



# Energetyka

75 lat

PROBLEMY ENERGETYKI I GOSPODARKI PALIWOWO-ENERGETYCZNEJ

ISSN 0013-7294

CENA 30 Zł (w tym 8% VAT)

**3/2022**  
(813)



Rozwiązujemy  
bieżące problemy  
polskich elektrowni

**25 lat**  
**pr.n.vum**<sup>®</sup>  
RESEARCH & TECHNOLOGICAL SERVICES  
Centrum Badawczo - Rozwojowe



1987 - 2022



# Biuletyn

**nr 1/2022**

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



POLSKA  
NAGRODA  
JAKOŚCI  
XXIII edycja 2016  
LAUREAT  
w kategorii:  
średnia organizacja  
naukowo-techniczna

*35 lat*  
**pro·vum**®  
*1987 - 2022*  
RESEARCH & TECHNOLOGICAL SERVICES  
Centrum Badawczo - Rozwojowe

**Szanowni Państwo,**

W niniejszym Biuletynie zamieszczamy kolejne artykuły opracowane na podstawie referatów wygłoszonych podczas ostatniego I/XXIII Sympozjum Pro Novum, które odbyło się w listopadzie ubiegłego roku, a także artykuły przedstawiające własności stali P91, stali bainitycznej P5 (X11CrMo5) oraz stali Cr-Mo-V i Cr-Mo po długotrwałej eksploatacji.

Ten ostatni artykuł to reedycja publikacji Pani prof. Stefanii Stachury. Informacja o Jej śmierci dotarła do nas podczas redagowania niniejszego Biuletynu. Pożegnanie z Panią Profesor zamyka niniejszy Biuletyn. Przypominamy w nim sylwetkę Pani Profesor, jej karierę zawodową i dorobek naukowy oraz wieloletnią współpracę z Pro Novum.

Artykuły prezentują najnowsze podejście do diagnostyki czy szerzej do zapewnienia bezpieczeństwa i dyspozycyjności urządzeń energetycznych eksploatowanych w coraz bardziej regulacyjnym trybie. Przedstawione w nich niektóre wyniki prac, nie tylko naszych specjalistów oraz współpracujących z nami firm, wskazują, że zaawansowane technologie analityczne, wykorzystujące modelowanie konstrukcji i procesów, metody sztucznej inteligencji wspierane przez nowoczesne aplikacje informatyczne sprawiają, że bloki pracujące od wielu lat można eksploatować taniej i bezpieczniej niż dotąd, a na blokach nowych można zdobywać kompetencje zwłaszcza wtedy, gdy budowane są bez technologicznego offsetu, a eksploatowane z utrzymaniem technicznym dostawcy w trybie LTSA.

Kolejny raz staramy się przypomnieć, że kompetencje techniczne są ważną częścią nie tylko bezpieczeństwa eksploatacji poszczególnych urządzeń, lecz także, zwłaszcza szeroko rozumianego, bezpieczeństwa energetycznego. Rzeczywistego bezpieczeństwa, w tym także energetycznego, nie da się zapewnić w outsourcingu.

Jerzy Trzeszczyński & Jerzy Dobosiewicz

# Wykorzystanie parametrycznych bliźniaków cyfrowych do analizy trwałości kadłubów turbiny podczas uruchomień

## The application of parametric digital twins to analyze the lifetime of turbine casings during start-ups

Kadłuby turbiny, jako elementy krytyczne bloku energetycznego, są poddawane zmiennym obciążeniom termicznym i mechanicznym. Charakter obciążeń powoduje względnie duże deformacje kadłubów oraz ich uszkodzenia związane ze zmęczeniem termomechanicznym. Wykorzystując symulację komputerową (MES) możliwe jest wyznaczenie stanów naprężenia i przemieszczenia kadłubów w trakcie ich pracy oraz w czasie uruchomień i odstawień. Uzyskane wyniki symulacji pozwalają na określenie lokalizacji najbardziej wyęźzonych miejsc oraz na oszacowanie zmian trwałości elementów. Niestety, ze względu na rozmiar modeli numerycznych potrzebnych do uzyskiwania wysokiej jakości wyników obliczeń i średnie dostępne moce obliczeniowe stacji inżynierskich, czas symulacji uniemożliwia prowadzenie obliczeń w czasie rzeczywistym. Rozwiązaniem tego problemu jest sprowadzenie modelu numerycznego do modelu zredukowanego, który odzwierciedla zachowanie modelu MES znacznie zmniejszając koszt obliczeniowy konieczny do prowadzenia symulacji. Parametryczne modele zredukowane kadłubów turbin umożliwiają analizę ich stanu wyęźżenia w czasie rzeczywistym oraz dla symulowanych warunków pracy. Zastosowanie modeli zredukowanych pozwala również na prognozowanie trwałości elementów, co przekłada się na możliwość wdrożenia planów badań i remontów opartych na analizie pracy i rzeczywistego obciążenia urządzenia. W artykule przedstawiono przykład zastosowania podejścia do oceny trwałości kadłubów turbiny z wykorzystaniem parametrycznych modeli zredukowanych.

**Słowa kluczowe:** ocena trwałości kadłubów turbiny, parametryczne modele zredukowane kadłubów turbin, możliwości zastosowania parametrycznych bliźniaków cyfrowych (Digital Twin) do analizy trwałości kadłubów turbiny

The turbine casings, as the critical components of a power unit are subjected to variable thermal and mechanical loads. The nature of the loads causes relatively large casings deformations and their damage due to thermomechanical fatigue. By the application of numerical simulation (FEM), it is possible to determine the stress state and displacements of the casings during their operation, startups and shutdowns. The obtained computation results allow to find the most stressed locations and to estimate changes in the components durability. Unfortunately, due to the size of numerical models necessary to obtain high-quality computations results and the computing power of a typical engineering workstation, the simulation time makes it impossible to perform real-time simulation. The solution to the described issue is application of reduced order models, which reflect the behavior of the FEM model, significantly reducing the computational cost. Parametric reduced order models (PROM) of the turbine casings enable the analysis of casings stress state in real time and for simulated operation conditions. The application of PROM also allows forecasting the components durability, which translates into the possibility of implementing test and repair plans based on the analysis of the work and actual load of the casings. An example is presented in the paper of the approach to assessing the durability of turbine casing with the application of PMOR will be presented.

**Keywords:** lifetime assessment of turbine casings, parametric reduced models of turbine casings, possibilities of using parametric digital twins for the lifetime analysis of turbine casings

### Wstęp

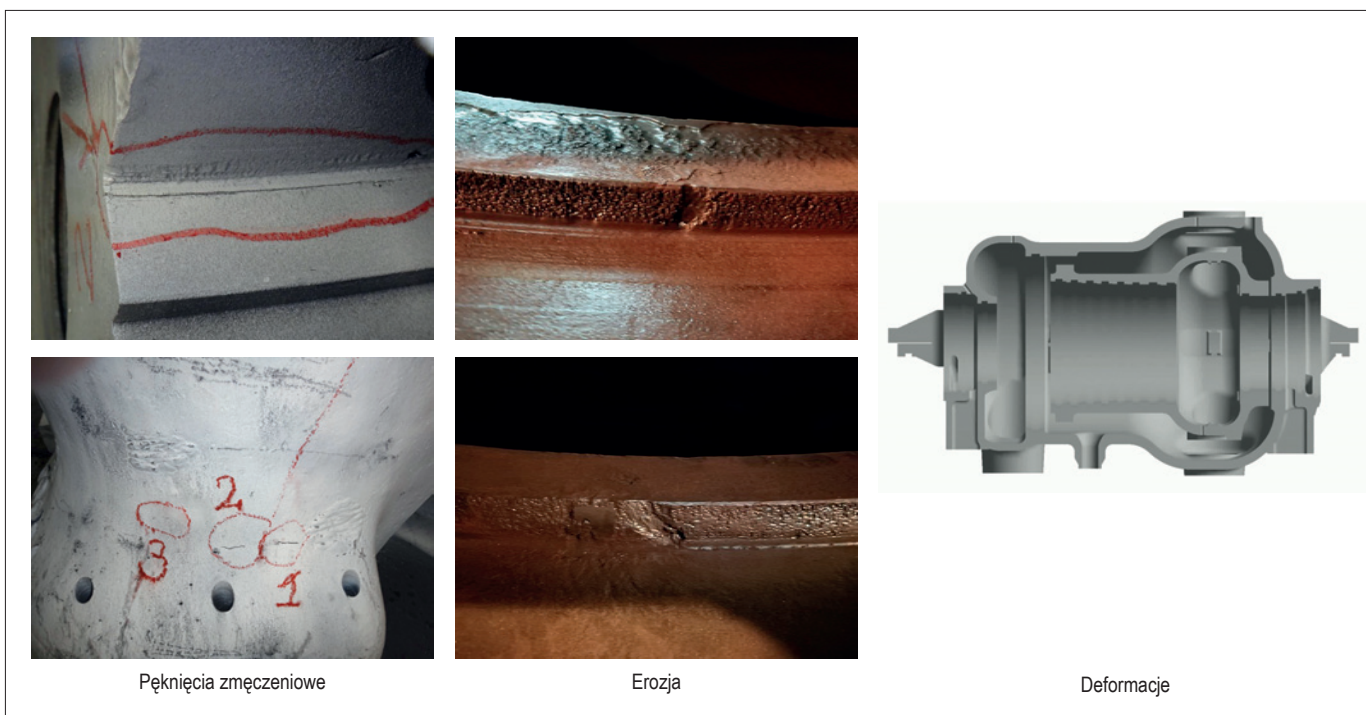
Dotychczas obliczenia numeryczne/symulacje komputerowe MES w znacznej mierze wykorzystywane były w projektowaniu nowych konstrukcji czy optymalizacji już istniejących. Wraz z rozwojem technologii cyfrowych wzrastają możliwości związane z wykorzystaniem metod numerycznych nie tylko w doskonaleniu projektowania, ale także w obszarze eksploatacji urządzeń/elementów [1, 2]. W artykule przedstawiono przykład możliwości zastosowania parametrycznych bliźniaków cyfrowych (Digital Twin) w celu analizy trwałości kadłubów turbiny, które mogą ulegać uszkodzeniom na skutek zmęczenia, erozji czy deformacji. Teoretycznie występować mogą także uszkodzenia o charakterze pełzaniowym, w praktyce, zwłaszcza w kadłubach części WP i SP turbin klasy 200 MW, wykrywa się je jednak sporadycznie. Przykłady uszkodzeń zaprezentowano na rysunku 1. O ile erozyjno-korozyjne mechanizmy uszkodzeń są praktycznie niepoliczalne, o tyle stopień wyczer-

pania trwałości kadłubów od zmęczenia można z powodzeniem szacować z zastosowaniem technologii jw. na podstawie analizy ich rzeczywistych warunków pracy.

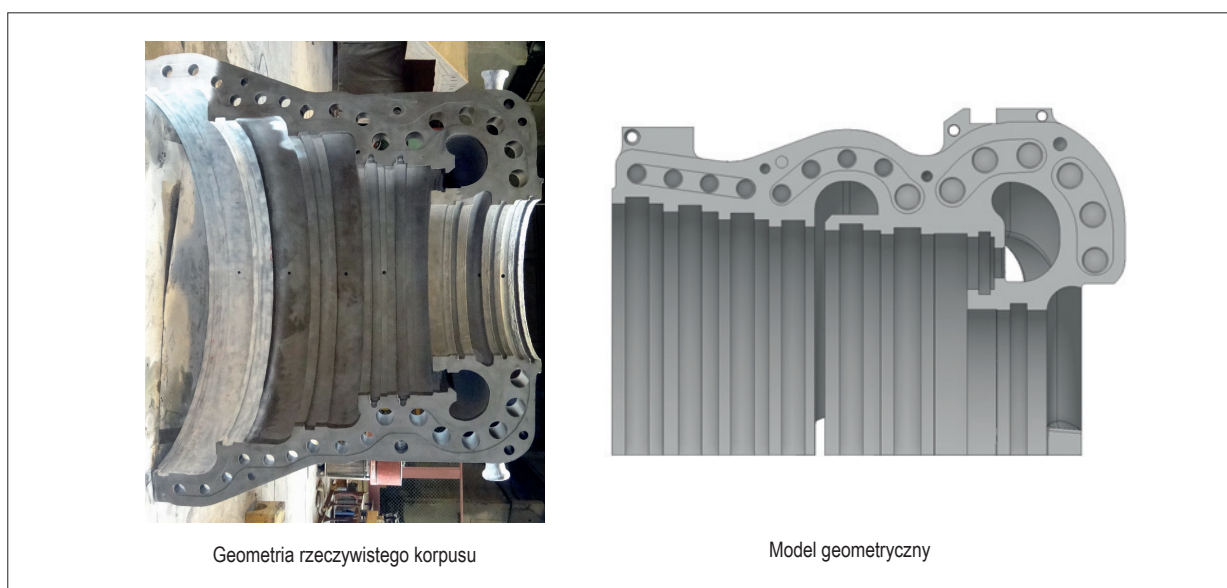
### Modelowanie komputerowe kadłubów

Modelowanie komputerowe kadłuba turbiny rozpoczyna się od utworzenia modelu geometrycznego CAD. Model ten tworzony jest na podstawie dokumentacji technicznej, najczęściej powykonawczej, oraz pomiarów wykonywanych na obiekcie rzeczywistym w trakcie remontów lub badań diagnostycznych. W celu zwiększenia jakości modelu numerycznego powinno zapewnić się możliwie najdokładniejsze odwzorowanie geometryczne rzeczywistego kadłuba turbiny uwzględniając aktualny stan obiektu spowodowany jego dotychczasową pracą. W *Pro Novum* w celu tworzenia modeli geometrycznych (rys. 2) wykorzystywane są narzędzia pakietu ANSYS Workbench, tj. ANSYS SpaceClaim.





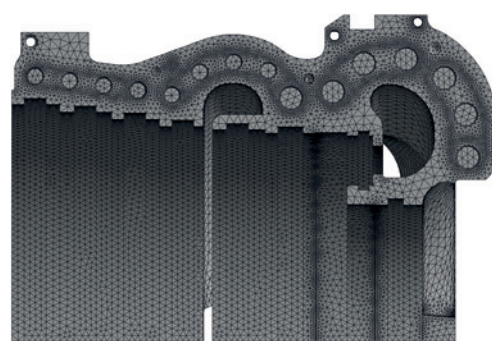
Rys. 1. Przykłady uszkodzeń kadłubów turbiny



Rys. 2. Model geometryczny kadłuba turbiny

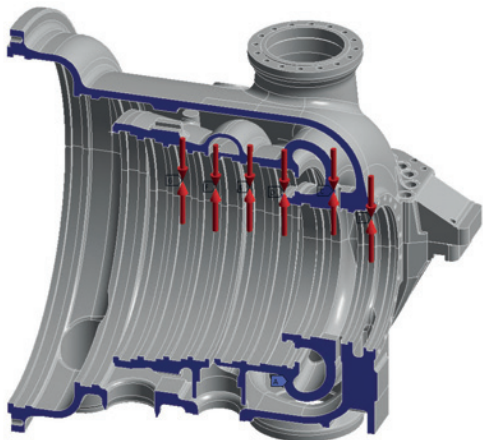
Dysponując komputerowym modelem geometrii kadłuba można wykorzystać metody numeryczne, takie jak metoda elementów skończonych (MES) do symulacji stanów wyężenia materiału korpusu. W tym celu przygotowany model geometryczny dyskretyzuje się tworząc siatkę elementów skończonych (rys. 3). Ze względu na skomplikowany kształt kadłuba sugerowane jest stosowanie lokalnie zagęszczonej siatki elementów tetragonalnych.

Dzięki takiemu podejściu znacznie skraca się czas przygotowania geometrii do dyskretyzacji, wydłużając tym samym czas obliczeń ze względu na większą liczbę węzłów i elementów modelu numerycznego.

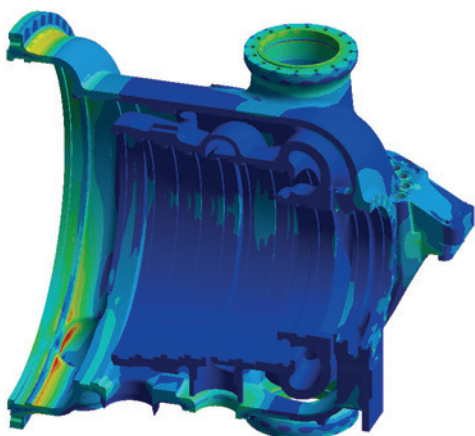


Rys. 3. Siatka elementów skończonych kadłuba turbiny

Dane materiałowe zasilające model numeryczny powinny być określone na podstawie badań materiałowych wykonanych na obiekcie rzeczywistym. W przypadku braku dostępu do takich badań należy korzystać z norm opisujących właściwości danego materiału i ze względów bezpieczeństwa przyjmować wartości prowadzące do najbardziej konserwatywnego podejścia do symulacji.



Rys. 4. Przykład zadanych warunków brzegowych na kadłubach



Rys. 5. Przykład wyników naprężeń uzyskanych po przeprowadzeniu symulacji numerycznej

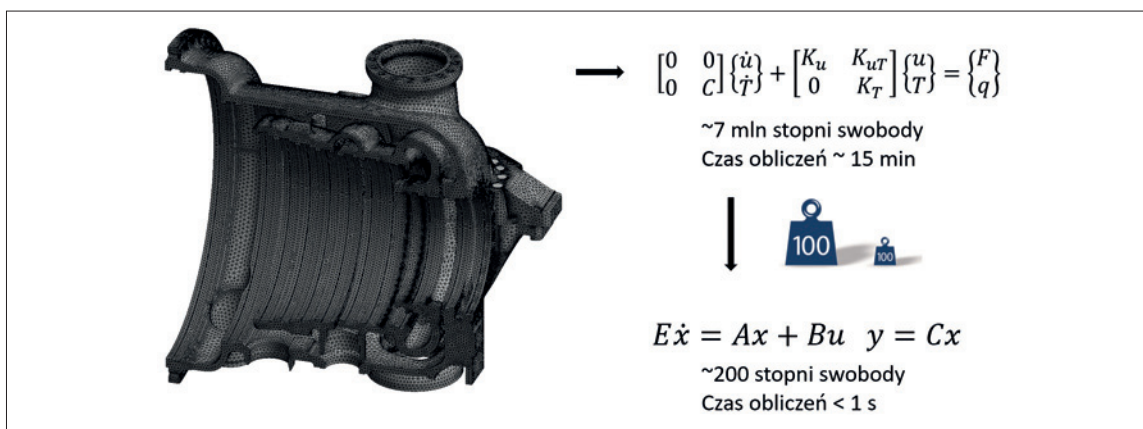
W celu wykonania symulacji komputerowej na model numeryczny należy narzucić obciążenia i warunki brzegowe (rys. 4) wynikające z charakteru pracy elementu. W przypadku analizy kadłubów turbiny najistotniejsze jest uwzględnienie obciążeń o charakterze termicznym oraz mechanicznym. Oddziaływania termiczne są bezpośrednio związane z przepływem medium roboczego przez kolejne stopnie turbiny. Takie obciążenia mogą być modelowane za pomocą warunków konwekcyjnej wymiany ciepła. Dane dotyczące warunków brzegowych powinny być zasilane oraz walidowane danymi procesowymi z systemu kontrolno-pomiarowego elektrowni. Przekształcenia prowadzące do otrzymania parametrów medium na kolejnych stopniach należy wykonać na podstawie praw termodynamiki oraz opracowań eksperckich dostępnych w literaturze. Obciążenia mechaniczne związane są z ciśnieniem medium i elementami współpracującymi z kadłubem turbiny (rurociągi, zawory itp.).

