

STRESZCZENIE

Na światowym rynku energii obserwuje się przechodzenie z paliw kopalnych na źródła odnawialne. Jednak popyt na energię ze źródeł konwencjonalnych utrzymuje się, a węgiel nadal odgrywa znaczącą rolę w zapewnieniu bezpieczeństwa energetycznego. W ciągu najbliższych 10-15 lat spodziewany jest „prześciowy renesans” węgla. Ponieważ elektrownie dostosowują się do zwiększonej liczby rozruchów i odstawień, pogarszanie właściwości materiału, szczególnie w warunkach pełzania, staje się problemem przy ocenie bezpiecznej eksploatacji i przewidywaniu trwałości części i elementów bloków energetycznych.

Niniejsza rozprawa ma na celu zbadanie charakterystyki pęknięcia wybranego materiału stosowanego w blokach elektrowni wytwarzających energię elektryczną, po długim okresie eksploatacji w warunkach pełzania w wysokiej temperaturze. Eksperymentalne i numeryczne badanie zostało przeprowadzone na elementach stalowych o ponad 100 000 godzinach pracy w celu oceny odporności na pęknięcie. Współczynnik intensywności naprężenia został przeanalizowany przy użyciu geometrii rozciąganej próbki łukowej.

Konstrukcje inżynierskie podlegają pękaniu w trybie mieszanym ze względu na orientację kąta pęknięcia lub istniejące naprężenie wieloosiowe. W związku z tym właściwe jest zbadanie zachowania i mechanizmu pęknięcia stali żaroodpornej pod obciążeniem w trybie mieszanym. Bezkontaktowe pomiary za pomocą cyfrowej korelacji obrazu zostały wykorzystane do pomiaru odporności na pęknięcie pod obciążeniem w trybie mieszanym przy użyciu próbek SENT.

Przeprowadzono kompleksowe eksperymentalne starzenie izotermiczne i przyspieszoną degradację poprzez pełzanie w wysokiej temperaturze, w celu zbadania wpływu starzenia i degradacji termicznej na zmianę odporności na pęknięcie stali kotłowej.

Wyniki wskazują, że odporność na pęknięcie różni się w zależności od elementów konstrukcyjnych, przy czym komora zaworu wykazuje większą wytrzymałość niż sekcje rurociągu. Analiza porównawcza próbek SENT i AT dostarczyła dalszych informacji na temat zachowania podczas pęknięcia w różnych warunkach. Wyniki badania wskazują na potrzebę dodatkowej oceny wytrzymałościowej, takiej jak analiza elementów skończonych (MES) w połączeniu z testami pełzania i testami wysokotemperaturowymi, w celu przewidywania pozostałej trwałości elementów kotła oraz poprawy jego bezpieczeństwa użytkowania.

Badania te prezentują krytyczny wgląd w trwałość kotłów wytwarzających energię elektryczną, pomagając operatorom kotłów w ocenie nośności, potencjalnych zagrożeń i strategii konserwacji. Charakteryzując degradację materiału poprzez równowagową analizę metalurgiczną, wyniki badań przyczyniają się do zapewnienia odporności bloków energetycznych w obliczu zmieniających się przemian w sektorze energetycznym.

Ponadto czynią opisane badania wykorzystując zaawansowane metody eksperymentalne i numeryczne do oceny obniżenia odporności na pęknięcie stali 14MoV6-3, kluczowego, tradycyjnego materiału w wielu istniejących elektrowniach. W pracy przebadano materiał w stanie nowym oraz zdegradowane poprzez przyspieszone pełzanie i starzenie izotermiczne,

symulujące rzeczywiste warunki pracy. Zbadano trzy etapy degradacji i co najmniej trzy kąty nachylenia karbu, aby zapewnić kompleksowe zrozumienie zachowania podczas pęknięcia.

Oprócz mechaniki pęknięcia zastosowano dodatkowe techniki charakteryzacji materiału, w tym testy twardości, analizę mikrostrukturalną, testy udarności Charpy'ego i fraktografię. Połączenie pełnowymiarowych próbek AT, SENT i SENB, wraz z symulacjami numerycznymi, dostarczyło cennych informacji na temat właściwości pęknięcia stali żaroodpornej po długotrwałej eksploatacji.

Chociaż wykracza to poza zakres niniejszej rozprawy, mam nadzieję, że praca ta pomoże w podejmowaniu świadomych decyzji dotyczących rozbudowy lub modernizacji bloków energetycznych elektrowni ciepłych.

SUMMARY

The global energy markets are transitioning from fossil fuels to renewable sources. However, the demand for conventional energy persists, with coal continuing to play a role in energy security. Over the next 10–15 years, a "transitional renaissance" of coal is anticipated. As power plants adapt to increased start-ups and shutdowns, components of power plants degrade due to ageing particularly under creep conditions, owing to this their structural integrity becomes a critical concern for safe operation and reliability.

This thesis studies the fracture behavior of material used in components of electricity-generating power plants after exposure to industry and laboratory ageing under high-temperature creep conditions. It starts with an overview of the fracture mechanics field and power plant steel grade, their operating conditions, and a description of the numerous degradation mechanisms that damage power plant systems and components. Experimental and numerical assessments were conducted on steel elements with over 100,000 operational hours to evaluate fracture toughness. The stress intensity factor (K) was analyzed using the arc tension specimen geometry. Effect of multiaxial stresses and mixed-mode fracture due to crack angle orientation or multi-axial stress are investigated. To overcome the limitations of traditional clip gauge method non-contact measurements by digital image correlation were used to measure fracture toughness under mixed-mode loading using SENT specimens.

Comprehensive experimental isothermal ageing and high-temperature accelerated creep degradation were carried out to examine the impact of ageing and thermal degradation on the trends of fracture resistance in power plant steel. Results indicate that fracture toughness varies across structural components, with the valve chamber exhibiting greater toughness than pipeline sections. A comparative analysis of SENT and AT specimens provided further insights into fracture behavior under different conditions. The study emphasizes the need for additional structural integrity assessments, such as finite element analysis (FEA) combined with creep and high-temperature testing, to predict remaining service life and enhance safety measures.

