

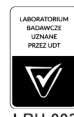
Biuletyn

nr 1/2025

**Zespół redakcyjny: mgr inż. Jerzy Dobosiewicz,
dr inż. Jerzy Trzecznyński**



System zarządzania
ISO 9001:2015
ISO 14001:2015
ISO 45001:2018
www.tuv.com
ID: 900012483



pronovum[®]
RESEARCH & TECHNOLOGICAL SERVICES
Centrum Badawczo - Rozwojowe
od 1987 r.

Szanowni Państwo,

Pierwszy tegoroczny Biuletyn Pro Novum wypełniają artykuły napisane na podstawie referatów wygłoszonych podczas XXVI Sympozjum Pro Novum, z którego relacja została zamieszczona w grudniowej „Energetyce”. Biuletyn otwiera artykuł, który przedstawia długoterminowy serwis remontowy z wyeksponowaną rolą diagnostyki (LTSDA). Bez niego nie można sobie wyobrazić utrzymania stanu technicznego urządzeń energetycznych na odpowiednim poziomie technicznym, gwarantującym zwłaszcza ich wysoką dyspozycyjność. Dla nowych bloków gazowych to może być okres sięgający prawie 20 lat. Dla bloków węglowych to powinien być czas pomiędzy ostatnim remontem kapitalnym a wyłączeniem bloku z eksploatacji oraz do czasu pozostawania w rezerwie operacyjnej.

Drugi artykuł prezentuje możliwości, jakie stwarzają współczesne technologie modelowania rzeczywistych konstrukcji oraz procesów wyczerpywania ich trwałości. M.in. umożliwiają bieżący nadzór nad stanem technicznym i prognozą trwałości walczków kotłów parowych z większą niż dotąd dokładnością oraz przy znaczącej redukcji kosztów. Elastyczna eksploatacja bloków węglowych i gazowych to także wyzwanie dla sposobu korekcji parametrów fizykochemicznych czynników obiegowych. Autor trzeciego artykułu dzieli się z nami swoimi bogatymi doświadczeniami w tym zakresie. W czwartym artykule prezentujemy najnowszą generację sprzętu do badań NDT urządzeń energetycznych i petrochemicznych, którymi od pewnego czasu dysponuje Pro Novum. Metody PAUT i TOFD, bo o nich mowa, pozwalają na rezygnację z uciążliwych badań rentgenowskich oraz potrafią zapewnić bardzo wysoką dokładność podczas identyfikacji i wymiarowania nieciągłości materiałowych, przez co pozwalają z większą niż dotąd dokładnością realizować nadzór zwłaszcza nad bezpieczeństwem warunkowo eksploatowanych elementów.

Podczas gdy my, inżynierowie, robimy wszystko, żeby zachować najwyższe kompetencje i możliwości techniczne diagnozując i remontując urządzenia eksploatowane w warunkach coraz bardziej odbiegających do tych, do jakich zostały zaprojektowane, transformacja energetyczna w naszym kraju przebiega według „strategii” na podstawie tzw. ambitnego scenariusza, który jednocześnie ma przyczynić się do uratowania naszej planety przed katastrofą klimatyczną oraz zapewnić tańszą, ale tylko w granicach Unii Europejskiej, energię. Dla ścisłości należy jednak dodać, że tzw. Zielony Ład UE ma zostać zweryfikowany. Dotyczy to jednak rolnictwa i przemysłu. Dekarbonizacja energetyki, tj. rezygnacja tylko z jednego z paliw kopalnych, tj. węgla, ma przebiegać bez większych zmian, bo... to obszar zbyt poważnej rywalizacji państw, aby najsilniejsze z nich miały rezygnować z sukcesu. Oficjalnie podnosi się jeszcze jeden argument, że „z założonych wcześniej celów UE nie może się całkowicie wycofać. Zielony Ład to już fragment europejskiego DNA”.

Póki co posiadamy jeszcze energetykę ciepłą opartą w zdecydowanej większości na elektrowniach węglowych, więc gdy zdarzyło się w lutym br. parę niezbyt mroźnych dni przy zapotrzebowaniu KSE na poziomie 23-25 GW z tych elektrowni pochodziło 19-21 GW energii, zwłaszcza gdy mniej niż powinno świeciło słońce, a wiatr też wiał przeciętnie. Zdarzało się wtedy także ca 1 GW energii z importu.

W licznych dyskusjach o tym czy energia powinna być czysta, tania, czy bezpieczna najchętniej głosi się pogląd, że jedno nie wyklucza drugiego, a nawet trzeciego. W tym miejscu warto przytoczyć fragment wywiadu, jakiego udzielił niedawno jednej z polskich gazet Pan Luc Rémont, prezes francuskiego EDF: „Powinniśmy utrzymać tempo odejścia od paliw kopalnych, ponieważ nie mamy własnych zasobów energetycznych. Dekarbonizacja jest dla nas koniecznością nie tylko dlatego, aby uratować planetę przed globalnym ociepleniem [...] Gdy Francja rozpoczęła proces dekarbonizacji 40 lat temu, wybierając atom, nie chodziło o to, by walczyć z emisją gazów cieplarnianych, tylko żeby być niezależnym energetycznie. A dziś pomaga on osiągać oba te cele”.

Prawie w tym samym czasie rozpoczęto prace towarzyszące budowie polskiej elektrowni jądrowej w Żarnowcu o mocy 1760 MW. Znacząca część jej komponentów miała powstać w Polsce posiadającej wtedy własny potencjał technologiczny (Zamech Elbląg, Dolmel Wrocław, Fabryka Kotłów Rafako, polskie instytucje naukowo-badawcze wyposażone w aparaturę do zaawansowanych badań materiałowych zakupioną w USA). Budowę elektrowni przerwano jednak w 1989 roku.

Jerzy Trzecznyński

Diagnostyka wykonywana w trybie LTSA zapewniająca dyspozycyjność bloków węglowych w okresie ich dalszej eksploatacji

Diagnostics performed in LTSA mode ensuring the availability of coal-fired power units during their further operation

Proces transformacji energetyki zawiera wiele niewiadomych. Część z obecnie istniejących bloków węglowych może być eksploatowana nawet przez ok. 10-15 lat. Coraz bardziej regulacyjny/elastyczny tryb ich pracy będzie przyspieszał ubytek trwałości urządzeń. Wymagał będzie coraz większych kompetencji inżynierskich w zakresie utrzymania stanu technicznego majątku produkcyjnego, których może brakować. Serwis LTSA/LTDSA sprawowany przez firmy remontowe oraz diagnostyczne wydaje się najprostszym sposobem uniknięcia problemów, których obecność już można zauważyć. Diagnostyka w serwisach LTSA powinna mieć jak najwięcej autonomii, co zapewni obiektywność ocen stanu technicznego. Może być także realizowana w formule LTDSA, co dla użytkowników bloków długo eksploatowanych wydaje się najbardziej korzystne.

Słowa kluczowe: diagnostyka w trybie LTSA, nadzór diagnostyczny, ocena stanu technicznego

The energy transformation process contains many unknowns. Some of the currently existing coal-fire units can be operated for up to approx. 10-15 years. The increasingly regulatory/flexible mode of their operation will accelerate the decline in the durability of equipment. It will require increasingly greater engineering competences in maintaining the technical condition of production assets, which may be in short supply. LTSA/LTDSA service provided by renovation and diagnostic companies seems to be the easiest way to avoid problems that can already be noticed. Diagnostics in LTSA services should have as much autonomy as possible, which will ensure objectivity of technical condition assessments. It can also be implemented in the LTDSA formula, which seems to be the most beneficial for users of long-operated units.

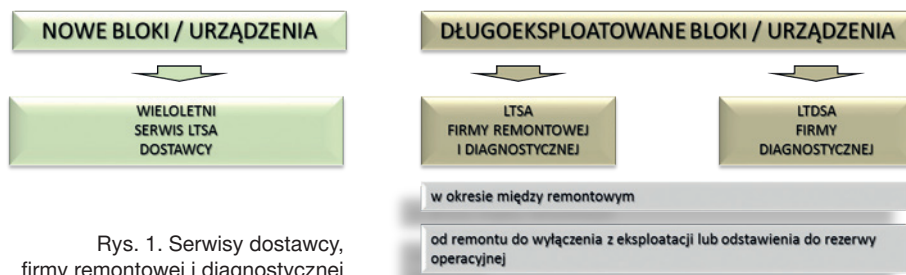
Keywords: diagnostics in LTSA mode, diagnostic supervision, assessment of technical condition

Wstęp

Serwis LTSA bloków i urządzeń energetycznych to atrakcyjny zarówno dla użytkownika jak i dostawcy urządzenia sposób na zapewnienie bezpiecznej pracy i oczekiwanej dyspozycyjności w dłuższym, wieloletnim okresie eksploatacji. Dla urządzeń samodzielnie eksploatowanych przez Użytkownika po wygaśnięciu gwarancji, zwłaszcza dla urządzeń długo eksploatowanych, atrakcyjną formą zapewnienia ich bezpieczeństwa oraz dyspozycyjności może być serwis LTSA realizowany wspólnie przez firmę remontową i diagnostyczną lub serwis LTDSA (Long Time Diagnostic Service Agreement) sprawowany tylko przez firmę diagnostyczną. Ma to znaczenie zwłaszcza wtedy, gdy warunki pracy urządzeń znacznie odbiegają od tych, do których zostały zaprojektowane, a czas dalszej eksploatacji może nie być dokładnie znany.

Diagnostyka związana z zapewnieniem bezpieczeństwa pracy w okresie dalszej eksploatacji bloków węglowych

Podobnie jak serwis LTSA, również serwis ograniczony do diagnostyki, najlepiej realizować w pełnym cyklu, tj. pomiędzy kolejnymi remontami kapitalnymi lub do wyłączenia bloku/urządzenia z eksploatacji, a także odstawienia do rezerwy operacyjnej (rys. 1). W tym czasie sprawowany jest pełny nadzór diagnostyczny, w trybie on-line aktualizowana jest ocena stanu technicznego i prognoza trwałości oraz wykonywane są badania towarzyszące przeglądowi i remontowi.

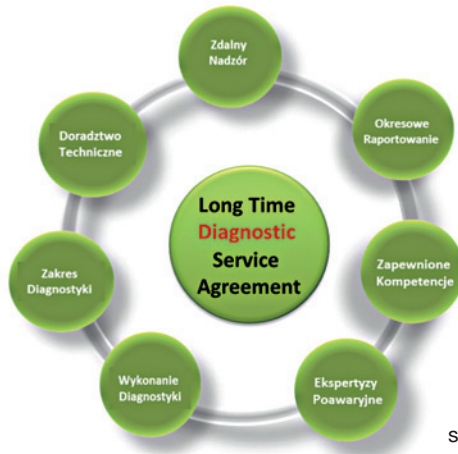


Rys. 1. Serwisy dostawcy, firmy remontowej i diagnostycznej

Diagnostyka jako podstawa długoterminowych serwisów diagnostycznych

Zarządzanie infrastrukturą techniczną bloków energetycznych wymaga w pierwszym rzędzie kompletnej, aktualnej wiedzy o stanie technicznym urządzeń. Najważniejszym źródłem informacji jest diagnostyka wykonywana, w odpowiednim zakresie, podczas planowych i awaryjnych postojów bloków. Wybrane informacje remontowe oraz dotyczące warunków pracy stanowią niezbędne uzupełnienie.

Diagnostykę nowych urządzeń jak również długo eksploatowanych należy traktować jako źródło wiedzy o ich stanie technicznym, dlatego powinna posiadać autonomię w systemach LTSA i być wykonywana w trybie LTDSA (rys. 2).