Wynikami symulacji kadłubów (rys. 5) są ich stany termiczne w czasie pracy turbiny, które wraz z obciążeniami mechanicznymi przekładają się na stan przemieszczeń i naprężeń. Dla weryfikacji jakości modelu numerycznego otrzymywane przebiegi temperatury metalu oraz wydłużeń powinny być walidowane z sygnałami z odpowiednich czujników.

### Parametryczny bliźniak cyfrowy kadłuba

Zwalidowany model numeryczny może posłużyć do utworzenia modelu zredukowanego kadłuba – parametryczny bliźniak cyfrowy kadłuba, który pozwala na znaczne zmniejszenie modelu numerycznego (zmniejszenie liczby stopni swobody – niewiadomych modelu), co przekłada się na znaczny wzrost prędkości wykonywanych obliczeń. Zredukowany model numeryczny pozwala na prowadzenie obliczeń w czasie rzeczywistym umożliwiając ciągłe monitorowanie naprężeń wynikających z aktualnego stanu obciążenia kadłuba.

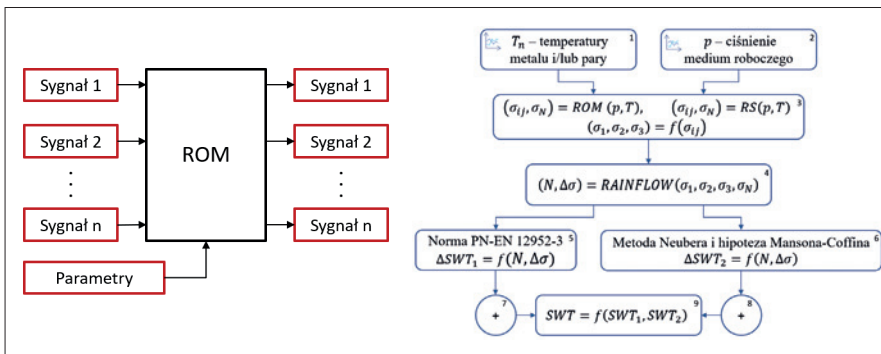
Matematyczna redukcja modelu opiera się na odpowiedniej modyfikacji macierzy opisujących model MES, sprowadzając go do uproszczonego układu równań stanu (rys. 6). Układ ten pozwala na uzyskiwanie bardzo wysokiej jakości wyników z określonych wstępnie lokalizacji modelu numerycznego. W celu redukcji wykorzystywane jest narzędzie Model Order Reduction inside ANSYS firmy CADFEM.



Rys. 6. Proces przygotowania cyfrowego bliźniaka kadłuba turbiny

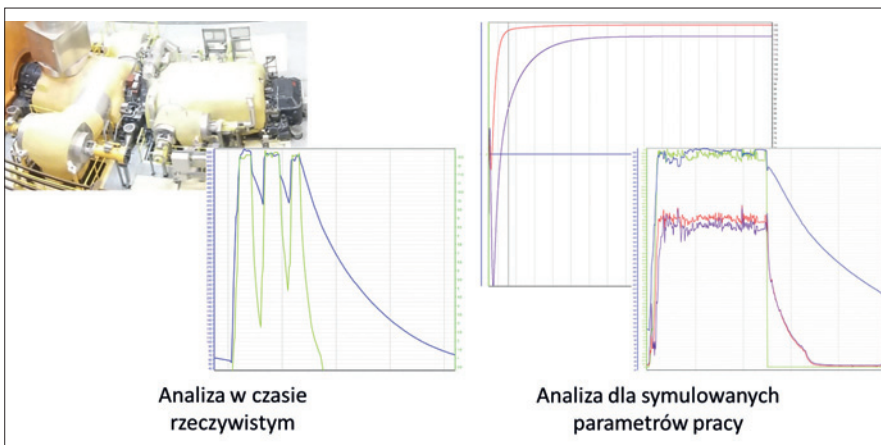
## Zastosowanie cyfrowych bliźniaków kadłubów turbin

Przygotowane w wyżej opisany sposób cyfrowe bliźniaki kadłubów (ROM z ang. Reduced Order Model) implementuje się w odpowiednio do tego przygotowanym Systemie/środowisku informatycznym *Pro Novum* [3], które umożliwi analizę stanu wytężeniowego kadłubów na podstawie rzeczywistych ich warunków pracy udostępnianych z Elektrowni w sposób zdalny. Wyniki analizy naprężeniowej z wykorzystaniem cyfrowych bliźniaków stanowią parametry wejściowe do procedury obliczeniowej (rys. 7) związanej bezpośrednio z trwałością kadłubów. Równolegle takie same bliźniaki można zaimplementować w środowisku IT Elektrowni, a wyniki ich analiz udostępniać – w zależności od potrzeb – operatorom bloku i/lub specjalistom utrzymania majątku produkcyjnego [3].



Rys. 7. Integracja cyfrowych bliźniaków z rzeczywistymi warunkami pracy elementów i procedurami obliczeniowymi

Ważną cechą cyfrowych bliźniaków, oprócz bieżącej analizy naprężeniowej i trwałościowej kadłubów, jest także możliwość symulowania innych/zmiennych warunków pracy kadłubów czy innych elementów bloku (rys. 8). W przypadku planowanej zmiany reżimu warunków pracy takich elementów, w szybki i bezpieczny sposób, za pomocą możliwości symulacyjnych cyfrowych bliźniaków, sprawdzić można czy planowane zmiany mają istotny wpływ na wytężenie elementów. Symulacje takie umożliwiają także wprowadzenie odpowiednich korekt w procedurach diagnostycznych takich elementów z uwagi choćby na identyfikację nowych potencjalnych stref uszkodzeń.



Rys. 8. Wykorzystanie cyfrowych bliźniaków do analiz w czasie rzeczywistym i symulowanych warunkach pracy

Wykorzystując możliwości analiz rzeczywistych i symulowanych warunków pracy kadłubów turbin w odpowiednio przygotowanym diagnostycznym środowisku testowym w *Pro Novum*, odpowiednio zintegrowanym ze środowiskiem informatycznym Elektrowni, stworzono warunki do sprawowania zdalnej diagnostyki tych elementów w sposób nowoczesny, efektywny ekonomicznie oraz bezpieczny [3].

## Podsumowanie

Przedstawiona metoda wykorzystania parametrycznych bliźniaków cyfrowych kadłubów turbin do analizy ich trwałości wykazała, że diagnostykę turbin można wykonywać w sposób nowoczesny i bezpieczny [4,5]. Dużo dokładniej niż w dotychczas stosowanych metodach analitycznych. Możliwości symulacyjne metody pozwalają na doskonalenie procedur diagnostycznych takich elementów, a także pozyskiwanie wiedzy specjalistów od diagnostyki.

Metodykę taką można i trzeba doskonalić wraz z rozwojem cyfrowych narzędzi obliczeniowych, jak np. poprzez wprowadzanie automatycznych systemów regulacji parametrów modeli ROM.

Wraz z rozwojem technologii cyfrowych wzrastają możliwości związane ze zdalną diagnostyką urządzeń energetycznych. Wykorzystując nowoczesne systemy informatyczne można zapewnić ciągłą komunikację z systemami kontrolno-rejestrującymi oraz sterowania w elektrowniach. Informacje zebrane w ten sposób mogą być przetwarzane przez systemy dedykowane do diagnostyki, analizy awaryjności czy oceny stanu technicznego urządzeń.

## PIŚMIENNICTWO

- [1] Trzeszczyński J., *Diagnostyka dziś i jutro*. „Energetyka” 2021 (800), nr 2.
- [2] Trzeszczyński J., *Dokąd zmierza diagnostyka?* „Energetyka” 2021, nr 12, *Biuletyn Pro Novum* 2/2021.
- [3] Trzeszczyński J., *Wirtualne Środowisko Diagnostyczne*. „Energetyka” 2021, nr 9, *Biuletyn Pro Novum* 1/2021.
- [4] Stanek R., Trzeszczyński J., *Prognozowanie trwałości urządzeń energetycznych w trybie zdalnym z wykorzystaniem aplikacji Prognoza PRO®*. „Energetyka” 2021, nr 12, *Biuletyn Pro Novum* 2/2021.
- [5] Dragon A., Pośpiech S., Rajca S., *Remonty turbin wspierane przez zaawansowaną diagnostykę*. „Energetyka” 2021, nr 12, *Biuletyn Pro Novum* 2/2021.



# Modelowanie numeryczne – przydatne narzędzie inżynierskie dla poprawy eksploatacji urządzeń energetycznych

## Numerical modeling – a useful engineering tool to improve operation of power equipment

W artykule przedstawiono kilka wybranych aspektów zastosowania modelowania numerycznego w realizacji prac naukowo-badawczych. Zaproponowane podejście i metodyka postępowania mogą być zastosowane w obliczeniach i ocenie warunków pracy rzeczywistych elementów, układów, bądź urządzeń energetycznych, a wyniki obliczeń posłużyć mogą zwłaszcza dla ułatwienia analizy bieżącej pracy, jak i optymalizacji wydajności oraz wydłużenia trwałości i czasu eksploatacji analizowanych urządzeń.

**Słowa kluczowe:** eksploatacja urządzeń energetycznych, modelowanie numeryczne

Some chosen aspects associated with the application of numerical modeling for the investigation of numerous scientific and research works are presented in the current paper. The proposed approach and methodology may be used for the calculations and assessment of the operating conditions of real power generating systems or devices. The modelling results can be used especially to diagnose and facilitate the analysis of the operating conditions of the analyzed devices, as well as to optimize the efficiency and extend the durability and operation time of power generating facilities.

**Keywords:** operation of power equipment, numerical modelling

### Wstęp

Ze względu na dokonujące się w ostatnich latach istotne zmiany w szeroko rozumianym sektorze energetycznym, wymuszone zarówno praktyczną implementacją nowych technologii oraz materiałów, jak i koniecznością zmiany systemu pracy oraz dostosowywaniem obciążeń klasycznych siłowni cieplnych do bieżącej produkcji energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych, w codziennej praktyce inżynierskiej coraz istotniejsze jest bardziej szczegółowe i kompleksowe podejście do kontroli eksploatacji oraz optymalizacji pracy różnych urządzeń energetycznych. Zmiana priorytetów jest kluczowa także z innych powodów, a mianowicie rosnących wymagań eksploatacyjnych oraz redukcji czasu i możliwości finansowych przedsięwzięciach w zakresie realizacji prac remontowych oraz braku wsparcia UE dla długookresowego funkcjonowania siłowni i innych układów energetycznych opartych na tradycyjnych paliwach kopalnych na rzecz odnawialnych, które jednak niestety przysparzają zwykle więcej problemów eksploatacyjnych spowodowanych m.in. niestabilnością pracy czy też logistyką dostaw oraz fizykochemią procesów konwersji energii – jak ma to miejsce w przypadku siłowni wiatrowych, a także opartych na biomasie.

Uwzględniając powyższe dla praktyków jasne jest, że wobec ograniczonych zasobów finansowych, dążenie do redukcji kosztów funkcjonowania przedsięwzięciach energetycznych musi prędkiej czy później doprowadzić do skrócenia czasu bezpiecznej eksploatacji urządzeń energetycznych, które trzeba będzie kiedyś jakoś

zastąpić. Czas, niezbędny dla wypracowania i wdrożenia nowej technologii można by wydłużyć poprzez właściwą eksploatację już pracującego parku maszynowego, którego niezawodna eksploatacja wymusza jednak – ze względu na dotychczasowy stopień zużycia i wypracowania poszczególnych elementów – konieczność stosowania szczegółowego i zaawansowanego podejścia diagnostycznego – zarówno w bieżącej kontroli pracy, jak i diagnostyki remontowej. Jedną z interesujących i szeroko stosowanych obecnie możliwości w tym zakresie oferuje modelowanie numeryczne, a istniejące komputery oraz dostępne oprogramowanie pozwalają na realizację i rozwiązywanie wielu szczegółowych zagadnień – zarówno stricte naukowych, jak i tych spotykanych w codziennej praktyce inżynierskiej.

Wraz z poprawą możliwości obliczeniowych oraz dynamicznym rozwojem Internetu, oferującym możliwość zbierania i przesyłania danych online można ograniczyć kosztochłonne badania na modelach fizycznych, a rozwiązanie szeregu skomplikowanych zagadnień inżynierskich można zrealizować wykorzystując obliczenia numeryczne. Co ważne, bardzo często z uwagi na istniejące ograniczenia (np. brak możliwości pozyskania kluczowych danych podczas pracy danego urządzenia) obliczenia i analiza numeryczna stanowią jedyną realną możliwość znalezienia w rozsądnym czasie sposobu rozwiązania określonego problemu.

### Metodyka modelowania numerycznego

Modelowanie numeryczne można realizować wykorzystując zarówno własne kody, jak i używając wielu rodzajów dostępnego na rynku oprogramowania. Jednym z najpowszechniej

<sup>1)</sup> e-mail: rafal.kobylecki@pcz.pl

<sup>2)</sup> e-mail: robert.zarzycki@pcz.pl

wykorzystywanych jest pakiet Ansys-Fluent, używany zarówno w celach edukacyjnych, jak i przez przedstawicieli firm w celach komercyjnych. Potwierdzeniem możliwości tego oprogramowania jest szereg publikacji dostępnych w bazach naukowych (np. Elsevier) oraz bazach przedsiębiorstw – te ostatnie cechuje niestety dość ograniczony dostęp.

Przeprowadzenie obliczeń poprzedza zwykle wykonanie wirtualnych siatek obliczeniowych stworzonych indywidualnie dla każdego analizowanego układu. Siatki te stanowią zestaw geometrycznych danych wejściowych dla właściwych obliczeń numerycznych. Średni rozmiar liniowy pojedynczego „oka” siatki uzależniony jest od geometrii i stopnia komplikacji analizowanego obiektu, a tworząc siatkę obszaru obliczeniowego należy odzworować wszystkie elementy układu ważne z punktu widzenia celu realizacji danej pracy. W znakomitej większości przypadków działalność naukowo-badawczej rozmiar „oka” siatki mieści się zwykle w zakresie od kilku mm do kilkunastu cm, a sumaryczna liczba węzłów siatki nie przekracza kilku mln – im więcej węzłów, tym dokładniejsze i bardziej szczegółowe są obliczenia, lecz niestety uzyskanie wyników wymaga więcej czasu i dostępu do lepszych maszyn obliczeniowych. Oprócz siatek realizacja obliczeń wymaga także podania różnego rodzaju danych wejściowych oraz określenia warunków brzegowych i początkowych. Wybrane wyniki obliczeń numerycznych realizowanych w pracy naukowej autorów zostaną przedstawione w dalszej części niniejszego artykułu.

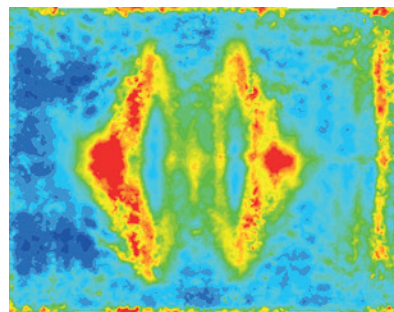
### Przykładowe obliczenia przeprowadzone z wykorzystaniem modelowania numerycznego

Jak wspomniano wcześniej, zwykle obliczenia numeryczne prowadzone są dla przypadków, których nie można przeanalizować bezpośrednio wskutek istniejących ograniczeń przestrzenno-czasowych. Modelowanie numeryczne wykorzystywać można np. do analizy pracy reaktorów fluidalnych, obejmujących zarówno kotły spalające paliwa stałe, jak i reaktory FCC do krakingu ropy naftowej, czy też inne stosowane w inżynierii chemicznej. W przypadku poprawnej pracy reaktorów fluidalnych typu gaz – materiał sypki istotne jest utrzymywanie jednorodnej fluidyzacji w całej przestrzeni reaktora, co można osiągnąć poprzez równomierny rozdział gazu w przekroju poprzecznym. Taka organizacja procesu zapewnia stabilną pracę urządzenia oraz pozwala na osiąganie wysokich sprawności i niskich emisji niepożądanych produktów ubocznych. Niestety, bardzo często znaczne gabaryty układów fluidalnych powodują, że zapewnienie równomiernego rozdziału gazu w przekroju poprzecznym nie jest możliwe – zakres nierównomierności i możliwości ewentualnych korekt można jednak stosunkowo łatwo oszacować wykorzystując właśnie obliczenia numeryczne.

Przykładowe wyniki obliczeń dla hipotetycznego układu kotła z cyrkulacyjną warstwą fluidalną pokazano na rysunku 1.

Analiza wyników wykazuje dysproporcje w rozdziale gazu, o czym świadczą obszary zaznaczone na niebiesko i czerwono. Bardziej szczegółowa analiza przypadku (niestety ograniczona ze względu na objętość niniejszego artykułu) doprowadziła do wniosku, że taki rozdział powietrza w rzeczywistym układzie może skutkować znacznymi (>10%) względnymi różnicami w rozkładzie temperatury, które mogą spowodować tworzenie lokalnych stref generacji np. NO<sub>x</sub>, w efekcie czego oczekiwać

należy nawet dwukrotnego wzrostu zawartości tlenków azotu w spalinach w porównaniu z przypadkiem, gdy rozdział gazu byłby jednorodny. Wyniki obliczeń jasno wskazują, że oparta na obliczeniach numerycznych odpowiednia diagnostyka i kontrola warunków pracy układu przynieść mogą istotne wymierne korzyści pozwalając nie tylko na ograniczenie emisji NO<sub>x</sub>, lecz także na ograniczenie erozji we wnętrzu kotła w efekcie wyeliminowania lokalnych obszarów o wyższej prędkości gazu spowodowania jego nierównomiernym rozdziałem na ruszcie.



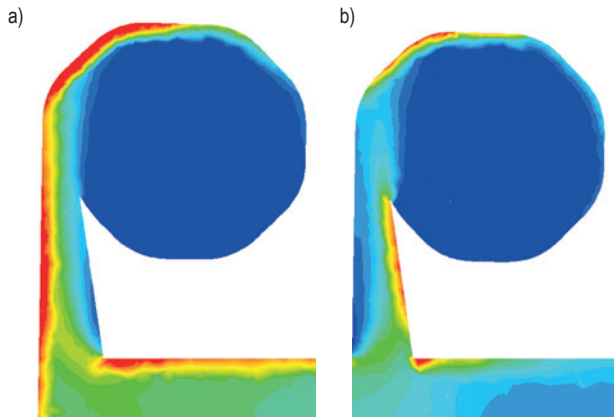
Rys. 1. Wyniki obliczeń numerycznych autorów obrazujące rozkład prędkości gazu w poprzecznym przekroju reaktora (kotła) fluidalnego

Bardzo często obliczenia numeryczne wykorzystywane są także do porównywania różnych konfiguracji elementów bądź układów, czy też do oceny pracy tych elementów w różnych warunkach (np. cieplno-przepływowych). Takie podejście i wyniki obliczeń pozwalają nie tylko stosunkowo łatwo dokonać analizy wielu różnych przypadków w krótkim czasie, lecz także umożliwiają efektywny dobór optymalnej w danych warunkach konfiguracji układu. Przykładowo, na rys. 2 pokazano wybrane przykłady zastosowania modelowania numerycznego do wizualizacji przepływu gazu i materiału sypkiego w separatorze kotła fluidalnego w celu oceny potencjalnej erozji. Analiza wyników obliczeń pozwala zarówno na dokonanie identyfikacji obszarów szczególnie narażonych na mechaniczne zużycie, jak i może być wykorzystana do opracowania innej konfiguracji układu, istotnej z punktu widzenia ograniczenia erozji. W przypadku wyników na rysunku 2a widać, że najbardziej narażone na mechaniczne zużycie są obszary zaznaczone kolorem czerwonym. Istotne jest wykazanie, że możliwa jest poprawa sytuacji np. poprzez implementację zmian widocznych na rysunku 2b, gdzie intensywność zużycia jest ograniczona (brak czerwonych obszarów).