This research offers critical insights into the effect of creep and isothermal ageing on the durability of components in electricity-generating boilers, aiding decision-makers in assessing load-carrying capacity, potential hazards, and maintenance strategies. Furthermore, the study employs advanced experimental and numerical methods to assess fracture toughness. The research compares as received and degraded samples. The ageing was achieved through laboratory accelerated creep and isothermal ageing, simulating actual power plant operating conditions. Three stages of degradation and a minimum of three crack tilt angles were examined to provide a comprehensive understanding of fracture behavior.

In addition to fracture mechanics, supplementary material characterization techniques, including hardness testing, microstructural analysis, Charpy impact testing, and fractography, were utilized. The combination of full-size AT, SENT, and SENB specimens, along with numerical simulations, provided valuable insights into the fracture properties of heat-resistant steel after prolonged operation. Although it is beyond the scope of this thesis, the hope is that this work will assist in making informed decisions regarding the extension or upgrading of power plant components. The thesis concludes with a summary of main findings and suggestions for future research.

SAMENVATTING

De wereldwijde energiemarkten stappen over van fossiele brandstoffen naar hernieuwbare bronnen. De vraag naar conventionele energie blijft echter bestaan en steenkool blijft een rol spelen in de energiezekerheid. Voor de komende 10-15 jaar wordt een “overgangsrenaissance” van steenkool verwacht. Naarmate energiecentrales zich aanpassen aan meer opstarten en uitschakelen, wordt de degradatie van materiaaleigenschappen, vooral onder kruipomstandigheden, een kritisch punt van zorg voor een veilige werking en het voorspellen van de levensduur van componenten.

Dit proefschrift bestudeert het breukgedrag en de restlevensduur van materialen die worden gebruikt in componenten van elektriciteitscentrales na blootstelling aan veroudering in de industrie en het laboratorium onder kruipomstandigheden bij hoge temperatuur. Experimentele en numerieke beoordelingen werden uitgevoerd op stalen elementen met meer dan 100.000 bedrijfsuren om de breuktaaiheid te evalueren. De spanningsintensiteitsfactor (K) werd geanalyseerd met behulp van de geometrie van het boogspanningsmonster.

Technische constructies zijn onderhevig aan mixed-mode breuk als gevolg van scheurhoekoriëntatie of multi-axiale spanning. Daarom is het zinvol om het breukgedrag en -mechanisme van staal van krachtcentrales onder gemengde belasting te bestuderen. Contactloze metingen door digitale beeldcorrelatie werden gebruikt om de breuktaaiheid te meten onder gemengde belasting met behulp van SENT proefstukken.

Uitgebreide experimentele isotherme veroudering en versnelde kruipdegradatie bij hoge temperatuur werden uitgevoerd om de invloed van veroudering en thermische degradatie op de trends van breukbestendigheid in staal van energiecentrales te onderzoeken.

De resultaten geven aan dat de breuktaaiheid varieert over structurele componenten, waarbij de klepkamer een grotere taaiheid vertoont dan pijpleidingsecties. Een vergelijkende analyse van SENT en Arc-Shaped Tension (AT) specimens gaf meer inzicht in breukgedrag onder verschillende omstandigheden. Het onderzoek benadrukt de noodzaak van aanvullende structurele integriteitsbeoordelingen, zoals eindige-elementenanalyse (FEA) in combinatie met kruip- en hoge temperatuurtesten, om de resterende levensduur te voorspellen en veiligheidsmaatregelen te verbeteren.

Dit onderzoek biedt cruciale inzichten in de duurzaamheid van ketels die elektriciteit opwekken en helpt besluitvormers bij het beoordelen van de belastbaarheid, potentiële gevaren en onderhoudsstrategieën. Door materiaaldegradatie te karakteriseren met behulp van metallurgische analyse dragen de bevindingen bij aan het waarborgen van de veerkracht van energiecentrales tijdens de veranderende energietransities.

Verder maakt het onderzoek gebruik van geavanceerde experimentele en numerieke methoden om de degradatie van breuktaaiheid te beoordelen in 14MoV6-3 staal, een belangrijk materiaal in energiecentrales. Het onderzoek onderzoekt de huidige en gedegradeerde toestanden door versnelde kruip en isotherme veroudering, waarbij echte bedrijfsomstandigheden worden gesimuleerd. Drie stadia van degradatie en een minimum van drie scheurneigingshoeken werden onderzocht om een uitgebreid begrip te krijgen van breukgedrag.

Naast breukmechanica werden aanvullende materiaalkarakteriseringstechnieken gebruikt, waaronder hardheidstesten, microstructuuranalyse, Charpy-kerfslagproeven en fractografie. De combinatie van AT-, SENT- en SENB-exemplaren op ware grootte, samen met numerieke simulaties, gaven waardevolle inzichten in de breukeigenschappen van hittebestendig staal na langdurig gebruik.

Hoewel het buiten het bereik van dit proefschrift valt, hoopt men dat dit werk zal helpen bij het nemen van weloverwogen beslissingen over de uitbreiding of opwaardering van onderdelen van energiecentralen.

Rozszerzone streszczenie pracy doktorskiej

Autor: Benard Kiptoo Kipsang

Uczelnie: Politechnika Śląska (Polska) oraz Uniwersytet w Gandawie (Belgia)

Promotorzy: dr. hab. inż. Krzysztof Wacławiak oraz prof. dr inż. Wim De Waele

Tytuł: Ocena odporności na pękanie elementów grubościennych kotłów energetycznych po długotrwałym użytkowaniu (*Assessment of Fracture Development in Thick-Walled Elements of Power Boilers after Long-Time Operation*)

Słowa kluczowe: niskostopowa stal żarowytrzymała 14MoV6-3, zniszczenie, odporność na pękanie, pełzanie, krzywa CTOD, termiczna degradacja materiału, mikrostruktura.

