

Degradation of the turbogenerator materials in nuclear power plants and advanced repair technologies of hydrogen cooled rotor

Degradacja materiałów turbogenerators elektrowni jądrowej i zaawansowane technologie remontu wirnika chłodzonego wodorem



DOI: 10.15199/62.2025.12.?

A review, with 42 refs., of simultaneous processes for degradn. of the hydrogen-cooled flow turbogenerator materials and methods for their general and routine overhauls by sealing the damaged assembly (rotor-retaining ring), or cutting the degraded metal by using ecol. fluids.

Keywords: hydrogen corrosion, material degradation, operating defects, rotor repair technology

W trakcie długotrwałej (trwającej nawet 60 lat) eksploatacji elektrowni jądrowych¹⁻⁸⁾ w materiałach konstrukcyjnych (w obiegach pierwotnym i wtórnym) zachodzą zmiany strukturalne (degradacja, w tym kruchość wodorowa i radiacyjna), obserwowane na nano-, mezo-, mikro- i makro-poziomach²⁻¹⁹⁾, które są spowodowane oddziaływaniem naprężeń mechanicznych w środowisku wodoronośnym w podwyższonych temperaturach. Badanie takich zjawisk jest głównym zadaniem fizyko-chemicznej mechaniki materiałów (FHMM). Zgodnie z jej zasadami podczas eksploatacji stalowych urządzeń w wodzie lub innych środowiskach zawierających wodór następuje degradacja materiału konstrukcyjnego spowodowana przede wszystkim kruchością wodorową. Pękanie korozyjne pod naprężeniem

Podczas eksploatacji materiałów konstrukcyjnych turbin w wodzie lub środowiskach zawierających wodór następuje degradacja ich struktury spowodowana kruchością wodorową. W celu oceny możliwości bezpiecznej i długotrwałej eksploatacji elementów konstrukcyjnych narażonych na pęknięcia istotne jest uwzględnianie zmian fizycznych i mechanicznych charakterystyk tych materiałów. Przedstawiono przegląd technologii chłodzenia wodorem turbogenerators przepływowego i jego remontu kapitalnego poprzez plombowanie uszkodzonego zespołu „wirnik-pierścien” z wykorzystaniem ekologicznych cieczy smarująco-chłodzących.

Słowa kluczowe: wodór, degradacja, uszkodzenia eksploatacyjne, technologia remontu wirnika

SCC (*stress corrosion cracking*) wysokowytrzymałych stali w środowiskach wodnych i wodorowych ma decydujące znaczenie dla bezpieczeństwa elektrowni jądrowych⁷⁻¹⁰⁾. Ustalono, że SCC wysokowytrzymałych stali w wodzie jest jednym z rodzajów spowodowanego wodorem pękania HIC (*hydrogen-induced cracking*). W takim przypadku lokalny wskaźnik pH środowiska w szczelinach i pęknięciach na powierzchni stali może obniżyć się do ok. 3,5¹⁹⁾. Tworzą się wówczas warunki do wydzielania wodoru i zmiany potencjału elektrochemicznego.

W wielu badaniach wykazano, że progowy współczynnik intensywności naprężeń (K_{ISCC}) w warunkach SCC zmniejsza się ze wzrostem granicy plastyczności stali (σ_p) i dla niektórych wysokowytrzymałych stali ustalono



Prof. dr hab. inż. Alexander BALITSKII (ORCID: 0000-0002-3841-5493) w roku 1976 ukończył studia na Wydziale Fizycznym Uniwersytetu Lwowskiego. Stopień doktora nauk fizyko-matematycznych uzyskał w 1982 r. na Wydziale Fizycznym Uniwersytetu Kiszyniowskiego, a stopień doktora habilitowanego nauk technicznych uzyskał w 2000 r. w Fizyko-Mechanicznym Instytucie im. G.V. Karpienki we Lwowie (w którym był zatrudniony od 1976 r.). Od 2002 r. pracuje na stanowisku profesora na Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie. Tytuł profesora otrzymał postanowieniem Prezydenta RP w 2010 r. Specjalność – materiałoznawstwo, technologie wodorowe, degradacja materiałów konstrukcyjnych.



Doc. dr Valentyna BALITSKA (ORCID: 0000-0002-9744-814) w roku 1976 ukończyła studia na Wydziale Fizycznym Uniwersytetu Lwowskiego. Stopień doktora nauk fizyko-matematycznych uzyskała w 1998 r. w Instytucie Optyki Fizycznej im. O.G. Vlokhwa we Lwowie. Tytuł docenta uzyskała w 2007 r. W latach 1976–2005 była zatrudniona na stanowiskach inżyniera, starszego badacza naukowego Instytutu Materiałów „Carat” we Lwowie. Obecnie pracuje w Katedrze Fizyki i Chemii Spalania Lwowskiego Państwowego Uniwersytetu Bezpieczeństwa Życia. Specjalność – optyka, fizyka laserowa, degradacja radiacyjna materiałów funkcjonalnych i konstrukcyjnych.

*** Adres do korespondencji:**

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, al. Piastów, 19, 70-310 Szczecin, tel.: (91) 449-49-47, e-mail: abalicki@zut.edu.pl

relacje pomiędzy parametrami SCC i charakterystykami wytrzymałości tych materiałów w zależności od stężenia w nich wodoru¹⁸⁻³²). Zdolność do długotrwałej pracy elementów konstrukcyjnych ze stali stopowych i zwykłych w urządzeniach energetycznych zależy od intensywności zarodkowania pęknięć w elementach konstrukcji.

Zasady oceny podatności materiałów na degradację

Przy ocenie zdolności materiałów konstrukcyjnych do długookresowej pracy należy brać pod uwagę podatność tych materiałów na zmiany struktury i właściwości. W celu przygotowania numerycznego podejścia i opracowania schematu oceny możliwości bezpiecznej i długotrwałej eksploatacji elementów konstrukcji narażonych na pęknięcia istotne jest uwzględnienie zmian fizycznych i mechanicznych charakterystyk użytych materiałów. Zgodnie z zasadami FHMM i mechaniki pęknięcia znajomość ciągłości materiałów umożliwia dogłębną ocenę warunków rozprzestrzeniania się w nich pęknięć i metodami numerycznymi można przewidywać zachowanie się konstrukcji w trakcie długotrwałej eksploatacji. Zasadniczymi parametrami ich charakterystyk są wartości współczynnika intensywności naprężeń K_{IC} i δ_{IC} .