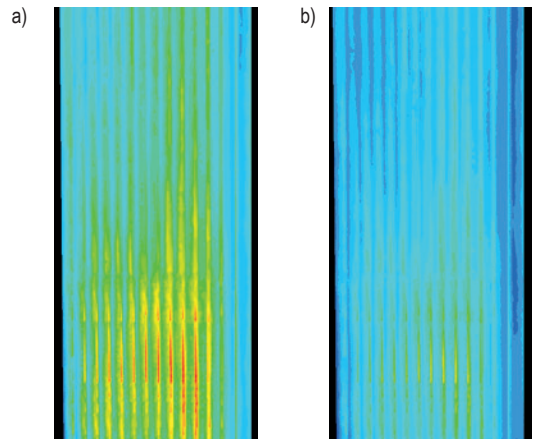
Wspomnieć należy, iż obliczenia numeryczne mogą być wykorzystywane nie tylko do analizy hydrodynamiki przepływu w układach dwufazowych, lecz także do oceny zagadnień związanych z wymianą ciepła. Przykładowo (rys. 3) porównanie obu przypadków obliczeniowych wskazuje, że w zależności od konfiguracji i realizacji przepływu dwufazowego można kontrolować ilość materiału sypkiego na powierzchni wymienników ciepła w palenisku kotła. Tym samym możliwa jest kontrola strumienia ciepła przekazywanego do wymiennika i do czynnika roboczego.

W ostatnich latach w energetyce obserwuje się zwiększone zainteresowanie wykorzystaniem paliw odnawialnych (m.in. biomasy) w różnego rodzaju układach. Również w takim przypadku z powodzeniem można wykorzystać możliwości jakie dają obliczenia numeryczne – nie tylko do wizualizacji i analizy warunków

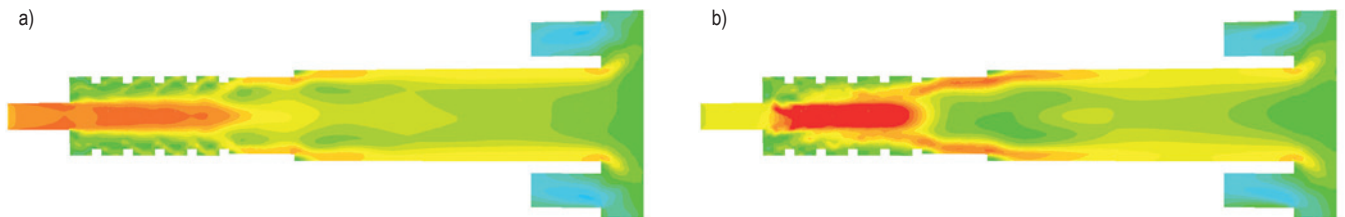




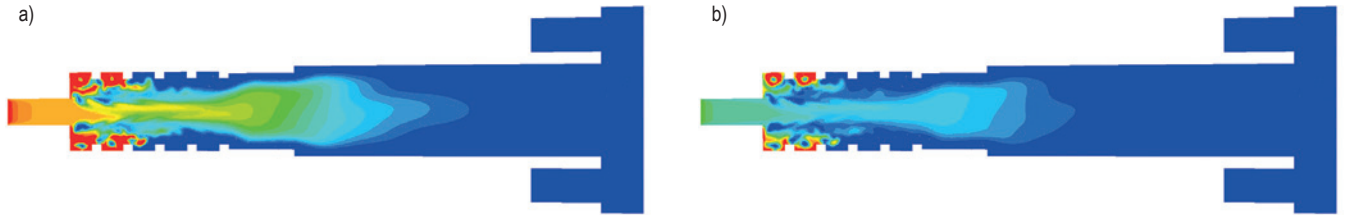
Rys. 2. Rozkłady koncentracji materiału sypkiego w okolicy wlotu oraz we wnętrzu separatora kotła fluidalnego  
 a) konfiguracja nr 1 z widocznymi strefami o wysokiej koncentracji fazy stałej (potencjalne ogniska lokalnej erozji),  
 b) konfiguracja nr 2 (erozja ograniczona)



Rys. 3. Uśrednione czasowe mapy rozkładów koncentracji ziaren materiału sypkiego na powierzchni ścian wymiennika ciepła kotła fluidalnego dla dwóch przypadków – różnice dotyczą organizacji przepływu i warunków fluidyzacji



Rys. 4. Mapy prędkości gazów dla dwóch wybranych konfiguracji rozdzielu powietrza doprowadzanego do układu spalania gazów z termolizy biomasy (gaz wprowadzany jest w osi, zaś powietrze doprowadzają odpowiednie króćce na tworzącej reaktora)



Rys. 5. Mapy rozkładów koncentracji tlenku węgla (a) i wodoru (b) zawartych w gazach powstałych podczas termolizy biomasy

cieplno-przepływowych, lecz także do obliczeń i kontroli procesów spalania, bądź zgazowania. Przykładowe wybrane wyniki obliczeń numerycznych i analizy układu do termolizy biomasy oraz produkcji biowęgla pokazano na rys. 4-5 (zakładana moc układu to kilka MW). Wyniki mogą być wykorzystane w praktyce, np. do analizy i optymalizacji procesu spalania gazów termolitycznych, tak aby proces zachodził w określonej części reaktora (obszar najwyższych stężeń CO i wodoru obejmuje praktycznie całą lewą część układu widocznego na rysunku 5).

## Wnioski

Na podstawie przedstawionych i krótko omówionych w niniejszym artykule wybranych przykładów wykorzystania obliczeń numerycznych stwierdzić można, że modelowanie numeryczne daje wiele możliwości praktycznego zastosowania – zarówno w obszarze naukowo-badawczym jak i użytkowym. W tym dru-

gim przypadku modelowanie oferuje szerokie możliwości w zakresie bieżącej diagnostyki oraz analizy i optymalizacji warunków pracy urządzeń energetycznych, co niewątpliwie przyczyni się w dłuższej perspektywie do ograniczenia kosztów i wydłużenia bezawaryjnej pracy analizowanych obiektów.

Podkreślić należy, że dostępne obecnie na rynku oprogramowanie oferuje szereg możliwości praktycznego wykorzystania – zarówno w działalności naukowej, jak i dla oceny hydrodynamiki przepływów wielofazowych, zagadnień wymiany ciepła czy też spalania oraz zgazowania. Realizacja obliczeń oraz ich czas uzależnione są od stopnia komplikacji analizowanego układu oraz dostępnych mocy obliczeniowych, lecz w każdym przypadku uzyskane wyniki stanowią niewątpliwie istotny czynnik dla poprawnej diagnostyki i kontroli eksploatacji oraz efektywności wykorzystania różnego rodzaju urządzeń energetycznych.

# Modelowanie zjawisk w układzie przepływowym turbiny towarzyszących pracy bloku przy obniżonym minimum technicznym

## Process modelling in steam turbine flow during reduced technical minimum

W artykule opisano modelowanie w programie MATLAB procesu z wykorzystaniem wirtualnych modeli odwzorowujących rzeczywiste elementy turbozespołu. Analizie poddano model turbiny składający się z czterech submodeli, które mogą pracować niezależnie od siebie. Są to modele części WP, SP, NP oraz model skraplacza pary. Analizę procesu przeprowadzono symulując pracę bloku energetycznego przy obniżonym minimum (129-90 MW). Za pomocą wirtualnych modeli można określić sprawność danej części turbiny oraz moc jaką generuje. Przedstawiono przykładowe kierunki dalszego rozwoju modelowania w programie MATLAB w tym możliwość integracji z modelami termo-mechanicznymi wykonanymi w programie ANSYS.

**Słowa kluczowe:** MATLAB, modelowanie procesów, diagnostyka turbin, minimum techniczne

The article describes process modeling based on virtual models representing real elements of turbo-generator set. The turbine model analyzed consists of four submodels (HP, IP LP and steam condenser), which can work separately of themselves. Process analyze was performed to simulate power unit operation at reduced technical minimum (129-90 MW). Virtual models can define the efficiency of the given turbine part and the power which it generates. The simulation was performed using MATLAB software. In summary, the exemplary directions for further development of modeling in MATLAB, including the possibility of integration with thermo-mechanical models made in ANSYS software are shown.

**Keywords:** MATLAB, process modelling, diagnostics of turbine, 90 MW, reduced technical minimum

### Wstęp

Od dłuższego czasu diagnostyka tradycyjna [1] coraz częściej jest uzupełniana poprzez nowoczesne aplikacje informatyczne służące do jej wykonywania także w trybie zdalnym [2]. Dzięki rozwojowi metod analitycznych diagnostyka zmierza do wykonywania analiz /oceny stanu technicznego w trybie on-line, co ma miejsce zwłaszcza na nowych blokach energetycznych. Zadaniem zdalnego systemu diagnostycznego jest bieżąca ocena stanu technicznego komponentów bloku na podstawie analizy parametrów pracy pochodzących z obiektu rzeczywistego. Naprężenia i stopień wyczerpania trwałości określa się z pomocą modeli cyfrowych elementów wchodzących w skład bloku energetycznego [3].

### MATLAB w Pro Novum

MATLAB to środowisko programistyczne przeznaczone do obliczeń o charakterze naukowym i inżynierskim. Zaletą programu są wbudowane biblioteki do obliczeń na macierzach, które przyspieszają prowadzenie obliczeń. Przykładowymi funkcjami oprogramowania są: analiza danych – Big Data, przetwarzanie sygnałów, graficzna prezentacja wyników za pomocą wykresów, projektowanie układów sterowania, rozbudowana biblioteka komponentów obliczeniowych, tzw. toolbox [4]. Wyżej wymienione zastosowania programu zostały wykorzystane przez Pro Novum w modelach diagnostycznych cyfrowego bloku klasy 200 MW.

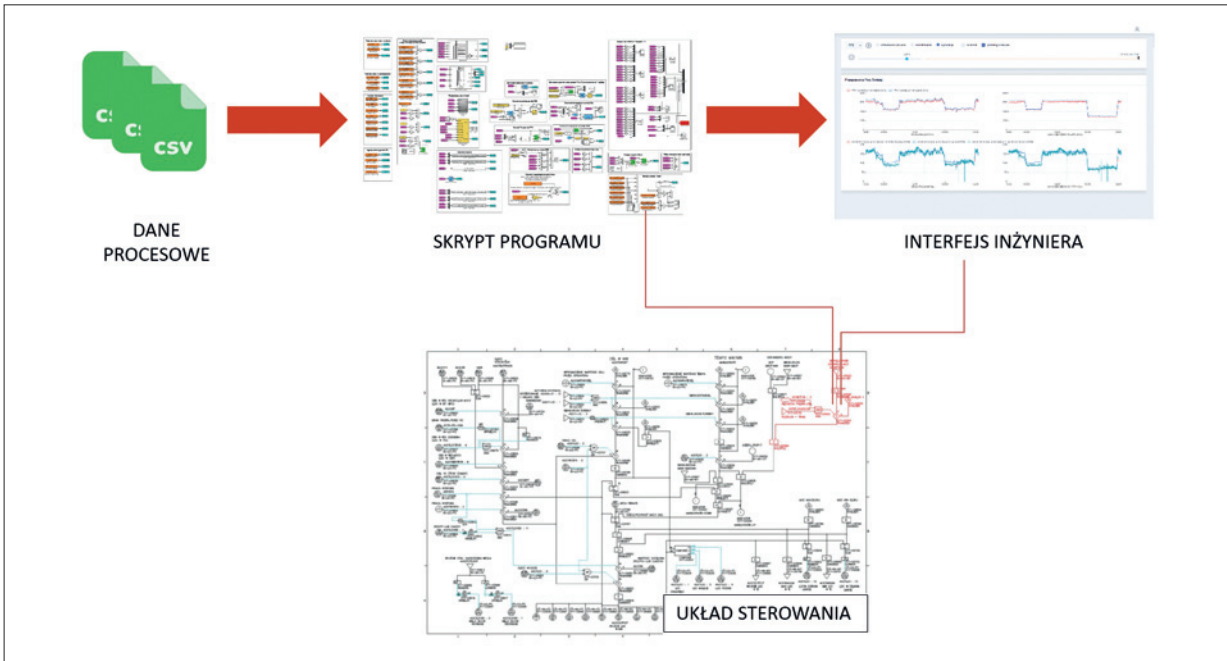
Na rysunku 1 przedstawiono schemat procesu przygotowania danych wymaganych do zasilania modeli cyfrowych, który polega na odpowiednim stworzeniu/edycji plików wsadowych pochodzących z czujników. Kolejny krok polega na zaimportowaniu danych do skryptu programu. Otrzymane wyniki obliczeń przedstawione są w interfejsie graficznym specjalisty, w którym użytkownik ma możliwość nadzorowania w trybie on-line pracy urządzeń energetycznych.

Skrypt programu przygotowany w programie MATLAB oraz odpowiednio przygotowany interfejs specjalisty są ze sobą zintegrowane. Można również wyobrazić sobie działanie związane z oddziaływaniem algorytmów zaimplementowanych w środowisku MATLAB na układy sterowania pracą urządzeń.

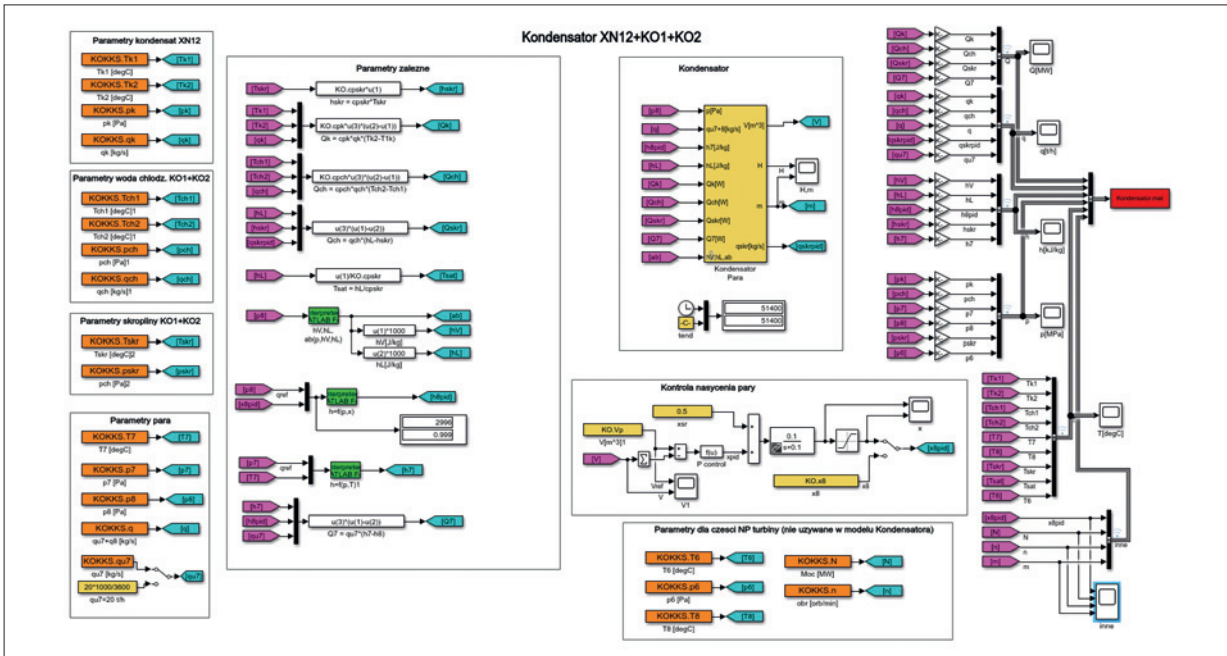
Dzięki oprogramowaniu MATLAB wygenerowano cyfrowe modele elementów wchodzących w skład bloku energetycznego klasy 200 MW. Przygotowane modele odwzorowują warunki pracy oraz pozwalają, dla znanych sygnałów, wyznaczyć odpowiedzi, które nie są możliwe do wyznaczenia w sposób bezpośredni. Przykładowy model elementu z programu MATLAB Simulink przedstawiono na rysunku 2.

Model turbiny składa się z czterech mniejszych submodeli, które mogą pracować niezależnie od siebie. Model składa się z następujących elementów: część WP, SP, NP oraz skraplacz pary (kondensator) – rysunek 3.

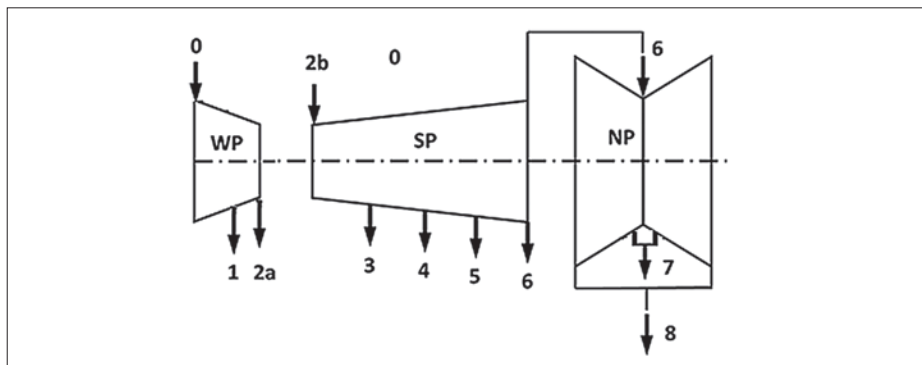
Za pomocą oprogramowania MATLAB można wyznaczyć odpowiednie wejścia i wyjścia z modelu. W opisywanym przypadku dla modelu turbiny z rysunku 3 zilustrowano punkty kontrolne, w których model był zasilany oraz gdzie otrzymano wyniki obliczeń – wlot (0, 2b, 6), upust (1, 3, 4, 5), wylot (2a, 6, 7) oraz kondensator (8).



