

■ Dr hab. inż. Krzysztof Radwański, dr hab. inż. Radosław Swadźba,
dr inż. Hanna Purzyńska, prof. dr hab. inż. Adam Zieliński,
Sieć Badawcza Łukasiewicz - Górnośląski Instytut Technologiczny



Rozwój materiałów do zastosowań w środowiskach wodorowych w działaniach Łukasiewicz - GIT

Ostatnie lata są związane z transformacją energetyczną. Terminologia ta odnosi się do zmiany sposobu produkowania, przesyłania i zużywania energii, tak aby zastąpić paliwa kopalne czystszyimi i bardziej zrównoważonymi źródłami energii. Inicjatorem tych zmian jest Rada Europejska, która obrata za cel zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych o co najmniej 55% do 2030 r. w porównaniu z poziomem z 1990 r.¹

Równocześnie założyła osiągnięcie do 2050 r. neutralności klimatycznej, przez którą rozumie się równowagę między emitowanymi gazami cieplarnianymi, a ich składowaniem lub pochłanianiem przez zbiorniki wodne, lasy, czy gleby. Cele te są wiążące dla Unii Europejskiej i jej państw członkowskich, dlatego też w ostatnich latach zauważalny jest intensywny rozwój odnawialnych źródeł energii (OZE) i inwestycji w energetykę wiatrową, solarną, wodną, geotermalną, czy pochodzącą z biomasy.

Ze względu na konieczność zapewnienia bezpieczeństwa dostaw energii elektrycznej i w związku z brakiem rozwiniętych sposobów magazynowania energii na dużą skalę oraz usług bilansujących systemy elektroenergetyczne,

nieograniczony rozwój OZE nie jest możliwy. Wodór, jako magazyn energii, może odegrać istotną rolę w procesie osiągnięcia neutralności klimatycznej. Unia Europejska, dostrzegając te ograniczenia, opublikowała w 2020 r. strategię wodorową², w ślad za którą Ministerstwo Klimatu i Środowiska wydało „Polską strategię wodorową do 2030 r. z perspektywą do 2040 r.”³. Dokumenty te określają rozwój gospodarki wodorowej w Europie i w Polsce.

Wodór znajduje coraz szersze zastosowanie w gospodarce, jednak kluczowe znaczenie w jego rozwoju mają obecnie technologie związane z jego produkcją, transportem oraz magazynowaniem. Szczególną rolę w tym obszarze odgrywają materiały konstrukcyjne,

zwłaszcza stale, które stanowią podstawę infrastruktury wodorowej.

Rozwój gospodarki wodorowej jest jednoznacznie związany z postępowaniem w dziedzinie materiałów stosowanych do wytwarzania, przesyłu i magazynowania wodoru. Dotyczy to materiałów wykorzystywanych zarówno w elektrolizatorach, jak i rurociągach oraz elementach zbiorników magazynowych. Zagadnienia te mają charakter interdyscyplinarny, jednak w kontekście przemysłu przesyłowego szczególne znaczenie przypisuje się stalom, które są powszechnie stosowane w instalacjach transportowych i magazynowych.

Elektrolizery, będące podstawowym elementem produkcji wodoru z wykorzystaniem energii elektrycznej, pracują

w środowisku o wysokiej reaktywności chemicznej, często przy podwyższonym ciśnieniu i temperaturze. Wymagają zatem zastosowania materiałów o wysokiej odporności korozyjnej, odpowiednich właściwościach mechanicznych oraz stabilności w kontakcie z wodorem. Podobne wymagania stawiane są materiałom wykorzystywanym w infrastrukturze przesyłowej, w której wodór transportowany jest pod ciśnieniem, co dodatkowo potęguje oddziaływanie tego pierwiastka na strukturę metalu.

Wodór, ze względu na niewielki promień atomowy, wykazuje wysoką zdolność do dyfuzji w sieci krystalicznej że-

portowych, w tym w rozwijającym się sektorze lotnictwa. Rozważane jest wykorzystanie wodoru zarówno w ogniwach paliwowych, jak i w procesach bezpośredniego spalania w silnikach turbinowych. Produktem spalania wodoru jest głównie para wodna, co czyni go paliwem niskoemisyjnym pod względem emisji CO_2 . Zarazem specyficzne warunki pracy układów lotniczych wymagają zastosowania materiałów o wysokiej odporności na ekstremalne temperatury, zmienne obciążenia oraz oddziaływanie wodoru.