Rys. 2. Zakres usług w ramach serwisu LTDSA

Kluczowymi cechami serwisów LTSA/LTDSA są (rys. 3):

- długoterminowy charakter: umowy są zawierane na wiele lat, co zapewnia stabilność kosztów i dostępność firmy remontowej i diagnostycznej;
- koszty: ustalona z góry cena usługi lub modelu rozliczenia ułatwia przewidywanie wydatków, zarządzanie budżetem i planowanie kosztów na utrzymanie stanu technicznego urządzeń;
- elastyczność rozliczeń: w umowach często uwzględnia się warunki elastyczne, takie jak zmiany harmonogramów badań w zależności od faktycznego stanu technicznego urządzeń;
- nowoczesność: w ramach usług serwisowych dostawcy często zapewniają systemy do zdalnej diagnostyki, które na bieżąco informują Użytkownika o nieprawidłowościach;
- zarządzanie ryzykiem: można przenosić część ryzyka na dostawcę usług, ponieważ to on jest odpowiedzialny za zapewnienie poprawnego stanu technicznego urządzeń, co minimalizuje ryzyko wystąpienia awarii oraz nieplanowanych postojów.

Tego rodzaju serwis gwarantuje bezpieczeństwo i dyspozycyjność zapewniając zachowanie koniecznych kompetencji firm diagnostycznych, których utrata lub znaczące ograniczenie może stwarzać większe zagrożenie dla dyspozycyjności urządzeń niż utrata trwałości na skutek eksploatacji.

Nadzór diagnostyczny jako część diagnostyki

Bieżący nadzór diagnostyczny może stanowić ważną częścią diagnostyki także w formule LTSA/LTDSA, która powinna zostać zorganizowana w sposób systemowy wykorzystując współczesne, sprawdzone technologie analityczne, cyfrowe i informatyczne jednocześnie opierając się na wiedzy i doświadczeniu, które są rezultatem bogatej, także pod względem know-how, historii polskiej elektroenergetyki.

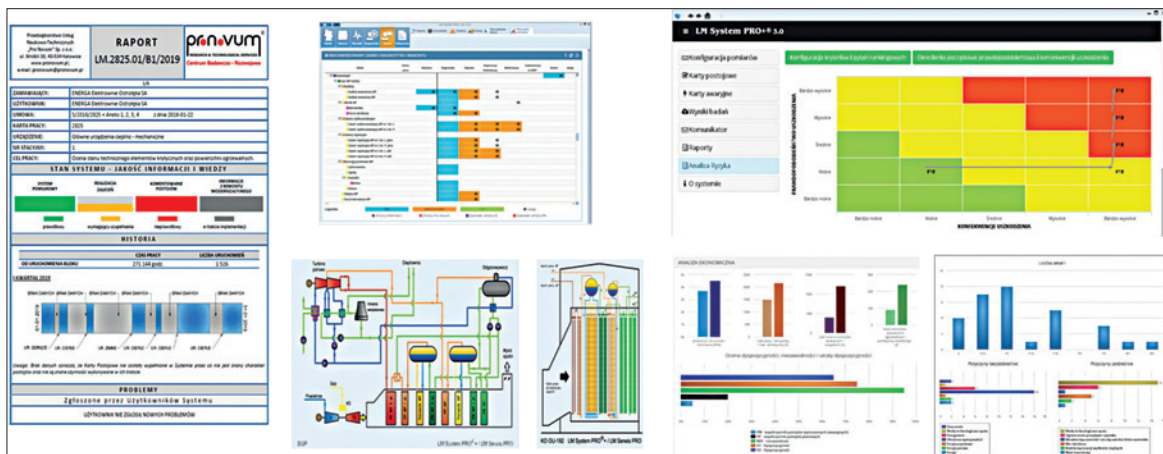
Jako firma diagnostyczna posiadamy wieloletnie doświadczenia w sprawowaniu serwisów diagnostycznych o podobnym charakterze, uprawnione laboratoria zapewniające pełne spektrum badań oraz systemy do sprawowania zdalnej diagnostyki, w których zaimplementowano wiedzę i wieloletnie doświadczenie specjalistów, jak również obowiązujące standardy i wytyczne.

Koncepcja Zdalnego Nadzoru Diagnostycznego polega na integracji klasycznej, zaawansowanej wiedzy w zakresie eksploatacji i diagnozowania urządzeń energetycznych oraz współczesnych technologii modelowania numerycznego konstrukcji i procesów wymiany ciepła, generowania naprężeń, przemieszczeń i utraty trwałości.

Podczas kilkunastoletnich doświadczeń z wdrażaniem nadzoru diagnostycznego udostępniłmy swoim Klientom odpowiednio skonfigurowane aplikacje informatyczne – oparte na platformie informatycznej **LM System PRO+**. Najnowszym rozwiązaniem jest program **Prognoza PRO**® oraz platforma informatyczna **LE-FO System PRO**®. Zapewniają one bezpieczeństwo eksploatacji oraz oczekiwaną dyspozycyjność, także w przypadku, gdy praca elementów odbywa się w trybie warunkowym.

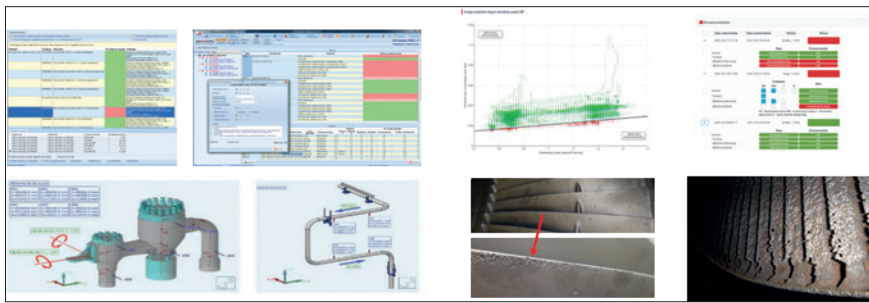
Poniżej przedstawiono kilka głównych rodzajów serwisów diagnostycznych LTDSA sprawowanych w okresie ostatnich lat.

- Nadzór diagnostyczny w zakresie oceny stanu technicznego i aktualizacji prognozy trwałości on-line elementów krytycznych głównych urządzeń bloku węglowego oraz gazowo-parowego z uwzględnieniem chemii energetycznej.



Rys. 3. Nadzór diagnostyczny nad głównymi urządzeniami bloku węglowego oraz gazowo-parowego

- Nadzór diagnostyczny towarzyszący identyfikowaniu i monitorowaniu wybranych problemów technicznych wraz z oceną ryzyka.



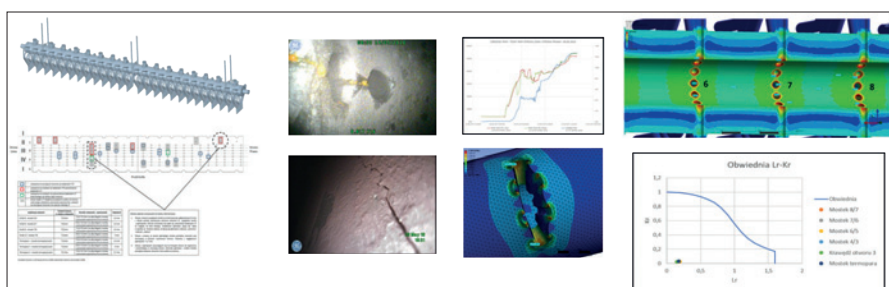
Rys. 4. Nadzór diagnostyczny towarzyszący identyfikowaniu i monitorowaniu wybranych problemów technicznych

- Nadzór diagnostyczny wybranych elementów turbiny parowej długo eksploatowanych i nowo zabudowanych w celu przedłużenia okresu międzyremontowego, w okresie gwarancyjnym i/lub kontroli on-line poziomu naprężeń z oddziaływaniem na sterowanie.



Rys. 5. Nadzór diagnostyczny wybranych elementów turbiny

- Nadzór diagnostyczny nad warunkową pracą uszkodzonych elementów np. komór przegrzewaczy pary i schładzaczy.



Rys. 6. Nadzór diagnostyczny nad warunkową pracą elementów ciśnieniowych kotła

Podsumowanie

Proces transformacji energetyki zawiera wiele niewiadomych. Jej sposób i tempo realizacji powinny to uwzględniać. Część z obecnie istniejących bloków węglowych może być eksploatowana jeszcze przez ok. 10-15 lat. Coraz bardziej regulacyjny/elastyczny tryb ich pracy będzie przyspieszał ubytek trwałości nie tylko elementów krytycznych urządzeń. Wymagał będzie coraz większych kompetencji inżynierskich, których może brakować.

Serwis LTSA/LTDSA sprawowany przez firmy remontowe oraz diagnostyczne wydaje się najprostszym sposobem zapewnienia dyspozycyjności bloków węglowych w ostatnim okresie ich eksploatacji.

Diagnostyka powinna mieć systemowy charakter integrując:

- wiedzę i doświadczenia z możliwie najbardziej odległej historii eksploatacji,
- możliwości, jakie stwarzają współczesne technologie analityczne, cyfrowe i informatyczne.

Diagnostyka może być nie tylko zdalna, ale realizowana przez algorytmy w większym niż dotąd stopniu. Takie podejście do diagnostyki realizujemy od wielu lat, dzięki temu jesteśmy przygotowani na każdy scenariusz transformacji energetyki polskiej i europejskiej.

PIŚMIENNICTWO

- Trzeczcyński J., Stanek R. *Diagnostyka wykonywana w trybie LTSA zapewniająca dyspozycyjność bloków węglowych w okresie ich dalszej eksploatacji*, Sympozjum Pro Novum 2024.
- Trzeczcyński J., *Projekt BLOKI 2025+. Założenia do strategii kontynuowania eksploatacji bloków klasy 200 MW (I). Aktualny stan implementacji Projektu*. „Energetyka” 2023, nr 12. Biuletyn Pro Novum nr 2/2023.
- Rajca S., Pośpiech S., Dragon A., *Diagnostyka wspierająca remonty i eksploatację turbin parowych*, „Energetyka” 2022, nr 12. Biuletyn Pro Novum nr 2/2022.
- Trzeczcyński J., Murzynowski W., *Nadzór diagnostyczny nad warunkową eksploatacją uszkodzonych schładzaczy do czasu ich wymiany lub naprawy*. „Energetyka” 2019, nr 7. Biuletyn Pro Novum nr 1/2019.

Ocena stanu technicznego walczków kotłów parowych – wybrane problemy i metody ich rozwiązywania

Assessment of the technical condition of steam boiler drums – selected problems and methods of solving them

Od wielu lat dokonuje się transformacja polskiej energetyki i tym zmianom powinna również towarzyszyć aktualizacja podejścia do utrzymania majątku produkcyjnego elektrowni, w tym m.in. do elementów ciśnieniowych kotłów. Kotły na węgiel kamienny od wielu lat nie pracują w podstawie systemu, a ich elementy grubościennym narażone są na warunki pracy, do których nie zostały zaprojektowane. Jeśli dodać do tego wieloletnią eksploatację, liczne naprawy i modernizacje, otrzymuje się w przypadku każdej elektrowni i każdego bloku energetycznego sytuację wymagającą indywidualnego podejścia. Równie ważne są uwarunkowania ekonomiczne. Każdy użytkownik kotła z obiegiem naturalnym powinien więc z uwagą przyrzeć się swojemu urządzeniu, a szczególnie z troską spojrzeć na walczak, który w dzisiejszych realiach jest praktycznie niewymienialny. Na szczęście można go naprawiać, co wymaga także odpowiedniej diagnostyki. W artykule przedstawiono aktualne podejście do diagnostyki długo eksploatowanych walczków oraz zaprezentowano metody, które w ocenie stanu technicznego oraz podczas bieżącego nadzoru diagnostycznego pozwalają uwzględnić indywidualne cechy walczków i zapewnić ich bezpieczną eksploatację z oczekiwaną dyspozycyjnością urządzenia i bloku energetycznego.