Po tym, w jaki sposób wyznaczone parametry wymiarów i konfiguracji szczelinopodobnych defektów, granica plastyczności i ciągłość materiału w obszarze defektu zależą od płaskonapreżeniowego lub płaskoodkształceniowego stanu położenia napiecia, można oczekiwać pęknięcia i naruszenia spójności również przy niskich naprężeniach. Potrzebne jest wówczas zastosowanie metody liniowej analizy odpowiednich równań i wyznaczenie wartości K . Do środowisk aktywnych powierzchniowo stosowanych w nowoczesnej energetyce należą zarówno środowiska gazowe (gazy spalinowe, wodór, tlen, amoniak, tlenki siarki i tlenki węgla w podwyższonych temperaturach), środowiska ciekłe (roztwory chlorków, w tym chlorku miedzi, woda morska, roztwory kwasów, zasady, płyny organiczne), jak i środowiska stopionego metalu (nośniki ciepła,

w tym ołów). Zastosowanie mechaniki pęknięcia pozwala na ocenę przydatności materiałów do długookresowej pracy (z uwzględnieniem ich degradacji) oraz konieczności planowych i awaryjnych remontów konstrukcji elektrowni ciepłych i jądrowych^{16, 17, 39-42}). Odporność na kruchość wodorową jest podstawą do przewidywania podatności materiałów na zmiany strukturalne^(3, 8, 41, 42).

Badano metale, z których wykonane były pierścienie wirnikowe o dwóch początkowych poziomach wytrzymałości (950 i 1150 MPa), po okresie (τ) ich eksploatacji¹⁸). Pierścienie wycofano z użytkowania po wykryciu na ich powierzchni defektów o krytycznych rozmiarach. Wykazano, że wpływ ich eksploatacji w środowisku wodoru na pęknięcie jest znaczący (rys. 1).

Rozprzestrzenianie się pęknięcia w rurociągach, pierścieniach i w innych elementach konstrukcji bloków energetycznych można oceniać za pomocą równania kryterialnego¹⁸⁾ dla mechaniki pęknięcia ciał (1):

$$\left(\frac{K_{Imax}(a, \sigma)}{K_{IC}} \right)^4 + \left(\frac{\sigma}{\sigma_T} \right)^2 = 1 \quad (1)$$

w którym σ oznacza naprężenia eksploatacyjne nowstające w pierścieniu w płaszczyźnie pęknięcia, $K_{Imax} = K_{Imax}(\sigma, a)$ oznacza maksymalną wartość współczynnika intensywności naprężeń dla pęknięcia o długości a w warunkach obciążenia cyklicznego, σ_T granicę plastyczności, a K_K odporność na pęknięcie (ciągłość w warunkach płaskiego odkształcenia) materiału.

Naprężenia σ wyznacza się ze wzoru (2):

$$\sigma = \frac{pR}{t} \quad (2)$$

w którym p oznacza ciśnienie, R promień wewnętrzny, a t grubość pierścienia. Długość pęknięcia można wyliczyć ze wzoru (3):

$$a_* = \eta \frac{K_{IC}^2}{\sigma_*^2}, \quad (3)$$

w którym stała η zależy od elastycznych charakterystyk materiału i rozmiarów badanego elementu.

Zdolność do pracy konstrukcji inżynierskich z defektami typu pęknięć a określa się wzorami (4–7):

$$a < a_* \quad (4)$$

$$a_*^H = \eta \frac{K_{IC(H)}^2}{\sigma_{*(H)}^2} \quad (5)$$

$$a_*^A = \eta \frac{K_{IC(A)}^2}{\sigma_{*(A)}^2} \quad (6)$$

$$a_{*(H)} = a_{*(A)} \frac{K_{IC(H)}^2}{K_{IC(A)}^2} \quad (7)$$

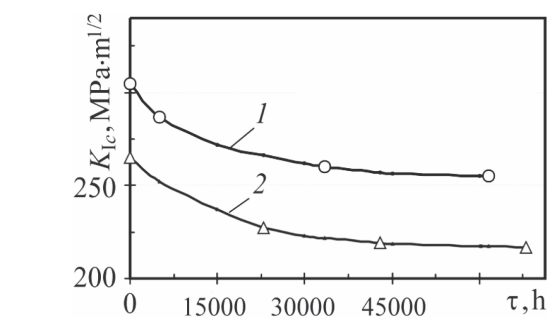


Fig. 1. Change in the static crack resistance (K_{IC}) of the 18Mn18Cr steel retaining rings after their long-term operation in hydrogen at 80°C: 1 – $\sigma_B = 950$ MPa, 2 – $\sigma_B = 1150$ MPa¹⁸⁾

Rys. 1. Zmiana odporności na pęknięcie statyczne (K_{IC}) stali 18Mn18Cr pierścieni wirnikowych podczas ich długotrwałej eksploatacji w wodrze w temp. 80°C: 1 – $\sigma_B = 950$ MPa, 2 – $\sigma_B = 1150$ MPa¹⁸⁾

Ocena krytycznych rozmiarów defektów wg tych kryteriów pozwala podczas remontów planowych podejmować decyzje o przedłużeniu bezpiecznej eksploatacji chłodzonych wodorem turbogeneratorów, biorąc pod uwagę zmiany