Rys. 1. Schemat procesu pracy w MATLAB



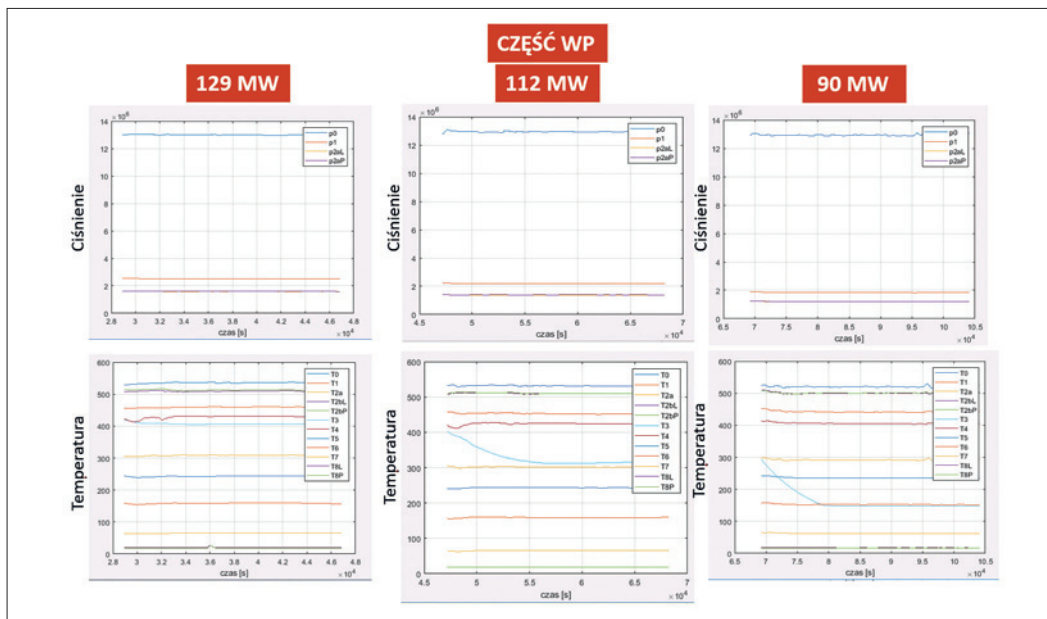
Rys. 2. Model kondensatora z programu MATLAB Simulink



Rys. 3. Schemat modelu turbiny części WP, części SP i części NP



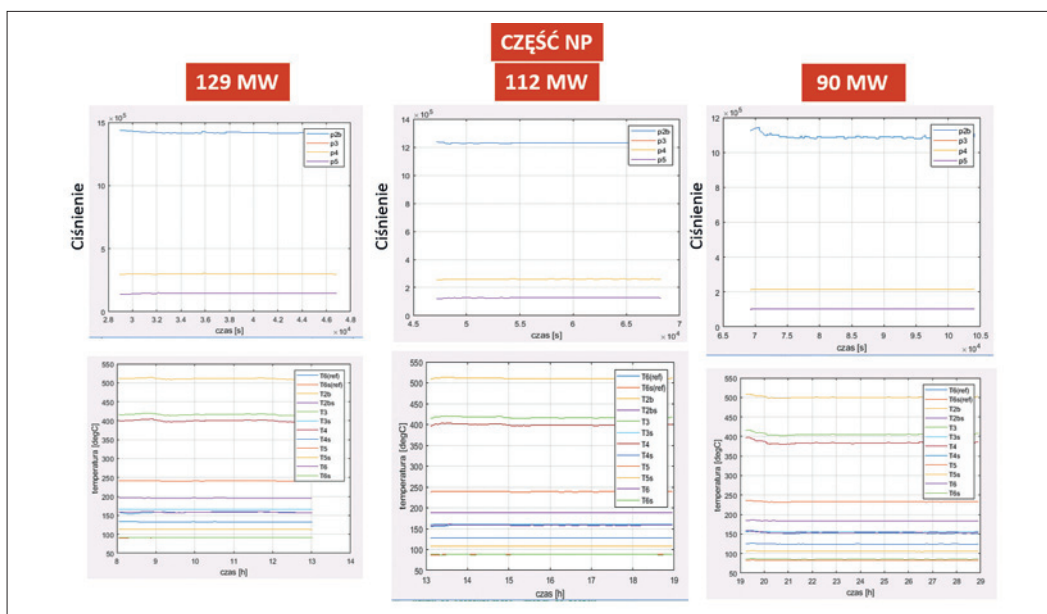
Rys. 4.  
Temperatury  
i ciśnienia  
dla części WP  
w punktach  
kontrolnych



Rys. 5.  
Temperatury  
i ciśnienia  
dla części SP  
w punktach  
kontrolnych



Rys. 6.  
Temperatury  
i ciśnienia  
dla części NP  
w punktach  
kontrolnych



## Praca przy obniżonym minimum technicznym

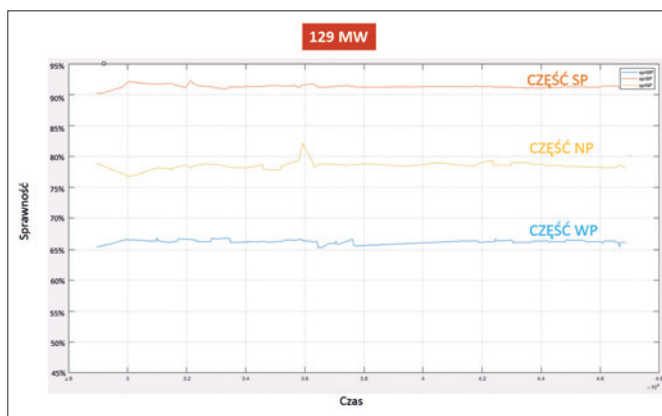
W ostatnim czasie rośnie na znaczeniu uzyskanie akceptowalnej sprawności podczas długotrwałej eksploatacji przy mocy niższej niż znamionowa, uwzględniając także ilość i koszty paliwa oraz emisji CO<sub>2</sub> czy stężenia NO<sub>x</sub> w spalinach.

Analizę procesu przeprowadzono symulując pracę bloku energetycznego przy obniżonym minimum w zakresie 129-90 MW. Na potrzeby analizy przygotowano następujące scenariusze:

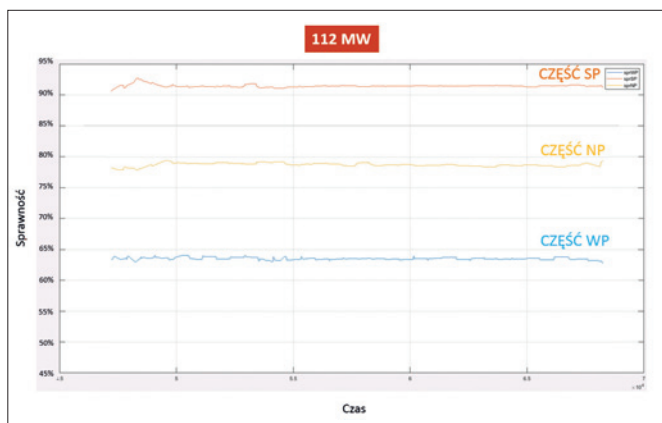
- praca bloku przy minimum technicznym – 129 MW trwająca 4 godz. 39 min,
- praca bloku przy minimum technicznym – 112 MW trwająca 5 godz. 37 min,
- praca bloku przy minimum technicznym – 90 MW trwająca 9 godz. 24 min.

Przy pomocy przedstawionych modeli obliczeniowych turbiny można określić energię wewnętrzną – którą generuje dana część turbiny – temperatury, ciśnienia oraz efektywność. Wartości temperatur, ciśnienia oraz entalpii i entropii można wyznaczyć dla poszczególnych punktów kontrolnych przedstawionych na rysunku 3. Przykładowe wykresy przedstawiono na rysunkach 4-9.

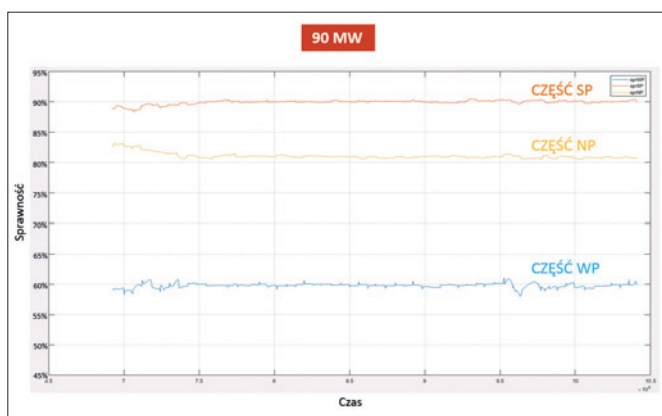
Kontrola parametrów temperatury lub ciśnienia jest możliwa za pomocą wykresów pochodzących z modelu skraplacza. Przykładowe wyniki temperatury i ciśnienia na wylocie z części NP przedstawiono na rysunkach 10 i 11.



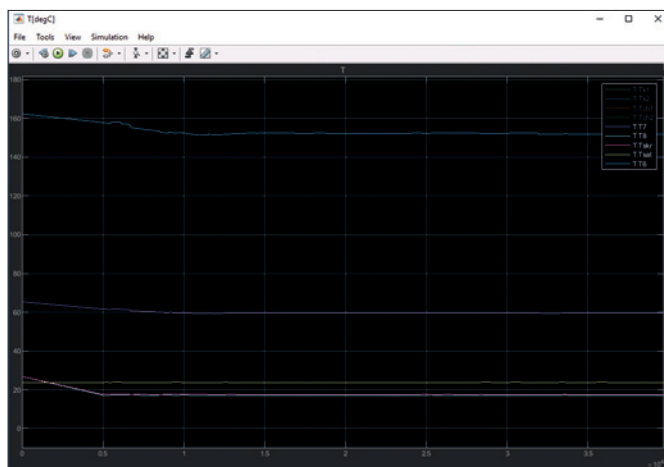
Rys. 7. Sprawność części WP, SP i NP podczas pracy bloku – 129 MW



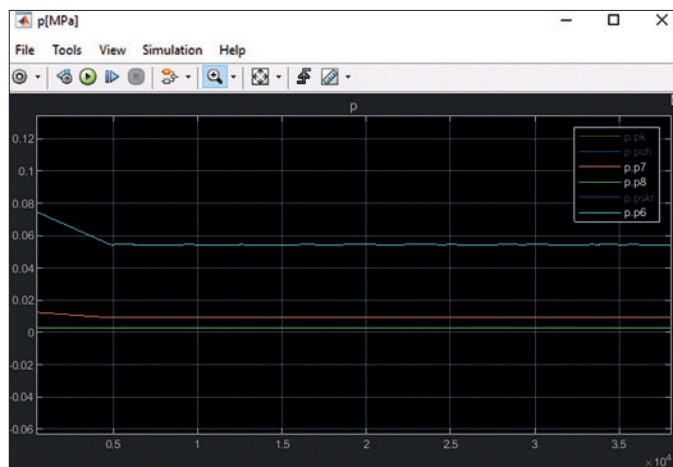
Rys. 8. Sprawność części WP, SP i NP podczas pracy bloku – 112 MW



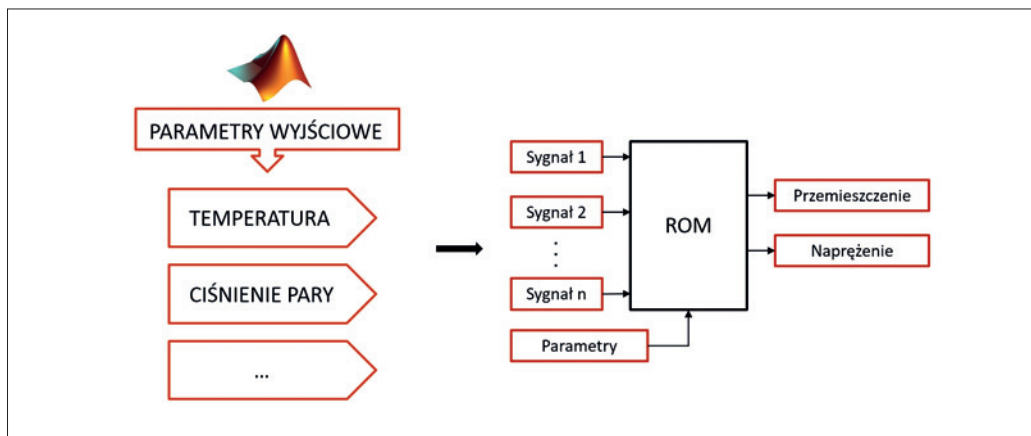
Rys. 9. Sprawność części WP, SP i NP podczas pracy bloku – 90 MW



Rys. 10. Temperatury w skraplaczu



Rys. 11. Ciśnienia w skraplaczu



Rys. 12. Schemat integracji oprogramowania MATLAB i ANSYS

### Kierunki dalszego rozwoju modelowania

Ocena stanu technicznego i zapewnienie wysokiej dyspozycyjności i bezpieczeństwa elementów krytycznych bloków energetycznych eksploatowanych w trybie intensywnej regulacji [5] wymagają zastosowania innowacyjnych rozwiązań oraz zdalnej diagnostyki na odpowiednio wysokim poziomie. Jednym z możliwych kierunków działania jest integracja oprogramowania ANSYS – przygotowującego analizy termomechaniczne – oraz środowiska MATLAB, umożliwiającego modelowanie i symulację procesu przemiany energii pary w układzie przepływowym poszczególnych części turbiny i skraplacza.

Na rysunku 12 przedstawiono przykładowy schemat połączenia programu MATLAB i ANSYS. Wyniki otrzymane z programu MATLAB, takie jak temperatura, ciśnienie itp. mogą zostać wykorzystane do zasilania nimi cyfrowego modelu ROM, pomagając w weryfikacji – poprawie jakości wyników, przetwarzając zaimplementowane parametry oraz sygnały pochodzące z rzeczywistych elementów i pozwalając na otrzymanie wartości przemieszczeń oraz naprężeń.

### Podsumowanie i wnioski

1. Wykorzystując zaawansowane oprogramowanie do symulowania procesów MATLAB Simulink można generować modele cyfrowe procesów zachodzących w układzie przepływowym turbin. Wykorzystując odpowiednio czasowe przebiegi rzeczywistych wartości sygnałów procesowych, pochodzących z zainstalowanych czujników na elementach krytycznych, można w szerokim zakresie mocy analizować pracę poszczególnych części turbiny także na drodze symulacji wybranych warunków pracy bloku energetycznego.
2. Korzystając z komponentów/modeli turbiny można określać wybrane wielkości procesowe związane z pracą poszczególnych części układu przepływowego turbiny, w tym energię wewnętrzną, temperatury, ciśnienia pary oraz ich efektywność/sprawność.

3. Integracja modeli MATLAB oraz ANSYS pozwala na jednoczesne modelowanie warunków rozprężania pary oraz wytężenia elementów krytycznych, a także zjawisk stanowiących zagrożenie dla bezpieczeństwa i efektywności pracy, jak np. erozja łopatek ostatnich stopni nie tylko części NP, co ma ważne praktyczne znaczenie dla bezpieczeństwa i dyspozycyjności turbin pracujących w trybie regulacyjnym, zwłaszcza w obszarze aktualnego i obniżonego minimum technicznego.

### PIŚMIENNICTWO

- [1] Dobosiewicz J., *Diagnostyka elementów układów przepływowych turbin*, „Energetyka” 2013.
- [2] Trzecznyński J., Murzynowski W., Białek S., *Monitorowanie stanu technicznego urządzeń ciepłno-mechanicznych bloków energetycznych przy wykorzystaniu platformy informatycznej LM System PRO+®*. „Dozór Techniczny” 2011, nr 5.
- [3] Trzecznyński J., Hatłas M., Murzynowski W., *Wykorzystanie parametrycznych bliźniaków cyfrowych do analizy trwałości kałużów turbiny podczas uruchomień*, „Energetyka” 2022, nr 2, *Biuletyn Pro Novum* 1/2022.
- [4] ONT – Matlab – <http://www.ont.com.pl/>
- [5] Trzecznyński J., Stanek R., Rajca S., Staszatek K., Sobczyński A., *Diagnostics of Long Time Operated Power Units Planned for Flexible Operation*. VGB Workshop „Materials and Quality Assurance”. 18-19 May 2017, Maria Enzersdorf /Austria.



# Uczenie maszynowe w konserwacji predykcyjnej i optymalizacji

## Machine learning in predictive maintenance and optimization

Zauważalny w ostatnich latach postęp technologiczny w obrębie przetwarzania dużych zbiorów danych, a przede wszystkim Uczenie Maszynowe (UM), otwiera nowe perspektywy w cyfryzacji zakładów przemysłowych. Postęp zdecydowanie przyspieszył na skutek gwałtownego rozwoju technik komputerowych oraz ich wszechstronnych zastosowań, które utożsamiane są bezpośrednio z takimi pojęciami, jak Industry 4.0 czy Big Data. Geneza tych pojęć jest bezpośrednio związana z dynamicznym wzrostem ilości danych pozyskiwanych i gromadzonych przez zakłady przemysłowe. Wśród szerokiego zbioru technologii pozwalających na efektywną pracę z danymi wyróżniają się algorytmy uczenia maszynowego, pozwalające na automatyczne grupowanie, klasyfikację, wykrywanie wzorców oraz prognozę w wielowymiarowych zbiorów danych, których analiza przy pomocy klasycznych metod eksploracji zajęłaby tygodnie albo i miesiące. Postępująca cyfryzacja otwiera nowe możliwości przed przedsiębiorstwami, pozwalając na sprawniejsze zarządzanie majątkiem oraz optymalizację procesów przemysłowych oraz biznesowych.

**Słowa kluczowe: Uczenie Maszynowe (UM), cyfryzacja zakładów przemysłowych, optymalizacja procesów przemysłowych i biznesowych, rola metod UM w diagnostyce oraz konserwacji maszyn i urządzeń**

The technological progress in the processing of large data sets, especially Machine Learning, noticeable in recent years, opens up new perspectives in the digitization of industrial plants. Progress has definitely accelerated as a result of the rapid development of computer techniques and their versatile applications, which are identified directly with such terms as Industry 4.0 or Big Data. The genesis of these concepts is directly related to the dynamic increase in the amount of data obtained and collected by industrial plants. Among the wide set of technologies that allow for effective work with data, machine learning algorithms stand out – they enable automatic grouping, classification, pattern detection and forecasting in multidimensional data sets, the analysis of which would take weeks or months using classic methods of mining. Progressive digitization opens up new opportunities for companies, allowing for more efficient asset management and optimization of industrial and business processes.

**Keywords: machine learning, digitalization of industrial plants, optimization of industrial and business processes, the role of machine learning methods in diagnostics and maintenance of machines and devices**

### Wstęp

W ostatnim czasie oczywistym stało się, że funkcjonowanie wielu przedsiębiorstw zmieniło się w nieodwracalny sposób, nawet jeśli zmiany te nie są jeszcze wyraźnie dostrzegalne. Strategie wdrażane w odpowiedzi na nową rzeczywistość zaważają o sukcesie lub porażce firmy. Naturalnym okazuje się zadanie pytania, w jaki sposób wykorzystać rozwiązania sztucznej inteligencji do budowy przewagi konkurencyjnej?

Utrzymanie ciągłości i wydajności produkcji jest jednym z kluczowych zadań zapewniających rentowność firmy. Dlatego w ostatnich latach jesteśmy świadkami ciągłej transformacji w zakresie podejścia do utrzymania ruchu w przedsiębiorstwach.

Geneza obserwowanej rewolucji jest ściśle związana z dynamicznym wzrostem ilości danych generowanych i gromadzonych przez zakłady przemysłowe. Znacznie wzrosła również świadomość ogromnej wartości informacyjnej tych danych. Zadanie, z którym mierzą się przedsiębiorcy, to maksymalne wykorzystanie danych, aby uzyskać z nich jak najwięcej informacji, ponieważ – jak pokazują badania – firmy wykorzystujące analizy danych w swoich strategiach są znacznie skuteczniejsze od swojej konkurencji. Dzięki nowatorskim metodom eksploracji danych, przede wszystkim Uczenia Maszynowego, możliwa stała się także analiza dużych zbiorów danych, obejmujących nawet kilka lat pracy zakładu przemysłowego.