Słowa kluczowe: walczaki kotłów parowych, nadzór diagnostyczny, bezpieczna eksploatacja

The transformation of the Polish energy sector has been taking place for many years and these changes should also be accompanied by an update of the approach to maintaining the power plant's production assets, including, among others, for pressure components of boilers. Coal-fired boilers have not been operating in the base of the system for many years, and their thick-walled elements are exposed to operating conditions for which they were not designed. If we add many years of operation, numerous repairs and modernizations, we get a situation requiring an individual approach for each power plant and each power unit. Economic conditions are equally important. Every user of a natural circulation boiler should therefore take a close look at their equipment, and especially look at the drum, which in today's reality is practically irreplaceable. Fortunately, it can be repaired, which also requires proper diagnostics. The article presents the current approach to the diagnostics of long-operated drums and presents methods that, when assessing the technical condition and during ongoing diagnostic supervision, allow to take into account the individual characteristics of drums and ensure their safe operation with the expected availability of the device and the power unit.

Keywords: steam boiler drums, diagnostic supervision, safe operation

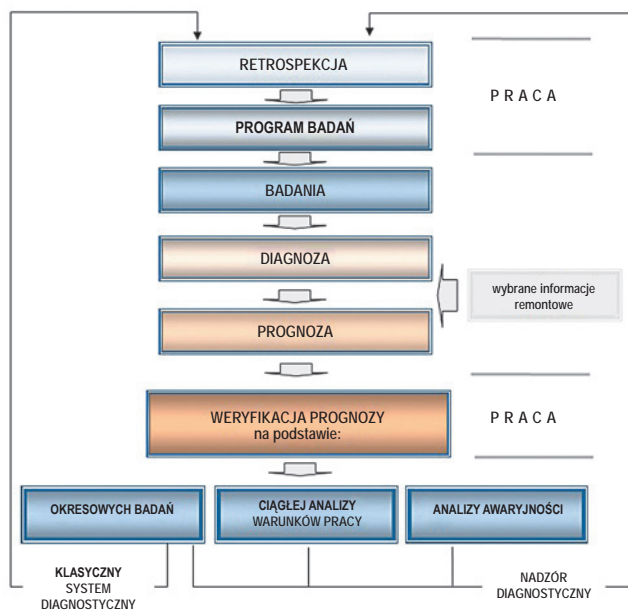
Wstęp

Duża część kotłów, nie tylko eksploatowanych na blokach klasy 200 MW, wyposażona jest w walczaki, które przepracowały ok. 300 000 godzin. W przeciwieństwie do innych elementów części ciśnieniowych kotłów ich wymiana jest praktycznie niemożliwa lub nieoptymalna. Mogą być one jednak bez ograniczeń naprawiane, gdyż ich uszkodzenia są lokalne i mają charakter zmęczeniowy. Niejednokrotnie zdarza się, że walczak podlega modernizacji, przez co jego konstrukcja nie jest zgodna z dokumentacją projektową. Modernizacje oraz liczne naprawy sprawiają, że Użytkownik eksploatuje element o indywidualnych cechach, które powinny zostać uwzględnione przy określaniu zapasu trwałości i warunków jego dalszej bezpiecznej eksploatacji.

Przy ocenie stanu technicznego walczków uwzględniać należy także rzeczywiste warunki ich pracy, w szczególności gdy planuje się eksploatację kotłów/bloków energetycznych w trybie jeszcze bardziej regulacyjnym niż dotychczas. To sprawia, że aktualne metody oceny stanu technicznego walczków kotłów parowych, oprócz potencjalnych stref uszkodzeń, powinny brać pod uwagę rzeczywiste strefy uszkodzeń i zmiany w ich konstrukcji, w tym zwłaszcza zmiany w lokalnej geometrii płaszcza walczaka związane z naprawą.

Diagnostyka walczaka

Diagnostyka to nie jest pojedyncza czynność, lecz proces, który w sposób schematyczny może być ogólnie przedstawiony tak jak na rysunku 1.



Rys. 1. Diagnostyka jako proces powiązany z eksploatacją urządzenia/bloku energetycznego

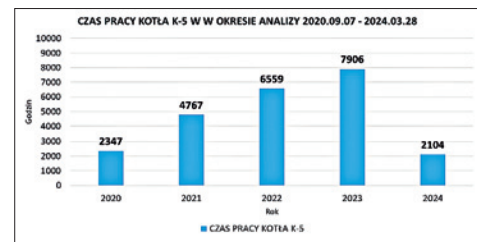
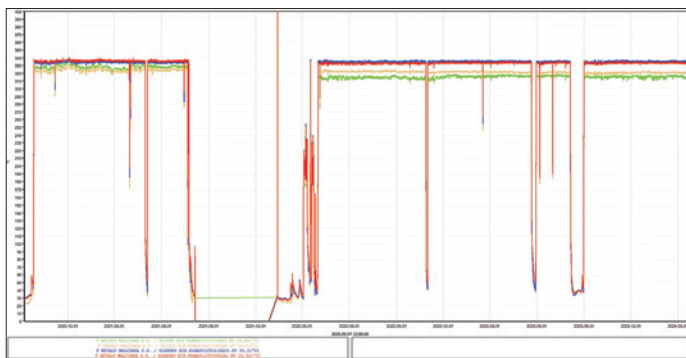
Schemat z rysunku 1 znajduje zastosowanie również w przypadku diagnostyki walczaków. W szczegółach wygląda to następująco.

- Program badań/retrospekcja – ustalony wraz z Użytkownikiem program badań powinien uwzględniać retrospekcję oraz wynikające z niej problemy eksploatacyjne. W związku z czasem eksploatacji, nierzadko przekraczającym 300 000 godzin, istotną kwestią są informacje dotyczące remontów i modernizacji, jak np. zmiany konstrukcyjne w obszarach króćców czy mocowania separacji oraz kwestie dotyczące ewentualnych napraw czy usuwania wykrytych nieprawidłowości. Badania nieniszczące powinny być wykonywane według aktualnie obowiązujących norm i procedur [1-4].



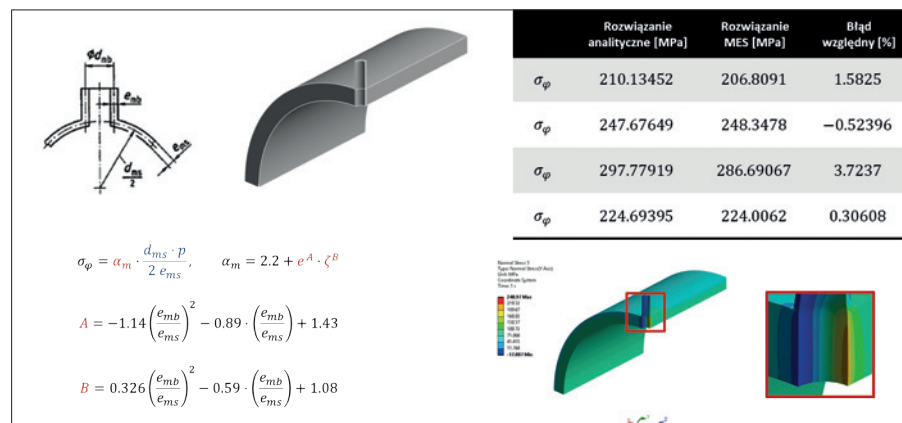
Rys. 2. Powierzchnia zewnętrzna i wewnętrzną walczaka przygotowane do badań magnetyczno-proszkowych

- Analiza warunków pracy/historia eksploatacji – zestawienie istotnych parametrów pracy rejestrowanych w systemie Użytkownika (ciśnienie i temperatura pary, temperatury metalu na górnej i dolnej tworzącej oraz po grubości ścianki), weryfikacja gradientów temperatur płaszczu i ich ewentualnych przekroczeń w odniesieniu do Instrukcji Eksploatacji, a następnie określenie wpływu tych warunków na trwałość walczaka, szczególnie w okresach uruchomień/odstawień oraz pracy stacjonarnej, zważywszy na obecny regulacyjny tryb eksploatacji bloków energetycznych i kotłów.



Rys. 3. Analiza historii eksploatacji i warunków pracy walczaka

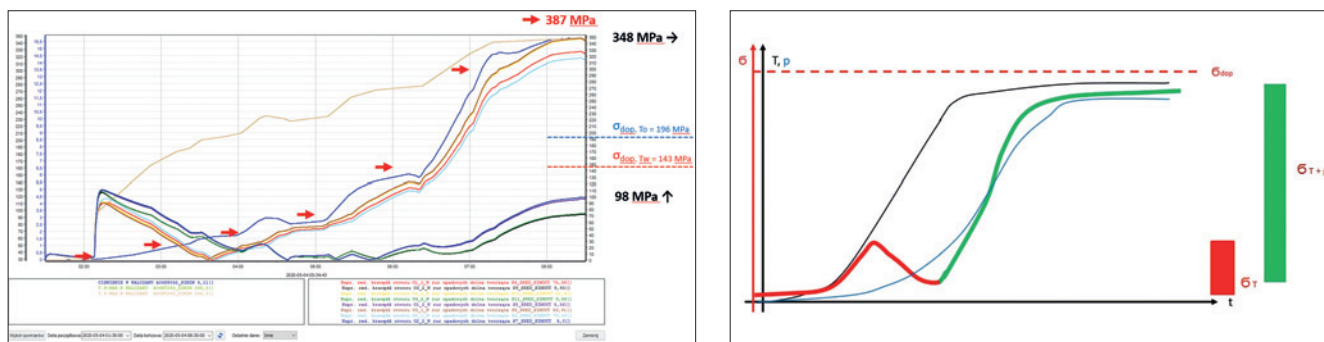
Rys. 4. Wyniki obliczeń naprężeń króćca walczaka z wykorzystaniem wzorów analitycznych i obliczeń numerycznych



- Obliczenia – określenie metodą analityczną wielkości naprężeń mechanicznych i cieplnych w nieowierzonej i owierzonej części płaszczu (szczególnie w potencjalnych strefach uszkodzeń) oraz określenie stopnia wyczerpania trwałości metalu poprzez wyznaczenie dopuszczalnej liczby cykli zmian warunków pracy w odniesieniu do ich rzeczywistej liczby. Obliczenia te uwzględniają łączny wpływ parametrów konstrukcyjnych, technologicznych i eksploatacyjnych.

Naprężenia w diagnostyce walczaka

Jednym z istotnych elementów przy ocenie stanu technicznego walczaków jest określenie w jego potencjalnych strefach uszkodzeń (PSU) rozkładu i wartości naprężeń cieplno-mechanicznych. W przypadku konstrukcji/geometrii walczaka, która nie została zmodyfikowana na skutek prac remontowych czy modernizacyjnych obliczenia naprężeń jw. do tej pory wykonywano z wykorzystaniem wzorów analitycznych, a ich wyniki w dużej mierze pokrywały się z tymi uzyskanymi z obliczeń numerycznych (rys. 4).

