wirnika WP turbozespołu nr 4 potwierdziły jego dobry stan (również w obszarach wrębów łopatek) i możliwość dalszej eksploatacji.

Na podstawie przeprowadzonych licznych badań wirników WP turbozespołów typu 13K215 można stwierdzić, iż generalnie nie wskazują one krytycznych uszkodzeń, które eliminowałyby je z dalszej eksploatacji. Po przepracowaniu 200 tysięcy godzin, w większości wirniki części WP są w dobrej kondycji, łącznie z krytycznymi obszarami wrębów łopatek.

Ocena żywotności resztkowej elementów części WP

Ocena żywotności resztkowej korpusów, komór zaworowych oraz wału wirnika części WP obejmowała:

- Analizę historii eksploatacji turbozespołu,
- Analizę wyników wykonanych badań nieniszczących i niszczących elementów,
- Teoretyczne obliczenia żywotności,
- Sporządzenie wniosków i rekomendacji do dalszej eksploatacji.

Podstawą oceny żywotności resztkowej elementów czę-

Fot. 3. Badanie otworu centralnego za pomocą skanera ultradźwiękowego



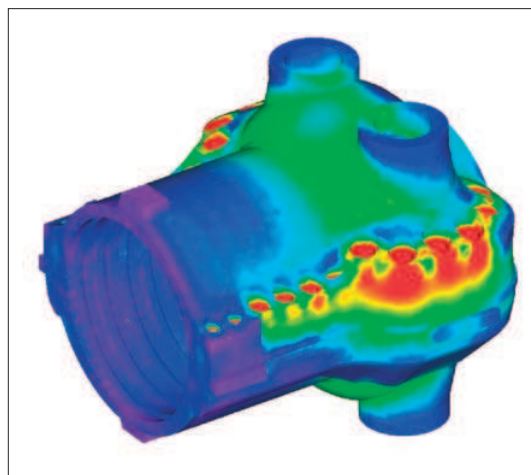
ści WP były wyniki badań nieniszczących i niszczących. Jako uzupełnienie wykorzystane zostały metody teoretyczne, które obejmowały zastosowanie obliczeń naprężeń metodą elementów skończonych. Na rys. 2 przedstawiono wyniki obliczeń analizy wytrzymałościowej metodą elementów skończonych dla korpusu wewnętrznego części WP.

Na podstawie wykonanej oceny żywotności resztkowej korpusów, komór zaworowych oraz wału wirnika części WP turbozespołu nr 4 stwierdzono, że po wykonanych czynnościach remontowych elementy te mogą być dopuszczone do dalszej eksploatacji.

Modernizacja uszczelnień części WP

Z rys. 1 wynika, że modernizacja uszczelnień części WP obejmowała uszczelnienia dławnicowe, uszczelnienia międzystopniowe i uszczelnienia nadbandażowe. Firma TurboCare od wielu lat rozwija własną technologię inteligentnych uszczelnień parowych (ang. SMART® Seals), w tym opatentowanych uszczelnień cofających się, które zostały zastosowane na turbozespołe nr 4.

Rys. 2. Analiza wytrzymałościowa metodą elementów skończonych. Naprężenia zredukowane wg Hubera-Misesa

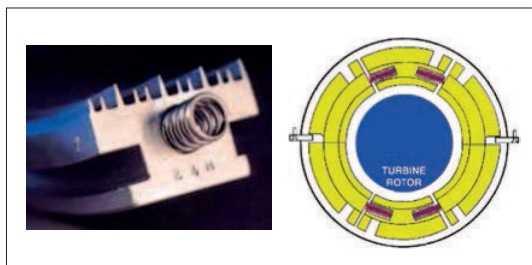


Uszczelnienia dławnicowe – zastosowanie cofających się pierścieni uszczelniających na dławnicach wlotowych i wylotowej części WP. Na fot. 4 przedstawiono przykład cofającego się pierścienia uszczelniającego wraz z zasadą działania. Widoczne obwodowe sprężyny pomiędzy segmentami pierścienia uszczelniającego zapewniają