Przykładem oprogramowania, które wykorzystuje najnowsze osiągnięcia w zakresie uczenia maszynowego (Deep Learning) i sztuczną inteligencję jest system RSIMS firmy *Reliability*

*Solutions*. Jest to oprogramowanie, które pozwala przewidywać awarie monitorowanych maszyn i zarządzać informacją o ich technicznym stanie.

W niniejszym artykule przybliżono rolę metod Uczenia Maszynowego oraz sztucznej inteligencji w diagnostyce oraz konserwacji maszyn i urządzeń.

### Diagnostyka techniczna – podejście klasyczne

Diagnostyka techniczna w klasycznym ujęciu zajmuje się oceną stanu technicznego maszyn. Stosowana jest m.in. w celu wczesnej identyfikacji niepożądanych zjawisk prowadzących do uszkodzenia maszyny, obniżenia jej wydajności lub pogorszenia jakości produktu. Dzięki informacjom dostarczanym przez techniki diagnostyczne pojawia się możliwość podjęcia działań prewencyjnych, pozwalających na poprawę bezpieczeństwa i niezawodności urządzeń czy instalacji.

Historycznie do czynności diagnostycznych można zaliczyć wszystkie metody pozwalające wykryć przyczyny powstającej awarii i są nimi na przykład subiektywne metody oparte na zmysłach (słuchu, węchu, dotyku, wzroku) czy nowoczesne technologie wykorzystujące techniki pomiarowe.

W ramach procesu diagnostyki można wyróżnić następujące zadania:

- **detekcja** – odnalezienie symptomów powstającej awarii,
- **lokalizacja** – wskazanie miejsca, wadliwej części lub fragmentu procesu powstającej awarii,

- **specyfikacja** – określenie przyczyny/powodu powstającej awarii,
- **prognoza** – określenie czasu wystąpienia problemu lub pozostałego czasu możliwej eksploatacji (Remaining Useful Life Time).

Kolejne zadania diagnostyki otwierają coraz szersze możliwości w kontekście planowania konserwacji maszyn i urządzeń, produkcji oraz zarządzania majątkiem. W szczególności możliwość prognozowania stanu urządzeń pozwala na przejście na konserwację predykcyjną, a więc planowanie prac na podstawie znajomości stanu maszyny w przyszłości i zapobieganie jedynie tym problemom, które rzeczywiście wystąpią. Parafrazując znaną zasadę 'nie naprawiaj tego, co się nie zepsuje'.

Obecnie w diagnostyce technicznej można wyróżnić kilka kierunków rozwoju:

- wykorzystywanie coraz bardziej zaawansowanych metod przetwarzanie sygnałów, jak np. transformaty falkowe,
- postęp metod pomiarowych, nie tylko obejmujący wzrost dokładności, ale także inteligentne czujniki czy bezprzewodowy przesył danych,
- rozwój wiedzy eksperckiej w dziedzinie mechaniki ośrodków ciągłych, będący także wynikiem m.in. rozwoju metod pomiarowych,
- modelowanie pod kątem eksploatacji, obejmujące m.in. metody oparte na MES czy dynamikę układów wieloczołowych.

Zwracając uwagę na wyzwania stojące przed diagnostyką można wymienić na przykład:

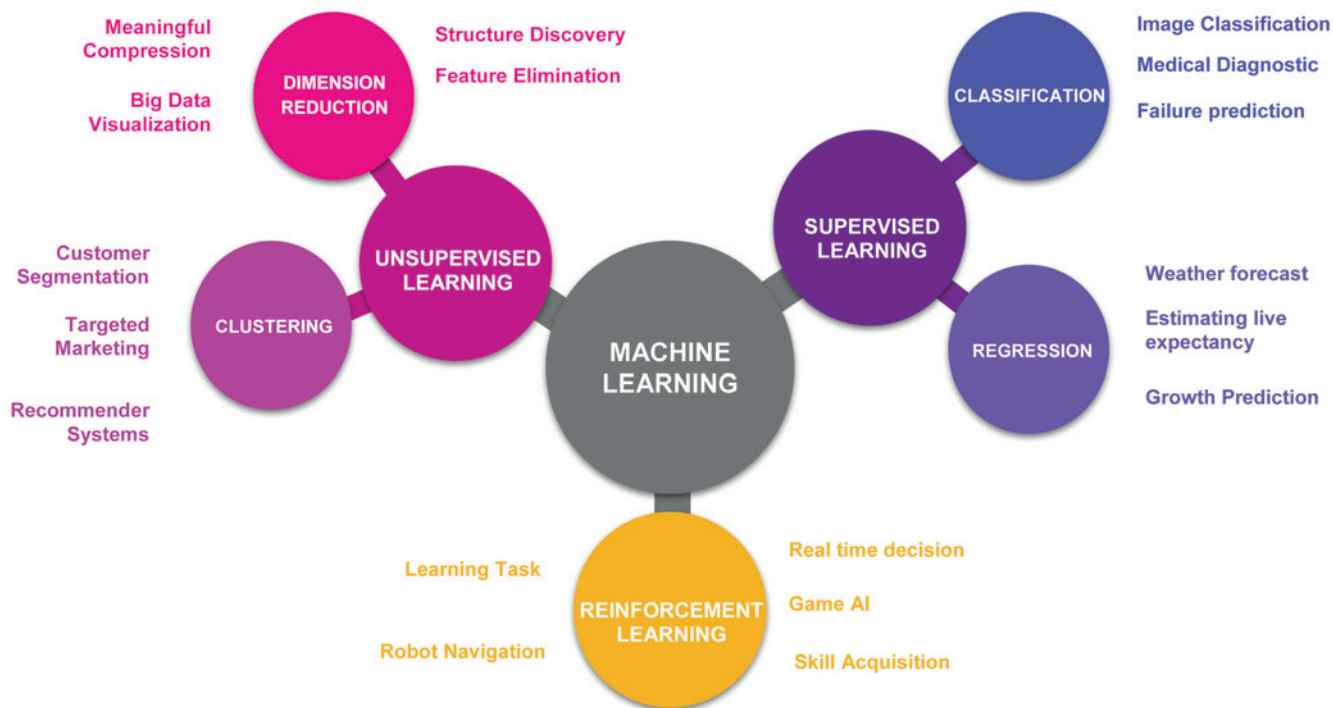
- wielowymiarowość, różnorodność i znaczną ilość danych, obejmujących nie tylko dane z czujników, ale także z systemów wspomagających zarządzanie majątkiem (Big Data),
- wysokie koszty modelowania za pomocą metod opartych na MES,
- skalowalność 'z laboratorium' na środowisko produkcyjne.

## Data Science w diagnostyce technicznej

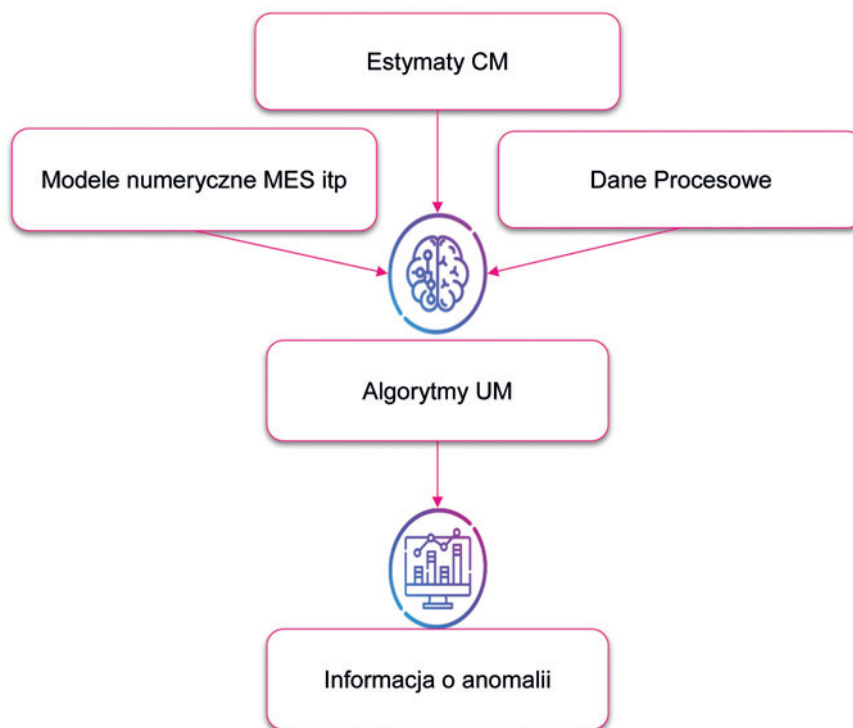
Odpowiedzią na niektóre z wyzwań stojących przed diagnostyką techniczną mogą być nowoczesne metody analizy danych, w tym Uczenie Maszynowe. Techniki te rozwijają się od lat 60. XX wieku gwarantując obecnie niespotykane dotąd możliwości predykcyjne dzięki ich użyteczności w kontekście ekstrakcji cech dla problemów o tzw. głębokiej architekturze.

Algorytmy Uczenia Maszynowego można podzielić na kilka typów (rys. 1):

- uczenie nadzorowane (Supervised Learning), czyli wsparte przykładami opracowanymi przez człowieka; w jego ramach wyróżniamy dwie najważniejsze grupy rozwiązań:
  - klasyfikacja – która pozwala np. odróżnić stan awaryjny od prawidłowej pracy urządzenia,
  - regresja – dzięki której można modelować pracę urządzeń i przewidywać ich stan w przyszłości.



Rys. 1. Schemat podziału zadań uczenia maszynowego (opracowanie własne na podstawie <https://medium.com/@vaani.rawatt/introduction-to-machine-learning-a5ddc31ce404> data dostępu 01.02.2022)



Rys. 2. Schematyczne działanie połączenia różnych źródeł informacji i ich wykorzystanie przez UM

- uczenie nienadzorowane (Unsupervised Learning), w którym udział człowieka jest minimalny; jedną z podstawowych możliwości jest wyszukiwanie grup w danych mogących np. odwzorowywać stany pracy urządzenia.

Korzyści oferowane przez algorytmy oparte na Uczeniu Maszynowym:

- wysoka jakość i szybkość modelowania z wykorzystaniem danych procesowych (data-driven),
- wykrywanie nieszablonowych wzorców w danych,
- opracowywanie rozwiązań bezpośrednio na sygnałach z instalacji przemysłowych,
- wielowymiarowa analiza danych różnych typów, pozwalająca na uwzględnienie w jednym algorytmie danych diagnostycznych, procesowych, zarządczych oraz pochodzących z symulacji numerycznych (rys. 2).

Oczywiście nowoczesne metody analizy danych mają przed sobą także wyzwania:

- modelowanie poza zakresem dostępnych danych – problem dotyczy wszystkich metod czarnoskrzynkowych; jeśli dysponujemy danymi jedynie dla wycinka pracy danego urządzenia (np. dla mocy 10-20 MW, podczas gdy zakres pracy wynosi 10-50 MW), to modelowanie pracy poza zakresem może być obciążone znacznym błędem;
- transfer pomiędzy podobnymi instalacjami/maszynami może być utrudniony, jeśli maszyny pracują w różnych warunkach operacyjnych lub gdy wprowadzono duże zmiany podczas remontu kapitalnego; wymagana może być kalibracja algorytmów;

- niepełna historia eksploatacji, która mimo posiadania znacznej ilości danych z pracy urządzenia może stanowić ograniczenie w użyciu niektórych algorytmów;
- błędy i zaburzenia pomiarów muszą zostać zidentyfikowane przed opracowaniem algorytmu diagnostycznego.

### Czy zawsze i wszędzie warto stosować Uczenie Maszynowe?

Choć Uczenie Maszynowe szturmem wdarło się na technologiczną listę przebojów, nie należy traktować go jak uniwersalnej metody na radzenie sobie z każdym problemem. Algorytmy uczenia maszynowego oferują unikatowe możliwości, ale są 'tylko' narzędziami, które można w wielu przypadkach zastąpić innymi rozwiązaniami. A więc, kiedy warto rozważyć wdrożenie tego typu algorytmów? Poniżej prezentujemy kilka przykładów.

W sytuacjach, w których dysponujemy dużą ilością danych historycznych (także z kilku takich samych urządzeń). Jeśli nie mamy ich w ogóle – powinniśmy zacząć tworzyć bazę danych pod przyszłe algorytmy. Otrzymanie pełnych możliwości będzie wymagało czasu potrzebnego na zebranie danych z pierwszych kilku tygodni/miesięcy pracy.

Dla urządzeń złożonych i bardzo dobrze opomiarowanych – mówimy tu o dziesiątkach lub setkach czujników. Analiza danych z takiego zestawu wymaga albo dużego zespołu statystyków, albo wykorzystania UM, który w połączeniu z zaawansowaną statystyką będzie mógł rozwinąć skrzydła.



Dla urządzeń unikatowych – dla których opracowanie modelu matematycznego opartego na zależnościach fizycznych (tj. biało- lub szaroskrzynkowego) lub odtworzenie ich w skali laboratoryjnej nie będzie opłacalne, a w niektórych przypadkach możliwe. W takim przypadku zazwyczaj łatwiej jest przeprowadzić identyfikację przy pomocy modelu czarnoskrzynkowego opartego na Uczeniu Maszynowym.

## Modelowanie metodami Uczenia Maszynowego

Opracowanie odpowiednich narzędzi UM możemy zasadniczo podzielić na 4 główne części:

- zbieranie danych z rzeczywistego obiektu
- obróbka danych
- budowa algorytmu
- wyszukiwanie wzorców

### Zbieranie danych z rzeczywistego obiektu

Jak zostało wspomniane wcześniej w przemysłowym świecie, dane z czujników najczęściej są wykorzystywane do monitorowania i optymalizacji różnych rodzajów procesów produkcyjnych. Pomiaru te pozwalają na wprowadzenie inteligentnych zmian w celu zwiększenia wydajności i produktywności. Umożliwia to wdrożenie predykcyjnych i preskryptywnych polityk dotyczących utrzymania i rozwiązań dla każdego rodzaju zakładów, które biorą pod uwagę właściwe pomiary.

### Obróbka danych

Faktem jest, iż jakość analityki predykcyjnej (dokładność/poprawność predykcji) zależy w dużej mierze od jakości danych, które dostarczane są do algorytmów. Z tego powodu kluczowym jest, aby dane wybierane były w sposób gwarantujący optymalność na poziomach uczenia i późniejszego uogólniania. Bardzo duże znaczenie mają tutaj transformaty danych wykonywane przez system PdM.

### Budowa algorytmu

Zasadniczym etapem wdrożenia jest budowa modeli analitycznych, na podstawie których dokonywana będzie aktualna predykcja stanu technicznego maszyn (wykrywanie anomalii i przewidywanie awarii). Niezwykle istotne jest zrozumienie natury tego procesu. Model analityczny uczony jest na podstawie danych historycznych i gdy zostanie wygenerowany, stanowi pewnego rodzaju „czarną skrzynkę”, przez którą, w kolejnym kroku, przepuszczane są bieżące dane celem uzyskania predykcji aktualnego stanu technicznego maszyn.

## Wyszukiwanie wzorców

W przypadku najefektywniejszych metod analityki predykcyjnej (zwłaszcza Deep Learning, XGBoost, Random Forest), otrzymywane modele są bardzo trudne w interpretacji. Dla przykładu w metodzie lasów losowych finalny estymator składać się może nawet z wielu tysięcy drzew, przez co nie ma łatwej możliwości określenia, które zmienne niosą kluczowe informacje na temat nadchodzącej awarii, a na pewno nie jest to możliwe do wykonania poprzez bezpośrednią analizę. Analiza przyczynowości dla metod sieci neuronowych bądź głębokich sieci neuronowych jest tym bardziej utrudniona, gdyż nie ma możliwości przesłедzenia hierarchii zależności pomiędzy neuronami.

Odpowiedzią na zidentyfikowane wyżej problemy jest klasa metod RCA (Root Cause Analysis), która daje możliwość identyfikowania przyczynowości dla konkretnych problemów. Dla przykładu, zastępując lasy losowe drzewem decyzyjnym o zadanej maksymalnej wysokości, istnieje możliwość jego łatwej interpretacji poprzez śledzenie poszczególnych ścieżek i analizowanie, w jakich przypadkach dysponujemy informacją o nadchodzącej awarii. W RSIMS istnieje też możliwość wykorzystania algorytmów dotyczących analizy przyczynowości opartych także na wykorzystaniu lasów losowych. Jest to nieco inne podejście polegające na badaniu wpływu usunięcia wybranej zmiennej, na jakość konstruowanego lasu losowego.

## Podsumowanie

Popularyzacja narzędzi opartych o Uczenie Maszynowe wpłynęła na wiele dziedzin techniki. W artykule opisaliśmy pokrótce możliwości oferowane przez Uczenie Maszynowe w kontekście utrzymania ruchu, a także jego wymagania. Szeroko rozumiane Uczenie Maszynowe może otworzyć kolejne drzwi dla diagnostyki technicznej, wprowadzając do niej analizę wielkich zbiorów danych (big data). Dzięki rozwojowi systemów i sprzętu komputerowego oraz opracowaniu nowatorskich metod eksploatacji danych stosowanie UM w przemyśle staje się łatwiejsze.

## PIŚMIENNICTWO

- [1] Żółtowski B., Łukasiewicz M., *Podstawy diagnostyki technicznej*, Bydgoszcz Radom 2012, <http://www.wimpoig.utp.edu.pl/Opracowania/Diagnostyka%20DM/R.1DDM'.pdf> (dostęp online 01.02.2022).
- [2] Blata J., Juraszek J., *Metody diagnostyki technicznej teoria i praktyka*, Ostrava 2013, <http://interdiago.vsb.cz/pl/book/Metodydiagnostyki.pdf> (dostęp online 01.02.2022).

# Aktualne problemy identyfikowane podczas diagnostyki turbin ciepłowniczych

## Current problems identified during diagnostics of heating turbines

Turbozespoły eksploatowane w elektrociepłowniach posiadają specyficzne dla warunków pracy rozwiązania konstrukcyjne. Zapewnienie im wysokiej dyspozycyjności, zwłaszcza w sezonie ciepłowniczym, jest podstawowym wyzwaniem dotyczącym utrzymania stanu technicznego. Bez diagnostyki i remontów wykonywanych na odpowiednio wysokim poziomie nie można tego osiągnąć. W artykule opisano najważniejsze problemy identyfikowane w trakcie badań w ostatnim czasie. Przedstawiono także zasady postępowania, które pozwalają ich uniknąć.

**Słowa kluczowe:** turbiny ciepłownicze, diagnostyka, remonty

Turbine sets operated in combined heat and power plants have design solutions specific to the operating conditions. Providing them with high availability, especially during the heating season, is the main challenge in maintaining the technical condition. Without diagnostics and overhauls performed at a sufficiently high level, this cannot be achieved. The article presents the most important problems recently identified during the tests. There are also described the rules, which help to avoid these problems in the future.