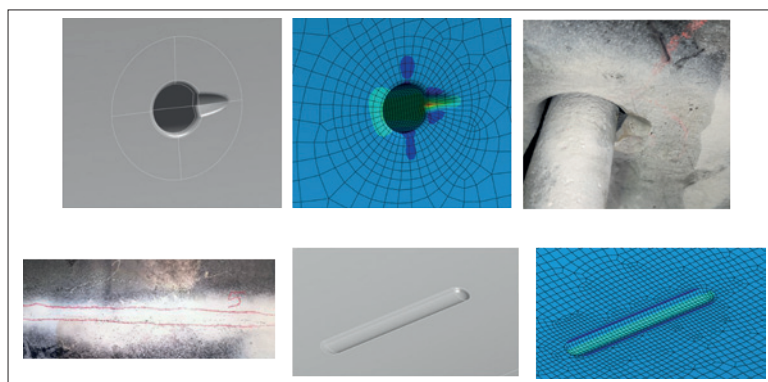


Rys. 5. Udziół naprężeń ciepłych i ciepło-mechanicznych w płaszczu walczaka w czasie uruchomienia kotła

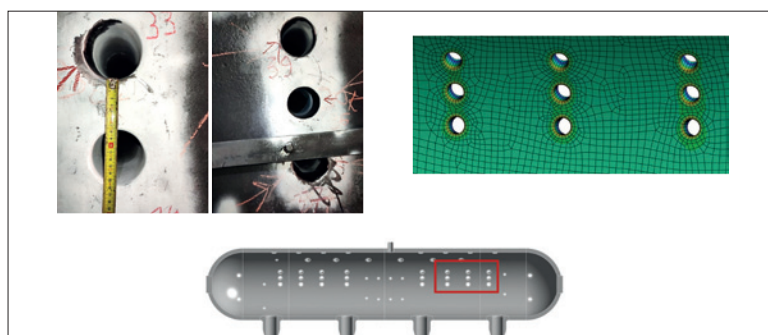
Należy jednak zwrócić uwagę, że obliczenia analityczne albo w ogóle, albo w ograniczony sposób uwzględniają efekty ciepłe zachodzące w czasie eksploatacji walczaków. Nie uwzględniają chociażby rzeczywistych cykli naprężeń w czasie uruchomienia (rys. 5).

Odrębnym zagadnieniem, które należy uwzględnić przy ocenie stanu technicznego i określaniu zapasu trwałości długo eksploatowanych walczaków kotłów parowych, są zmiany w ich konstrukcji powstałe na skutek licznych remontów i modernizacji. Niejednokrotnie czynności te spowodowały powstanie w konstrukcjach walczaków tzw. karbów geometrycznych, które obecnie są źródłami dodatkowych naprężeń nieprzewidzianych przez konstruktora i stanowią rzeczywiste strefy uszkodzeń (RSU).

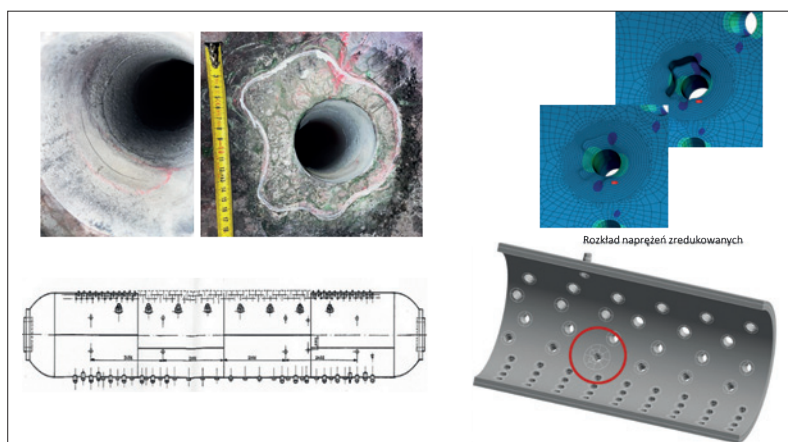
Obliczenia naprężeń ciepło-mechanicznych w RSU z wykorzystaniem wzorów analitycznych są praktycznie niemożliwe do przeprowadzenia i nawet jeśli byłyby możliwe, to taka analiza jest niezasadzona z uwagi na dostępne dzisiaj metody obliczeniowe oparte na metodach numerycznych i cyfrowych bliźniakach analizowanych elementów. Przykłady wykorzystania obliczeń numerycznych naprężeń w RSU walczaków zaprezentowano na rysunkach 6-9.



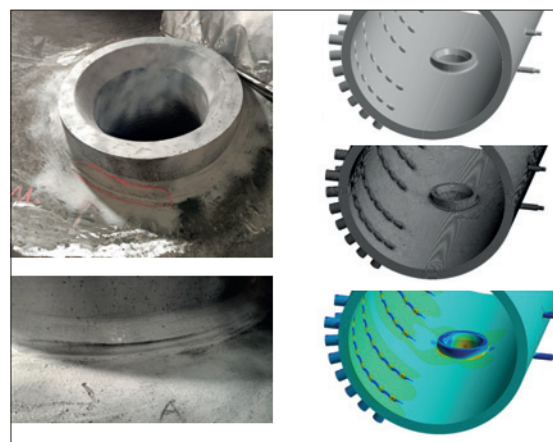
Rys. 6. Zmiana geometrii krawędzi otworu i ubytek materiału w płaszczu walczaka po naprawie



Rys. 7. Zmiana geometrii krawędzi otworów i mostków międzyotworowych



Rys. 8. Rozwarstwienie płaszczu walczaka ujawnione w czasie naprawy otworu króćca



Rys. 9. Modernizacja kształtu spiny centralnej rury opadowej

Stosowane w *Pro Novum* od wielu lat obliczenia numeryczne uwzględniają:

- rzeczywiste warunki pracy elementu,
- cykle naprężeń pochodzących od zmian termicznych elementu,
- całą konstrukcję elementu, np. układ króćców, otworów, rurociągów łączących czy zamocowań,
- naprężenia dodatkowe nieprzewidziane przez konstruktora związane np. z jakością montażu, remontu czy modernizacji,

a także pozwalają:

- dokładniej odwzorować stan termiczny i naprężeniowy w potencjalnych strefach uszkodzenia (PSU) elementu,
- zidentyfikować nowe, rzeczywiste strefy uszkodzeń konstrukcji (RSU),
- analizować stan naprężenia w czasie pełnych cykli pracy elementu, tj. uruchomienie – praca – odstawienie,
- na analizę wytrzymałościową w czasie zakłóceń w pracy czy stanów awaryjnych elementów urządzeń,
- na ich automatyzację i szybkie dostosowanie do zmian w konstrukcji czy warunków eksploatacji,
- symulować nowe czy zmienne warunki pracy elementu.

Zapas trwałości elementów krytycznych

Nierzadko można spotkać się z określeniem „wyczerpanie trwałości materiału”, co jest określeniem błędnym. W przypadku materiału możemy mieć wyłącznie do czynienia z degradacją własności: fizycznych, termicznych, mechanicznych czy wytrzymałościowych. Dopiero w przypadku elementu o określonej geometrii i technologii wykonania, z materiału (materiałów) o określonych własnościach jw., można mówić o trwałości (czy SWT) uwarunkowanej jego: cechami konstrukcyjnymi, wykonawstwem, montażem i zmiennymi warunkami pracy; w przypadku elementów krytycznych są nimi obciążenia mechaniczne (ciśnienie, obroty) i ciepłne. Ogólnie rzecz ujmując SWT dotyczy elementu, a nie materiału, z którego został wykonany, a jego wartość zależna jest od jego konstrukcji (karby geometryczne i strukturalne) i zmiennych obciążeń ciepłno-mechanicznych, a także od jakości montażu, remontu czy modernizacji, które mogą być źródłem dodatkowych naprężeń nieprzewidzianych przez konstruktora [4,5].

Odpowiednio wykonywana diagnostyka może pomóc w oszacowaniu zapasu trwałości walczaków z wystarczającą dla praktyki dokładnością. W zapasie trwałości elementu można wyróżnić i odpowiednio wykorzystać trzy fazy jego ubytku (rys. 10).

- **Faza I** – gdy badania i obliczenia SWT według obowiązujących norm wykazują rezerwę czasu do zainicjowania pęknięcia, a w materiale elementu nie ma zmian strukturalnych.
- **Faza II** – podczas której istnieje możliwość całkowitego wyczerpania zapasu trwałości, rozumianego jako zainicjowanie pęknięcia identyfikowanego podczas badań NDT oraz obliczeń wskazujących wartość $SWT = 1$ (100%). Wyniki obliczeń SWT w Fazie II wskazują wyłącznie na lokalne wyczerpanie trwałości, co nie wyklucza dalszej eksploatacji elementu po wykonaniu naprawy (jeśli jednocześnie materiał w miejscu uszkodzenia zmęczeniowego nie wykazuje objawów pełzania wykluczających naprawę przez spawanie).
- **Faza III** – gdy lokalny zapas trwałości został wyczerpany, a zidentyfikowane pęknięcia elementu są nienaprawialne (np. na powierzchni wewnętrznej komory czy kolektora).



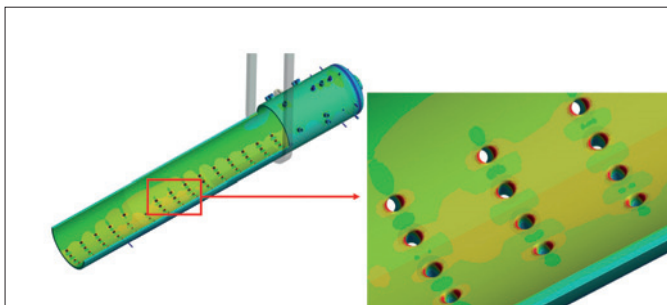
Rys. 10. Określanie zapasów trwałości elementów krytycznych urządzeń do pełnego wyczerpania ich trwałości z uwzględnieniem kontroli propagacji pęknięć (według kryteriów mechaniki pęknięcia)

O ile w przypadku walczaków, które są elementami krytycznymi w zasadzie w pełni naprawialnymi (możliwa jest naprawa stwierdzonych pęknięć), Faza III zapasu trwałości nie musi być brana pod uwagę, o tyle dwie pierwsze z powodzeniem można bezpiecznie nadzorować.

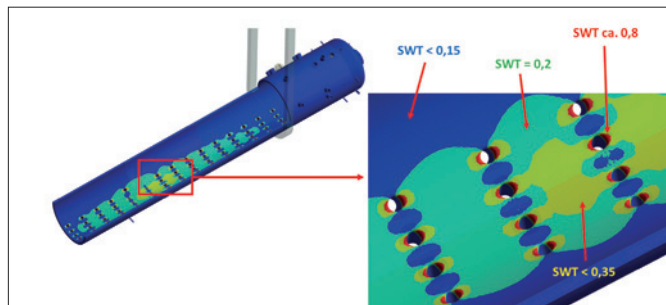
Konstrukcja walczaka poddawana jest cyklicznym obciążeniom ciepłno-mechanicznym, które wywołują na ogół zróżnicowany stan naprężeń w różnych jego obszarach (rys. 11). Cykle naprężeń są skutkiem: uruchomień, pracy regulacyjnej, odstawiń urządzeń i stanów awaryjnych. Kolejnym czynnikiem generującym dodatkowe naprężenia w walczaku mogą być błędy montażowe, remontowe czy modernizacyjne, co oznacza, że w walczakach można identyfikować zarówno miejsca o zróżnicowanych wartościach SWT, jak również dodatkowe, RSU strefy uszkodzeń (rys. 12), co opisano wcześniej.

Występowanie obszarów o zróżnicowanych wartościach SWT, a często także RSU, w obrębie jednego walczaka nie stwarza obecnie problemów z równoległym określeniem zapasu trwałości tych miejsc ze względu na oczekiwany czas i tryb dalszej eksploatacji walczaka. Można także prognozować jego trwałość na podstawie oczekiwanych warunków przyszłej eksploatacji. Opracowane w *Pro Novum* metody i narzędzia pozwalają obecnie na takie analizy. Ocenę zapasu trwałości walczaków i nadzór nad bezpiecznym jego wykorzystaniem realizujemy przy użyciu oprogramowania Walczak PRO® (rys. 13) opierając się na obowiązujących normach, rozwiązaniach numerycznych i rzeczywistych warunkach pracy walczaków.