Rozwój nowoczesnych silników lotniczych wiąże się ze wzrostem ich spraw-

wadzi do powstawania gazów wylotowych o podwyższonej zawartości pary wodnej, co może skutkować nowymi mechanizmami degradacji materiałów i powłok. Z tego powodu rozwój turbin, zarówno w lotnictwie, jak i energetyce, jest bezpośrednio związany z opracowaniem nowych rozwiązań w zakresie ochrony powierzchni łopatek i kierownic turbin, umożliwiających zwiększenie trwałości komponentów w warunkach charakterystycznych dla spalania wodoru¹⁰⁻¹². W konsekwencji rozwój technologii wodorowych jest ściśle powiązany z postępem w inżynierii materiałowej, a zwłaszcza z doskonaleniem właściwości stali stosowanych w instalacjach produkcyjnych, przesyłowych i magazynowych. Zapewnienie ich trwałości i bezpieczeństwa eksploatacji jest jednym z głównych warunków efektywnego wdrażania gospodarki wodorowej.

” Transformacja energetyczna, wynikająca z celów klimatycznych Unii Europejskiej, stymuluje rozwój OZE oraz technologii magazynowania energii, wśród których wodór odgrywa kluczową rolę jako nośnik energii wspierający proces dekarbonizacji

laza, nawet w temperaturze pokojowej. Dotychczasowe badania wskazują, że kinetyka jego przenikania oraz dyfuzji jest silnie uzależniona od wielu czynników, takich jak struktura krystaliczna metalu, gęstość strumienia wnikażącego wodoru, temperatura i ciśnienie, stan powierzchni materiału, skład chemiczny stali, stan naprężeń wewnętrznych oraz obecność tzw. trucizn katalitycznych, wpływających na procesy adsorpcji i absorpcji wodoru^{4,5}. Zjawiska te mogą prowadzić do degradacji właściwości mechanicznych materiału, w tym do występowania kruchości wodorowej, czy pękania naprężeniowego, co stanowi istotne wyzwanie w projektowaniu i eksploatacji instalacji. Znaczącymi elementami infrastruktury są również systemy magazynowania wodoru, w których stosuje się m.in. zbiorniki wysokociśnieniowe. W tym przypadku kluczowe znaczenie ma dobór odpowiednich gatunków stali, zapewniających jednocześnie wysoką wytrzymałość oraz odporność na długotrwałe oddziaływanie wodoru.

Wodór znajduje także zastosowanie w nowoczesnych rozwiązaniach trans-

ności poprzez narażanie komponentów na coraz bardziej wymagające warunki pracy. Jednocześnie istotnym kierunkiem rozwoju jest potencjalne zastosowanie paliw wodorowych, które wprowadzają nowe uwarunkowania eksploatacyjne. Przewiduje się, że ruch lotniczy podwoi się w najbliższych 20 latach. Kierunek rozwoju silników określają również coraz bardziej rygorystyczne wymagania dotyczące ograniczenia emisji gazów, takich jak NO_x oraz hałasu⁶.

Wyższa temperatura na wlocie do turbiny prowadzi do obniżenia emisji CO i umożliwia osiągnięcie tzw. okna niskich emisji, w którym zarówno CO_x , jak i NO_x utrzymywane są na minimalnym poziomie. Dopuszczalny zakres temperatury, spełniający jednocześnie limity CO i NO_x , wynosi ok. $1325\text{-}1435^\circ\text{C}$ ⁷. Spełnienie tych wymagań wiąże się z ciągłym podnoszeniem temperatury gazów na wlocie do turbiny oraz koniecznością stosowania nowoczesnych materiałów o podwyższonej trwałości w warunkach utleniania i korozji wysokotemperaturowej^{8,9}.

W kontekście paliw wodorowych istotne jest, że ich zastosowanie pro-

Prace realizowane w zakresie rozwoju materiałów do zastosowań wodorowych

Rozwój materiałów do zastosowań wodorowych stanowi w ostatnich latach istotny kierunek działalności Sieci Badawcza Łukasiewicz - Górnośląskiego Instytutu Technologicznego (Łukasiewicz - GIT). Prowadzone prace koncentrują się na zagadnieniach związanych z oddziaływaniem wodoru na materiały konstrukcyjne. Łukasiewicz - GIT realizuje zarówno prace bezpośrednio zlecane przez podmioty przemysłowe, ukierunkowane na rozwiązywanie konkretnych problemów technologicznych, jak i projekty badawczo-rozwojowe o charakterze krajowym i międzynarodowym. Do najważniejszych z nich w tematyce wodorowej należą projekty:

- MITHRIL, pt. „Development of permeation barrier coatings for steels in hydrogen applications”, realizowany w latach 2025-2029 w ramach programu Fundusz Badawczy Węgla i Stali. Projekt współfinansowany ze środków

Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach programu Projekty Międzynarodowe Współfinansowane. W skład konsorcjum realizującego projekt wchodzi: RI-NA Consulting - Centro Sviluppo Materiali S.p.A. (koordynator; Włochy), Flame Spray Hungary Kft. (Węgry), Uniwersytet w Gandawie (Belgia), Il Sentiero International Campus SRL (Włochy), Łukasiewicz - GIT (Polska), Corinth Pipe-works Pipe Industry S.A. (Grecja), Fundación Tekniker (Hiszpania), Uniwersytet w Cagliari (Włochy).

Projekt MITHRIL koncentruje się na opracowaniu, walidacji i wdrożeniu powłok barierowych dla stali przeznaczonej do pracy w środowisku wodorowym. Wśród badanych rozwiązań znajdują się m.in. powłoki diamentopodobne (DLC - *diamond-like carbon*), niklowo-fosforowe (Ni-P) oraz z tlenku glinu (Al_2O_3).

Celem projektu jest zapewnienie stali odporności na kruchość wodorową, wydłużenie okresu eksploatacji materiałów oraz zwiększenie bezpieczeństwa ich użytkowania w przemyśle wodorowym. W ramach projektu opracowana zostanie również metodologia przemysłowego wytwarzania powłok barierowych o właściwościach mechanicznych dostosowanych do sektora rurociągów wodorowych.

W pierwszej fazie MITHRIL skupia się na sektorze transportowym, jako głównym miejscu zastosowania. Następnie analizowany będzie potencjał adaptacji opracowanych rozwiązań do innych obszarów wykorzystania wodoru - w tym motoryzacji, czy energetyki jądrowej, w których kluczowe znaczenie mają wysokie ciśnienie i temperatura. Projekt przewiduje osiągnięcie poziomu gotowości technologicznej TRL 5 w trakcie jego trwania oraz opracowanie planu działań umożliwiających dalszy rozwój technologii do poziomu TRL 9

(komercjalizacja) w ciągu 5 lat od zakończenia prac.

- HANACOAT „Harnessing nanolaminate coatings for high temperature applications”, realizowany w konsorcjum z RWTH Aachen i German Aerospace Center (DLR) z Niemiec i Politechniką Śląską.

Projekt dotyczy opracowania nowoczesnych powłok ochronnych typu MAX, przeznaczonych do pracy w ekstremalnych warunkach wysokotemperaturowych, charakterystycznych dla współczesnych i przyszłych silników lotniczych. Materiały typu MAX stanowią unikalną klasę materiałów łączących właściwości ceramiki (odporność na utlenianie, korozję i wysoką temperaturę) z cechami metali (odporność na zmęczenie i pęcznienie), co czyni je szczególnie obiecującymi jako powłoki ochronne dla takich elementów jak łopatki turbin.

cyjnych, zwłaszcza kompozytów ceramicznych. Opracowywane powłoki mają chronić materiały podłoża, takie jak stopy międzymetaliczne TiAl oraz kompozyty ceramiczne SiC-SiC, przed degradacją poprzez tworzenie stabilnej, ochronnej warstwy tlenku glinu (Al_2O_3).

W ramach badań analizowane będą mechanizmy degradacji powłok i materiałów w warunkach wysokiej temperatury oraz obecności pary wodnej, a także zjawiska dyfuzji na granicy powłoka-podłoże. Wyniki projektu przyczynią się do zwiększenia trwałości i niezawodności komponentów silników lotniczych, umożliwiając ich pracę w bardziej wymagających warunkach oraz wspierając rozwój technologii niskoemisyjnych opartych na wodorze.