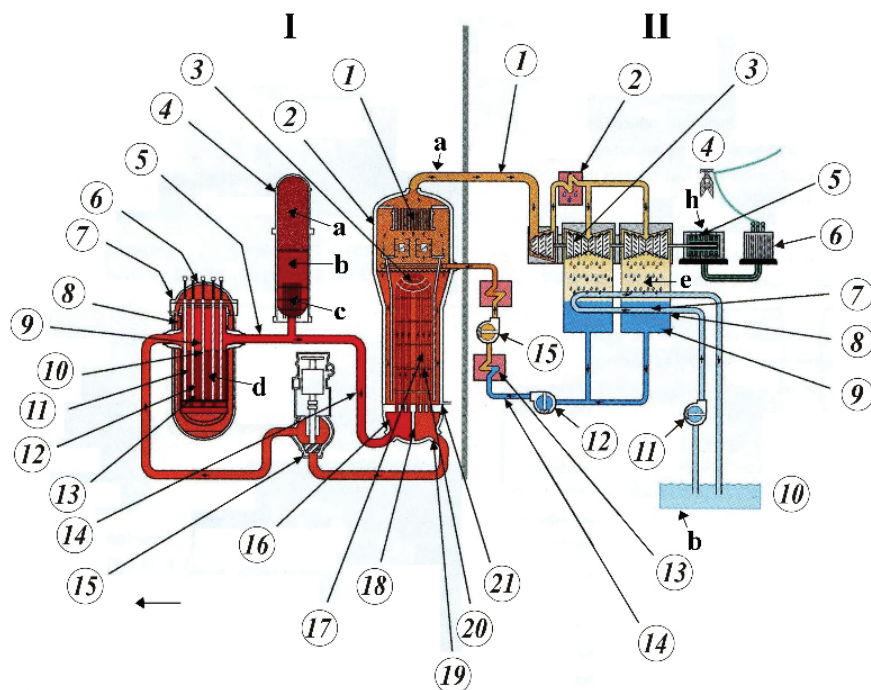


Fig. 2. Structural materials of pressurized water reactor (PWR) energy unit's components¹⁻⁸⁾. Primary circuit (I): 1 – steam dryers: steel 304 SS; 2 – steam generator (SG) vessel wall: low alloy steel; 3 – anti-vibration bars: alloy 600, 405 SS; 4 – pressurizer: alloy steel, clad: 308 (06H19G15), 309 SS; 5 – welds: SS to SS; 308 SS to LAS; 6 – control rod drive mechanism (CRDM) housing: alloy 600MA, 690TT; 7 – closure studs: alloyed steel; 8 – pressure vessel: alloyed steel, clad: 308, 309 SS; 9 – control rod: SS clad; B4C+SS poison; B4C + SS poison; 10 – core structural elements from high strength steel 304 SS; 11 – core structural elements from high strength steels A 286, X 750; 12 – fuel cladding: Z-4, advanced Zr alloys; 13 – fuel: UO_2 ; 14 – primary piping: 304, 316 SS; 15 – pump materials: high strength steels A 286, 17-4 PH, X 750; structural steels: 304, 316 SS; impeller housing: cast stainless steel; 16 – primary SG plenum clad: 308, 309 SS; 17 – SG tubing: alloys 600MA, 600TT, 690TT, 800; 18 – divider plate: alloy 600; 19 – welds: steel: 82, 182; 20 – tube supports: 405 SS; 21 – SG tube sheet: low alloy steel. Secondary circuit (II): 1 – steam pipe from carbon steel; 2 – moisture separator reheater (MSR): 439 ferritic steel; 3 – turbine: rotor: low alloy steel; blades: 17-4PH, 403 SS; blade attach: low alloy steel; diaphragm, Cr steel 17-4PH, 403 SS; 4 – generator: retaining ring: high strength, high toughness; copper conductors; 5 – electric power; 6 – power transformer; 7 – condenser tubes: Ti or SS tubes; 8 – condenser tube sheet: cathodic protection or titanium clad; 9 – condenser structural from the water side: carbon steel; 10 – cooling water: river or sea water, cooling tower; 11 – pump; 12 – condenser pump; 13 – preheater tubing: 304 SS; 14 – secondary feed-water piping: carbon steel; 15 – feed-water pump; a – steam, b – water, c – steam generator, h – hydrogen

Rys. 2. Materiały konstrukcyjne elementów elektrowni z reaktorem wodnym ciśnieniowym RWC¹⁻⁸⁾. Obieg pierwotny (I): 1 – osuszacz pary: stal 304 SS (0H18N9 wg PN); 2 – wytwornica pary: stal niskostopowa; 3 – płyty przeciwwibracyjne: stopy 600, 405 SS; 4 – zbiornik ciśnieniowy: stal stopowa, powłoka napawana: stal 308 (06H19G15), 309 SS; 5 – złącza spawane (stal nierdzewna + nierdzewna: 308 SS; stal zwykła + nierdzewna: 308, 309); 6 – mechanizm napędowy drążka sterującego (MNDS) obudowy reaktora: stop 600MA, 690TT; 7 – szpilki ochronne: stal stopowa; 8 – korpus reaktora: stal stopowa, pokryta powłoką: stal 308, 309 SS; 9 – pręt kontrolny: stal nierdzewna pokryta powłoką, B, C + SS; 10 – elementy konstrukcyjne reaktora z wysokowytrzymałej stali 304 SS; 11 – elementy konstrukcyjne reaktora z wysokowytrzymałej stali A 286, X 750; 12 – kaseta paliwa: Z-4, stopy Zr zaawansowane; 13 – paliwo: UO_2 ; 14 – rurociąg obiegu pierwotnego: stale 304, 316 SS; 15 – pompa cyrkulacyjna: wysokowytrzymałe stale A 286, 17-4 PH, X 750; stale konstrukcyjne 304, 316 SS; nierdzewne staliwo; 16 – pierwotna wykładzina wytwornicy pary: 308, 309 SS; 17 – rurki wytwornicy pary: stopy 600MA, 600TT, 690TT, 800; 18 – płyta rozdzielająca: stop 600; 19 – złącza spawane: stale SS: 82, 182; 20 – rurki wspierające: stal 405 SS; 21 – deska rurkowa: stal niskostopowa. Obieg wtórny (II): 1 – rurociąg pary ze stali węglowej; 2 – separator wilgoci-podgrzewacz (MSR): stal ferrytyczna 439; 3 – turbina, rotor: stal niskostopowa; łopatk: 17-4PH, 403 SS; kierunkowanie łopatek: stal niskostopowa; diafragma, stal chromowa; 4 – generator, pierścienie wirnikowe: materiał wysokowytrzymały o dużej ciągliwości; zwojnica miedziana; 5 – wyprodukowana energia elektryczna; 6 – transformator siłowy; 7 – rurki kondensatora: Ti, SS (tytanowe, nierdzewne); 8 – deska kondensatora: ochrona katodowa lub powłoka tytanowa; 9 – obudowa kondensatora od strony wody: stal węglowa; 10 – woda chłodząca: woda z rzeki lub woda morska, chłodnia kominowa; 11 – pompa; 12 – pompa kondensacyjna; 13 – nagrzewacz rurkowy: stal 304 SS; 14 – rurociąg wtórnego obiegu: stal węglowa; 15 – pompa wodna wtórnego obiegu; a – para, b – woda, c – generator pary, h – wodór

fizycznych i mechanicznych właściwości materiałów konstrukcyjnych (tabela 1).