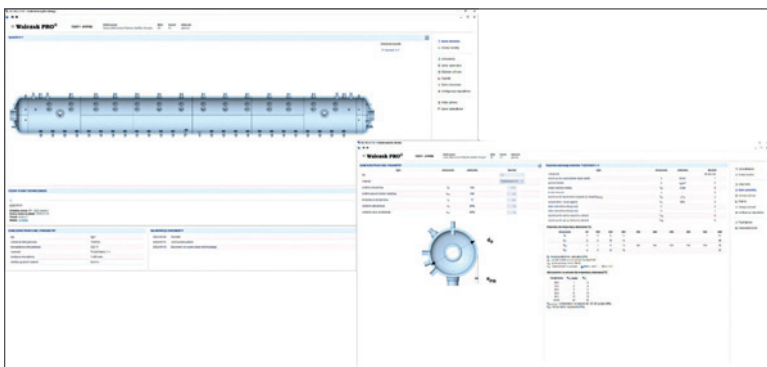
Użytkownikom walczaków proponujemy nadzór nad bezpiecznym wykorzystaniem zapasu ich trwałości. Nadzór taki może być realizowany bezpośrednio u operatora bloku i/lub u specjalistów zarządzania majątkiem (rys. 14).



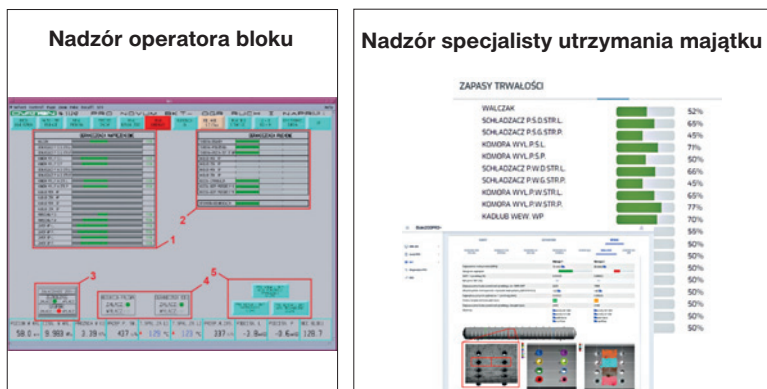
Rys. 11. Przykład rozkładu naprężeń zredukowanych w płaszczu walczaka



Rys. 12. Walczak – obszary o zróżnicowanych wartościach SWT w obrębie jednego elementu krytycznego



Rys. 13. Walczak PRO® – ocena stanu technicznego i zapasów trwałości walczków



Rys. 14. Nadzór nad wykorzystaniem zapasu trwałości

Podsumowanie

Walczak jest urządzeniem ciśnieniowym poddawany obciążeniom mechanicznym i termicznym. Ze względu na długi czas pracy walczków ich rzeczywista geometria odbiega od projektowej, co wynika z napraw i modernizacji wykonywanych w trakcie eksploatacji. Ocena stanu technicznego walczaka wymaga wykonania badań opartych na indywidualnie opracowanym zakresie badań oraz obliczeń uwzględniających historię eksploatacji walczaka oraz retrospekcję.

Wiedza i doświadczenia *Pro Novum* wskazują, że obliczenia walczaka opisane w normach powinny być uzupełniane obliczeniami z wykorzystaniem metod numerycznych, szczególnie wtedy, gdy parametry walczaka (geometryczne, eksploatacyjne) odbiegają od założeń, na podstawie których powstały wzory normowe czy analityczne.

Metody numeryczne są idealnym rozwiązaniem dla wielokrotnie naprawianych i modernizowanych walczków, gdyż jako jedyne mogą zapewnić realne odwzorowanie skomplikowanego stanu naprężeń w każdym obszarze walczaka. To właśnie prawidłowo określone naprężenia są podstawą określenia wiarygodnego zapasu trwałości.

Opisana w artykule metodyka oceny stanu technicznego pozwala więc na indywidualne podejście do każdego walczaka z uwzględnieniem jego charakterystycznych cech geometrycznych, historii eksploatacji oraz warunków pracy. Wykonana w taki sposób diagnostyka to nie tylko zwiększenie bezpieczeństwa pracy elementu, ale też możliwość, opartych na praktycznie dowolnych scenariuszach dalszej pracy kotłów/bloków energetycznych, planowania ich badań oraz remontów.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Wytyczne Urzędu Dozoru Technicznego nr 1/2015: Zasady diagnostyki i oceny trwałości eksploatacyjnej elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania. Urząd Dozoru Technicznego. Warszawa 2015.
- [2] I/PN/85/3400/2016 „Wytyczne przedłużania czasu eksploatacji urządzeń ciepłno-mechanicznych bloków 100 MW – 360 MW. Instrukcja”. *Pro Novum*. Katowice, lipiec 2016.
- [3] UDT WUDT/UC/2003 „Warunki Urzędu Dozoru Technicznego. Urządzenia ciśnieniowe”.
- [4] Instrukcja badania, oceny stanu technicznego oraz prognozowania trwałości walczków kotłów parowych. *Pro Novum*, styczeń 2025.
- [5] Trzeszczyński J., Murzynowski W., *Określanie i monitorowanie zapasów trwałości elementów krytycznych na potrzeby przedłużonej eksploatacji bloków energetycznych w nowych reżimach pracy*, „Energetyka” 2023, nr 6, Biuletyn Pro Novum 1/2023.

Enhancing efficiency and sustainability in combined cycle power plants with Cetamine® treatment: a solution for intermittent operations

Zwiększanie wydajności i zrównoważonego rozwoju w elektrowniach gazowo-parowych z obróbką Cetamine®: rozwiązanie dla pracy przerywanej

The power industry is increasingly facing challenges associated with intermittent operations, frequent start-ups, and shutdowns, which place significant strain on boiler systems and steam generators. This article examines the effectiveness of Kurita's Cetamine® treatment, a film-forming corrosion inhibitor, in mitigating corrosion and enhancing the operational performance of a Combined Cycle Gas Turbine (CCGT) plant operating under cycling conditions. The plant, which experienced severe damage due to flow-accelerated corrosion (FAC) from unstable operational regimes, adopted Cetamine® alongside its existing chemical treatment. The introduction of Cetamine® resulted in improved corrosion protection during shutdowns, reduced blow-down rates, and a significant reduction in particle counts during start-ups. This led to annual savings of 11 854 m³ of water, 3000 MWh of energy, and 940 tons of CO₂ emissions, translating to over 400 000 € in economic savings. The results underscore the effectiveness of Cetamine® in enhancing plant efficiency, reducing resource consumption, and achieving sustainability goals, demonstrating its potential as a valuable solution for power plants operating under challenging conditions.

Słowa kluczowe: combined cycle power plants, Kurita Europe GmbH, Cetamine® treatment

Branża energetyczna coraz częściej stoi przed wyzwaniem związanym z przerywaną pracą, częstymi rozruchami i wyłączeniami, które stanowią znaczne obciążenie dla systemów kotłowych i wytornic pary. W artykule przeanalizowano skuteczność preparatu Cetamine® firmy Kurita, inhibitora korozji tworzącego film ochronny, w łagodzeniu korozji i zwiększaniu wydajności operacyjnej elektrowni turbiny gazowej o cyklu mieszanym (CCGT) pracującej w warunkach cyklicznych. W zakładzie, w którym doszło do poważnych uszkodzeń z powodu korozji przyspieszonej przepływem (FAC) spowodowanej niestabilnymi warunkami operacyjnymi, wprowadzono Cetamine® do dotychczas stosowanego systemu obróbki chemicznej czynnika obiegowego. Wprowadzenie Cetamine® spowodowało poprawę ochrony przed korozją podczas przestojów, zmniejszenie szybkości odsalania i znaczne zmniejszenie liczby cząstek stałych w czynniku obiegowym podczas rozruchu. Doprowadziło to do rocznych oszczędności 11 854 m³ wody, 3000 MWh energii i 940 ton emisji CO₂, co przekłada się na ponad 400 000 € oszczędności ekonomicznych. Wyniki potwierdzają skuteczność Cetamine® w zwiększaniu wydajności zakładów, zmniejszaniu zużycia zasobów i osiąganiu celów zrównoważonego rozwoju, demonstrując jej potencjał jako cennego rozwiązania dla elektrowni pracujących w trudnych warunkach intensywnej regulacji.

Keywords: elektrownie gazowo-parowe, firma Kurita Europe, preparat Cetamine®

Introduction

The power industry today is facing new challenges due to changing market demands. In the past, it was standard practice to operate boilers under continuous and stable conditions, without the need for frequent start-ups and shutdowns. While shutdowns did occur occasionally, they were always seen as exceptional cases. However, what we are witnessing now across Europe is a shift toward conventional units operating intermittently, with regular short shutdowns and rapid start-ups. This has become the new standard operational mode and requires the introduction of new chemical treatment strategies. Kurita has recognized this market trend and developed technologies to protect boiler systems and steam generators against corrosion specifically in intermittent operation. One such innovation is the introduction of an additional corrosion inhibitor alongside the existing treatment program. This approach ensures extra protection during shutdown periods without the need to change the currently applied chemical treatment.

Kurita's Cetamine® Technology based on Film Forming Amines (FFA) provides an excellent treatment option for water/steam cycles, especially for plants operating in cycling mode where preservation is required during shutdowns, but unit availability must be maintained [3]. Successful applications of Film Forming Products have been reported for both plants which are continuously operated [4-8] and plants under wet or dry-lay-up [9, 10]. The Film Forming Amine molecule Oleyl Propylenediamine (OLDA) adsorbs onto metal/metal oxide surfaces to form a protective film or barrier, which prevents corrosion by stopping water and other corrosive agents from contacting the metal/metal oxide surface. Furthermore, the thin film fosters the formation of a smooth and compact iron oxide layer [11].

Once formed, the protective film remains intact in both wet and dry conditions. This offers significant potential benefits for plants under a cycling mode of operation and for the preservation of both drained and (partially) filled plants during a shutdown.

The number of units treated with FFP has significantly increased over recent years and The International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS) has released two Technical Guidance Documents (TGD) dealing with the Application of Film Forming Substances (FFS) in Industrial Steam Generators (IAPWS TGD11-19) and in Fossil,

Combined Cycle and Biomass Power Plants (IAPWS TGD8-16, 2019). In these TGDs three substances, among them, OLDA are listed, which have been the subject of intensive research and where significant application experience is available [1, 2].

If applied correctly, the following advantages can be achieved by applying Kurita's Cetamine® Technology:

- Reduction of Flow-Accelerated Corrosion (FAC).
- Excellent protection during outages and lay-up periods.
- Significant reduction of corrosion and metal oxide transport.
- Lower corrosion products especially during start-ups after shutdown periods.
- Shorter turbine coupling time at restart after shutdown.
- Formation of clean, smooth heat transfer surfaces.

The purpose of this article is to describe and demonstrate the effectiveness of Cetamine against corrosion in a Combined Cycle Plant under cycling mode conditions with short and long term shutdowns. The technical improvements that have been realized in terms of better total iron control lead to decreased blow-down rates during the start-ups and the related economical savings in terms of water, energy and carbon dioxide emission reduction.

Combined Cycle Gas Turbine (CCGT)

The Combined Cycle Plant with 800 MW total output consists of two Heat Recovery Steam Generators (HRSG) with horizontal gas path drum boilers. The two gas turbines are powered by the combustion of the fuel which is mainly natural gas and diesel oil in case of emergency. The expansion of the combustion gases operates the electricity generators coupled to each gas turbine. From the residual heat from the gas turbine exhaust gases steam is produced in the two HRSG.

Each HRSG consists of a triple pressure water and steam cycle generating a maximum total steam quantity of 2 x 240 t/h driving the steam turbine with a maximum superheated steam temperature of 566°C. The steam from the last stage of the turbine condenses in the condenser and the water is re-circulated to the heat recovery steam generators where the cycle begins again.