**Keywords:** heating turbines, diagnostics, overhauls

Niezależnie od tego czy turbozespół zainstalowany jest w elektrowni, czy w elektrociepłowni jednym z kluczowych czynników decydujących o efekcie ekonomicznym jego eksploatacji jest jego wysoka dyspozycyjność. Dyspozycyjność natomiast w oczywisty sposób wynika ze stanu technicznego. Turbozespoły, które eksploatowane są w trybie pracy ciepłowniczej, ze względu na konstrukcję układów przepływowych, a zwłaszcza warunki eksploatacji, różnią się od turbozespołów wykorzystywanych przede wszystkim do generowania energii elektrycznej.

W celu zapewnienia stanu technicznego umożliwiającego bezpieczną, na oczekiwanym poziomie dyspozycyjności, eksploatację turbin należy:

- planować zakres remontu, w tym zakres badań diagnostycznych, na podstawie aktualnego stanu technicznego urządzenia, wynikającego z retrospekcji oraz bieżących spostrzeżeń z kontroli eksploatacji;
- wykonywać remonty z wykorzystaniem firm o wysokim potencjale wyposażenia oraz wiedzy i doświadczenia, gwarantujących odpowiedni poziom techniczny remontu oraz terminowość jego realizacji;
- w okresie trwałości indywidualnej (przyjmuje się, że po przepracowaniu przez turbozespół ca. 200 000 godzin pracy) wykonywać badania diagnostyczne (nieniszczące i niszczące oraz pomiary geometrii) w celu rozpoznania aktualnego stanu technicznego urządzenia;
- stosować sprawdzone, o odpowiedniej trwałości, technologie remontowe oparte na opracowanych wspólnie z inwestorem i firmą diagnostyczną zaleceniach remontowych;
- dbać o wysoką jakość montażu poszczególnych elementów turbozespołu;
- pamiętać o właściwym przygotowaniu układu przepływowego do rozruchu między innymi pod kątem czystości;

- prowadzić uruchomienia oraz eksploatację na podstawie aktualnej Instrukcji Eksploatacji,

### **Uwaga:**

*Właściciele Elektrowni i Elektrociepłowni powinni pamiętać, że oczekując remontu wykonanego tanio i szybko rzadko mogą oczekiwać, aby wykonany był dobrze.*

Często wystarczy nie dopełnić choćby jednej z wyżej wymienionych zasad, aby pojawiły się problemy, z awarią włącznie. Sytuacji awaryjnych nie jesteśmy w stanie w pełni wyeliminować, jednak poprzez metodyczne, sprawdzone i wynikające z rzetelnej praktyki inżynierskiej podejście do remontu/exploatacji turbozespołów możemy w znacznie mierze zminimalizować ryzyko powstania awarii.

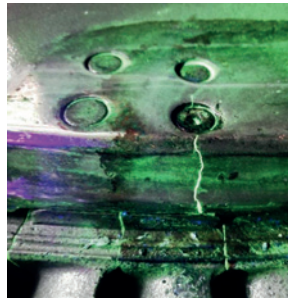
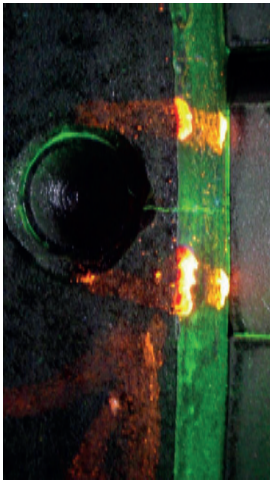
Awaryjne odstawienie turbozespołu/bloku energetycznego rodzić może wiele konsekwencji:

- awaria może zagrozić bezpieczeństwu ludzi i spowodować znaczne szkody w wyposażeniu elektrowni,
- awaria może spowodować długie, nieplanowane postój,
- przywrócenie stanu technicznego urządzenia po awarii związane z naprawą lub wymianą pociąga za sobą znaczne koszty.

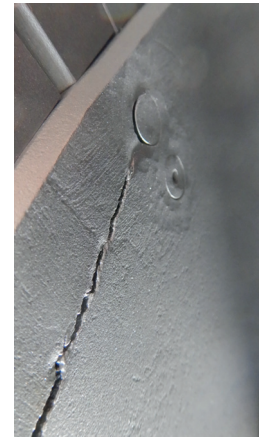
W przypadku elektrociepłowni największym problemem są awarie turbozespołów/bloków zdarzające się w okresie jesienno-zimowo-wiosennym.

Jednym z elementów krytycznych – który często (ze względu na konstrukcję i warunki eksploatacji) narażony jest na awarię – jest wirnik turbozespołu. W obszarze wirnika uszkodzeniom ulegać mogą:

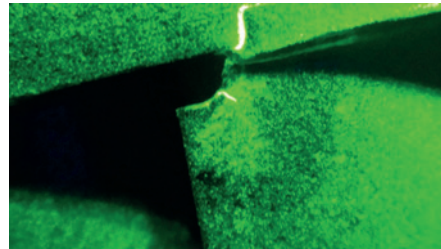
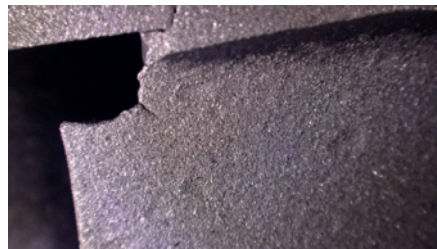
- wał wirnika – przykłady przedstawiono na rysunkach 1 i 2,
- układ łopatkowy oraz elementy nasadzone na wale wirnika – przykłady przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 1. Przykłady pęknięć stwierdzonych w 2021 r. na pierwszym stopniu wirnika



Rys. 2. Pęknięta tarcza wirnikowa turbiny typu 50 MW



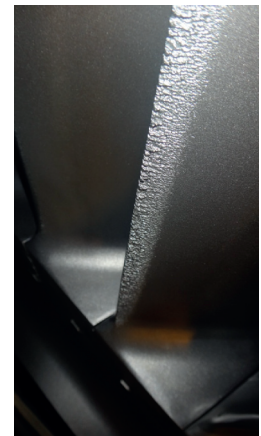
Rys. 3. Uszkodzenia/pęknięcia łopatek

Typowymi, często obserwowanymi zjawiskami dla układów łopatkowych są procesy erozyjnego uszkodzania krawędzi łopatek i wałów wirników. Charakterystyczne przykłady zerodowanych elementów wirników przedstawiono na rysunku 4.

Turbiny parowe są projektowo przystosowane do pracy w obszarze pary mokrej, wilgotność pary może sięgać kilku %. Praca w obszarze pary wilgotnej ma duży wpływ na zmniejszenie jednostkowego zużycia ciepła. Powoduje to jednak powstanie erozyjnego zużycia górnych krawędzi wlotowych łopatek ostatnich stopni części niskoprężnej turbiny. Intensywność erozji zależy od twardości krawędzi łopatek. W celu zmniejszenia intensywności erozji producenci turbin zabezpieczali krawędzie łopatek turbin w miejscach narażonych na jej występowanie. Najstarszym rozwiązaniem było lutowanie nakładek stellite'owych o wysokiej twardości. Mimo że operacja ta technologicznie jest trudnym zabiegiem, w trakcie eksploatacji dochodziło do odrywania nakładek, co z kolei prowadziło do uszkodzeń rurek skraplaczy oraz wtórnych uszkodzeń krawędzi łopatek.

Producenci turbin prowadzili prace w kierunku zmiany konstrukcji stopni przez zmianę profilu łopatek: zmianę krawędzi wylotowych na tarczach kierowniczych i zmianę krawędzi wlotowych na wirniku. Zmiany te miały na celu takie ukierunkowanie strumienia skroplin, aby częściowo strumień ten przepływał przez stopień bez kontaktu z łopatkami. Intensywność erozji zależy od: konstrukcji stopnia (co opisa-

no powyżej), stanu technicznego turbiny, ale w największym stopniu od dotrzymywania parametrów pary (w tym temperatury pary na wlocie do turbiny). Zmniejszenie intensywności erozji prawidłowo eksploatowanych turbin stworzyło warunki do rezygnacji z nakładek stellite'owych i stosowania łopatek, które mają zahartowane krawędzie wlotowe.



Rys. 4. Ubytki erozyjne na krawędziach łopatek



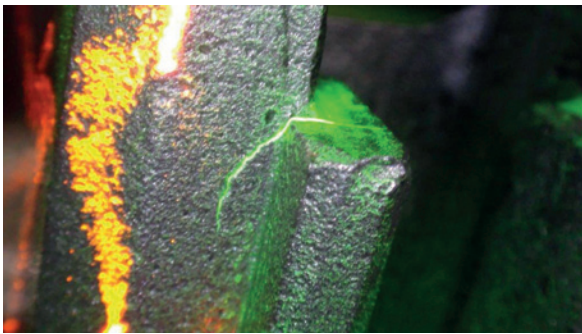
Należy pamiętać, że nie tylko wirniki turbin ciepłowniczych „noszą ślady” warunków pracy.

Uszkodzenia typu wyerodowania, wyflukania widoczne są bardzo dobrze na powierzchniach osadczycy tarcz kierowniczych i obejm w miejscach ich osadzenia w kadłubie/obojmnie – przykłady takich uszkodzeń pokazano na rysunku 5.

Nieprawidłowości oraz nieciągłości obserwowane są w trakcie badań diagnostycznych wrębów łopatkowych – rysunek 6.



Rys. 5. Ubytki erozyjne na powierzchniach osadczycy (powierzchnia uszczelniająca)

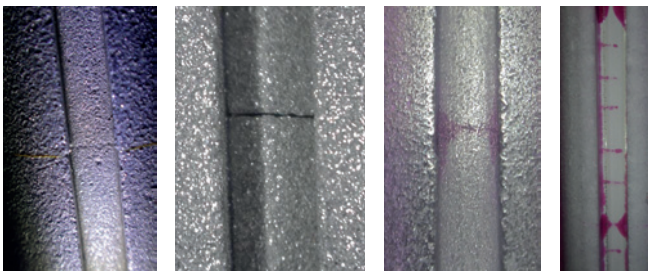


Rys. 6. Pęknięcie w studzience zamkowej

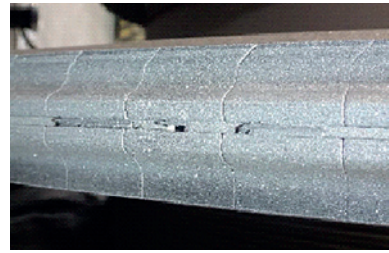
Problemy ujawniające się w eksploatacji turbin ciepłowniczych nie dotyczą wyłącznie starszych konstrukcji, niektóre ze stosunkowo niedawno zabudowanych w polskiej energetyce turbin (ok.10 lat) także sprawiają ich Użytkownikom problemy.

Wśród najczęściej identyfikowanych problemów na uwagę zasługują:

- pęknięcia drutu łączącego łopatki w pakiety – rysunki 7 i 8,
- wyerodowania na bandażach – rysunek 9,
- wyerodowania na wale – rysunek 10.



Rys. 7. Przykłady pęknięć drutu zlokalizowanego we wrębie wieńca wirnikowego łopatek



Rys. 8. Zaciągnięcia materiału na drucie łączącym łopatki w pakiety



Rys. 9. Ubytki erozyjne w materiale bandaża



Rys. 10. Ubytki erozyjne na wale wirnika

Zakres możliwych do wykonania badań diagnostycznych uwarunkowany jest stopniem demontażu turbozespołu. Nawet nie otwierając układu przepływowego można przynajmniej w ograniczonym zakresie wykonać badania endoskopowe, które również pozwalają Użytkownikowi zdobyć informacje, często diametralnie zmieniające charakter postoju turbozespołu. Przykłady uszkodzeń zarejestrowanych podczas badań endoskopowych zostały zaprezentowane na rysunku 11.

Niezależnie, z jakim układem przepływowym mamy do czynienia, starą czy nową konstrukcją, procesem, który wpływa destrukcyjnie na układ łopatkowy i inne elementy, przy braku odpowiedniego zabezpieczenia, jest korozja postojowa. Z negatywnym wpływem warunków postoju na elementy układu przepływowego mamy do czynienia zazwyczaj podczas postojów dłuższych niż 20 dni. Znaczna wilgotność pojawiająca się w układzie przepływowym po odstawieniu, bez zastosowania odpowiedniego zabezpieczenia, doprowadza do pojawiania się ognisk korozji postojowej. Przykłady uszkodzeń tego rodzaju zostały zaprezentowane na rysunku 12.





Rys. 11. Wyniki badań endoskopowych stopni wirnikowych – erozja, pęknięcie oraz urwanie łopatki



Rys. 12. Przykład korozji postojowej łopatek wirnikowych

## Podsumowanie i wnioski

1. W powojennej historii naszego kraju energetyka stawiała przed naszymi:
  - konstruktorami/ budowniczymi,
  - firmami remontowymi,
  - firmami diagnostycznymi
 liczne wyzwania. Można stwierdzić, że nasi poprzednicy stanęli na wysokości zadania i zbudowali system elektroenergetyczny prawie od zera w formie, który do dzisiaj spełnia większość naszych potrzeb. System ten zapewnił energię ciepłą i elektryczną indywidualnym odbiorcom oraz stworzył warunki dla rozwoju przemysłu, a także znaczącego eksportu energii.
2. Za zmianami konstrukcyjnymi, zmianami obejmującymi warunki eksploatacji i oczekiwaniami Użytkowników w zakresie dyspozycyjności nadążała diagnostyka oraz powstawały nowe i były doskonalone, wcześniej wdrożone technologie remontowe.
3. Zmiany w podejściu Użytkownika do „strategii” remontowych, tj. ograniczania remontów aż do rezygnacji z ich wykonywania włącznie (tzw. strategia awaryjno-planova) skłoniła nas do porządkowania dużej liczby informacji pochodzących z remontów i eksploatacji, co stało

się jednym z bodźców dla rozwoju diagnostyki zdalnej oraz usługi z wykorzystaniem platformy informatycznej LM System PRO+®.

4. Turbiny w polskiej energetyce są coraz starsze (mają coraz większą liczbę uruchomień), większość z nich przekroczyła 250 000 godzin pracy. Aby powstawały i były realizowane optymalne dla naszych turbin zakresy diagnostyki i remontu potrzebna jest usystematyzowana informacja o ich stanie technicznym. Ocena stanu technicznego, która powstaje po remoncie musi być na bieżąco uzupełniana, a prognoza weryfikowana na podstawie analizy warunków pracy i ich wpływu na stan techniczny turbiny.
5. Turbiny ciepłownicze pracują w specyficznych warunkach (np. praca w zakresie pary wilgotnej), co nie oznacza, że układy przepływowe są odporne na zasysanie z upustu wody do układu przepływowego. Należy pamiętać o tym opracowując zakresy diagnostyki i remontów tego typu turbin.

## PIŚMIENNICTWO

- [1] Dobosiewicz J., *Wpływ eksploatacji na zmiany własności mechanicznych metalu kadłubów turbin parowych*, „Energetyka” 1992, nr 1.
- [2] Dobosiewicz J., *Odształcenie kadłubów*, „Energetyka” 1992, nr 12.
- [3] Grzesiczek E., Trzeczcyński J., Rajca S., *Możliwości wydłużenia czasu eksploatacji elementów części przepływowych turbin parowych*, „Energetyka” 2003, nr 12.
- [4] Dobosiewicz J., *Korozja łopatek turbin parowych*, „Energetyka” 1998, nr 3.
- [5] Moskal E., *Ocena stanu zmodernizowanego układu przepływowego części niskoprężnej turbin. Doświadczenia eksploatacyjne Elektrowni Rybnik SA*, „Energetyka” 2003, nr 2.
- [6] Trzeczcyński J., *Monitorowanie pracy urządzeń ciepłno-mechanicznych elektrowni jako istotny element prognozowania ich żywotności w ostatniej fazie wydłużonej eksploatacji*, „Energetyka” 2009, nr 12.

# Mikrostruktura i właściwości mechaniczne stali P911 po długotrwałej eksploatacji w temperaturze 560°C

## Microstructure and mechanical properties of P911 steel after long-term operation at a temperature of 560°C

Przedstawiono wyniki badań metaloznawczych stali P911 po ok. 70 000 godzin eksploatacji w temperaturze 560°C. Przeprowadzone badania wykazały względnie niewielki stopień degradacji badanego materiału, po eksploatacji obserwowano zachowaną listwową mikrostrukturę martenzytyczną. Wykazano, że zmiany w mikrostrukturze badanej stali polegały na: procesach zdrowienia i rekrytalizacji osnowy oraz utworzeniu ciągłej siatki węglików  $M_{23}C_6$  po granicach ziaren byłego austenitu. Stosunkowo niewielkie zmiany w mikrostrukturze stali P911 były związane z relatywnie niską temperaturą eksploatacji. Przełożyło się to na właściwości mechaniczne stali P911, które po eksploatacji nadal były wyższe od normatywnych wymagań.

**Słowa kluczowe:** stal P911, badania metaloznawcze, długotrwała eksploatacja, właściwości mechaniczne stali P911

The article presents the results of metallurgical tests of P911 steel after approx. 70,000 hours of operation at the temperature of 560°C. The conducted research showed a relatively low degree of degradation of the tested material and the retained martensitic strip microstructure was observed after operation. It was shown that the changes in the microstructure of the tested steel consisted of: matrix healing and recrystallization processes as well as the formation of a continuous  $M_{23}C_6$  carbide mesh at the former austenite grain boundaries. Relatively small changes in the microstructure of P911 steel were related to the relatively low operating temperature. This refers to the mechanical properties of the P911 steel, which after operation were still higher than the standard requirements.

**Keywords:** steel P911, metallurgical testing, long-term operation, mechanical properties of steel P911

### Wstęp

Stalom stosowanym w przemyśle energetycznym stawia się warunek zachowania stabilnej mikrostruktury w długim okresie eksploatacji. Stabilna mikrostruktura umożliwia zachowanie założonych właściwości mechanicznych oraz wysokiej niezawodności. Ocenę niezawodności (bezpieczeństwa) elementów urządzeń ciśnieniowych, wykonanych ze stopów żarowytrzymałych, określa się na podstawie m.in. danych uzyskanych w wyniku przeprowadzenia szeregu laboratoryjnych badań metaloznawczych. Oprócz badań laboratoryjnych dających pewien obraz stabilności mikrostruktury i właściwości mechanicznych żarowytrzymałych stali, realne dane uzyskuje się w wyniku badań wycinków po określonym czasie eksploatacji i danym stanie mikrostruktury [1, 2].

Stal X11CrMoWVNb9-1-1 (P911) należy do grupy żarowytrzymałych stali o osnowie ferrytycznej zawierających ok. 9%Cr. Stal ta została opracowana w ramach programu badawczego COST 501 i miała być europejską odpowiedzią na stal P91. Stal P911 powstała w wyniku modyfikacji składu chemicznego stali P91 poprzez wprowadzenie dodatku wolframu w ilości ok. 1% i mikrododatku boru [3]. Wprowadzenie wolframu miało na celu zwiększenie stabilności osnowy, podwyższenie temperatury rekrytalizacji oraz wzrost umocnienia roztworowego [4]. Z kolei mikrododatek boru spowalnia procesy koagulacji węglików  $M_{23}C_6$  przyczyniając się do stabilizacji listwowej mikrostruktury martenzytycznej [5]

W literaturze przedmiotu brak jest koniecznej liczby danych dotyczących wpływu rzeczywistych, długotrwałych warunków eksploatacji w bloku energetycznym na stabilność mikrostruktury i właściwości mechanicznych martenzytycznych stali typu 9-12%Cr. Sytuacja ta zainspirowała autorów artykułu do przeprowadzenia badań mikrostruktury i właściwości mechanicznych stali P911 po ok. 70 000 godzinach eksploatacji w temperaturze 560°C.