W obiegach pierwotnym i wtórnym elektrowni jądrowej (rys. 2) stosowane są stale stopowe i niskostopowe z powłokami, superstopy i stopy nieżelazne oraz inne materiały funkcjonalne^{11-15, 40)}.

Celem i istotą przeprowadzonych analiz jest przedstawienie aktualnego podejścia do wyboru nowych zaawansowanych technologii planowych lub awaryjnych remontów wirnika chłodzonego wodorem.

Technologie chłodzenia wodorem turbogenerators przepływowego i jego remonty

W elektrowniach jądrowych w obiegu pierwotnym przyczyną degradacji materiałów jest kruchość radiacyjna (*swelling*), a w obiegu wtórnym dominuje korozja naprężeniowa i kruchość wodorowa. Oprócz napraw awaryjnych przeprowadzane są tu planowe remonty obiegu pierwotnego i wtórnego, wymagające wizualizacji i archiwizacji parametrów, dostępu do bieżących informacji ze stanowisk pracy, wdrożenia oprogramowania do interakcji rozproszonych podsystemów bezpieczeństwa radiacyjnego i pożarowego, kontroli zautomatyzowanego systemu sterowania turbiną oraz zautomatyzowanego systemu monitorowania wymienników ciepła generatora parowego, detektorów scyntylacji cieczy, użycia spektrometrów do systemu monitorowania zbiorników reaktora, stanowisk pracy systemu do przetwarzania i rejestrowania monitoringu jakości metali (system monitorowania zbiorników w obiegu reaktora), monitorowania rur generatora pary za pomocą naddźwiękowego przyrządu, systemu sterowania awaryjnymi kondensatorami/wymiennikami ciepła oraz systemu monitorowania zaworów płaszcza reaktora za pomocą emisji akustycznej (rys. 2). Niskie stężenie wodoru w konstrukcji stalowej nie ma istotnego wpływu na charakterystyki sprężyste. W przypadku badań nieniszczących stali odkształconej plastycznie obecność wodoru przyczynia się do wzrostu emisji magneto-akustycznej o 23% w porównaniu z materiałem niewodornionym, co należy brać pod uwagę przy opracowy-

Table 1. Physical and mechanical characteristics of retaining ring steels for turbogenerators on air (A) and in hydrogen (H)

Tabela 1. Fizyczne i mechaniczne charakterystyki stali wirnikowych turbogeneratorów na powietrzu (A) i w wodorze (H)

Stal	E, GPa	σ_B , MPa	σ_T , MPa	δ , %	ψ , %	K_{Ic} , MPa/m
8Mn-8Ni-4Cr	189 (A) 185 (H)	1157(A) 1002(H)	925 (A) 800 (H)	30 (A) 22 (H)	60 (A) 55 (H)	200 (A) 160 (H)
18Mn-18Cr	200 (A) 197 (H)	1197(A) 1152(H)	1136 (A) 1121 (H)	29 (A) 21(H)	64 (A) 60 (H)	268 (A) 224 (H)

E – moduł Younga, ψ – przewężenie, δ – wydłużenie

waniu nieniszczących metod kontroli lokalnego stężenia wodoru w metalach bloków energetycznych³⁷.

Pomimo dużej pojemności cieplnej wodoru (29,83 J/(mol·K)), który jest dostarczany do turbogeneratorsa pod ciśnieniem 0,5 MPa, a także jego innych zalet, takich jak mała gęstość (14-krotnie mniejsza od gęstości powietrza) i o 44% większy (w porównaniu z powietrzem) współczynnik przenikania ciepła, aktualna pozostaje kwestia zastąpienia chłodzącego ośrodka wodorowego w szczelinie magnetycznej turbogeneratorsa (TG) innym czynnikiem. Skuteczne rozwiązanie tego problemu pokazano na przykładzie TG Topair 23 (rys. 3). Jednocześnie liczne połączenia w ścieżkach przepływu środka chłodzącego wirnik, które są narażone na duże obciążenia mechaniczne, stanowią dla konstruktorów w pełni uzasadnioną barierę psychologiczną związaną z możliwością stosowania chłodzenia wodnego⁶.

Opracowanie niezawodnych systemów wodnego chłodzenia rdzenia stojana i uzwojeń wirnika jest zadaniem zupełnie nowym i technicznie złożonym. W tradycyjnych konstrukcjach stosowanych w Szwajcarii (BBC), Niemczech (KWU), Szwecji (ASEA), a także w Polsce (Électricité de France – EDF, Jeneral Electric, Alstom, ABB;

Table 2. Chemical composition of the material of the repaired rotor and the installed seal, % by mass

Tabela 2. Skład chemiczny materiału remontowanego wirnika i zainstalowanej plomby, % mas.

Pierwiastek	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Mo
Materiał wirnika	0,1	1,0	0,6	94,7	3,0	0,1	0,5
Materiał plomby	0,05	1,0	0,7	96,7	1,1	-	0,45

Elbląg, Wrocław i Lubliniec) oraz na Ukrainie (zakłady Elektrowazhmash w Charkowie) woda chłodząca za pomocą pompy jest dostarczana pod ciśnieniem do osiowego kanału trzonu wału i wchodzi do uzwojenia poprzez kanały promieniowe w trzonie. Podgrzana woda jest następnie odprowadzana do szybu i na zewnątrz przez rury spustowe. W wyniku działania dużych sił odśrodkowych ciśnienie wody w kanałach uzwojenia i przewodach przyłączeniowych znacznie wzrasta, co może prowadzić do uszkodzenia sieci wodociągowej⁶. Zaawansowana technologia niezawodnych systemów wodorowego chłodzenia wirnika i utrzymanie jego ruchu podczas długotrwałej eksploatacji jest zadaniem technicznie złożonym (rys. 4).