Projekt jest finansowany przez Narodowe Centrum Nauki w Polsce na podstawie umowy granto-

”

(...) działalność Łukasiewicz - GIT koncentruje się na rozwoju innowacyjnych rozwiązań materiałowych oraz infrastruktury badawczej, wspierających bezpieczne wdrażanie technologii wodorowych i realizację założeń transformacji energetycznej

Celem projektu jest wytworzenie nanolaminatowych powłok typu MAX (na bazie układów Ti-Al-C/N oraz Cr-Al-C/N), z wykorzystaniem różnych technik fizycznego osadzenia z fazy gazowej (PVD) oraz zbadanie ich właściwości w warunkach wysokiej temperatury. Głównym zadaniem jest zapewnienie odporności na utlenianie wysokotemperaturowe zarówno w powietrzu, jak i w atmosferze zawierającej parę wodną. Obecność pary wodnej jest szczególnie istotna w kontekście spalania wodoru, które stanowi jeden z głównych kierunków rozwoju niskoemisyjnych paliw lotniczych. Produktem spalania wodoru jest para wodna, która znacząco przyspiesza procesy degradacji materiałów konstruk-

wej nr 2022/04/Y/ST5/00109 oraz przez Niemiecką Fundację Badawczą (DFG) w ramach programu Weave-UNISONO.

- TBC4H2 pt. „Thermal Barrier Coatings for greener heat-to-power applications: understanding limits of operation under hydrogen combustion and sustainable outlook”, realizowany w ramach programu M-Era.NET przez międzynarodowe konsorcjum, tworzone przez: Łukasiewicz - GIT (lider konsorcjum), Politechnikę Śląską i partnera przemysłowego firmę Avio Aero (General Electric Aerospace) z Bielska-Białej, MINES Paris - Materials Research Center (MINES Paris-CDM; Francja), Fraunhofer Institute for Material and Beam

Technology IWS (Niemcy) i German Aerospace Center (DLR; Niemcy).

Projekt koncentruje się na opracowaniu i zrozumieniu działania zaawansowanych powłokowych barier cieplnych (TBC - *Thermal Barrier Coatings*) przeznaczonych do ochrony elementów turbin silników lotniczych, pracujących w ekstremalnych warunkach powyżej 1200°C. Szczególny nacisk położono na środowisko spalania wodoru, które - choć eliminuje emisję CO₂ - generuje dużą ilość pary wodnej, stanowiącej istotny czynnik degradujący materiały wysokotemperaturowe. Celem projektu jest zatem opracowanie systemów powłokowych zapewniających wysoką odporność na utlenianie i degradację w atmosferze powietrza oraz pary wodnej, charakterystycznej dla przyszłych technologii napędów wodorowych.

Badania obejmują wytwarzanie powłok TBC na monokrystalicznych nadstopach niklu stosowanych w łopatkach turbin lotniczych, z wykorzystaniem nowoczesnych technologii, takich jak zawieszinowe natryskiwanie plazmowe (SPS) oraz fizyczne osadzanie z fazy gazowej z użyciem wiązki elektronów (EB-PVD). Ważnymi elementami systemu są międzywarstwy dyfuzyjne i adhezyjne, które zapewniają trwałość i przyczepność powłok w warunkach długotrwałej eksploatacji. W projekcie rozwijane będą nowe rozwiązania materiałowe, w tym powłoki dyfuzyjne typu Pt-γ/γ', jako alternatywa dla klasycznych powłok aluminiokowych modyfikowanych platyną oraz ceramiczne powłoki barierowe na bazie tlenku cyrkonu stabilizowanego tlenkiem itru (7YSZ) i cyrkonianu gadolinu (Gd₂Zr₂O₇).

Projekt wpisuje się w rozwój technologii paliw wodorowych w lotnictwie, mających kluczowe znaczenie dla redukcji emisji i osiągnięcia celów klimatycznych, założonych przez m.in. Europejski Zielony Ład. Podniesienie temperatury pra-

cy turbin dzięki nowym powłokom pozwoli zwiększyć ich sprawność, zmniejszyć zużycie paliwa i poprawić efektywność energetyczną. Rezultatem projektu będzie demonstracja opracowanej technologii na rzeczywistych komponentach - łopatkach turbin - co przybliży jej wdrożenie przemysłowe i zastosowanie w nowej generacji silników lotniczych.