Transformacja energetyczna polegająca na przejściu z użytkowania paliw kopalnych na odnawialne źródła energii powoduje istotne zmiany w polskiej energetyce. Wiele z bloków elektrowni przepracowało już ponad 100 000 godzin, a spośród tych bloków energetycznych eksploatowanych w Polsce, 90% przekroczyło projektowy czas pracy, narażając ich grubościenne elementy na długotrwałe obciążenia termiczne i mechaniczne. Jednak elektrownie węglowe nadal odgrywają kluczową rolę w bezpieczeństwie energetycznym, szczególnie w Polsce. Zapewnienie integralności strukturalnej ciśnieniowych elementów kotłów ma zasadnicze znaczenie aby bezpiecznie i niezawodnie pracowały oraz sprzyja ono optymalizacji strategii konserwacji i przedłużaniu ich żywotności. Działania te koncentrują się na ocenie odporności na pękanie krytycznych elementów stalowych w elektrowniach, w szczególności wykonanych z niskostopowych stali Cr-Mo-V, po długotrwałym użytkowaniu. W badaniach laboratoryjne wykorzystuje się sztuczne pogorszenie struktury w symulowanych warunkach pełzania i termicznych.

Złożone warunki obciążenia cyklicznymi rozruchami, w których pracują te elementy wytwarzające energię, powodują degradację materiału i inicjację pęknięć. W trakcie eksploatacji materiał z którego wykonane są elementy bloków elektrowni, zmienia swój stan. Na jego odporność na pękanie mają wpływ zmiany w jego mikrostrukturze. Zmiany w ich morfologii i procesach strukturalnych, takich jak wytrącanie i przemiany węglików, są głównymi przyczynami zmian w cechach, które decydują o trwałości.

Skład chemiczny stali, stan początkowy materiału, proces produkcyjny i warunki eksploatacyjne wpływają na rodzaj zmian mikrostruktury i szybkość ich występowania. Badanie procesów akumulacji wad i określenie pierwotnych procesów pękania jest niezbędne, ponieważ długotrwała eksploatacja materiału może wywołać trwałe zmiany w jego strukturze, które mogą nasilać zarodkowanie i akumulację defektów. Co więcej, zmiana struktury materiału stwarza możliwość wczesnego pęknięcia,

co wymaga oceny prawdopodobieństwa jego powstawania i ułatwia powiązanie właściwości statystycznych z procesami pękania materiału.

Grupa konstrukcyjnych stali stopowych zwana stalami energetycznymi stosowana jest do elementów wysokotemperaturowych pracujących pod ciśnieniem. Należy do nich stal chromowo-molibdenowo-wanadowa 14MoV6-3 (13HMF), która jest używana do produkcji rur kotłowych, elementów turbin parowych oraz kotłów pracujących w temperaturach sięgających nawet 560 °C. Wiele awarii wystąpiło z powodu pęknięć, które mogą wystąpić, nawet jeśli granica plastyczności nie zostanie przekroczona. Koncepcja odporności na pękanie jest od dziesięcioleci stosowana do oceny niezawodności materiałów konstrukcyjnych, ale ostatnio zyskała uwagę ze względu na zauważalną skróconą żywotność spowodowaną degradacją materiału podczas eksploatacji. Aby rozwiązać problemy związane z ochroną środowiska i oszczędnością energii, elektrownie wprowadzają ostatnio podwyższone warunki wytwarzania pary.

Od 1960 roku prowadzone są różne badania nad stalami żaroodpornymi do zastosowań w kotłach i turbinach. Wśród różnych stali produkowanych do zastosowania w cyklach parowych o podwyższonych parametrach, znaczący postęp nastąpił w zakresie stali 9-12% Cr na rurociągi kotłowe i elementy turbin, a także stali austenitycznych na rurki przegrzewacza i przegrzewacza. Najnowsze stale 9-12% Cr mają wytrzymałość na pełzanie 140 MPa w temperaturze 600°C przez co najmniej 100 tysięcy godzin. Aby zwiększyć wytrzymałość materiału na pełzanie, wprowadza się wolfram aby zmniejszyć ilość molibdenu.

Zrozumienie mechanizmu degradacji materiału umożliwia lepsze planowanie konserwacji i zmniejsza liczbę nieoczekiwanych przestojów. W celu obiektywnej oceny stanu materiału stosowane są metody nieniszczące (NDT) oraz modelowanie obliczeniowe. Metoda oceny i pomiary różnią się w zależności od typu i funkcji elementu kotła. W Polsce do oceny stanu materiału po długotrwałym użytkowaniu wykorzystywane są degradacja struktury z użyciem badań mikrostrukturalnych w skaningowym mikroskopie elektronowym, analiza składu fazowego wytrąceń, oraz pomiar twardości. Wykorzystanie procesów wytrącania węglików, a także określenie składu fazowego i zawartości typu węgla za pomocą rentgenowskiej analizy fazowej, do oceny stanu materiałów stosowanych w części ciśnieniowej kotłów energetycznych poza czasem prac projektowych, ma to ograniczenie, że reprezentuje bardzo mały obszar mikrostrukturalny.

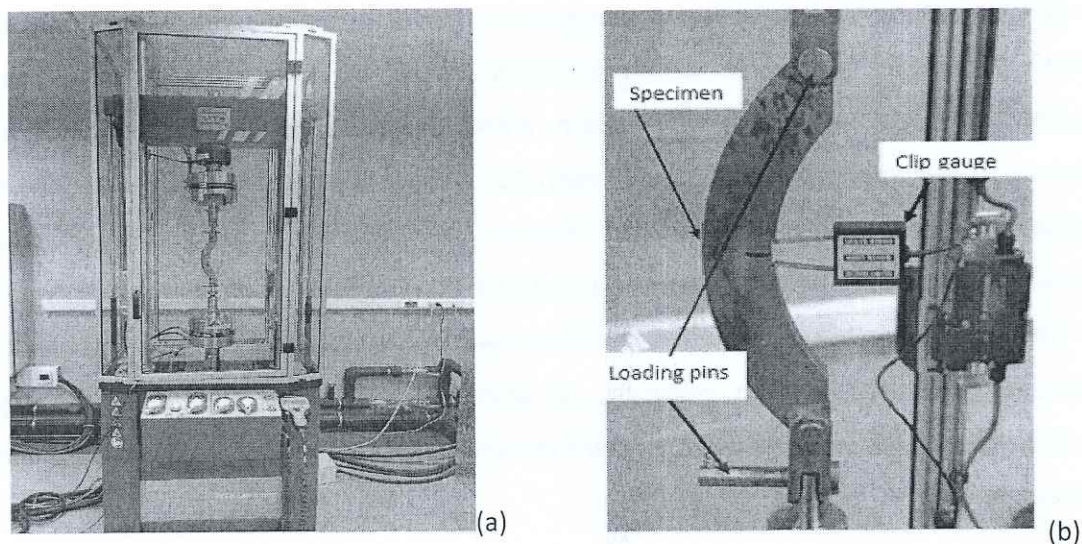
W literaturze rzadziej opisywana jest ocena doświadczalna elementów wykonanych ze stali austenitycznej poddanych długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania. Prowadzone są ograniczone badania nad odpornością na pękanie stali ferrytyczno-bainitycznych (perlitycznych), martenzytycznych i austenitycznych przeznaczonych do stosowania w elementach ciśnieniowych kotłów energetycznych z uwzględnieniem pękania sprężysto-plastycznego, pełzania i degradacji