Przykładowe typy awaryjnych uszkodzeń turbogeneratorów (rys. 5) świadczą o niezbędności analizy rozmiarów i typów defektów za pomocą kryteriów mechaniki pęknięcia oraz oceny stopnia degradacji w badaniach niszczących i nieniszczących. Na podstawie tych wstępnych ocen dochodzi do podjęcia decyzji o stosowaniu znanych technologii remontowych lub zaproponowanie technologii innowacyjnych.

Poważnie uszkodzone pierścienie wirnikowe i szyny miedziane (rys. 5) zazwyczaj podlegają wymianie, ale w przypadku wirnika po raz pierwszy w Alstom Power (Wrocław) zamontowano wstawkę (plombę), która wypełniła ubytek materiału (stali wirnikowej). O tym, jak poważne było to uszkodzenie świadczy masa wstawianego materiału (20 kg)^{15, 16}. Przed tym dokonano pomiarów twardości w miejscach uszkodzenia, a także sprawdzono, czy nie ma pęknięć centralnego otworu wirnika (o długości do 11 m). Na uniikatowej tokarce sprawdzono dysbalans jego mas obrotowych. Zaproponowano zaawansowaną technologię obróbki wirnika skrawaniem w hali turbinowej lub remontowej za pomocą niepalnych ekologicznych cieczy chłodząco-smarujących, w celach higienicznych i przeciwpożarowych (bez stosowania azbestu). Dodatkowo zastosowano technologię mocowania za pomocą specjalnego zamka i przeprowadzono analizę konstrukcji wkładki w uszkodzonym miejscu wału wirnika, sposobu mocowania oraz zgodności charakterystyki uszczelnienia z właściwościami bazowego metalu wirnika (tabele 2 i 3). Po obróbce cieplnej wału wirnika w miejscu uszkodzonej blachy przewodu prądowego opracowano konstrukcję wkładki. Przeprowadzono analizę chemiczną metalu wkładki oraz badania jego właściwości magnetycznych. Wyniki analizy chemicznej i badania właściwości magnetycznych potwierdziły jednorodność obu metali (wkładki i wirnika głównego). Analiza składu chemicznego, badania

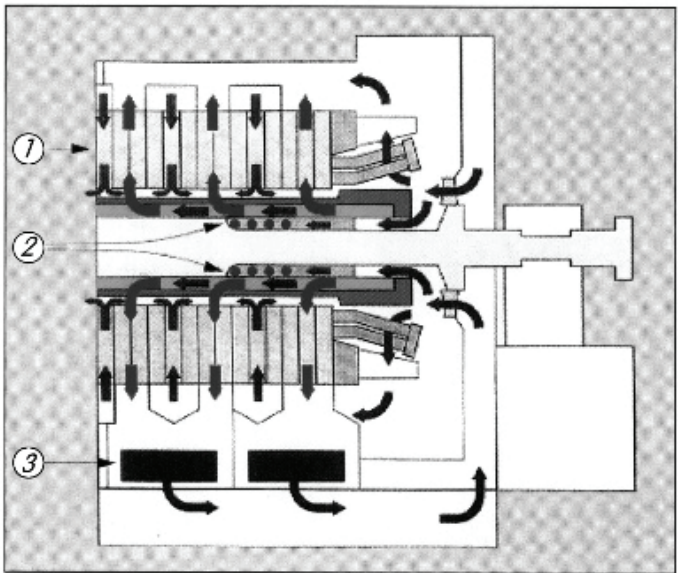


Fig. 3. Cooling principle of the Topair 23 turbogenerator⁶: 1 – stator venting chamber; 2 – rotor sub-slots; 3 – cooler

Rys. 3. Schemat ideowy chłodzenia TG Topair 23⁶: 1 – komora wentylacyjna stojana; 2 – przestrzeń podrowkowa wirnika; 3 – komora chłodnicza

Table 3. Material properties of the repaired rotor and the installed seal

Tabela 3. Właściwości materiału remontowanego wirnika i zainstalowanej plomby

Właściwość	Gęstość	Moduł ścinania	Moduł sprężystości normalnej	Granica wytrzymałości	Granica plastyczności	Indukcja pola magnetycznego	Względne ubytki
Jednostka	g/cm ³	kg/mm ²	kg/mm ²	MPa	MPa	Gs	Wt/kg
Materiał wirnika 18029	7,85	8300	19686	950	810	16300	6,1
Materiał plomby na wirnik 18029	7,85	8300	19686	960	820	16200	6,0

Uwagi: ^aprzy natężeniu pola magnetycznego H = 1000 A/cm; bprzy 16300 Gs

wytrzymałości i innych właściwości przy znacznych siłach odśrodkowych (powstających przy obrotach wirnika 50 Hz) pozwoliła wdrożyć w elektrowni jądrowej w Ukrainie dobrze przemyślaną i sprawdzoną technologię (rys. 6).

Technologię chłodzenia wodorem turbogeneratorskiego przepływowego i jego remontu kapitalnego poprzez plombowanie (w przyszłości możliwe za pomocą zaawansowanych technologii przyrostowych 3D druku) uszkodzonego zespołu „wirnik-pierścień” oraz remontu planowanego (skrawanie zdegradowanego metalu) z wykorzystaniem zawierających wodór ekologicznych cieczy smarujących

-chłodzących (CSH) bezpośrednio w hali turbinowej już wcześniej przedstawiono szczegółowo w wielu źródłach literaturowych^{33–36, 38, 39, 41, 42}.

Nasycenie stali wodorem podczas długotrwałej eksploatacji może znacząco zmienić właściwości matrycy metalowej, węglików, siarczków i związków międzymetalicznych, głównie poprzez kruchość wodorową, zmiany właściwości elektrochemicznych i powstawanie lokalnych defektów. Zmiany te mogą mieć znaczący wpływ na ogólne właściwości mechaniczne stali, w tym jej twardość, wytrzymałość i plastyczność, co wpływa na obróbkę skrawaniem.