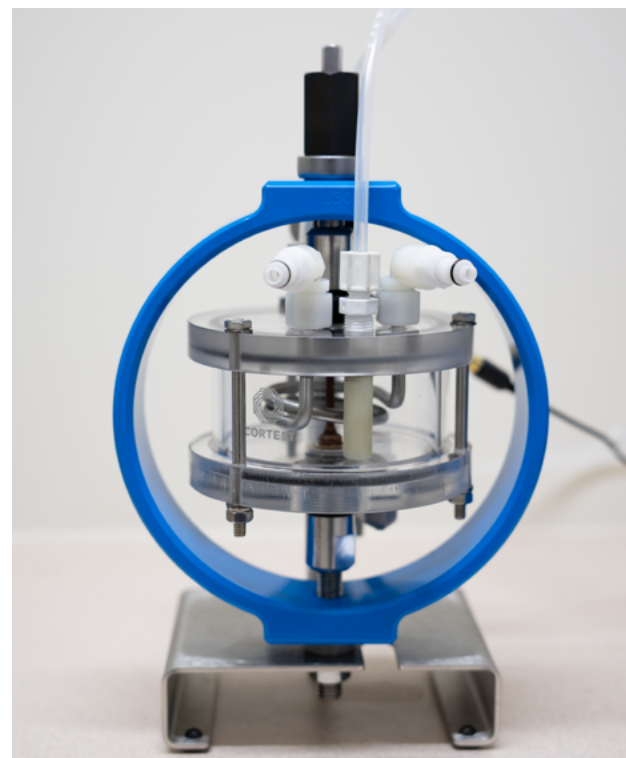
Projekt finansowany jest przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju NCBiR (M-ERA.NET3/2022/31/TBC4H2/2024), saksońskie Ministerstwo Nauki, Kultury i Turystyki (SMWK) (FKZ: 100688418) oraz francuską Narodową Agencję Badań (ANR) w ramach programu M-Era.NET 2022.

Unikatowe laboratoria wodorowe

Rozwój nowoczesnych materiałów wodorowych i przemysłowych wymaga inwestycji w specjalistyczną aparaturę badawczą, która jednocześnie wspiera bieżącą działalność naukową i wdrożeniową Łukasiewicz - GIT. W latach 2024-2025 w Łukasiewicz - GIT uruchomiono dwa nowoczesne laboratoria: badań odporności materiałów na pękanie naprężeniowe siarczkowe oraz wysokotemperaturowego utleniania w parze wodnej.

Laboratorium badań odporności materiałów na pękanie naprężeniowe siarczkowe (SSC)

Laboratorium SSC, wykorzystujące test Sulfide Stress Cracking metodą A, zgodnie z normą NACE TM0177 oraz PN-EN ISO 15156, jest obecnie jedynym działającym ośrodkiem tego typu w Polsce. Normy te określają wymagania dotyczące doboru materiałów odpornych na korozję w środowiskach zawierających siarkowodor - krytycznych m.in. w procesach wydobywania ropy i gazu, a także w instalacjach przesyłowych i magazynowych wodoru.



Rys. 1. Pojedyncze stanowisko do badań SSC

Łukasiewicz - GIT dysponuje 6 niezależnymi stanowiskami badawczymi SSC, co pozwala na równoległe prowadzenie testów dla różnych wariantów materiałowych. Pojedyncze stanowisko do badań przedstawiono na rys. 1. Podczas testu próbka jest osadzana w komorze wypełnionej odpowiednim roztworem korozyjnym i poddawana naprężeniom rozciągającym do wartości odniesionej procentowo do granicy plastyczności materiału. Według norm obciążenie powinno wynosić 75-100% granicy plastyczności. Każdy wariant testowy wymaga przeprowadzenia badań dla co najmniej trzech próbek. Pojedynczy test trwa 720 godz., a pozytywny wynik oznacza, że w tym czasie próbki nie wykazały pęknięć. Więcej informacji przedstawiono w ramach pracy *Opracowanie metodyki badań odporności wyrobów stalowych na niszczenie w warunkach korozji naprężeniowej w środowisku nawodorowującym na przykładzie materiału przeznaczonego dla transportu*



Rys. 2. Laboratorium wysokotemperaturowego utleniania w parze wodnej

przesyłowego¹³. Tego typu badania są kluczowe dla oceny trwałości materiałów w trudnych warunkach przemysłowych i umożliwiają wdrażanie bezpiecznych i trwałych rozwiązań stalowych w infrastrukturze wodorowej oraz innych aplikacjach przemysłowych.

Laboratorium wysokotemperaturowego utleniania w parze wodnej

Łukasiewicz - GIT stworzył nowoczesne laboratorium do badań utleniania materiałów w wysokich temperaturach, także w obecności pary wodnej. Umożliwi ono lepsze zrozumienie procesów wpływających na trwałość materiałów w energetyce i lotnictwie. Wodór, jako

paliwo przyszłości, wciąż wymaga badań nad wpływem składu stopów, temperatury i obecności pary wodnej na utlenianie w wysokich temperaturach.