cieplnej. W związku z tym, celem niniejszej pracy jest zbadanie wpływu długotrwałej eksploatacji na odporność na pękanie wybranego gatunku stali do stosowania w elektrowniach ciepłych. Degradacja materiału w czasie jest w większości determinowana przez wady powstające wskutek pełzania. Niezależnie od stopnia degradacji konstrukcji, wady te są kluczowe i decydujące o przydatności elementu do dalszej eksploatacji. Starzenie się materiałów musi być brane pod uwagę przy szacowaniu żywotności konstrukcji lub jej elementów. Zdolność materiału do przenoszenia przyłożonego obciążenia może być znacznie zmniejszona przez różne mechanizmy takie jak korozja, zmęczenie, poprzez obniżenie jego właściwości mechanicznych, takich jak wytrzymałość na rozciąganie, granica plastyczności, ciągliwość itp. Dodatkowo podczas procesu produkcyjnego drobne wady mogą przekształcić się w pęknięcia, które mogą prowadzić do awarii elementów. Bardzo ważne jest, aby zrozumieć, w jaki sposób starzenie wpływa na odporność materiału na pękanie.

W rozdziale 1 podano wprowadzenie do tematu pracy oraz sformułowano tezę i zakres pracy. Celem niniejszej pracy doktorskiej jest zbadanie i zrozumienie wpływu degradacji materiału spowodowanego długotrwałą eksploatacją na powstawanie i zachowanie pęknięć w grubościennych elementach kotłów energetycznych wykonanych z niskostopowej stali molibdenowo-wanadowej. Aby osiągnąć ten cel, do niniejszej pracy wyznaczono kilka celów szczegółowych. W rozdziale 2 przeprowadzono przegląd literatury w celu ustalenia ram teoretycznych zastosowanych w tych badaniach. Omówiono historię, podstawy teoretyczne i metodologię eksperymentalną stosowaną w badaniach odporności na pękanie różnych kształtów próbek, a tym o geometrii niespełniającej wymagań istniejących norm. Przeprowadzono krótki przegląd stali ferrytyczno-bainitycznych (perlitycznych), martenzytycznych i austenitycznych stosowanych w elementach ciśnieniowych kotłów energetycznych, w tym przegląd właściwości i historii niskostopowego gatunku stali molibdenowo-wanadowej. Ustalono, że pomiary odporności na pękanie coraz częściej wykorzystują kształty próbek, które naśladują rzeczywistą położeń defektów. Stwierdzono, że próbka SENT ma podobne ograniczenia związane z frontem pęknięcia, jak próbki rurowe, w przeciwieństwie do częściej używanych próbek CT, które mają większe ograniczenia tworzenia się pęknięć, co daje wyniki bardziej zachowawcze.

W rozdziale 3 przeprowadzono badania eksperymentalne i numeryczne w celu zbadania odporności na pękanie elementów kotłów parowych, które pracowały ponad 100 000 godzin. Badane materiały były elementami składowymi dwóch różnych części zespołu turbiny parowej: odcinka rurociągu, który łączy kolektory z turbinami, który jest wykonany ze stali 13HMF, oraz sekcji komory zaworu, która jest wykonana ze staliwa L17HMF. W ocenie eksperymentalnej wykorzystano pełnowymiarowe próbki rozciągane w kształcie łuku (AT). Rysunek 1 przedstawia eksperymentalną konfigurację statycznych prób z wykorzystaniem hydraulicznej uniwersalnej maszyny

wytrzymałościowej MTS Landmark o nośności 100 kN (a) oraz specjalnych uchwytów do mocowania i ekstensometru zaciskowego (b). Do modelowania numerycznego wykorzystano próbki badane wspomniane próbki AT oraz pręty o przekroju kwadratowym z naciętym karbem do prób rozciągania (SENT). Dane wejściowe metody elementów skończonych (MES) zostały przygotowane a następnie analizowane oprogramowaniem Abaqus, w który zdefiniowano model powłokowy z wyznaczoną powierzchnią środkową po grubości próbki. Karb został modelowany przy użyciu definicji całki konturowej opartej na kryterium maksymalnej szybkości uwalniania energii. Odporność na pękanie określono ilościowo za pomocą współczynnika intensywności naprężenia (K_I) a wyniki porównywano. Stwierdzono, że komora zaworu ma wyższą odporność na pękanie niż odcinek rurociągu. Zauważalny jest również wpływ geometrii próbki na odporność na pękanie próbek SENT i AT. Numeryczne symulacje MES wykazały pole naprężenia wzdłużnego wokół wierzchołka pęknięcia. Przy średnich obciążeniach maksymalnych wynoszących odpowiednio 23,96 i 23,13 kN, próbki AT rurociągów mogły przenosić nieco wyższe wartości P_{max} w porównaniu z próbkami zaworów. Dodatkowo próbki komory zaworu mają wyższy stosunek P_{max}/P_Q . To pokazuje, że doświadczyły one większej liczby pęknięć ciągłych w porównaniu z elementami rur. Średni współczynnik intensywności naprężenia (K_Q) ze wszystkich próbek był bardzo spójny i wynosił odpowiednio 3,75 i 4,38 MPa $m^{1/2}$ dla próbek rur i zaworów. Świadczy to o jednorodności materiału, z którego pobrano próbki.



Rysunek 1. Stanowisko badawcze: maszyna wytrzymałościowa MTS Landmark (a) oraz części mocujące wraz z dołączanym ekstensometrem (b).