Próbki materiału wycięte z obszarów o różnym stopniu degradacji urządzeń energetycznych i o różnym czasie eksploatacji charakteryzują się odpornością na korozję do 17% mniejszą niż pierwotna odporność stali. Podczas technologii naprawczej (obróbki skrawaniem) odnotowano wzrost zawartości wodoru w wiórach, i to zarówno w tych powstałych bezpośrednio podczas obróbki, jak i w tych pochodzących z uszkodzonych obszarów wału wirnika. W obszarach na granicy stref nienaruszonych i uszkodzonych stężenie wodoru wynosiło do 7,12 ppm, a w obszarach najbardziej uszkodzonych do 7,94 ppm. Ponadto stwierdzono, że wzrost maksymalnego stężenia wodoru w wiórach zbiega się ze wzrostem chropowatości powierzchni. Może to wskazywać na istnienie zakresu, w którym oddziaływanie wodoru z CSH i stopniowe nawilżanie elementów konstrukcyjnych stali zapewnia optymalne wartości chropowatości podczas obróbki wału wirnika turbogeneratorskiego.

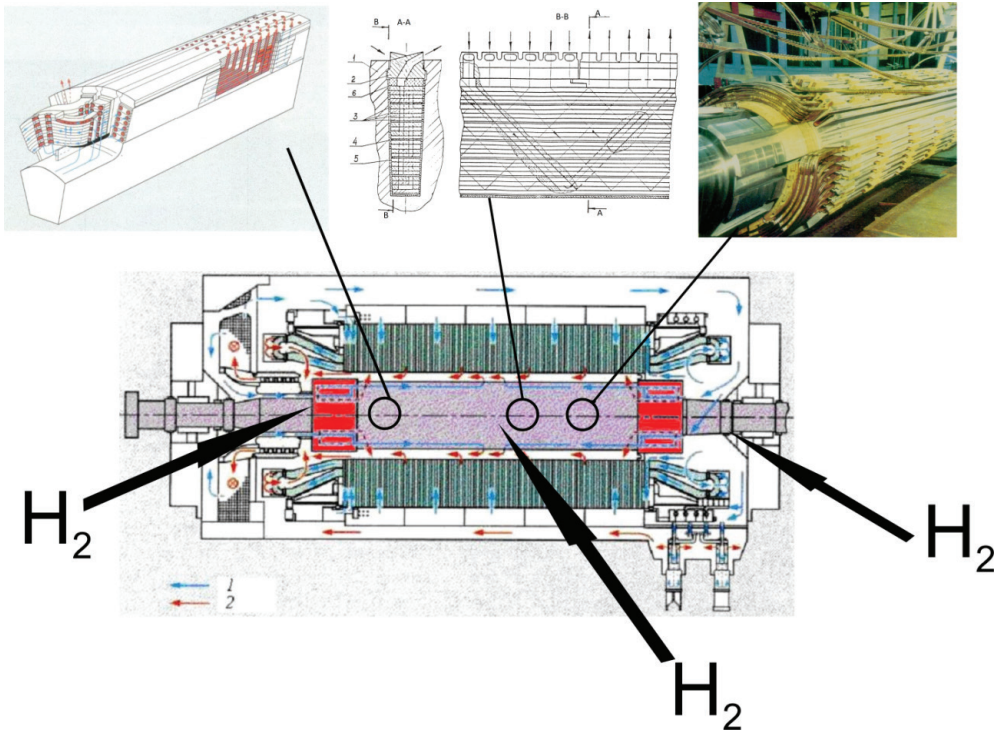


Fig. 4. Hydrogen cooling system of the modern turbogenerator (TG TVV-1000-4UZ) at the nuclear power plant^{1–6)}; bottom: from the left – ring, rotor, stator with bearing cover; top – rotor fragment with rails, copper winding, diagram of hydrogen flows through channels in the middle of rails and wedges (cross-section: A-A, B-B; 1–5 turns of the coil and insulation), technological process of stacking; 1 – cold (at the inlet after cleaning and cooling), 2 – warm (at the outlet) gaseous hydrogen; venting channels of synchronous 3-phases TG TVV-1000-4UZ: 1 – rotor shaft; 2 – wedge; 3 – coil loop; 4 – coil insulation; 5 – case insulation; 6 – under edge gasket (a) and corrosion damage of TVF-100 copper conductors (b)

Rys. 4. Układ chłodzenia wodorem turbogeneratorskiego TG TVV-1000-4UZ w elektrowni jądrowej^{1–6)}; na dole: od lewej: pierścień, wirnik, stator z pokrywą łożysk; na górze – fragment wirnika z szynami, uzwojeniem miedzianym, schemat przepływu wodoru kanałami w środku szyn i klinów (przekrój: A-A, B-B; 1–5 obroty cewki izolacji), proces technologiczny układania szyn; 1 – zimny (na wlocie po oczyszczalni i chłodzeniu), 2 – ciepły (na wylocie) wodór gazowy. Kanały wentylacyjne synchronicznego trójfazowego TG TVV-1000-4UZ: 1 – wał wirnika; 2 – klin; 3 – zwój cewki; 4 – izolacja; 5 – izolacja; 6 – uszczelka klinowa (a) i korozyjne uszkodzenie miedzianych przewodników TVF-100 (b)

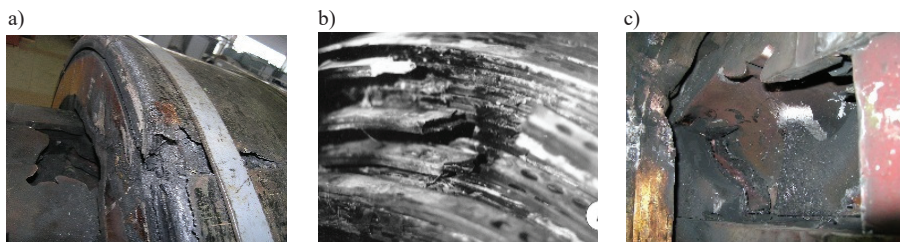


Fig. 5. Hydrogen, electro-erosion and corrosion damages of the retaining ring (a), the busbars (copper wires) of (b) and rotor body (c) in the range of hydrogen compaction