Laboratorium dysponuje dwoma piecami wysokotemperaturowymi firmy Carbolite Gero - do badań w suchym powietrzu oraz z możliwością wprowadzania pary wodnej, pozwalającymi testować materiały do 1600°C w krótkotrwałych eksperymentach i do 1500°C w badaniach długookresowych. Laboratorium wyposażono też w spektrometr FTIR firmy Bruker do analizy gazów wylotowych oraz mikroskopię elektronową do badania próbek w ramach Grupy Badawczej Badania Właściwości i Struktury Materiałów.

Badania wspierają rozwój materiałów stosowanych w lotnictwie i energetyce,

wykorzystywanych m.in. w turbinach gazowych, ogniwach wodorowych i systemach pracujących w wysokich temperaturach i środowisku pary wodnej. Laboratorium Łukasiewicz - GIT odpowiada na potrzeby przemysłu związane z technologiami wodorowymi i wspiera bezpieczne wykorzystanie wodoru oraz rozwój innowacyjnych materiałów odpornych na ekstremalne warunki.

Podsumowanie

Transformacja energetyczna, wynikająca z celów klimatycznych Unii Europejskiej, stymuluje rozwój OZE oraz technologii magazynowania energii, wśród których wodór odgrywa kluczową rolę jako nośnik energii wspierający proces dekarbonizacji.

Rozwój gospodarki wodorowej jest jednak znacznie ograniczony przez problemy materiałowe, w szczególności związane z oddziaływaniem wodoru na metale, degradującym ich właściwości mechaniczne. Wymusza to konieczność prowadzenia zaawansowanych badań nad nowymi materiałami i powłokami ochronnymi, zdolnymi do pracy w wysokim ciśnieniu i temperaturze oraz w środowisku agresywnym chemicznie.

W tym kontekście działalność Łukasiewicz - GIT koncentruje się na rozwoju innowacyjnych rozwiązań materiałowych oraz infrastruktury badawczej, wspierających bezpieczne wdrażanie technologii wodorowych i realizację założeń transformacji energetycznej. □

Przypisy:

1. Rada Unii Europejskiej / Rada Europejska, EUCO 22/20, Conclusions of the European Council meeting (2020).
2. Komisja Europejska. (2020). A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. Brussels.
3. Polska strategia wodorowa do roku 2030 z perspektywą do 2040 r. Monitor Polski, 2021, poz. 1138.
4. M. Nagumo, Hydrogen related failure of steels - a new aspect. *Materials Science and Technology* 2004, 20(8), s. 940-950, DOI: [10.1179/026708304225019687](https://doi.org/10.1179/026708304225019687).
5. R.P. Gangloff, B.P. Somerday (ed.), *Gaseous Hydrogen Embrittlement of Materials in Energy Technologies*. Woodhead Publishing, Cambridge 2012.
6. J.H. Perepezko, The Hotter the Engine, the Better. *Science* 2009, 326, s. 1068-1069, DOI: [10.1126/science.1179327](https://doi.org/10.1126/science.1179327).
7. A.H. Lefebvre, D.R. Ballal, *Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions*, CRC Press, Boca Raton 2010.
8. S. Bose, *High Temperature Coatings*, Elsevier, Boston 2007.
9. U. Schulz, Ch. Leyens, K. Fritscher, M. Peters, B. Saruhan-Brings, O. Lavigne, J.M. Dorvaux, M. Poulain, R. Mévrel, M. Caliez, Some recent trends in research and technology of advanced thermal barrier coatings Aktuelle Forschungs- und Entwicklungstrends bei Wärmedämmschichten für die Gasturbine. *Aerospace Science and Technology* 2003, 7(1), s. 73-80, DOI: [10.1016/S1270-9638\(02\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S1270-9638(02)00003-2).
10. J.L. Smialek, Compiled furnace cyclic lives of EB-PVD thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology* 2015, 276, s. 31-38, DOI: [10.1016/j.surfcoat.2015.06.018](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.06.018).
11. Y. Tamarin, *Protective Coatings for Turbine Blades*. ASM International, Materials Park 2002.
12. R.C. Reed, *The Superalloys Fundamentals and Application*. Cambridge University Press, Cambridge 2008, DOI: [10.1017/CBO9780511541285](https://doi.org/10.1017/CBO9780511541285).
13. K. Radwański, J. Gazdowicz, W. Kubosz, Opracowanie metodyki badań odporności wyrobów stalowych na niszczenie w warunkach korozji naprężeniowej w środowisku nawodorującym na przykładzie materiału przeznaczonego dla transportu przesyłowego, *Materials Science and Welding Technologies* 2025, 69(3), s. 18-22.