### Materiał i metodyka badań

Materiałem do badań były próbki pobrane z wycinka rurociągu pary świeżej o średnicy zewnętrznej 273 mm i grubości ścianki 55 mm. Badany materiał eksploatowany był przez ok. 70 000 godzin przy temperaturze 560°C i ciśnieniu 27,5 MPa. Skład chemiczny badanego materiału określony za pomocą spektrometru iskrowego SpectroLab, przedstawiony w tabeli 1, odpowiadał gatunkowi stali martenzytycznej X11CrMoWVNb9-1-1 (P911).

Zakres przeprowadzonych badań obejmował badania mikrostrukturalne za pomocą skaningowej i transmisyjnej mikroskopii elektronowej oraz badania właściwości mechanicznych – pomiar twardości, próbę udarności, statyczną próbę rozciągania w temperaturze pokojowej i podwyższonej. Badania strukturalne przeprowadzono z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) – JEOL JSM-6610LV oraz transmisyjnego

Skład chemiczny badanej stali, %mas

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	W	Nb	V	N
0,11	0,16	0,45	0,014	0,003	8,86	0,96	1,00	0,08	0,18	0,08

mikroskopu elektronowego (TEM) – JEOL 2100plus stosując odpowiednio: zgłądy metalograficzne trawione odczynnikami Mi19Fe i cienkie folie. Badania właściwości mechanicznych wykonano zgodnie z wytycznymi zawartymi w przedmiotowych normach. Ze względu na brak danych dotyczących właściwości mechanicznych badanej stali w stanie dostawy uzyskane wyniki odniesiono do wymaganych minimalnych właściwości stali P911 zawartych w [6].

## Wyniki badań i ich analiza

### Mikrostruktura i właściwości stali P911 w stanie dostawy

Stal P911 należy do grupy wysokochromowych stali martenzytycznych, zawiera ok. 9% chromu. Stal dostarczana jest w stanie ulepszanym cieplnie, tj. po hartowaniu na powietrzu (często w literaturze nazywanym normalizowaniem) z temperatury austenitizowania 1040-1080°C i wysokim odpuszczaniu w zakresie temperatur 740-780°C. W stanie dostawy stal P911 posiada strukturę wysokoodpuszczonego martenzytu. Struktura ta cechuje się listwowym martenzytem o bardzo dużej gęstości dyslokacji wewnętrznych podziaren (rzędu co najmniej  $10^{14} \text{ m}^{-2}$ ) i licznymi wydzieleniami typu  $M_{23}C_6$  i MX (NbC, VX) [6, 7]. Węglik NbC, jako wydzielenia pierwotne, nie ulegają rozpuszczeniu w czasie austenitizowania, ograniczając rozrost ziarna austenitu w czasie obróbki cieplnej. Z kolei cząstki typu  $M_{23}C_6$  i VX wydzielają się w czasie odpuszczania stali martenzytycznych. Węglik  $M_{23}C_6$  obserwuje się przede wszystkim na granicach ziaren byłego austenitu i na granicach podziaren/listew martenzytu. Z kolei wydzielenia typu MX widoczne są wewnątrz i na granicach podziaren. W badanej stali istnieje możliwość występowania ferrytu d w ilości poniżej 5% [3, 7].

Obróbka cieplna stali P911 poprzez odpowiedni dobór parametrów austenitizowania i odpuszczania ma zapewnić uzyskanie właściwości mechanicznych na poziomie co najmniej wymagań zawartych w normie (tab. 2).

Uzyskanie wysokich podstawowych właściwości mechanicznych oraz odporności na pęcznienie stali martenzytycznych wynika z zastosowania do umocnienia tych materiałów czterech mikromechanizmów, to jest [8, 9]:

- roztworowego – atomami pierwiastków stopowych rozpuszczonych w osnowie w przypadku badanej stali atomami pierwiastków substytucyjnych: Cr, Mo, W;

- dyslokacyjnego – dużą gęstością dyslokacji;
- wydzieleniowego – za pomocą licznych drobnodispersyjnych wydzieleni typu MX;
- granicami ziaren – granice ziaren byłego austenitu, granice listew martenzytu, granice podziaren.

Ulepszanie cieplne stali martenzytycznych, w tym kilkugodzinne odpuszczanie, nie zapewnia uzyskania stabilnej struktury, stąd w czasie eksploatacji będzie ona ulegać stopniowym zmianom. Szybkość degradacji mikrostruktury żarowytrzymałych stali, jako procesu dyfuzyjnego, ściśle zależy od rzeczywistej temperatury pracy. Wyższa temperatura będzie prowadzić do przyspieszenia procesów i zjawisk decydujących o degradacji mikrostruktury. Wpływ na szybkość rozpadu mikrostruktury stali pracującej w warunkach pęcznienia ma również poziom naprężenia.

### Mikrostruktura i właściwości stali P911 po eksploatacji

Mikrostrukturę stali P911 po eksploatacji przedstawiono na rysunkach 1 i 2. W mikrostrukturze badanej stali widoczna jest jeszcze zachowana listwowa mikrostruktura martenzytyczna o zróżnicowanej wielkości podziaren (rys. 2a). Na granicach ziaren byłego austenitu oraz granicach listew martenzytu obserwowano liczne cząstki, które miejscami tworzyły ciągłą siatkę wydzieleni (rys. 1, 2a). Wewnątrz listew martenzytu obserwowano stosunkowo dużą gęstość dyslokacji oraz ujawniono oddziaływanie dyslokacji z dyspersyjnymi cząstkami typu MX (rys. 2a, 2b). W mikrostrukturze oprócz listwowej budowy, widoczne były również mikroobszary spoligonizowanego ferrytu (rys. 2a).

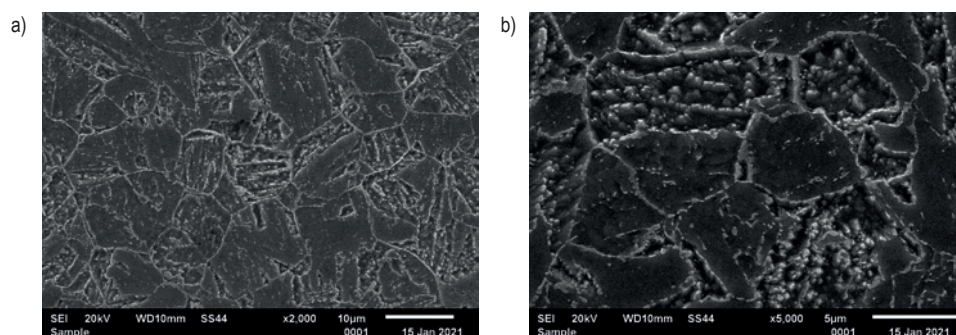
Badania za pomocą transmisyjnej mikroskopii ujawniły ponadto procesy zdrowienia, poligonizacji i rekryształizacji osnowy. Procesy te prowadzą do zmniejszenia gęstości dyslokacji, wzrostu szerokości podziaren (wskazano zieloną strzałką na rys. 2a) oraz postępującego zaniku listwowej mikrostruktury na rzecz spoligonizowanego ferrytu. Wzrost wielkości podziaren w mikrostrukturze badanej stali odbywał się mechanizmem typu „Y” (wskazano żółtą strzałką na rys. 2a). Migracja tym mechanizmem polega na przemieszczaniu się węzłów „Y”, które są miejscem styku podgranic, co umożliwia koalescencję dwóch niskokątowych granic [10].

Na granicach ziaren byłego austenitu i granicach listew martenzytu ujawniono występowanie węglików  $M_{23}C_6$ . Wydzielenia te są dominujące w stalach typu 9-12%Cr i stanowią ok. 90%

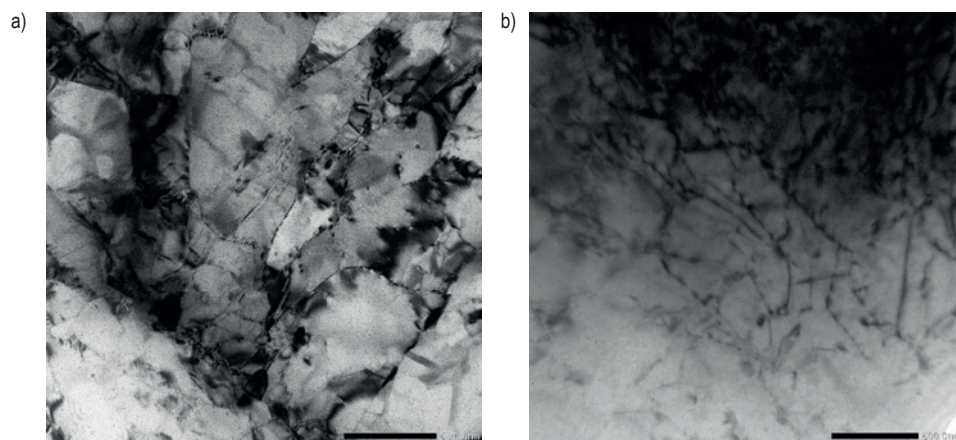
Wymagane właściwości mechaniczne stali P911 w stanie dostawy [6]

	$R_{p0,2}$ , MPa	$R_m$ , MPa	A, %	KV, J	$R_{p0,2}^{550}$ , MPa
Wymagania według [6]	min. 450	min. 620	min. 17	min. 27	min. 287





Rys. 1. Mikrostruktura stali P911 po eksploatacji  
a) widok ogólny, b) ciągła siatka węglików po granicach ziaren, SEM



Rys. 2. Mikrostruktura stali P911 po eksploatacji  
a) oddziaływanie dyslokacji z wydzieleniami wewnątrz listwy martenzytu, b) TEM

wszystkich cząstek [11]. Stabilność cieplna węglików  $M_{23}C_6$  jest wysoka. Stąd te cząstki wykazują skłonność do koagulacji i tworzenia ciągłej siatki po granicach ziaren/listew [7, 11]. Wydzielenia te odgrywają istotną rolę w stalach martenzytycznych, gdyż stabilizują listwową mikrostrukturę martenzytyczną hamując ruch granic dyslokacyjnych. Proces koagulacji cząstek wydzielonych na granicach podziaren przy stałym ułamku ich objętości prowadzić może zgodnie z mechanizmem Zenera do obniżenia siły hamującej ruch granic. Siłą napędową wzrostu wielkości wydzieleni podczas pełzania jest dążenie do zmniejszenia energii międzyfazowej cząstka/osnowa. Proces ten kontrolowany jest dyfuzją pierwiastków substytucyjnych (Cr, Mo, W). Wzrost wielkości węglików  $M_{23}C_6$  skutkuje ograniczeniem ich roli jako czynnika stabilizującego dyslokacyjne granice i prowadzi także do obniżenia osnowy w te pierwiastki, co przekłada się na wielkość umocnienia mechanizmem roztworowym [9, 12].

Spowolnienie procesu koagulacji węglików  $M_{23}C_6$  istotnie zależy od składu chemicznego stali martenzytycznej. Mikrododatek boru oraz dodatek wolframu poprzez obniżenie ener-

gii międzyfazowej cząstka/osnowa wpływają na zmniejszenie skłonności tych wydzieleni do wzrostu wielkości [3, 4, 9, 13]. Obserwowana w badanej stali listwowa mikrostruktura wskazuje na korzystne oddziaływanie węglika  $M_{23}C_6$  na stabilność podstruktury.

W stali P911 po eksploatacji wewnątrz listew/podziaren ujawniono występowanie wydzieleni typu MX (NbC, VX). Cząstki te kotwiczą dyslokacje i utrudniają możliwość ich swobodnego przemieszczania się (rys. 2a). Wydzielenia typu MX są cząstkami charakteryzującymi się bardzo wysoką stabilnością termodynamiczną. Szybkość ich wzrostu w zakresie temperatury 500-600°C wynosi około 1/10 szybkości koagulacji węglika  $M_{23}C_6$  [9, 12, 14].

Właściwości mechaniczne stali P911 po eksploatacji określone w temperaturze pokojowej i podwyższonej zestawiono w tabeli 3.

Wysokie, w odniesieniu do wymagań normy (tab. 2), właściwości mechaniczne badanej stali po eksploatacji (tab. 3) wskazują na relatywnie niewielki stopień degradacji jej mikrostruktury.

Tabela 3

Właściwości mechaniczne stali P911 po eksploatacji

$R_{p0.2}$ , MPa	$R_m$ , MPa	A, %	KV, J	HV30	$R_{p0.2}^{550}$ , MPa	TPK, °C
543	709	23	67	224	382	ok. - 50



Właściwości mechaniczne stali są sumą zastosowanych do jej umacniania mechanizmów umocnienia. W stalach martenzytycznych dominuje umocnienie granicami ziaren/listew, które stanowią ok. 33% przyrostu granicy plastyczności [8, 9]. Zaobserwowane w mikrostrukturze procesy poligonizacji i rekrytalizacji oraz wzrostu ilości wydzielań na granicach ziaren wskazują na spadek umocnienia poprzez mechanizm dyslokacyjny i roztworowy. Obniżenie to jest zapewne rekompensowane poprzez wzrost umocnienia mechanizmem wydzieleniowym.

Zachowana listwowa mikrostruktura martenzytyczna, o względnie wąskich listwach i o względnie niewielkiej szerokości podziaren (rys. 2), przekłada się również na energię łamania spełniającą kryterium  $KV_{min} > 27$  J oraz jednocześnie na wartość temperatury przejścia w stan kruchy zdecydowanie niższej od temperatury pokojowej (tab. 2). Ciągliwość badanej stali wyższa od 27 J wynika również z braku w mikrostrukturze wydzielań fazy Lavesa, co potwierdzono badaniami mikroskopowymi. Faza Lavesa jest podstawowym wydzieleniem wtórnym wydzielającym się w czasie eksploatacji stali martenzytycznych. Wydzielenie się tej fazy oraz i jej wzrost są głównymi przyczynami szybkiego oraz znaczącego spadku udarności stali typu 9%Cr [15].

## Podsumowanie

Badaniom metaloznawczym poddano stal P911 po ok. 70 000 godzin eksploatacji w temperaturze 560°C. W analizowanej stali po długotrwałej eksploatacji nadal obserwowano listwową mikrostrukturę martenzytu, co dowodzi względnie dużej jej stabilności. Widocznym rezultatem długotrwałej eksploatacji były liczne wydzielenia węglików  $M_{23}C_6$  na granicach ziaren byłego austenitu i na granicach listew martenzytu oraz procesy poligonizacji i rekrytalizacji osnowy. Wewnątrz listew/podziaren ujawniono z kolei wydzielenia typu MX. Stosunkowo niewielkie zmiany w mikrostrukturze stali P911 były związane z relatywnie niską temperaturą jej eksploatacji. Przełożyło się to na właściwości mechaniczne stali P911, które po eksploatacji nadal były wyższe od normatywnych wymagań.

## PIŚMIENICTWO

- [1] Trzeczcyński J., Magiera Ł., *Najpierw diagnostyka, później remont*, „Energetyka” 2012, nr 12, 838-839.
- [2] Hernas A., *Materiały do budowy kotłów na parametry nadkrytyczne*, „Nowa Energia” 2013, nr 5-6, 34-36.
- [3] Cipolla L., Di Gianfrancesco A., Cumino G., Caminada S., *Longterm creep behaviour and microstructural evolution of E911 steel, Creep & fracture in high temperature components – desing & life assessment issues* (eds. I. A. Shibli, S. R. Holdsworth, G. Merckling), ECCC Creep Conference, London 2005, 288-289.

- [4] Fujita T., Sato T., Takahashi N., *Effect of Mo and W on long term creep rupture and strength of 12%Cr heat-resisting steel containing V, Nb and B*, „ISIJ Trans.” 1978, No 18, 115-124.
- [5] Abe F., *Effect of boron on microstructure and creep strength of advanced ferritic power plant steels*, „Eng. Proc.” 2011, No 10, 94-99.
- [6] Golański G., Urbańczyk P., *Nowoczesne stale ferrytyczne i austenityczne dla energetyki – charakterystyka*, Agenda Wydawnicza SIMP, Warszawa 2018.
- [7] Zielińska-Lipiec A., *Analiza stabilności mikrostruktury modyfikowanych stali martenzytycznych 9%Cr w procesie wyżarzania i pełzania*, Wyd. AGH, Kraków 2005.
- [8] Maruyama K., Sawada K., Koike J., *Strengthening mechanisms of creep resistant tempered martensitic Steel*, „ISIJ Inter.” 2001, No 41, 641-653.
- [9] Golański G., *Żarowytrzymałość wysokochromowych stali martenzytycznych*, Wyd. SBŁ-IMŻ, Gliwice 2022.
- [10] Abe F., *Coarsening behaviour of lath and its effect on creep rates in tempered martensitic 9Cr-W steels*, „Mater. Sc. Eng.” 2004, No 387-389A, 565-569.
- [11] Zhang J.G., Noble F.W., Eyre B.L., *Comparison of effects of aging on fracture of 9Cr-1Mo and 2.25Cr-1Mo steel. Part 1. Quenched and tempered material*, „Mater. Sc. Techn.” 1991, No 7, 218-223.
- [12] Golański G., Kolan C., Jasak J., *Degradation of microstructure and mechanical properties of high-chromium steels used in the power-industry, Creep* (edited by T. Tański, M. Sroka, A. Zieliński), Wyd. IntechOpen, Rijeka, Croatia 2018, 834-950.
- [13] Fujita T., Asakura K., Sato T., *Development and properties of new 10Cr-2Mo-V-Nb heat resisting steel*, „ISIJ Trans.” 1979, No 19, 605-613.
- [14] Sawada K., Kubo K., Abe F., *Contribution of coarsening of MX carbonitrides to creep strength degradation in high chromium ferritic steel*, „Mater. Sc. Techn.” 2003, No 19, 732-738.
- [15] Yan P., Liu Zh., *Toughness evolution of 9Cr-3W-3Co martensitic heat resistant steel during long time aging*, „Mater. Sc. Eng.” 2016, No 650A, 290-294.

# Mikrostruktura i właściwości mechaniczne stali bainitycznej Cr-Mo po eksploatacji

## Microstructure and mechanical properties of bainitic steel Cr-Mo after operation

Badaniu poddano próbki pobrane z wycinka rury wykonanej ze stali bainitycznej P5 (X11CrMo5). Badany materiał pracował w temperaturze 534°C przez ponad 93 000 godzin. Po eksploatacji badana stal charakteryzowała się nadal zachowaną mikrostrukturą bainityczną z licznymi wydzieleniami. Wydzielenia typu  $M_{23}C_6$  obserwowano na granicach ziaren byłego austenitu, na granicach listew bainitu, natomiast wewnątrz listew bainitu ujawniono obecność cząstek  $M_2C$  i  $M_{23}C_6$ . Badana stal charakteryzowała się względnie niewielkim stopniem degradacji mikrostruktury i właściwościami wytrzymałościowymi wyższymi od wymagań normatywnych.

**Słowa kluczowe:** stal bainityczna Cr-Mo, właściwości mechaniczne stali, degradacja mikrostruktury, właściwości wytrzymałościowe

The samples taken from the pipe section made of P5 bainitic steel (X11CrMo5) were tested. The test material was operated at 534°C for over 93,000 hours. After operation, the tested steel was still characterized by bainitic microstructure with numerous precipitates. The  $M_{23}C_6$  type precipitates were observed at the former austenite grain boundaries, at the boundaries of the bainite laths, while the  $M_2C$  and  $M_{23}C_6$  particles were revealed inside the bainite laths. The tested steel was characterized by a relatively low degree of microstructure degradation and strength properties higher than the standard requirements.