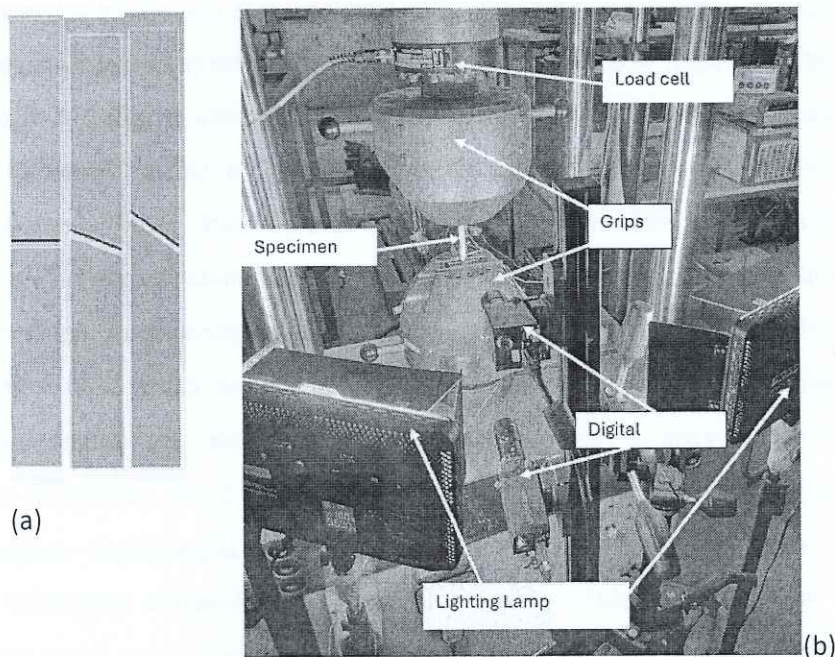
Biorąc pod uwagę złożone naprężenia w orurowaniu kotła energetycznego i ukośną orientację pęknięć, obciążenie w trybie mieszanym I/III odgrywa podczas eksploatacji znaczącą rolę w propagacji pęknięć.

W rozdziale 4 przedstawiono kompleksowy program eksperymentalny analizujący zachowanie się stali pod względem odporności na pękanie pod wpływem obciążenia w trybie mieszanym. W niniejszej pracy badano pęknienie w trybie mieszanym (I/III) stali energetycznej 14MoV6-3 przy użyciu próbki SENT z uwzględnieniem nachylonych nacięć. Badano wpływ kąta nachylenia karbu na odporność na pękanie i analizowano poszczególne kierunki I i III. Trzy kąty nachylenia karbu, $\phi=0^\circ$, reprezentujące obciążenie w trybie I oraz $\phi=22,5$ i 45° , reprezentujące obciążenie w trybie mieszanym I/III, pokazano na Rysunku 2(a). Techniki eksperymentalne wdrażano przy użyciu narzędzia 3D do pełnej korelacji obrazów cyfrowych (DIC) do pomiaru przemieszczenia frontu pęknięcia (CTOD) w warunkach obciążenia statycznego, jak pokazano na Rysunku 2(b) i 3. Udział kierunku I i III CTOD w otwieraniu pęknięć określano ilościowo. We wszystkich przypadkach można wywnioskować, że odporność na pękanie przy obciążeniu w trybie mieszanym I/III jest nieco wyższa niż przy obciążeniu w trybie I. Numerycznie problem rozwiązywano za pomocą metody elementów skończonych (MES), rozszerzonego o teorię mechaniki pęknięcia, w której wykorzystano całkę J. W kolejnym kroku porównano wyniki numeryczne z rozwiązaniem eksperymentalnym, co dobrze zweryfikowało zgodność symulacji. Współczynnik intensywności naprężenia (SIF) w trybie I obliczano na podstawie danych DIC w celu uzyskania alternatywnego rozwiązania i oceny skuteczności wybranej strategii doświadczalnej. W związku z tym dokonywano całościowego porównania wszystkich uzyskanych wyników. Ponadto eksperymentalnie oceniono odporność na pękanie (krzywe R) dla różnych kątów nacięcia.

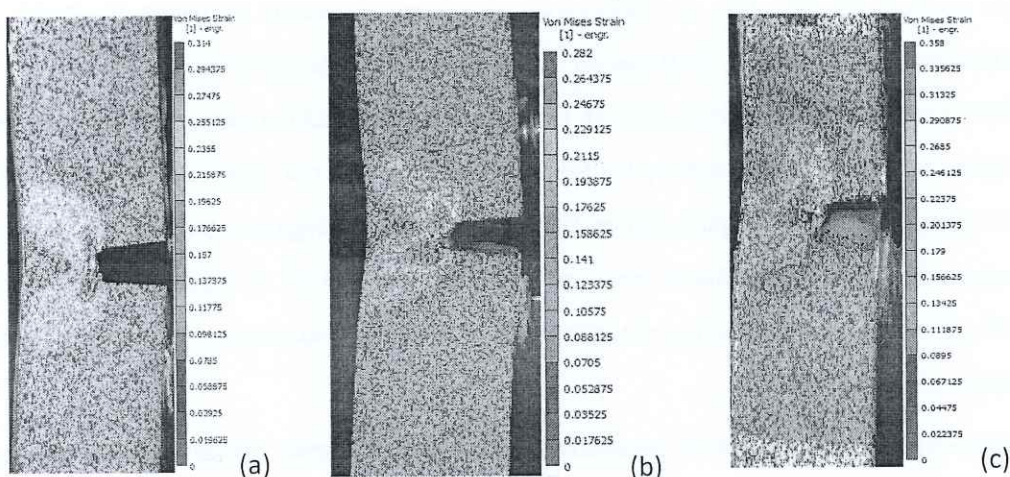
Z badań parametrycznych wynika, że istnieje silny wpływ kąta nachylenia karbu na δ_5 . Zwiększenie kąta nachylenia prowadzi do zwiększenia składowej rozwarcia w trybie III. Próbkę z prostymi karami charakteryzowały się stosunkowo niższą odpornością na pękanie. Wytrzymałość na pękanie wzrastała wraz z kątami dla obciążenia I+III. Z obserwacji powierzchni pęknięcia wynika, że kąt nachylenia wpływa na kształt czoła pęknięcia. Ścinanie w trybie III nie odgrywało istotnej roli w procesie zniszczenia, na który największy wpływ miały naprężenia rozciągające trybu I. Potencjalną przyczyną wzrostu odporności na pękanie wraz ze wzrostem obciążenia w trybie III była praca konieczna na zmianę mechanizmu pęknięcia z rozszczepienia przy obciążeniu w trybie I na ciągły przy obciążeniu w trybie mieszanym I/III.