zwiększony luz uszczelnienia podczas krytycznych okresów rozruchu i odstawienia turbozespołu. W ten sposób uszczelnienie jest chronione podczas okresów eksploatacji, w których najczęściej dochodzi do jego uszkodzenia. Duże ryzyko uszkodzenia uszczelnień dławnicowych podczas uruchomień i odstawień maszyny związane jest głównie z pogorszonym stanem dynamicznym (przechođenje przez obszary obrotów krytycznych) oraz pracę w nieustalonych warunkach termicznych i związanymi z nią odkształceniami elementów maszyny. W miarę jak zwiększa się przepływ pary w turbinie rośnie ciśnienie nad pierścieniami uszczelniającymi. Ciśnienie to powoduje powstanie siły promieniowej, dociskającej segmenty do wału aż do skasowania powiększonych luzów uszczelnienia, co następuje w bezpiecznym okresie po synchronizacji turbozespołu z siecią (w tej pozycji luzy pomiędzy wałem a uszczelnieniem mają optymalne wartości nominalne i pracują z maksymalną sprawnością).



Fot. 4. Przykład cofającego się pierścienia uszczelniającego TurboCare oraz zasada jego działania

Uszczelnienia międzystopniowe – cofające się uszczelnienia szczotkowe stopni 2-12. Na fot. 5 przedstawiono przykład pierścienia uszczelniającego międzystopniowego. Analogicznie jak dla uszczelnień dławnicowych, również pozostałe uszczelnienia przywałowe wyposażone są w funkcję cofania zabezpieczającą je, powiększonym luzem uszczelnienia, przed uszkodzeniami podczas krytycznych okresów uruchomień i odstawień maszyny. Ponadto, pierścienie uszczelniające międzystopniowe wyposażone są w element szczotki widoczny na fot. 5. Obecność szczotki umożliwia zastosowanie „zerowego” (równego ok. 0,05 mm) promieniowego luzu uszczelnienia dla pozycji zamkniętej. Prowadzi to do znaczącego wzrostu sprawności wewnętrznej stopnia. Zarówno materiał jak i konstrukcja szczotki przystosowane są do okresowego kontaktu w wałem wirnika bez negatywnego wpływu na element szczotki i powierzchnię wału.

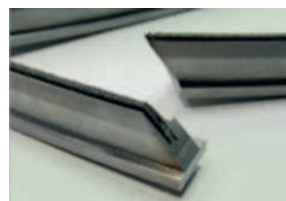


Fot. 5. Przykład cofającego się, szczotkowego pierścienia uszczelniającego TurboCare

Uszczelnienia nadbandażowe – szczotkowe uszczelnienia nadbandażowe stopni 2-12. Na fot. 6 przedstawiono przykład nadbandażowego, szczotkowego pierścienia uszczelniającego. Zarówno materiał, jak i konstrukcja szczotki umożliwiają, w porównaniu do oryginalnego rozwiązania konstrukcyjnego, kilkukrotne zmniejszenie luzu promieniowego. Prowadzi to do znacznego ograniczenia przecieków pary przez uszczelnienie oraz zwiększenia sprawności stopnia. Zarówno materiał, jak i konstrukcja szczotki zapewniają jej elastyczność oraz odporność na uszkodzenia w wyniku okresowych kontaktów z bandażami łopatek wirnikowych.

Dla każdej aplikacji uszczelnień SMART® wykonywana jest pełna analiza stabilności pracy maszyny. W przypadku zaistnienia takiej potrzeby stosowane są pierścienie antywirowe, których celem jest odstrojenie częstotliwości wirów występujących w sąsiedztwie uszczelnień od częstotliwości drgań własnych wału. Liczne aplikacje pierścieni antywirowych potwierdzają ich skuteczność.

Zastosowany na części WP turbozespołu nr 4 optymalny zakres modernizacji uszczelnień zapewnia znaczący wzrost osiągnięć, zwiększenie niezawodności oraz zmniejszenie kosztów eksploatacyjnych turbozespołu.