**Keywords:** Cr-Mo bainitic steel, steel mechanical properties, microstructure degradation, strength properties

### Wprowadzenie

Stal P5 (oznaczenie według PN-EN X11CrMo5) należy do grupy stali Cr-Mo o strukturze bainitycznej. Stal ta stosowana jest głównie w przemyśle petrochemicznym, ale również znalazła swoje zastosowanie w energetyce. Stal P5 w porównaniu z innymi stosowanymi w Polsce niskostopowymi stalami z grupy Cr-Mo, tj. 10CrMo9-10 (10H2M) czy 13CrMo4-5 (15HM), przy porównywalnej zawartości molibdenu, posiada wyższą na poziomie 4-6% zawartość chromu. Wyższa zawartość chromu w stali P5 skutkuje lepszą jej hartownością, co przekłada się na uzyskanie po obróbce cieplnej struktury bainitycznej. Struktura ta zapewnia w stanie dostawy wyższe właściwości mechaniczne w porównaniu z niskostopowymi stalami Cr-Mo. Zawartość chromu na tym poziomie przekłada się również na lepszą odporność korozyjną, w tym na działanie siarkowodoru oraz produktów ropopochodnych [1, 2].

Elementy konstrukcyjne pracujące powyżej temperatury granicznej projektowane są na ograniczony czas eksploatacji, obecnie 200 000 – 250 000 godzin. Ocenę ich przydatności do dalszej pracy przeprowadza się na podstawie oceny stanu struktury. Badania metaloznawcze wykonuje się za pomocą technik nieniszczących (repliki) lub niszczących (na pobranych reprezentatywnych wycinkach). Prowadzone badania kontrolne na wycinkach pobranych z instalacji energetycznych mają na celu ocenę wpływu parametrów ich pracy na stopień wyczerpania trwałości eksploatacyjnej. Pozwala to nie tylko na zweryfikowanie przydatności danego gatunku stopu do jego zastosowania w przemyśle, ale również umożliwia zbudowanie bazy danych i charakterystyk materiałowych po różnych okresach eksploatacji [3-5]. W artykule

przedstawiono wyniki badań mikrostruktury i właściwości mechanicznych stali bainitycznej P5 po długotrwałej eksploatacji w temperaturze 534°C.

### Materiał i metodyka badań

Materiałem do badań były próbki pobrane z wycinka rury o średnicy zewnętrznej 220 mm i grubości ścianki 8,7 mm. Rura wykonana była z stali bainitycznej P5, o składzie chemicznym przedstawionym w tabeli 1. Analizę składu chemicznego wykonano z wykorzystaniem spektrometru iskrowego SpectroLab. Badany materiał eksploatowany był przez 93049 h w temperaturze 534°C przy ciśnieniu 1,8 MPa. Zakres zrealizowanych badań obejmował badania mikroskopowe oraz badania właściwości mechanicznych. Badania strukturalne zrealizowano za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego Jeol JSM6610LV (SEM) oraz transmisyjnego mikroskopu elektronowego JEM-2100 PLUS (TEM). Badania właściwości mechanicznych obejmowały: statyczną próbę rozciągania na próbkach okrągłych za pomocą maszyny wytrzymałościowej Zwick/Roell Z100, pomiar twardości metodą Vickersa stosując obciążenie wgłębnika 10 kG (98,1 N), próbę udarności na niestandardowych próbkach Charpy V o pomniejszonej do 5 mm szerokości.

**Tabela 1**

Skład chemiczny stali P5, % masy

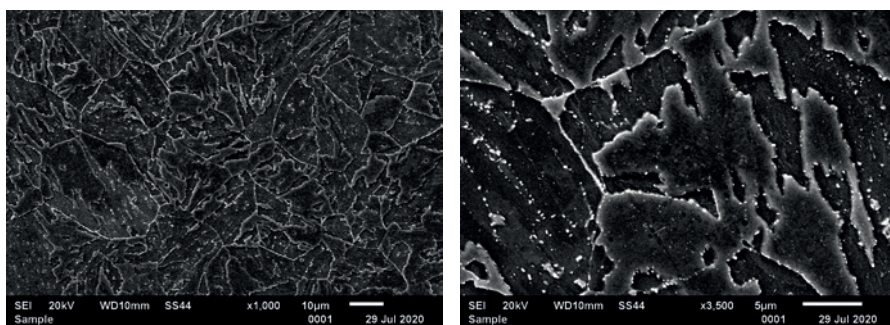
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,08	0,30	0,35	0,018	0,007	4,65	0,48

## Mikrostruktura stali P5 po eksploatacji

W stanie dostawy stal P5 charakteryzuje się strukturą bainityczną z wydzieleniami  $M_3C$  i  $M_2C$ . Wydzielenia cementytu stopowego  $M_3C$  obserwuje się na granicach ziaren byłego austenitu oraz listwach bainitu, natomiast wewnątrz listew/ziaren widoczne są cząstki  $M_2C$ . Węglik  $M_3C$  są wydzieleniami metastabilnymi, które w czasie eksploatacji ulegają przemianie „in situ” w bardziej stabilne cząstki, np.  $M_{23}C_6$ , bądź rozpuszczają się w osnowie [6-8].

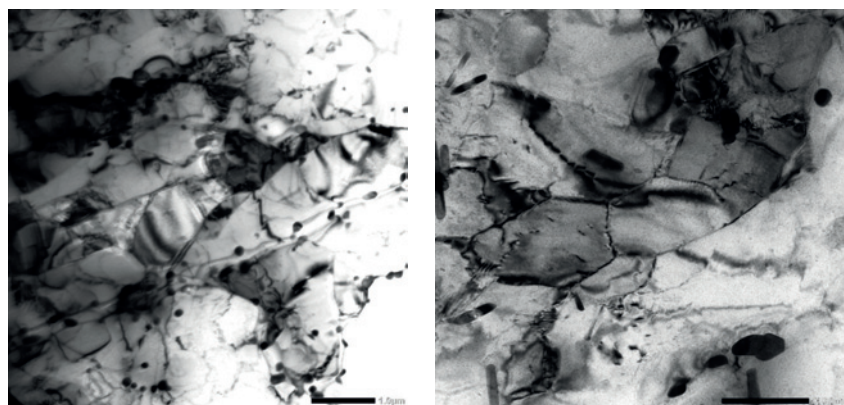
Długotrwała eksploatacja stali o wyjściowej, odbiegającej od stanu równowagi termodynamicznej, strukturze prowadzi do postępujących w czasie zmian, co nazywa się degradacją mikrostruktury. W przypadku stali niskostopowych Cr-Mo czy też Cr-Mo-V, ale również wysokochromowych stali martenzytycznych typu 9-12%Cr zmiany te obejmują następujące procesy: rozpad obszarów perlitycznych/bainitycznych/ martenzytycznych, zmianę rodzaju i morfologii wydzielań, ubożenie osnowy w pierwiastki substytucyjne, tj. pierwiastki węglotwórcze – Cr, Mo, W, V, etc., segregację domieszek, głównie fosforu do granic ziaren [9, 10]. Stopień rozpadu wyjściowej struktury stali dla energetyki uzależniony jest głównie od temperatury i czasu pracy, jako czynników odpowiedzialnych za szybkość procesów dyfuzyjnych w stanie stałym. Naprężenie wywołane ciśnieniem pochodzącym od czynnika będzie dodatkowo intensyfikować procesy degradacji mikrostruktury.

W badanej stali po eksploatacji widoczna była nadal zachowana mikrostruktura bainityczna z licznymi wydzieleniami (rys. 1). Względnie drobne cząstki obserwowano zarówno na granicach ziaren byłego austenitu, jak również na granicach i wewnątrz listew bainitycznych.



Rys. 1. Struktura stali P5 po eksploatacji, SEM

Badania elektronomikroskopowe (rys. 2) wykazały występowanie zarówno listwowej mikrostruktury bainitycznej z podziarnami o zróżnicowanej gęstości dyslokacji, jak również obszarów spolygonizowanego ferrytu. Na granicach listew/ziaren widoczne były pojedyncze cząstki o kształcie sferoidalnym i wydłużonym. Wewnątrz ziaren/listew zaobserwowano występowanie wydzielań iglastych oraz sferoidalnych.

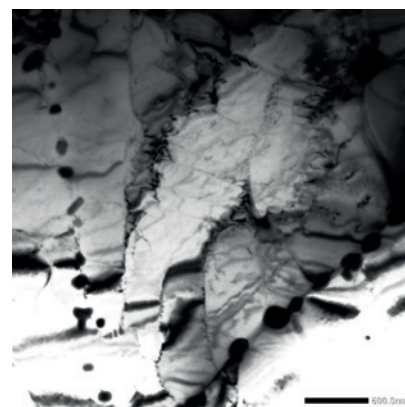


Rys. 2. Mikrostruktura stali P5 po eksploatacji, TEM

Przeprowadzone identyfikacje wydzielań za pomocą dyfrakcji elektronowej ujawniły występowanie w badanym materiale następujących rodzajów wydzielań: węglików  $M_{23}C_6$  i  $M_2C$  (rys. 3). Węglik  $M_{23}C_6$  obserwowano na granicach ziaren byłego austenitu i granicach listew bainitu, natomiast wewnątrz ziaren/listew obserwowano wydzielenia  $M_2C$  i  $M_{23}C_6$ . Obliczenia termodynamiczne przeprowadzone za pomocą programu ThermoCalc wykazały, że węgliki  $M_2C$  i  $M_{23}C_6$  są dla badanej stali wydzieleniami równowagowymi. Węglik  $M_{23}C_6$  wydziela na granicach listew/ziaren mają za zadanie stabilizowanie podstruktury [6, 11]. Stabilność podziarn jest istotnym czynnikiem wpływającym na odporność stali na pęcznienie. Cząstki wydzielone na ich granicach hamują wzrost ich wielkości [12]. Węglik  $M_2C$  w stalach Cr-Mo są wydzieleniami, które obserwuje się wewnątrz listew/ziaren, stąd ich głównym zadaniem jest utrudnianie procesów zdrowienia osnowy poprzez kotwiczenie dyslokacji [6, 11].

## Właściwości mechaniczne stali P5 po eksploatacji

Zarówno zachowana listwowa mikrostruktura bainityczna, jak również względnie niewielkie wydzielenia obserwowane na granicach i wewnątrz listew/ziaren wskazują na relatywnie mały stopień wyeksploatowania badanej stali. Zmiany w mikrostrukturze eksploatowanej stali wpływają na jej właściwości mechaniczne, powodując stopniowe ich obniżanie. Właściwości badanej stali po eksploatacji wraz z normatywnymi wymaganiem przedstawiono w tabeli 2.



Rys. 3. Wydzielenia  $M_{23}C_6$  i  $M_2C$  w stali P5 po eksploatacji, TEM



Właściwości mechaniczne stali P5 po eksploatacji wraz z minimalnymi wymaganiami

	$R_{p0.2}$ , MPa	$R_m$ , MPa	A, %	KV <sup>*)</sup> , J	HV10
Badana stal	386	562	27	218	172
Wymagania wg ASTM A213	205	415	30	27 <sup>**)</sup>	–

<sup>\*)</sup> – energia łamania określona na próbkach niestandardowych o pomniejszonej do 5 mm szerokości.

<sup>\*\*)</sup> – minimalna wartość energii łamania wyznaczona na standardowych próbkach uderzeniowych 10 x 10 x 55 mm.

Właściwości mechaniczne badanej stali po eksploatacji są nadal wysokie i spełniają (oprócz wartości wydłużenia A) wymagania stawiane dla tego gatunku stali. Właściwości wytrzymałościowe stali (umowna granica plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie) wynikają z sumarycznego oddziaływania poszczególnych mechanizmów umocnienia. W stalach o listwowej budowie mikrostruktury na wartość granicy plastyczności ma wpływ przede wszystkim umocnienie mechanizmem roztworowym oraz granicami ziaren (podziaren) [12, 13]. Na uzyskaną wysoką energię łamania KV badanej stali po eksploatacji dodatkowo mogą wpływać pomniejszone wymiary pobranych próbek (co wynikało z grubości ścianki rury). Jak wykazują badania własne Autorów oraz dane literaturowe [14] zmniejszenie szerokości próbki uderzeniowej może prowadzić do niezachodzącego wzrostu wartości tego parametru. Zdecydowanie wyższe od wymaganego minimum właściwości wytrzymałościowe oraz energia łamania KV stali P5 (tab. 2), dodatkowo potwierdzają względnie niewielki stopień degradacji mikrostruktury badanego materiału (rys. 1, 2).

## Podsumowanie

Badania metalograficzne oraz badania własności wytrzymałościowych przeprowadzone na wycinku rury ze stali P5 po długotrwałej eksploatacji w temperaturze 534°C pozwoliły stwierdzić że:

- obserwowano względnie niewielkie zmiany w mikrostrukturze, a badana stal zachowywała listwową budowę bainitu z licznymi wydzieleniami;
- nieznaczny stopień degradacji mikrostruktury zapewnia badanej stali wysokie, w odniesieniu do wymagań ASTM A213, właściwości wytrzymałościowe.

## PIŚMIENNICTWO

- [1] Kumšlytis V., Skindaras R., Valiulis A.V., *The structure and properties of 5%Cr-0.5%Mo steel welded joints after natural ageing and post-weld heat treatment*, "Mater. Sc." 2012, 18, 119-122.
- [2] *Material Data Sheet, Alloy steel tubes – P5/T5*, Peninsular Steel Tubes.
- [3] Dobrzański J., Zieliński A., Paszkowska H., Sposób oceny trwałości resztkowej na przykładzie materiału rodzimego i złącza spawanego po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania znacznie poza czas obliczeniowy eksploatacji, „Prace IMŻ” 2009, 63, 1, 34-37.
- [4] Zbroińska-Szczęchura E., *Niektóre kryteria oceny trwałości elementów ciśnieniowych bloków energetycznych pracujących w warunkach pełzania*, „Energetyka” 1996, 1, 43-45.
- [5] Golański G., Pietryka I., Jasak J., Słania J., Urbańczyk P., Wiczorek P., *Degradation of microstructure and mechanical properties of 15HM steel after 420 000 hours of service*, "Advances in Mater. Sc." 2014, 14, 5-11.
- [6] Poigrova G.D., Sedov V.M., Archakov Yu.I., *Carbide transformations in Cr-Mo steels in the process of long termaging and operation*, "Metal Sc. Heat Treatment" 1997, 39, 371-374.
- [7] Golański G., Stachura S., Kupczyk J., Kucharska-Gajda B., *Heat treatment of cast steel using normalization and intercritical annealing*, "Arch. Foundry Eng." 2007, 7, 123-126.
- [8] Golański G., Jasak J., Słania J., *Microstructure, properties and welding of T24 steel – critical review*, "Kovove Materialy" 2014, 52, 99-106.
- [9] Hernas A., *Żarowytrzymałość stali i stopów*, Wyd. PŚI., Gliwice 2000.
- [10] Zieliński A., *Trwałość eksploatacyjna żarowytrzymałych stali o osnowie ferrytycznej w warunkach długotrwałego oddziaływania temperatury*, Wyd. IMŻ, Gliwice 2016.
- [11] Das S., Joarder A., *Effect of long-term service exposure at temperature on microstructural changes of 5Cr-0.5Mo steels*, "Metall. Mater. Trans." 1997, 28A, 1607-1616.
- [12] Ghassemi-Armaki H., Chen R.P., Maruyama K., Igarashi M., *Contribution of recovery mechanisms of microstructure during long-term creep of Gr. 91 steels*, "J. Nucl. Mater." 2013, 433, 23-29.
- [13] Li M., Chen W.Y., *Microstructure-based prediction of thermal aging strength reduction factors for grade 91 ferritic-martensitic steel*, "Mater. Sc. Eng.", 2020, 798A, 140116.
- [14] Wallin K., Karjalainen-Roikonen P., Suikkanen P., *Sub-sized CVN specimen conversion methodology*, "Procedia Structural Integrity" 2016, 2, 3735-3742.



# Wspomnienie i pożegnanie Pani Profesor

My pracownicy Wydziału Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów Politechniki Częstochowskiej oraz Przedsiębiorstwa Usług Naukowo-Technicznych *Pro Novum* Sp. z o.o., byli studenci, doktoranci i współpracownicy Pani Profesor Stefanii Stachury z wielkim żalem i smutkiem przyjęliśmy informację o Jej śmierci.

W tej sytuacji chcielibyśmy przytoczyć kilka znanych nam faktów związanych ze ścieżką edukacyjno-zawodową Pani Profesor.

Pani Profesor Stefania Stachura ukończyła studia na Wydziale Metalurgicznym Politechniki Częstochowskiej. Od 1957 roku pracowała na tym Wydziale jako nauczyciel akademicki w Instytucie Inżynierii Materiałowej.

W 1966 roku uzyskała stopień doktora nauk technicznych w Politechnice Śląskiej. W 1980 roku uzyskała stopień doktora habilitowanego w Politechnice Częstochowskiej, a tytuł profesora w 1988 roku.

Na Wydziale Metalurgicznym pełniła funkcję dyrektora Instytutu Technologii Metali i Kierownika Zakładu Metaloznawstwa i Obróbki Ciepłej.

Była współzałożycielem i członkiem Polskiego Towarzystwa Metaloznawczego, Polskiego Towarzystwa Stereologicznego oraz członkiem Komisji Oddziału PAN w Katowicach.

Głównym przedmiotem zainteresowań naukowo-badawczych Pani Profesor były problemy metaloznawstwa i obróbki cieplnej stali i staliw. W dorobku naukowo-badawczym z tej dziedziny opublikowała ponad 150 artykułów w czasopismach i materiałach konferencyjnych, wykonała wiele prac wdrożeniowych. Była promotorem czterech przewodów doktorskich i ponad 80 prac magisterskich.

Współpracowała z odlewniami staliwa w zakresie modyfikacji składu chemicznego oraz technologii wytwarzania. Przez wiele lat, do 2014 roku współpracowała z Przedsiębiorstwem Usług Naukowo-Technicznych *Pro Novum* Sp. z o.o. w zakresie oceny stopnia degradacji struktury i własności mechanicznych elementów urządzeń energetycznych długotrwale eksploatowanych w podwyższonych temperaturach. Pisała artykuły do Biuletynu *Pro Novum* w czasopiśmie „Energetyka”. Uczestniczyła, także aktywnie, w kilkunastu Sympozjach *Pro Novum*. W *Pro Novum* pracowało i pracuje nadal wielu jej studentów i doktorantów.

Pani Profesor w naszej pamięci pozostanie postacią o wielkiej wiedzy i doświadczeniu. Wzorem pracowitości, organizacji pracy, sumienności i kompetencji. Pozostanie w naszej pamięci jako życzliwy, Dobry Człowiek.

W dniu 17 lutego bieżącego roku na Cmentarzu Komunalnym w Częstochowie w ostatniej drodze towarzyszyli Pani Profesor, wraz z najbliższą rodziną, jej byli studenci, wypromowani doktorzy, współpracownicy i przyjaciele.



**Prof. dr hab. inż. Stefania Stachura**  
25.03.1934 – 14.02.2022