Rys. 5. Uszkodzenia wodorowe, elektroerozyjne i korozyjne pierścieni (a), szyn (przewodów miedzianych) (b) i wirnika (c) w obszarze uszczelnienia wodorowego

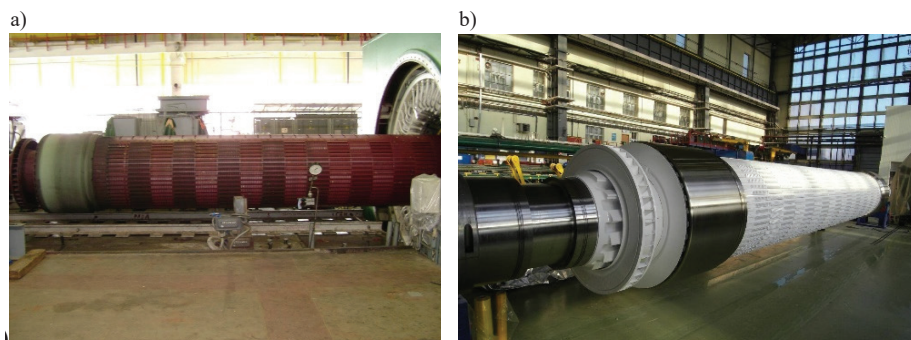


Fig. 6. Damaged rotor in the turbine hall (a) and in the repair hall in Wrocław (b) after applying new repair technology

Rys. 6. Uszkodzony wirnik w hali turbinowej elektrowni (a) i w hali remontowej we Wrocławiu po remoncie kapitalnym wykonanym wg nowej technologii (b)

Identyfikacja i monitorowanie procesów zużycia za pomocą wizji komputerowej i analizy cząstek jest skutecznym narzędziem zapobiegania katastrofalnym uszkodzeniom. Opracowanie i wdrożenie metod przesiewowych (opartych na morfologii wiórów) pozwala na wczesne wykrywanie uszkodzeń, co ma kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa konstrukcji bloków energetycznych.

Duże znaczenie ma wykrywanie zmian mikrostrukturalnych wywołanych przez wodór w stali wirników, szczególnie w warunkach długotrwałej eksploatacji w środowiskach zawierających wodór. W ramach protokołów eksploatacji turbogeneratorów należy wprowadzić regularną analizę wiórów w celu monitorowania stadium degradacji materiału.

Wnioski

W trakcie długotrwałej eksploatacji elektrowni jądrowych w materiałach konstrukcyjnych zachodzą zmiany spowodowane oddziaływaniem naprężeń mechanicznych i środowiska wodoronośnego w podwyższonych temperaturach. W obiegach pierwotnym i wtórnym elektrowni jądrowej materiały konstrukcyjne ulegają degradacji wodorowej i wyniki oceny jej zaawansowania na podstawie kryteriów mechaniki pękania stanowią podstawę dla podejmowania decyzji o przeprowadzaniu planowych lub awaryjnych remontów w celu przedłużenia bezpiecznej i niezawodnej eksploatacji urządzeń.

W warunkach lokalnej infrastruktury hali turbinowej efektywnie przeprowadzono kapitalny remont turboge-

neratora przepływowego poprzez plombowanie uszkodzonego zespołu „wirnik-pierścien”. W ramach planowanych remontów usuwano skrawaniem warstwy zdegradowanego metalu z wykorzystaniem ekologicznych cieczy smarująco-chłodzących.

Autorzy pragną podziękować Polskiej Akademii Nauk (PAN) i Narodowej Akademii Nauk Ukrainy (NANU) za wsparcie w ramach wspólnego polsko-ukraińskiego projektu wymiany akademickiej pt. „Ocena zmian eksploatacyjnych nanostruktury i właściwości materiałów w instalacjach „zielonego” wodoru na lata 2025–2027, zgodnie z umową o współpracy naukowej między PAN a NANU.

Otrzymano: 02-06-2025

Zrecenzowano: 16-06-2025

Zaakceptowano: 19-11-2025

Opublikowano: 17-12-2025

LITERATURA

- [1] T. Allen, J. Busby, M. Meyer, D. Petti, *Materials Today* 2010, **13**, nr 12, 14.
- [2] A. Balitskii, A. Syrotyuk, L. Ivaskevich, O.A. Balitskii, P. Kochmanski, V.O. Kolesnikov, *Int. J. Hydrogen Energy* 2024, **82**, 320; doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.390.
- [3] A.I. Balitskii, V.O. Kolesnikov, M.R. Havrilyuk, V.O. Balitska, I.V. Ripey, M.A. Królikowski, T.K. Pudlo, *Energies* 2025, **18**, 4368; doi.org/10.3390/en18164368.
- [4] A. Balitskii, *Proc. Struct. Int.* 2019, **16**, 134; doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.032.
- [5] A. Balitskii, O. Krohmalny, I. Ripey, *Int. J. Hydrogen Energy* 2000, **25**, nr 2, 167; doi.org/10.1016/S0360-3199(99)00023-3.
- [6] G. Bertagnolli, *The ABB approach*, Milano 1996, 45.
- [7] J. Adamczyk, K. Szkaradek, *Materiały metalowe dla energetyki jądrowej*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1992.
- [8] R. Melechow, K. Tubielewicz, *Materiały stosowane w energetyce jądrowej: gatunki, właściwości, degradacja*, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2002.
- [9] A. Zieliński, *Niszczenie wodorowe metali nieżelaznych i ich stopów*, Gdańskie Towarzystwo Naukowe, Gdańsk 1999.
- [10] O.I. Balyts'kyi, O.O. Krokhmal'nyi, *Mat. Sci.* 1999, **35**, nr 3, 389; doi.org/10.1007/BF02355483.
- [11] O.I. Shpotyuk, V.O. Balitska, M.M. Vakiv, L. Shpotyuk, *Sens. Actuators A Phys.* 1998, **68**, 356; doi.org/10.1016/S0924-4247(98)00067-3.
- [12] V. Balitska, Y. Shpotyuk, J. Filipecki, O. Shpotyuk, M. Iovu, *J. Non-Cryst. Solids* 2011, **357**, 487; doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2010.06.052.
- [13] V.O. Balitska, R. Golovchak, A. Kovalskiy, E. Skordeva, O. Shpotyuk, *J. Non-Cryst. Solids* 2003, **326–327**, 130; doi.org/10.1016/S0022-3093(03)00391-0.
- [14] O. Shpotyuk, Z. Lukáčová-Bujňáková, P. Baláž, Y. Shpotyuk, P. Demchenko, V. Balitska, *Adv. Powder Technol.* 2020, **31**, nr 8, 3610; doi.org/10.1016/j.apt.2020.07.008.
- [15] Y. Shpotyuk, P. Demchenko, O. Shpotyuk, V. Balitska, C. Boussard-Pledel, B. Bureau, Z. Lukáčová-Bujňáková, P. Baláž, *Materials* 2021, **14**, nr 16, 4478; doi.org/10.3390/ma14164478.
- [16] B. Kaniewska, *Generacja. Alstom Power* 2010, nr 8, 15.
- [17] B. Kaniewska, *Generacja. Alstom Power* 2011, nr 8, 7.
- [18] A.I. Balitskii, V.V. Panasyuk, *Strength Mat.* 2009, **41**, nr 1, 52; doi.org/10.1007/s11223-009-9097-4.
- [19] J.W. Wyrzykowski, E. Pleszakow, J. Sieniawski, *Odształtowanie i pękanie metali*, WNT, Warszawa 1999.
- [20] A. Neimitz, *Mechanika pękania*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998.