The power plant, commissioned in 2005, operated unstably from the very beginning, experiencing a high frequency of shutdowns and start-ups. The total operating time of both units was below 3000 hours in 2006 with a total number of start-ups of 110. In 2008, the plant achieved its maximum operational time, exceeding 13 000 hours, requiring 85 start-ups to reach this level. From that point onward, the operational time decreased year by year, with almost no activity recorded between 2013 and 2015. In 2016, operational hours began to rise again, however, the yearly total remained significantly lower compared to the period before the long-term shutdown. Additionally, the degree of utilization declined due to the reduced operational hours relative to the number of start-ups.

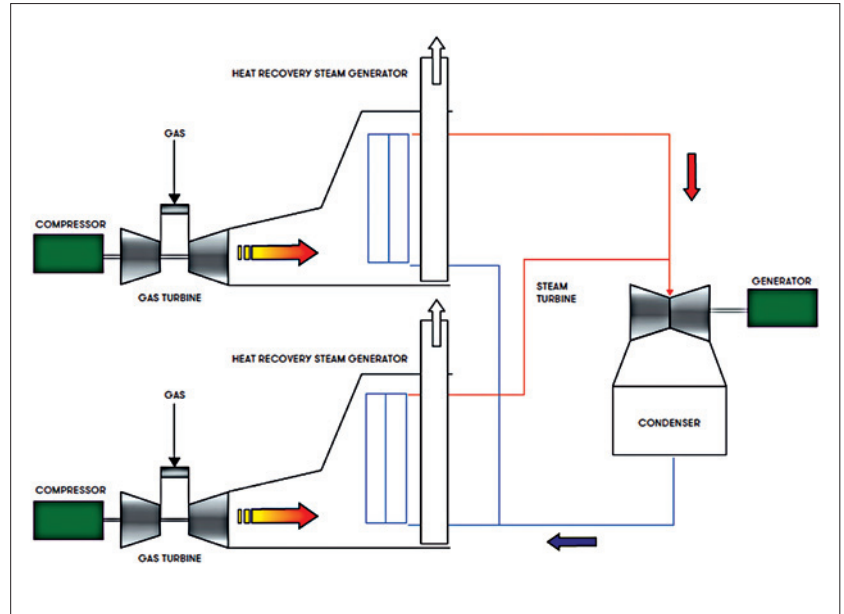


Fig. 1. Electricity production process CCGT power plant

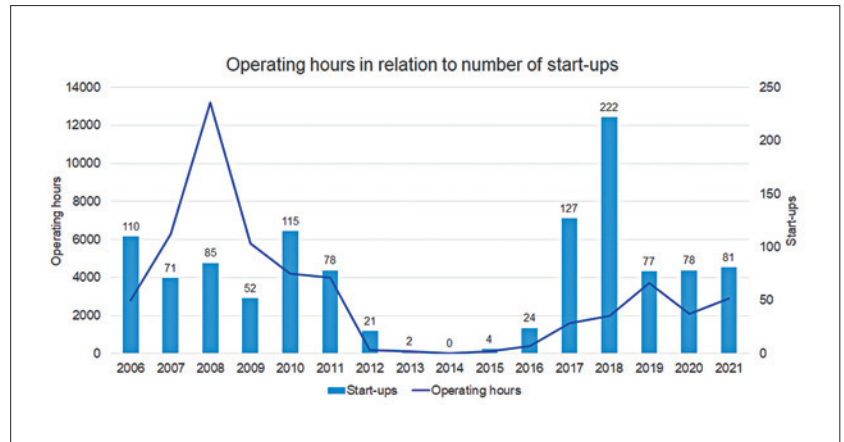


Fig. 2. Total operating hours for both units in relation to number of start-ups for both

This prolonged and extremely unstable operational regime of the power plant caused severe damages in sensitive areas of the system, as summarized in Figure 3. The main damages have been identified as flow accelerated corrosion (FAC) in the HP economizer collector lines, the LP evaporator, the IP feedwater line and IP boiler as well as in the LP evaporator.

Consequently, the plant operators decided to incorporate Cetamine® as a film-forming corrosion inhibitor in addition to the existing treatment concept, which was based on ammonia and drum alkalization with trisodium phosphate.

Year	System	Inspection result	Possible causes
2017	HP economizer collector lines LP evaporator	Presence of generalized FAC on internal surfaces of the lower and upper collectors	Direct consequence of cycling and flexible operation Plant with too many starts & stops
2018	IP boiler Water supply to IP boiler	Small areas affected by FAC visible on drum surface close to water exit zone of the primary separators FAC visible inside water feed inlet pipe to distributor holes	
2019	LP evaporator	Presence of FAC widespread in inner surface of header and tubes Gradual decrease in wall thickness inside the tube in localized area and orange peel appearance	
2021	In April start of Cetamine® treatment additionally to ammonia and TSP		

Fig. 3. System inspection results

Treatment with Cetamine®

The treatment with Cetamine® began in April 2021, with the product being dosed into the condensate line at an initial rate of 2 ppm. Over the first three months, the dosage was gradually increased to 5 ppm to ensure complete film formation and effective corrosion protection throughout the system. Following this three-month implementation phase, the dose rate was gradually reduced to a final level of 1 to 1.5 ppm, which has been applied continuously since then.

Particle count monitoring and blow-down control during start-ups

The two HRSGs experienced extremely high particle count values during start-ups under the conventional treatment, prior to the implementation of the additional Cetamine® dosage. Particle count monitoring is a technique used to measure the number and size of solid particles, such as corrosion products (e.g., iron oxides), in water/steam cycles. While it cannot be directly correlated with total iron measurement, it offers valuable insights into system cleanliness and is particularly effective at detecting erosion, especially during system start-ups. Particle count monitoring is a reliable tool for ensuring the efficiency, reliability, and longevity of plant equipment.

Due to the consistently and exceptionally high particle counts in both the HP and IP drums during start-ups, the operators implemented a manual blow-down control strategy based on particle count values, as illustrated in Figure 4.

The blow-down was manually opened to 100% when particle count values exceeded 2000 in the HP drum or 3000 in the IP drum. The blow-down rate was reduced to 50% when particle count values dropped below these thresholds and was completely closed once the particle count values fell below 250 in the HP drum or 350 in the IP drum.

Blow-down rate	100 %	50 %	closed
HP drum	> 2000	≤ 2000	≤ 250
IP drum	> 3000	≤ 3000	≤ 350

Fig. 4. Blow-down control in dependency of particle count in HP and IP drum

A typical cold start-up is illustrated in Figure 5. During the 12 hours and 23 minutes of operation, the particle count values in the IP system remained above 3000, with a peak particle count exceeding 14 000. Throughout this period, the manual blow-down was maintained at 100%. The particle count values in the HP system were significantly lower but still exceeded the implemented limit of 2000. This resulted in a blow-down rate of 100% for approximately 7 hours of operation. After 8 hours and 15 minutes, the particle count values dropped below 2000, and the blow-down rate was reduced to 50% for the remaining hours of operation.

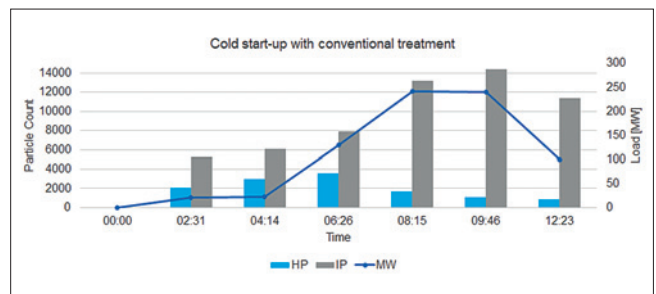


Fig. 5. Cold start-up particle count with conventional treatment

The implemented blow-down monitoring strategy, based on particle count monitoring results, was retained and consistently applied even after the introduction of Cetamine® treatment, which uses filmforming amines as a corrosion inhibitor. Figure 6 illustrates a typical cold start-up following a 27-day cycle shut-down. Initially, particle count values exceeded the internal limits for both the IP and HP systems. However, after 1 hour of operation, the blow-down rate was reduced to 50% due to the overall decrease in particle count values. As the values continued to drop below the lower blow-down set point limits, the blow-down was completely closed after 7 hours of operation.

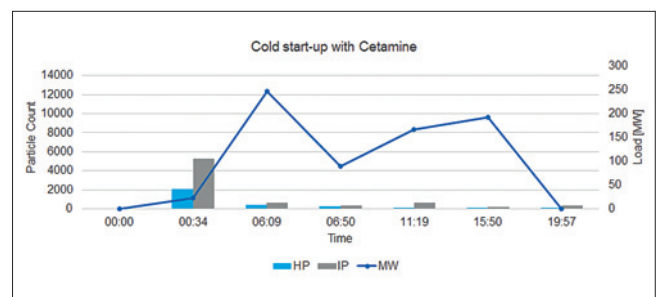


Fig. 6. Cold start-up particle count with Cetamine®

Blow-down reduction and economical savings evaluation for water, energy and carbon dioxide emission reduction

As described in the previous evaluation, the lower particle count values during start-ups under Cetamine® treatment allowed the blow-down to be reduced or closed much earlier compared to the conventional treatment. This resulted in substantial savings in both water and energy. For an accurate comparison, a one-year period of conventional operation was evaluated against one year

of operation with Cetamine® treatment. It is important to note that, for this evaluation, the number of start-ups and total operational hours were kept at comparable levels. Figure 7 shows the total number of start-ups, including cold, warm, and hot start-ups, with similar values for both treatments. Figure 8 illustrates the operating hours for both systems, showing a slightly lower operational time under the conventional treatment.

The total blow-down volume is shown in Figure 9. Over the course of one year under conventional treatment, the total blow-down volume was 57 974 m³, whereas it was 46 120 m³ under Cetamine® treatment. This represents annual water savings of 11 854 m³, reflecting a 20% reduction in make-up water usage. Corresponding energy savings amounted to over 3000 MWh, and CO₂ emissions were reduced by 940 tons per year. Based on the operator's internal evaluation and the prices for water, energy, and carbon dioxide emission permits at the time of evaluation, the reduction in water and energy consumption resulted in annual economic savings of more than 400 000 €.

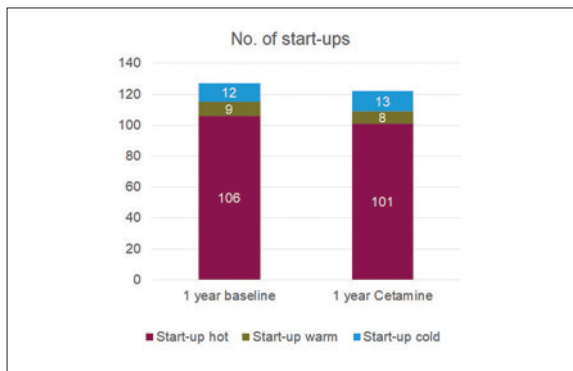


Fig. 7. Comparison of number of start-ups

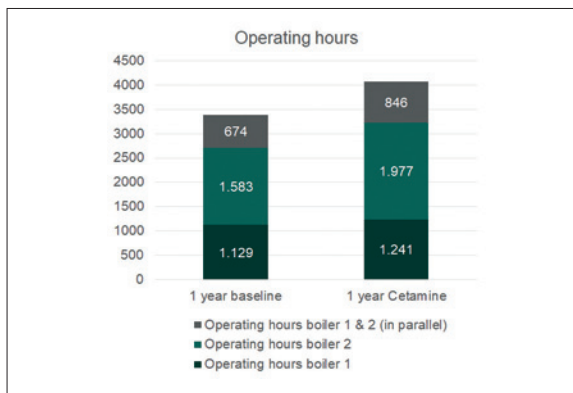


Fig. 8. Comparison of time of operation

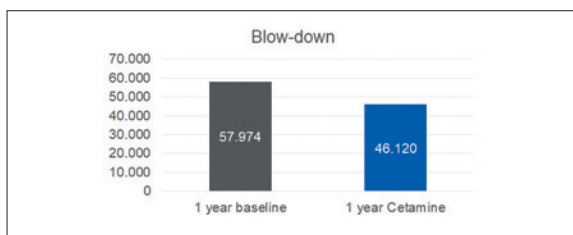


Fig. 9. Blow-down water consumption

Conclusion

The implementation of Cetamine® treatment in the Combined Cycle Gas Turbine (CCGT) plant has resulted in significant improvements in operational performance, system protection, and environmental sustainability. Faced with the growing challenges of intermittent operations, frequent start-ups, and shutdowns, the plant experienced severe damage from corrosion in sensitive areas. The introduction of Cetamine®, a filmforming corrosion inhibitor, has effectively mitigated these issues by providing reliable protection during shutdowns and start-ups, ensuring the longevity of plant equipment.