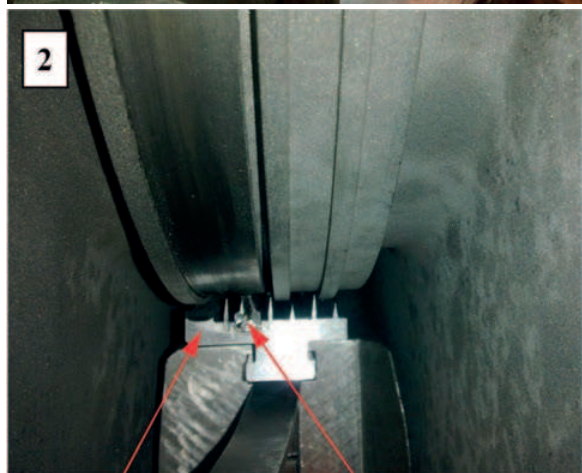


Fot. 6. Przykład nadbandażowego, szczotkowego pierścienia uszczelniającego TurboCare

Modernizacja łopatek stacjonarnych i wirnikowych części WP

Zgodnie z rys. 1 zastosowano nowe, zmodernizowane łopatki wirnikowe stopni 1-12 oraz nowe, zmodernizowane tarcze kierownicze i segmenty dysz stopnia regulacyjnego. Prace projektowe obejmowały pełną inżynierię odwrotną istniejącego wirnika z wykonaniem wszystkich niezbędnych analiz mechanicznych i ciepło-przepływowych. Modelowane jest także zachowanie dynamiczne zmodernizowanego wirnika, obejmujące wyznaczenie jego częstotliwości i postaci drgań własnych przy różnych prędkościach obrotowych. Zastosowane zostały zaawansowane aerodynamicznie, nowoczesne profile łopatek wirnikowych i stacjonarnych. Wreby zmodernizowanych łopatek wirnikowych stopni 1-12 pozostały takie same jak w oryginalnym rozwiązaniu konstrukcyjnym (stopka łopatki typu T-owego). Również sama liczba stopni części WP pozostaje niezmieniona (12 stopni). Na rys. 3 przedstawiono przykłady zmodernizowanych łopatek wirnikowych części WP turbozespołu typu 13K215 oraz analiz mechanicznych. Użyte rozwiązania konstrukcyjne obejmowały zastosowanie bandażu integralnych na wybranych stopniach, jak i zastąpienie cylindrycznych łopatek wirnikowych łopatkami skręconymi.

Na fot. 8 przedstawiono nowe, zmodernizowane tarcze kierownicze części WP. Prezentowane tarcze kierownicze wykonane zostały w technologii spawania wiązką elektronów (ang. EBW - Electron Beam Welding). Taka technologia spawania umożliwiła uzyskanie bardzo wysokiej dokładno-



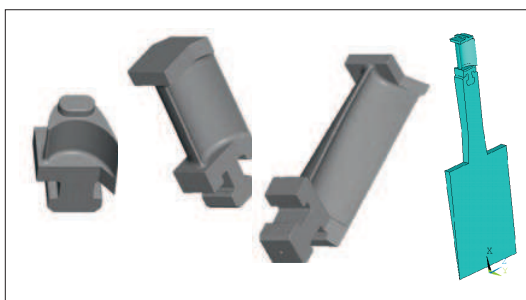
Pierścień antywirowy

Szczotka cofającego się uszczelnienia międzystopniowego



Szczotka uszczelnienia nadbandażowego zmodernizowanego stopnia WP nr 12

Fot. 7. Zmodernizowane uszczelnienia części WP turbos zespołu typu 13K215. 1 – wewnętrzna wlotowa dławnica WP z cofającymi się pierścieniami uszczelniającymi, 2 – cofające się, szczotkowe uszczelnienie międzystopniowe z pierścieniem antywirowym, 3 – szczotkowe uszczelnienie nadbandażowe



Rys. 3. Przykłady zmodernizowanych przez TurboCare łopatek wirnikowych części WP oraz analiz metodą elementów skończonych

ści wykonania w porównaniu z tradycyjnymi technologiami spawalniczymi, które cechują się znacznie większą strefą wpływu ciepła (ang. HAZ - Heat Affected Zone). Również trwałość tarcz kierowniczych wykonanych metodą spawania wiązką elektronów jest znacznie zwiększona.