- [21] BS 7448-1:1991, *Methods of test for plane strain fracture toughness (K_{IC}) of metallic materials*, British Standards Institution.
- [22] B.S. Kang, B.G. Park, I.S. Hwang, Proc. Int. Symp. Plant Aging and Life Predictions of Corrodible Structures, Sapporo, Japan, 5–18 maja 1995 r., 803.
- [23] O.O. Balyts'kyi, *Mater. Sci.* 2004, **40**, 706; doi.org/10.1007/s11003-005-0105-y.
- [24] M. Harzenmoser, M. Diener, Proc. of the 18th Int. SAMPE Europ. Conf. of the Society for the Advancement of Materials and Process Engineering, Paris, La Defense, 23–25 kwietnia 1997 r., 123.
- [25] H. Feichtinger, G. Stein, I. Hucklenbroich, Proc. of the Generator Retaining Ring Workshop, Miami, USA, 8–9 grudnia 1997 r., 1.
- [26] M. Harzenmoser, *Mater. Manufact. Proc.* 2004, **19**, nr 1, 179.
- [27] T. Zhang, W.Y. Chu, K.W. Gao, L.J. Qiao, *Mat. Sci. Eng.* 2003, **A-347**, 291.
- [28] H.L. Li, K.W. Cao, L.J. Qiao, Y.B. Wang, W.Y. Chu, *Corrosion* 2001, **57**, nr 4, 295.
- [29] Y. Pauleau, *Chemical physics of thin film deposition processes for micro- and nano-technologies*, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [30] J.D. Albright, D.R. Albright, EPRI Int. Conf., Orlando, 20 stycznia 2003 r.
- [31] J. Bothwell, *EPRI On-Line Monitoring and Condition Assessment Workshop*, Nashville, USA, 26 sierpnia 2003 r.
- [32] A.I. Balitskii, L.M. Ivaskevich, O.A. Balitskii, *Eng. Fracture Mech.* 2022, **260**, 108168, 15; doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.108168.
- [33] A.I. Balitskii, V.V. Dmytryk, L.M. Ivaskevich, O.A. Balitskii, A.V. Glushko, L.B. Medovar, K.F. Abramek, G.P. Stovpchenko, J.J. Elias, M.A. Krolikowski, *Energies* 2022, **15**, 6006; doi.org/10.3390/en15166006.
- [34] A.I. Balitskii, M.R. Havrilyuk, V.O. Balitska, V.O. Kolesnikov, L.M. Ivaskevych, *Energies* 2023, **16**, 535; doi.org/10.3390/en16010535.
- [35] A.I. Balitskii, A.M. Syrotyuk, M.R. Havrilyuk, V.O. Balitska, V.O. Kolesnikov, L.M. Ivaskevych, *Energies* 2023, **16**, 7851; doi.org/10.3390/en16237851.
- [36] A.L. Balitskii, A.M. Syrotyuk, V.O. Kolesnikov, V.O. Balitska, L.M. Ivaskevych, M.R. Havrilyuk, *Materials* 2024, **17**, 6257; doi.org/10.3390/ma17246257.
- [37] V. Skalskyi, Z. Nazarchuk, O. Stankevych, B. Klym, *Int. J. Hydrogen Energy* 2023, **48**, nr 15, 6146; doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.139.
- [38] A.I. Balitskii, A.M. Syrotyuk, M.R. Havrilyuk, V.O. Balitska, V.O. Kolesnikov, L.M. Ivaskevych, *Energies* 2023, **16**, 7851; doi.org/10.3390/en16237851.
- [39] A.I. Balitskii, M.R. Havrilyuk, V.O. Balitska, V.O. Kolesnikov, L.M. Ivaskevych, *Energies* 2023, **16**, 535; doi.org/10.3390/en16010535.
- [40] V. Balitska, J. Filipecki, A. Ingram, O. Shpotyuk, *Phys. Status Solidi C* 2007, **4**, 1317; doi.org/10.1002/pssc.200673737.
- [41] O.A. Balitskii, V.O. Kolesnikov, A.I. Balitskii, J.J. Elias, M.R. Havrilyuk, *Arch. Mat. Sci. Eng.* 2020, **104**, nr 2, 49; doi.org/10.5604/01.3001.0014.4894.
- [42] A. Balitskii, M. Kindrachuk, D. Volchenko, K.F. Abramek, O. Balitskii, V. Skrypnyk, D. Zhuravlev, I. Bekish, M. Ostashuk, V. Kolesnikov, *Energies* 2022, **15**, nr 1, 59; doi.org/10.3390/en15010059.