The treatment has not only reduced flow-accelerated corrosion (FAC) but also contributed to reduced particle count values, allowing for earlier and more efficient blow-down control. This has led to notable reductions in water consumption, energy usage, and carbon dioxide emissions. Specifically, the plant achieved a 20% reduction in make-up water usage, saving 11 854 m³ annually, along with over 3000 MWh in energy savings and a reduction of 940 tons of CO₂ emissions per year. Furthermore, these environmental benefits have translated into substantial economic savings of more than 400 000 € annually, based on current market prices for water, energy, and carbon dioxide emission permits.

The results of this case study illustrate the considerable potential of Cetamine® Technology in enhancing plant efficiency under cycling operational modes. By ensuring that the plant operates at optimal efficiency, the treatment minimizes the impact of cycling on system reliability while supporting sustainability goals. As the power industry continues to face the pressures of changing market demands and environmental regulations, the integration of advanced solutions like Cetamine® is crucial for improving both the economic and environmental performance of power plants. This technology provides a clear pathway to achieving sustainable and cost-effective operations in the modern power generation landscape.

BIBLIOGRAPHY

- [1] Technical Guidance Document: Application of Film Forming Amines in Fossil, Combined Cycle, and Biomass Power Plants, 2019. International Association for the Properties of Water and Steam, IAPWS TGD8-16, available from <http://www.iapws.org>
- [2] Technical Guidance Document: Application of Film Forming Substances in Industrial Steam Generators, 2019. International Association for the Properties of Water and Steam, IAPWS TGD11-19, available from <http://www.iapws.org>
- [3] Hater W., Smith B., McCann P., de Bache A., "PowerPlant Chemistry" 2017, 19(3), 129-140.
- [4] Allard B., Chakraborti S., "Svensk Papperstidning" 1983, 86(18), R. 186.
- [5] Hater W., Rudschützky N., Olivet D., "PowerPlant Chemistry" 2009, 11(2), 90.
- [6] Kolander B., de Bache A., Hater W., "VGB PowerTech" 2012, 92(8), 69.
- [7] van Lier R., Gerards M., Savelokoul J., "VGB PowerTech" 2012, 92(8), 84.
- [8] Hook B., Hater W., de Bache A., "PowerPlant Chemistry" 2015, 17(5), 283.
- [9] Hater W., de Bache A., Petrick T., "PowerPlant Chemistry" 2014, 16(5), 284.
- [10] Wagner R., Czempik E., "VGB PowerTech" 2014, 94(3), 48.
- [11] Topp H., Hater W., de Bache A., zum Kolk C., "PowerPlant Chemistry" 2012, 14(1), 38.

Nowoczesne techniki badań nieniszczących w diagnostyce urządzeń energetycznych: PAUT i TOFD w praktyce

Modern non-destructive testing techniques of energy equipment: PAUT and TOFD in practice

Diagnostyka urządzeń energetycznych to kluczowy proces, mający na celu zapewnienie ich długoterminowej niezawodności i minimalizację kosztów. W tym kontekście wybór odpowiednich metod badań ma ogromne znaczenie. Wraz z rozwojem technologii, techniki ultradźwiękowe, takie jak PAUT (Phased Array Ultrasonic Testing) i TOFD (Time of Flight Diffraction), stały się ważnymi narzędziami w precyzyjnej detekcji nieciągłości materiałowych. W artykule przedstawiono nowoczesne techniki badań nieniszczących, takie jak PAUT i TOFD, które zostały wdrożone i są oferowane przez Firmę Pro Novum Sp. z o.o. Korzystanie z tych zaawansowanych technologii dostarcza innowacyjne rozwiązania w diagnostyce elementów energetycznych, zapewniając najwyższą jakość i precyzję wykorzystywaną w analizach. Metody te, wykorzystywane w różnych sektorach przemysłowych, w tym energetyce, pozwalają na skuteczne monitorowanie stanu technicznego urządzeń oraz minimalizację ryzyka awarii, co bezpośrednio wpływa na wydajność i bezpieczeństwo eksploatowanych obiektów.

Słowa kluczowe: diagnostyka urządzeń energetycznych, techniki badań nieniszczących: PAUT i TOFD, Pro Novum Sp. z o.o.

Diagnostics of energy equipment is a key process aimed at ensuring the long-term their reliability and minimizing costs. In this context, the selection of appropriate testing methods is of great importance. With the development of technology, ultrasonic techniques such as PAUT (Phased Array Ultrasonic Testing) and TOFD (Time of Flight Diffraction) have become important tools in the precise detection of material discontinuities. This article presents modern non-destructive testing techniques, such as PAUT and TOFD, which have been implemented and are offered by Pro Novum Sp. z o.o. The use of these advanced technologies provides innovative solutions in the diagnostics of materials in energy sector components, ensuring the highest quality and precision applied in the analysis. These methods, used across various industrial sectors, including energy, enable effective monitoring of the technical condition of equipment and minimize the risk of failure, which directly affects the performance and safety of operational objects.

Keywords: diagnostics of energy equipment, non-destructive testing techniques: PAUT and TOFD, Pro Novum Sp. z o.o.

Wstęp

Diagnostyka i badania diagnostyczne to terminy, które są ze sobą ściśle związane, ale odnoszą się do różnych aspektów procesu potwierdzenia zgodności, wykrywania wskazań czy pęknięć i oceny stanu technicznego elementu. Diagnostyka w energetyce to całościowy proces, który obejmuje wszystkie działania mające na celu monitorowanie, ocenę, prognozowanie i zarządzanie stanem technicznym elementów w celu zapewnienia długoterminowej niezawodnej pracy i optymalizacji kosztów. Badania diagnostyczne to konkretne działania, które stanowią część procesu diagnostycznego skutecznie realizowanego przez Pro Novum Sp. z o.o. i są oparte na szczegółowych procedurach, pozwalających na precyzyjne wykrywanie wskazań i identyfikowanie ich charakteru zwłaszcza w postaci pęknięć, ze szczególnym uwzględnieniem potencjalnych stref uszkodzeń (PSU) [1].

Dobór badań powinien być determinowany przez diagnostykę w celu otrzymania konkretnej informacji o badanym elemencie. Jest to bardzo ważny, ale i nieoczywisty proces. Prawidłowo określony zakres badań, dobór metod i technik badania mają odpowiadać na konkretne pytania, a nie tworzyć równoległą rzeczywistość wraz z szeregiem niepotrzebnych wyników – zbędnych informacji tworzących szum informacyjny. Rozwój technologii, postęp w dziedzinie elektroniki otwiera nowe możliwości, często nowe metody badań są znane ponad 50 lat.

Dostęp do technologii pozwala na ich komercyjny użycie w dzisiejszych czasach. Przykładem takich badań są badania ultradźwiękowe. To postęp technologiczny pozwolił na obiektowe stosowanie TOFD i PHASE ARRAY [2].

W badaniach ultradźwiękowych (UT) istnieje kilka metod, które różnią się zastosowaniem oraz sposobem wykrywania i oceniania nieciągłości w materiałach. Poniżej przedstawiono różnice między klasycznymi badaniami ultradźwiękowymi a technikami PAUT (Phased Array Ultrasonic Testing) oraz TOFD (Time of Flight Diffraction):

Klasyczne badania ultradźwiękowe (UT)

- Zasada działania: klasyczne badania ultradźwiękowe polegają na wysłaniu pojedynczej fali ultradźwiękowej w materiał i odbieraniu jej odbicia od granic nieciągłości lub powierzchni materiału.
- Sprzęt: zwykle wykorzystywana jest jednoczesna sonda nadawczo-odbiorcza. Sonda jest umieszczona na powierzchni badanego materiału i emituje fale, które przechodzą przez materiał, a następnie odbijają się od granic wewnętrznych, jak w przypadku nieciągłości.
- Zastosowanie: wykorzystywane głównie do detekcji większych nieciągłości w materiałach, takich jak pęknięcia czy wtrącenia.

- Ograniczenia: jest stosunkowo mniej precyzyjna w wykrywaniu małych, subtelnym nieciągłości, szczególnie w materiałach o złożonej geometrii czy o grubszej strukturze [3-6].

PAUT (Phased Array Ultrasonic Testing)

- Zasada działania: PAUT to technika, w której wykorzystywana jest grupa sond ultradźwiękowych (główki wieloprzetwornikowe), jednocześnie sterowanych w taki sposób, by tworzyły fale o różnych kątach. Dzięki tej technologii możliwe jest uzyskanie obrazu wewnętrznego materiału w różnych płaszczyznach.
- Sprzęt: zastosowanie sondy złożonej z wielu elementów, które mogą działać równocześnie lub w różnych konfiguracjach, co umożliwia uzyskanie większej ilości danych o materiale.
- Zastosowanie: PAUT jest bardzo precyzyjne i umożliwia wykrywanie zarówno powierzchniowych, jak i głębokich nieciągłości. Idealne do skanowania złożonych elementów, takich jak spoiny czy grube materiały.
- Zalety: zwiększona precyzja i możliwość uzyskania szczegółowego obrazu materiału w różnych kierunkach. Często wykorzystywane do wykrywania nieciągłości w trudno dostępnych miejscach [3-6].

TOFD (Time of Flight Diffraction)

- Zasada działania: TOFD polega na pomiarze czasu, jaki zajmuje fali ultradźwiękowej dotarcie do nieciągłości i powrót. Technika tą wykorzystuje się dwa detektory: jeden nadający falę, drugi odbierający. W przypadku nieciągłości fala jest odbijana, a pomiar opóźnienia czasowego pozwala określić rozmiar i położenie nieciągłości.
- Sprzęt: używa się dwóch sond, jednej nadającej, drugiej odbierającej. Detektory są umieszczane w określony sposób w stosunku do badanej powierzchni, co pozwala na pomiar czasu przelotu fali.
- Zastosowanie: TOFD jest szczególnie skuteczne w detekcji i pomiarze wielkości nieciągłości w spoinach i innych połączeniach materiałowych. Dzięki tej metodzie można łatwo określić długość nieciągłości i głębokość jego występowania.
- Zalety: TOFD jest bardzo dokładne w określaniu wymiarów i głębokości nieciągłości, szczególnie w spoinach. Dzięki dużej dokładności pomiarów i stosunkowo szybkiemu przeprowadzaniu inspekcji, jest cenione w przemyśle [2-6].

Dla odbiorców badań, osób wykonujących ocenę wyników, poza wykrywalnością, kluczowa jest dokładność przeprowadzonych pomiarów (POD) oraz możliwość pojawienia się wskazań pozornych (PFI). Nie zawsze dokładność badań TOFD i PAUT różni się w zależności od rodzaju badania oraz specyficznych zastosowań. Każda z tych technik ma swoje zalety, jeśli chodzi o precyzyjność wykrywania i pomiarów nieciągłości. Ich dobór i zaprogramowanie badania muszą być ściśle powiązane z celem badania [7].