W rozdziale 5 opisano zastosowanie parametr CTOD w celu zbadania wpływu krótkotrwałego pełzania na pękanie próbek materiału. Wybrano czas pełzania wynoszący 120, 240 i 480 godzin w temperaturze 540°C i poziomie naprężenia 169 MPa. Przeprowadzono testy na próbkach wykonanych z otrzymanych materiałów. Degradację struktury materiału poprzez pełzanie trwające 480 godzin w tym stanie stanowi około 10% jego żywotności. Testy próbek SENT przeprowadzono przy użyciu metod odciążania (UC) oraz pomiaru spadku napięcia (DCPD) w celu zmierzenia wzrostu

pęknięć. Do obliczenia przemieszczenia otworu szczelinowego (CMOD) zastosowano podejście z podwójnym zaciskiem, które wykorzystano do obliczenia CTOD przy użyciu definicji przecięcia 90° , zwanej również metodą UGent. Zmiany odporności na pękanie oceniano dla stanu wyjściowego i każdego etapu degradacji. Porównano maksymalne obciążenia, CTOD przy inicjacji pęknięć oraz krzywe odporności dla każdego etapu degradacji struktury (poprzez przyspieszone pełzanie).



RYСУNEK 2. Kąt nachylenia karbu w próbkach SENT (a), układ pomiarowy 3D DIC badanych próbek w warunkach statycznego rozciągania (b).



RYСУNEK 3. Odształcenie zastępcze HMM wokół frontu pęknięcia pokazane metodą DIC na powierzchni badanych próbek przy maksymalnym obciążeniu dla karbów: prostego (a), nachylonego o 22.5° (b), nachylonego o 45° (c).

Dodatkowe techniki charakteryzacji materiałów, takie jak test udarności Charpy'ego i badanie mikrostrukturalne, wykorzystywano w celu uzyskania lepszego wglądu w efekt degradowania. Badane

nowe próbki wykazały najwyższą wartość CTOD₉₀ przy $\Delta a_{0,2}$ mm odporności na pękanie wynoszącą 1,24 mm, przy czym próbki zdegradowane miały niższe wartości o 48, 39 i 47 % odpowiednio dla 120, 240 i 480 godzin starzenia. Nowy materiał wykazywał szybciej rosnącą krzywą oporu w porównaniu ze starszymi próbkami. Wyniki udarności Charpy'ego i twardości wykazały, że zostały one nieznacznie poprawione, podczas gdy granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie pozostały niezmienione. Analiza mikrostrukturalna SEM wykazała, że mikrostruktura pozostała względnie stała. Naprężenie pełzania należałoby zwiększyć, aby dokładniej naśladować stan materiału pod koniec okresu użytkowania.

Do zbadania wpływu obciążenia wieloosiowego na wytrzymałość na rozciąganie należy stosować karby nachylone w stosunku do osi próbki. Badane próbki wykazały dobre właściwości mechaniczne nawet po termicznej degradacji struktury po 480 godzinach. Granica plastyczności i naprężenie rozciągające spełniają wymagania norm. DCPD zapewniło lepszą przewidywalność rozwoju pęknięć w porównaniu z UC. Charakter krzywych zmienia się wyłącznie w zależności od czasu starzenia, ale nie ma znaczącej różnicy w krzywych CTOD-R odnoszących się do 120, 240 i 480 godzin trwania procesu. Krzywe CTOD-R wskazują, że nowy materiał ma wysoką udarność w porównaniu z próbkami ze wszystkich etapów starzenia, a ich kształty są charakterystyczne dla metalowych materiałów konstrukcyjnych (rosnące krzywe CTOD-R). Z krzywych CTOD-R można wywnioskować, że zakres inicjacji pęknięć nowych próbek jest dwukrotnie większy niż w przypadku próbek starych. Oczywiście jest, że odporność stali 14MoV6-3 na pękanie zmniejsza się wraz z degradacją struktury w wyniku pełzania. Nie stwierdzono istotnej zmiany twardości. Właściwości twardości nowych próbek zgadzają się z tymi podawanymi w literaturze. Wyniki pomiarów udarności i twardości Charpy'ego, chociaż nieznacznie wzrosły w przypadku starszych próbek, pozostały stosunkowo spójne. Analiza fraktograficzna wszystkich próbek ze wszystkich okresów starzenia wykazała, że mają one podobny wygląd. Obserwowany stopień wyczerpania materiału w okresie trwałości w oparciu o parametr odporności na pękanie CTOD jest znacznie wyższy niż w przypadku twardości, pracy łamania Charpy'ego i CTOD na początku pęknięcia.

Badania związku między odpornością na pękanie a termicznym degradowaniem stali przedstawiono w rozdziale 6. Opisano techniki przyspieszonego starzenia izotermicznego (wyżarzania) i przyspieszonego pełzania. Przedstawiono wpływ degradacji materiału na wytrzymałość na rozrywanie ciągłe. Starzenie poprzez pełzanie w wysokiej temperaturze prowadzono w piecu elektrycznym w temperaturze 650°C i naprężeniu rozciągającym 60 MPa przez 100 godzin, natomiast starzenie izotermiczne prowadzono w temperaturze 650°C w warunkach atmosferycznych.