Zakres prac dla części SP i NP turbos zespołu nr 4

Na częściach SP i NP turbos zespołu wykonany został remont odtworzeniowy pozwalający na ich dalszą eksploatację, łącznie z rewitalizacją korpusów i komór zaworowych SP. Zakres prac obejmował również diagnostykę oraz ocenę żywotności resztkowej.

Rezultaty modernizacji turbos zespołu nr 4

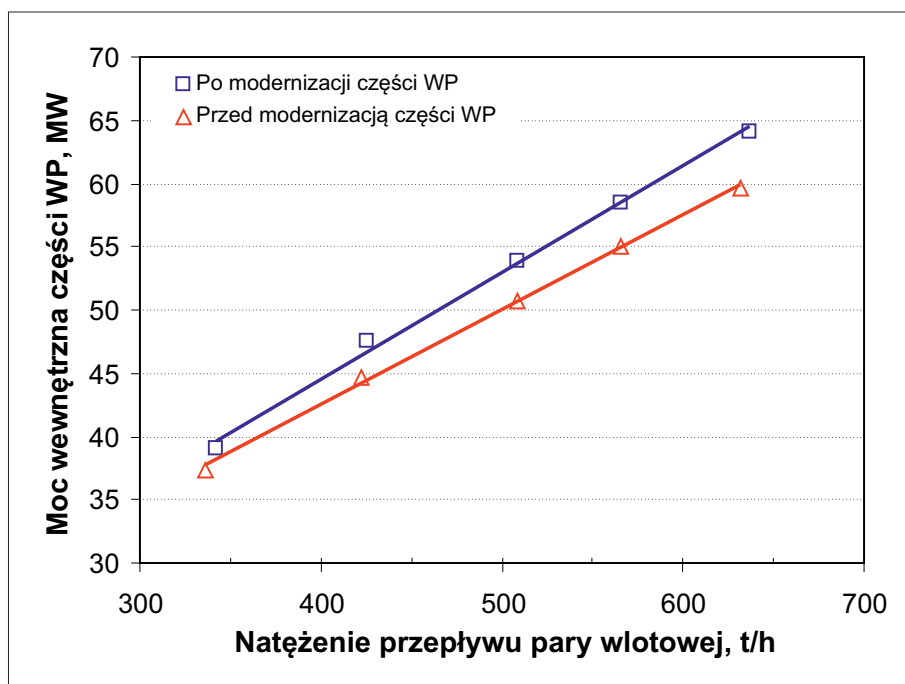
W wyniku przeprowadzonych prac remontowych oraz na podstawie szczegółowych badań diagnostycznych turbos zespół został dopuszczony do dalszej eksploatacji. Ocena żywotności resztkowej pozwoliła stwierdzić, że po wykonanym zakresie prac zawiera się ona w wymaganym przedziale 85-100 tysięcy godzin. Sformułowano również plan działań diagnostycznych podczas dalszej eksploatacji, umożliwiających kontrolę stanu krytycznych elementów turbos zespołu.

Pomiary gwarancyjne wykonane przez niezależną firmę pomiarową [2] potwierdziły spełnienie przez turbos zespół nr 4 wszystkich udzielonych gwarancji osiągnięć, określonych we wstępie jako główne cele prac modernizacyjnych. Obok efektu polepszenia osiągnięć turbos zespołu w wyniku wykonanego remontu odtworzeniowego, stwierdzono znaczne polepszenie osiągnięć zmodernizowanej części WP. Przykładowo, na rys. 4 przedstawiono moc części WP przed i po modernizacji, która w wyniku poprawy sprawności zmodernizowanej maszyny uległa znaczącemu zwiększeniu. Wzrost mocy elektrycznej turbos zespołu w wyniku modernizacji części WP znacznie przekroczył wartość gwarantowaną 3 MW w nominalnych warunkach pracy.