Dokładność TOFD

- Precyzja w określaniu głębokości nieciągłości: TOFD jest wyjątkowo dokładne w pomiarze głębokości nieciągłości (np. pęknięć, wtrąceń) w materiale, szczególnie w przypadku spoin i połączeń materiałowych. Dzięki pomiarowi czasu przelotu fali odbitej od nieciągłości możliwe jest bardzo precyzyjne określenie jego głębokości (z dokładnością do około 1-2 mm).
- Wielkość nieciągłości: TOFD jest mniej skuteczne w precyzyjnym określaniu kształtu lub dokładnych wymiarów nieciągłości, zwłaszcza w przypadku nieciągłości o nieregularnym kształcie. Niemniej jednak, dzięki wykrywaniu dyfrakcji fali dyfrakcyjnej odbitej od krawędzi nieciągłości, TOFD może dokładnie określić wymiary wzdłuż jednej osi (np. długość pęknięcia).
- Przenikalność materiału: TOFD jest szczególnie skuteczne w badaniu materiałów o dużej grubości, ponieważ falom ultradźwiękowym łatwiej przechodzić przez grubsze warstwy. Dokładność może być mniejsza w przypadku materiałów bardzo cienkich lub o złożonej geometrii [3-6].

Dokładność PAUT

- Precyzja w obrazowaniu: PAUT jest bardziej precyzyjne w tworzeniu obrazów materiału w różnych płaszczyznach, dzięki czemu może wykrywać nieciągłości o nieregularnych kształtach i wielkościach. Wykorzystując sondy wieloprzetwornikowe, PAUT pozwala uzyskać pełniejszy obraz wewnętrzny materiału, co umożliwia dokładniejszą detekcję i określenie lokalizacji nieciągłości. Może wykrywać nieciągłości w szerokim zakresie kątów i w różnych głębokościach.
- Wielkość i kształt nieciągłości: PAUT umożliwia precyzyjne określenie kształtu, rozmiaru i położenia nieciągłości dzięki zastosowaniu różnych kątów i ogniskowania wiązki ultradźwiękowej. W zależności od ustawień sondy PAUT pozwala na dokładne zidentyfikowanie np. małych pęknięć, wtrąceń lub innych nieregularnych nieciągłości.
- Dokładność kąta detekcji: PAUT zapewnia dużą dokładność w ocenie kąta nieciągłości, ponieważ może zmieniać kąt odbicia fali w czasie rzeczywistym. Jest to szczególnie ważne w badaniach materiałów o skomplikowanej geometrii, jak np. wirniki turbin parowych lub w miejscach trudno dostępnych.
- Wielkość i geometria materiału: PAUT jest efektywne zarówno w badaniach cienkich, jak i grubszych materiałów. Dzięki ustawieniu sondy i zmianie kąta technika ta może być stosowana w różnych rodzajach materiałów, w tym w bardzo złożonych strukturach, np. w spoinach o różnej geometrii [3-6].

PAUT (Phased Array Ultrasonic Testing) oraz TOFD (Time of Flight Diffraction) to nowoczesne metody badań nieniszczących, które mają przewagę nad tradycyjnymi badaniami UT, ale również nad badaniami radiograficznymi RT, w różnych zastosowaniach diagnostycznych. Ogromnym atutem jest możliwość ich wzajemnego połączenia w celu otrzymania jeszcze dokładniejszych efektów.

Oczywiście badanie musi być odpowiednio zaplanowane i dopasowane do zadania. Poniżej wymieniono najważniejsze zalety PAUT i TOFD.

Kluczowe zalety PAUT i TOFD

- Możliwość pełnego zapisu badania, który umożliwia jego odtworzenie w dowolnym miejscu i czasie.
- Możliwość porównania i analizy badań wykonywanych w różnych odstępach czasu – pomiędzy remontami.
- Precyzyjne określanie geometrii wykrytych wskazań i pęknięć (z uwzględnieniem ograniczeń), które mogą posłużyć jako dane do obliczeń analizy bezpieczeństwa.
- Skrócenie czasu badania.
- Zmniejszenie zakresu i kosztów przygotowania elementu do badań.
- Możliwość zastąpienia badań radiograficznych.

Bezpieczeństwo

- PAUT i TOFD są metodami ultradźwiękowymi, co oznacza, że nie wykorzystują promieniowania jonizującego. W związku z tym nie ma ryzyka związanego z ekspozycją na promieniowanie, co stanowi poważną przewagę nad RT, które wymaga stosowania promieniowania rentgenowskiego.
- RT wymaga ścisłych procedur bezpieczeństwa, w tym używania osłon ochronnych, wyznaczania stref bezpieczeństwa i przeprowadzania badań tylko przez wykwalifikowany personel. W przeciwieństwie do tego PAUT i TOFD mogą być stosowane bez tych rygorystycznych wymagań ochrony, co upraszcza cały proces badania.

Możliwość badania w czasie rzeczywistym

- PAUT i TOFD pozwalają na badanie materiałów w czasie rzeczywistym, co oznacza, że mogą dostarczyć natychmiastowe informacje na temat stanu badanego obiektu. Dzięki wykorzystaniu różnych kątów i ogniskowania wiązki ultradźwiękowej, te techniki umożliwiają uzyskanie pełnego obrazu struktury materiału na żywo, co przyspiesza proces diagnostyczny.
- RT wymaga czasu na przetworzenie obrazu rentgenowskiego, co oznacza, że wyniki nie są dostępne natychmiast. Ponadto, analiza obrazu rentgenowskiego wymaga specjalistycznego sprzętu i doświadczonego personelu, co również może wpłynąć na czas oczekiwania na wyniki.

Lepsza rozdzielczość i precyzyjność w wykrywaniu nieciągłości

- PAUT pozwala na tworzenie szczegółowych obrazów 3D wewnętrznej struktury materiału, dzięki czemu możliwe jest wykrywanie małych nieciągłości, takich jak pęknięcia czy wtrącenia, a także określenie ich kształtu, rozmiaru i głębokości. Technika ta ma znacznie lepszą rozdzielczość przestrzenną w porównaniu z RT.

- TOFD ma szczególną przewagę w dokładnym pomiarze głębokości nieciągłości (z dokładnością do 1-2 mm), co czyni ją idealnym rozwiązaniem w badaniach materiałów o dużej grubości, takich jak spoiny, rury i inne elementy o złożonej geometrii.

Wielowarstwowe badanie

- PAUT umożliwia badanie materiałów o dużej grubości i złożonej geometrii poprzez wykorzystanie różnych kątów ultradźwiękowych oraz precyzyjnego ogniskowania wiązki. Pozwala to na dokładną analizę struktur z wieloma warstwami, co jest trudne do osiągnięcia przy użyciu RT.
- RT może mieć trudności z badaniem materiałów o dużej grubości lub złożonych geometriach, ponieważ promieniowanie rentgenowskie może być pochłaniane lub rozpraszane przez grube lub gęste materiały, co zmniejsza jakość uzyskiwanych obrazów.

Możliwość pracy w trudnych warunkach

- PAUT i TOFD mogą być wykonywane w trudniejszych warunkach środowiskowych czy w trudno dostępnych miejscach.
- RT często wymaga bardziej kontrolowanych warunków pracy oraz specyficznego ustawienia sprzętu, co może sprawiać trudności, szczególnie w przypadkach, gdy dostęp do badanego obiektu jest ograniczony.

Brak potrzeby stosowania środków chemicznych

- W przypadku RT, w niektórych przypadkach może być konieczne stosowanie środków chemicznych (np. w procesie przygotowania płytek filmowych). Z kolei PAUT i TOFD nie wymagają żadnych substancji chemicznych, co sprawia, że są bardziej ekologicznymi i mniej kosztownymi metodami.

Zastosowanie w różnych materiałach

- PAUT i TOFD oferują wszechstronność w zakresie materiałów – są skuteczne w badaniach spoin, rur, konstrukcji stalowych, materiałów kompozytowych, a także materiałów o różnej grubości.
- RT jest ograniczone w badaniach materiałów o bardzo złożonej geometrii lub małej grubości, a także może mieć problemy z uzyskaniem odpowiednich obrazów w przypadku niejednorodnych materiałów.

Podsumowanie

Obie technologie są bardzo precyzyjne w odpowiednich zastosowaniach, ale PAUT oferuje większą wszechstronność i dokładność w obrazowaniu, natomiast TOFD jest lepsze, jeśli chodzi o precyzyjne pomiary głębokości i wykrywanie większych nieciągłości w strukturach materiałów o dużej grubości.

PAUT i TOFD różnią się w zakresie zastosowania i dokładności, ale razem stanowią komplementarne narzędzia do przeprowadzania skomplikowanych badań nieniszczących. Ich wykorzystanie wpisuje się w obecne wyzwania, jakie stawia współczesna diagnostyka zarówno w przypadku badań elementów eksploatowanych jak i nowych na etapie budowy lub wymian. Jest to również idealne narzędzie do wykorzystania w realizacji nadzorów diagnostycznych jako podejścia umożliwiającego bezpieczną pracę elementów z uszkodzeniami o charakterze pęknięć [1, 8].

Podsumowując, techniki PAUT (Phased Array Ultrasonic Testing) oraz TOFD (Time of Flight Diffraction) stanowią zaawansowane metody badań nieniszczących, które oferują szereg korzyści w diagnostyce urządzeń, zwłaszcza w przemyśle energetycznym i petrochemicznym. PAUT wyróżnia się precyzyjnym obrazowaniem materiału w różnych płaszczyznach, umożliwiając wykrywanie nieciągłości o nieregularnych kształtach i rozmiarach, natomiast TOFD zapewnia wyjątkową dokładność w pomiarze głębokości nieciągłości, szczególnie w materiałach o dużej grubości. Obie metody umożliwiają szybkie, bezpieczne i dokładne wykrywanie nieciągłości, eliminując konieczność stosowania promieniowania jonizującego, co daje im przewagę nad tradycyjnymi badaniami radiograficznymi. Dzięki swojej wszechstronności, możliwości stosowania w trudnych warunkach oraz przeprowadzania badań w czasie rzeczywistym, PAUT i TOFD stają się niezastąpionymi narzędziami w ocenie stanu technicznego obiektów, poprawiając jakość diagnostyki oraz efektywność konserwacji i napraw [1,8].

PIŚMIENNICTWO

- [1] Trzeszczyński J., Murzynowski W., Stanek R., *Nadzór diagnostyczny elementów grubościennych kotła K-5 w Elektrowni Dolna Odra w okresie ich warunkowej eksploatacji – zastosowana metodyka i doświadczenia po dwuletniej eksploatacji*. „Energetyka” 2020, nr 12, Biuletyn Pro Novum 2/2020.
- [2] Śliwowski M., *Podstawy zaawansowanej technologii PA*.
- [3] Dutta R.M., *Ultrasonic Testing: Fundamentals and Applications*.
- [4] Hellier C., *Handbook of Nondestructive Evaluation*.
- [5] Brunné K., *Badania materiałów stosowanych w energetyce ciepłej*, XII Międzynarodowa Konferencja „Laboratoria badawcze, systemy jakości w Unii Europejskiej”.
- [6] *Non-Destructive Testing Handbook*, ASNT – American Society for Nondestructive Testing.
- [7] Grześkowiak P., *Niepewność i wiarygodność badań nieniszczących*. Bezpлатny biuletyn Urzędu Dozoru Technicznego, wydanie specjalne.
- [8] Trzeszczyński J., Murzynowski W., *Nadzór diagnostyczny nad warunkową eksploatacją uszkodzonych schładzaczy do czasu ich wymiany lub naprawy*, „Energetyka” 2019, nr 7, Biuletyn Pro Novum 1/2019.



Rozwiązujemy
bieżące problemy
polskich elektrowni