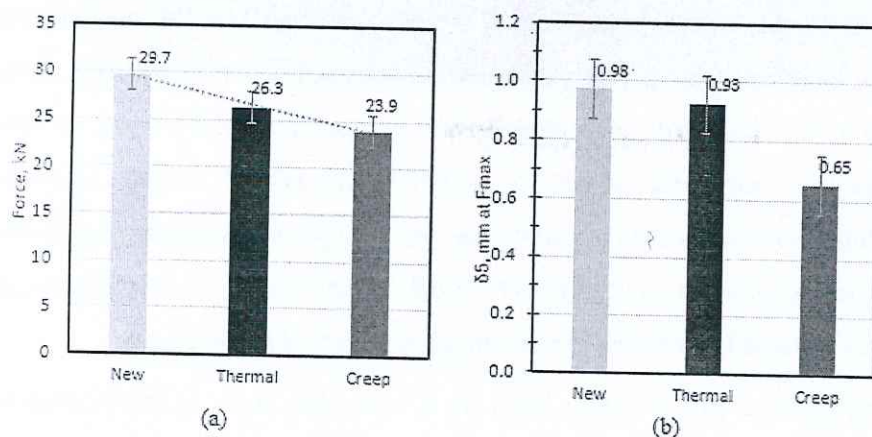
Wyniki odporności na pękanie wykazały, że próbki nieobrobione cieplnie, wykazywały najwyższy CTOD przy maksymalnym obciążeniu ($\delta m = 0,98$ mm), następnie próbki zdegradowane izotermicznie

($\delta m = 0,93$ mm), przy czym próbki poddane pełzaniu wykazywały najniższą wartość ($\delta m = 0,65$ mm), co odzwierciedla zmniejszenie odporności na pękanie o 33%. Pomimo wyraźnych zmian mikrostrukturalnych obserwowanych w procesie starzenia izotermicznego, wyniki wykazały ograniczoną wrażliwość degradacji termicznej bez pełzania w przypadku CTOD. Ponadto nie zaobserwowano istotnych różnic w odporności na pękanie wraz ze zwiększonym czasem wyżarzania próbek. Analizy mikrostrukturalne z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej i skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) wykazały porównywalne pogorszenie w próbkach degradowanych pełzaniowo i izotermicznie.

Jednak brak pogorszenia odporności na pękanie w tych ostatnich podkreśla dominującą rolę pełzania w pogarszaniu się odporności na pękanie. Bardziej znaczący spadek maksymalnego obciążenia zarówno po starzeniu termicznym, jak i pełzaniowym w porównaniu z CTOD sugeruje, że degradacja pełzaniem wpływa przede wszystkim na nośność materiału, a nie na jego ogólną ciągliwość. Chociaż stwierdzono, że pełzanie ma łagodny wpływ w trybie mieszany I i III, stwierdzono, że odporność na pękanie zmniejsza stan naprężenia trójosiowego na krawędziach dla nachylonych karbów, zmieniając tryb pękania z naprężenia płaskiego na odkształcenie płaskie.

Przemieszczenie rozwarcia wierzchołka pęknięcia wykazało bardzo dużą wrażliwość na degradację pełzaniem, co prowadziło do większej propagacji pęknięć i niższej odporności na ich rozrastanie. Degradacja izotermiczna w wysokiej temperaturze spowodowała istotną transformację mikrostruktury, ale nie stwierdzono zauważalnej zmiany w odporności na rozrywanie ciągłe. Zmiany w procesach wytrącania i mikrostrukturze nie świadczą o pogorszeniu właściwości odporności na pękanie. Wraz z pełzaniem w wysokiej temperaturze wytrzymałość na rozciąganie uległa drastycznemu zmniejszeniu. Pełzanie zmniejszyło δm o 33%, a maksymalne obciążenia o 19%. Oznacza to, że materiał staje się kruchy w miarę postępu degradacji, ale wpływa to bardziej na odporność na pękanie, a nie na zdolność do przenoszenia obciążeń, jak pokazano na Rysunku 4.

W rozdziale 7 omówiono przyszłe, możliwe kierunki badań oraz podsumowano wyniki całej pracy. Należy zbadać więcej przypadków trwania degradacji poprzez pełzanie, aby można było zaproponować model empiryczny do przewidywania zmiany wytrzymałości na rozciąganie w funkcji czasu pełzania. Geometria próbki z pochyłym karbem okazała się mniej wrażliwa na proces pełzaniowy. Bardziej znaczący spadek maksymalnego obciążenia w porównaniu z CTOD sugeruje, że degradacja pełzaniem wpływa przede wszystkim na nośność materiału, a nie na jego ogólną ciągliwość. Chociaż wiedza na temat struktury i ewolucji mikrostrukturalnej jest niezbędna do oceny pozostałej żywotności, ma kilka ograniczeń jako narzędzie do określania odporności materiału na pękanie po degradacji.



RYSUNEK 4. Średnie maksymalne obciążenie dla 3 warunków degradacji materiału (a), średnia wartość parametru $\delta 5$ przy maksymalnym obciążeniu (b).

Ogólnie rzecz biorąc, niniejsza rozprawa stanowi podstawę do zrozumienia zmniejszenia odporności na pękanie przy długotrwałej eksploatacji w stalach Cr-Mo-V stosowanych w kotłach energetycznych. Łączenie zaawansowane techniki eksperymentalne z modelowaniem numerycznym, tworzy podstawy do bezpieczniejszej eksploatacji i świadomej konserwacji starzejącej się infrastruktury energetyki cieplnej. Niektóre niedociągnięcia i główne wnioski tej pracy sugerują wiele interesujących obszarów dla przyszłych badań i rozwoju. W pracy tej badano jedynie wpływ degradacji pełzaniem i izotermicznej wyżarzaniem, ale w rzeczywistych kotłach jednym z najczęstszych rodzajów obciążeń są zmienne w czasie, pola sił i temperatury, które indukują degradację materiału w wyniku zmęczenia cieplno-mechanicznego i pełzania w podwyższonej temperaturze.

Należy przeprowadzić bardziej kompleksowe badania eksperymentalne i numeryczne, które obejmują wieloosiowe oddziaływanie pełzania i zmęczenia, aby poprawić dokładność oceny wpływu długotrwałej eksploatacji na pogorszenie właściwości mechanicznych. Ponadto na podstawie przeglądu piśmiennictwa zaobserwowano, że podczas rozruchu w niskiej temperaturze i w warunkach przejściowych może dojść do pęknięć, należy zwrócić uwagę na wpływ niskiej temperatury na stal, zwłaszcza w obszarze wpływu strefy ciepła, który jest najbardziej kruchym obszarem połączenia spawanego. Ponadto należy przeprowadzić badania propagacji pęknięć zmęczeniowych w warunkach obciążenia mieszanego I+III.