Wysoką sprawność zmodernizowanego układu przepływowego części WP, w szczególności zastosowanych uszczelnień SMART®, potwierdza obserwacja temperatury pary w upuście nr 7, do którego odsysany jest przeciek czynnika z pierwszego segmentu dławnicy wlotowej WP. W porównaniu do stanu przed modernizacją temperatura pary upustowej uległa obniżeniu o kilkanaście stopni Celsjusza [2]. Na efekt ten składa się głównie znaczne ograniczenie przecieku pary przez uszczelnienia dławni-



Fot. 8. Zmodernizowane przez TurboCare tarcze kierownicze części WP turbozespołu typu 13K215, wykonane z użyciem technologii spawania wiązką elektronów



cowe, wynikające z zastosowania cofających się pierścieni uszczelniających o zmniejszonych luzach promieniowych. Należy również podkreślić, że dzięki ochronnej funkcji cofania się, w odróżnieniu od innych rozwiązań konstrukcyjnych dostępnych na rynku, cofające się pierścienie uszczelniające są odporne na degradację, a uzyskany efekt ograniczenia strat pary/wzrostu sprawności części WP zostanie utrzymany przez długi okres eksploatacji.

Rodzaj drgań		Łożysko nr 1	Łożysko nr 2
Drgania bezwzględne, mm/s	X	0.7	0.8
	Y	0.5	0.6
Drgania względne, μm	L	39	56
	P	48	34

Tab. 2. Drgania łożysk w obrębie zmodernizowanej części WP

Rys. 4. Moc wewnętrzna części WP turbozespołu nr 4 przed i po modernizacji. Stwierdzony przyrost w nominalnym punkcie pracy (650t/h) 4.4 MW [2]

Kolejnym pozytywnym efektem modernizacji części WP jest obniżenie wtrysku wody zasilającej do przegrzewacza pary wtórnej, w porównaniu do stanu przed modernizacją [2]. Wynika ono z obniżenia temperatury pary wylotowej z części WP, spowodowanego znacznie większą sprawnością zmodernizowanego układu przepływowego. Zmniejszenie wtrysku wody zasilającej skutkuje znaczącym obniżeniem jednostkowego zużycia ciepła przez blok.

Innym weryfikowanym obszarem był stan dynamiczny turbozespołu nr 4 po modernizacji, który uległ znacznej poprawie oraz który spełniał wymagania stawiane wykonawcy. Przykładowe wartości drgań łożysk w obrębie zmodernizowanej części WP przedstawiono w tabeli nr 2.

Przed modernizacją turbozespół nr 4 charakteryzował się ciśnieniem w stopniu regulacyjnym, które w warunkach pomiarów [3] przekraczało wartość 10 MPa. Dla turbozespołów typu 13K215 taką wartość ciśnienia w stopniu regulacyjnym należy uznać za relatywnie wysoką, co uwzględniono podczas prac modernizacyjnych. Po modernizacji części WP ciśnienie w stopniu regulacyjnym uległo wyraźnemu obniżeniu [2].

W artykule przedstawione zostały wybrane aspekty modernizacji oraz remontu turbozespołu typu 13K215. Głównymi celami przeprowadzonych prac było wydłużenie bezpiecznego czasu eksploatacji turbozespołu oraz poprawa jego efektywności w wyniku modernizacji części WP. Zdefiniowany zakres prac zakładał minimalizację kosztów inwestycyjnych poprzez maksymalne wykorzystanie istniejących elementów turbiny parowej, np. wału wirnika części WP. Otrzymane rezultaty przeprowadzonych prac potwierdzają, że możliwa jest znaczna poprawa osiągniętych turbozespołów typu 13K215 oraz ich dalsza eksploatacja po przekroczeniu 200 tysięcy godzin, przy zakresie prac zapewniającym relatywnie krótki czas zwrotu poniesionych kosztów inwestycyjnych.

Fot. i rys. TurboCare Sp. z o.o.

Literatura

- [1] <http://www.elko.com.pl/>
- [2] Badania sprawności turbozespołu nr 4 przed i po modernizacji części przepływowej WP w Elektrowni Kozienice, Etap II: Badania sprawności turbozespołu po modernizacji, INWAT ZAKŁAD BADAWCZO-PROJEKTOWY Sp. z o.o., grudzień 2011.
- [3] Badania sprawności turbozespołu nr 4 przed i po modernizacji części przepływowej WP w Elektrowni Kozienice, Etap I: Badania sprawności turbozespołu przed modernizacją, INWAT ZAKŁAD BADAWCZO-PROJEKTOWY Sp. z o.o., maj 2011.