Testy odporności na pękanie przeprowadzono w warunkach temperatury pokojowej, jednak badana stal pracuje w podwyższonej temperaturze. Rozszerzenie badań eksperymentalnych na wyższą temperaturę roboczą w celu zbadania pęknięcia w trudnych warunkach termicznych, które symulują rzeczywiste warunki w elektrowni byłoby cenną kontynuacją niniejszej pracy. Jednakże trudno byłoby monitorować i mierzyć przemieszczenie karbu badanych próbek SENT za pomocą DIC ze względu na utratę nakrapianego wzoru na krawędziach próbki podczas deformacji.

Dlatego zaleca się opracowanie bardziej niezawodnej metody wykorzystania DIC do pomiaru CMOD. Możliwe są również inne sposoby jak przykładowo monitorowanie rzeczywistego stanu konstrukcji przy użyciu czujników, takich jak emisja akustyczna i cyfrowa korelacja obrazu, w celu monitorowania wzrostu pęknięć i procesów pękania w ważnych elementach lub w obszarach potencjalnych pęknięć. Analiza mikrostrukturalna starzejącej się stali obejmuje przeprowadzenie kompleksowych badań mikrostrukturalnych, takich jak mikroskopia elektronowa i analiza fazowa, w celu skorelowania zachowania pękania ze zmianami materiału leżącego u podłoża w czasie.

W pracy tej nie uwzględniono obciążenia w kierunku II. Jednakże kotły są konstrukcjami inżynierskimi, które często są poddawane obciążeniom w trybie II, co może skutkować pęknięciem w trybie mieszanym I-II lub bardziej złożonym pęknięciem w trybie mieszanym I-II-III.

Obecnie nie ma normy określającej odporność na pękanie w trybie mieszanym. Celowa byłaby współpraca z operatorami elektrowni w celu potwierdzenia przydatności nowych metod badania odporności na pękanie. Opracowanie modeli empirycznych przewidujących zmiany odporności na pękanie w funkcji narażenia na pełzanie byłoby przydatne w szacowaniu okresu eksploatacji i planowaniu konserwacji elementów bloków elektrowni, zapobiegając w ten sposób nieplanowanym wyłączeniom. Te perspektywiczne kierunki badań mają na celu udoskonalenie obecnych metod oceny integralności konstrukcji starzejących się elektrowni poprzez zrozumienie rozwoju pęknięć w jej elementach, przyczyniając się do zwiększenia bezpieczeństwa, niezawodności i wydłużenia żywotności tej kluczowej infrastruktury.

Curriculum vitae

Benard Kipsang was born and raised in the lush green highlands of the Great Rift Valley Chepkorio, Kenya in August 1991.

He started his schooling at the age of 5 and finished the Kenyan 8-4-4 basic education system in 2008. He started his higher education at Moi University in Eldoret, Kenya, where he enrolled in the Bachelor of Engineering program in Industrial and Textile Engineering in August 2010. His years at Moi were marked by rigorous coursework in fluid mechanics, thermodynamics, electrical technology, textile colorations, and manufacturing processes—subjects that not only challenged him intellectually but shaped his multidisciplinary outlook on problem-solving. His dedication culminated in graduating with second-class honors, upper division.

After gaining hands-on experience in Kenya's engineering sector, Benard's aspirations led him to the global stage. In 2018, he earned a Chinese government scholarship under ministry of commerce and joined Hunan University in Changsha, China, for his master's degree in industrial engineering. His studies covered a wide range of technical subjects, including engineering machinery, manufacturing technology, energy storage systems, quality and reliability engineering, and production scheduling. With a GPA of 4.13 and a strong focus on computational material science, Benard thrived in both research and coursework. He not only gained technical proficiency but also developed cultural fluency, collaborating with peers and professors from around the world.

In 2020, he embarked on a PhD program in Materials Engineering at Silesian University of Technology, Poland, when from 2023 he benefited from a joint doctorate agreement between Politechnika Śląska (Silesian University of Technology) in Poland and Ghent University in Belgium. His dissertation, titled *"Assessment of fracture development in thick-walled elements of power boilers,"* investigates the structural integrity of energy production components, contributing valuable insights to the long-term reliability and safety of power systems. His work, situated at the intersection of

materials science, experimental mechanics, and power plant safety, involved advanced testing techniques such as 3D Digital Image Correlation (DIC) and Crack Tip Opening Displacement (CTOD) assessment under mixed mode I/III loading. While pursuing his PhD, he was actively involved in mechanical material testing, machine calibration.

Beyond university walls and academia, professionally Benard has worked in Kenya for several organizations. Since July 2018, he has worked with Kenya's TVET Curriculum Development, Assessment, and Certification Council (CDACC) Kenya as a Curriculum Development and Assessment Coordinator. In this capacity, he has designed assessment tools, validated national curricula, coordinated candidate assessments, and ensured rigorous quality control in vocational training. His contributions have been instrumental in strengthening Kenya's technical education framework.

In 2025, Benard took on another critical educational role—this time as a Trainer in at Bandari Maritime Academy in Mombasa, Kenya. Here, he is responsible for designing and delivering training programs, developing, and reviewing curricula, and supervising trainees' hands-on sessions. His teaching is enriched by his international research and industrial experience, offering students a well-rounded, industry-ready education.

Benard's industry experience is as rich as his academic background. As an Industrial Engineer at Hela Intimates EPZ in Nairobi, he optimized production processes by implementing lean manufacturing principles, monitoring downtime, creating daily production targets, and balancing production lines using Yamazumi charts and Six Sigma tools. He also developed a multi-skill operator bank, planned production, and calculated operator incentives—directly contributing to enhanced factory efficiency.

Prior to that, at Shanga Engineering Works, he worked as a Mechanical Technician, interpreting technical drawings, supervising machine operations, and applying lean tools to streamline production. These formative experiences on the factory floor gave him valuable insight into the practical challenges of engineering, which would later

inform his academic research and teaching. Throughout his journey, Benard has developed a broad skill. He is equally adept at communication and presentation, blending technical depth with clarity. Professionally, he is registered with the Engineers Board of Kenya (EBK) and is an accredited curriculum developer and assessor with the National Industrial Training Authority (NITA) and Kenya's Ministry of Education (TVET division).

