

Rozszerzone streszczenie pracy doktorskiej

Autor: Benard Kiptoo Kipsang

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

Promotorzy: dr. hab. inż. Krzysztof Waclawiak 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 grubościennie 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 laboratoryjnych 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.

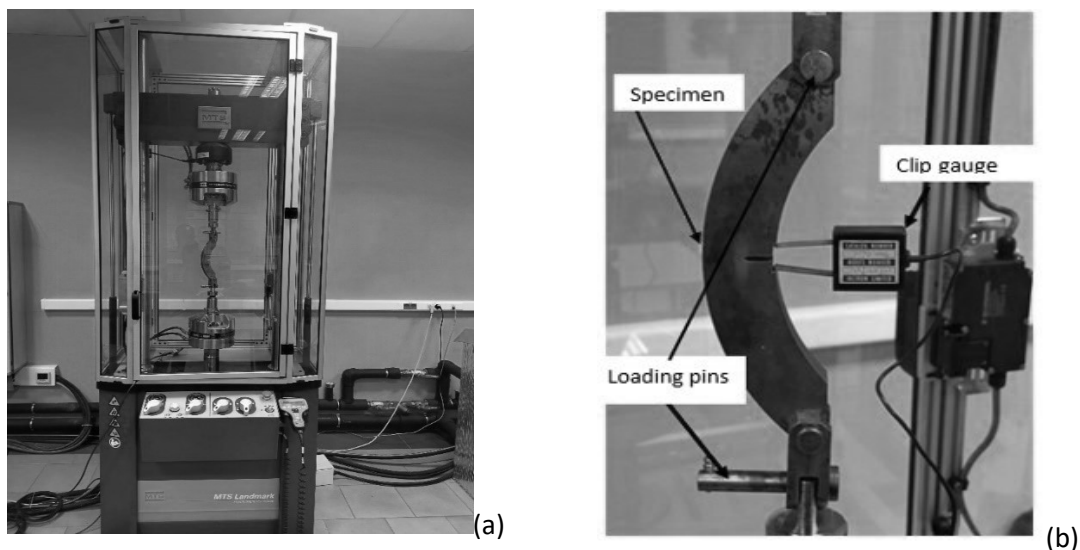
W literaturze rzadziej opisywana jest ocena doświadczalna elementów wykonanych ze stali austenitycznej poddanych długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania. Prowadzone są ograniczone badania nad odpornością na pękanie stali ferrytyczno-bainitycznych (perlitycznych), martenzytycznych i austenitycznych 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).

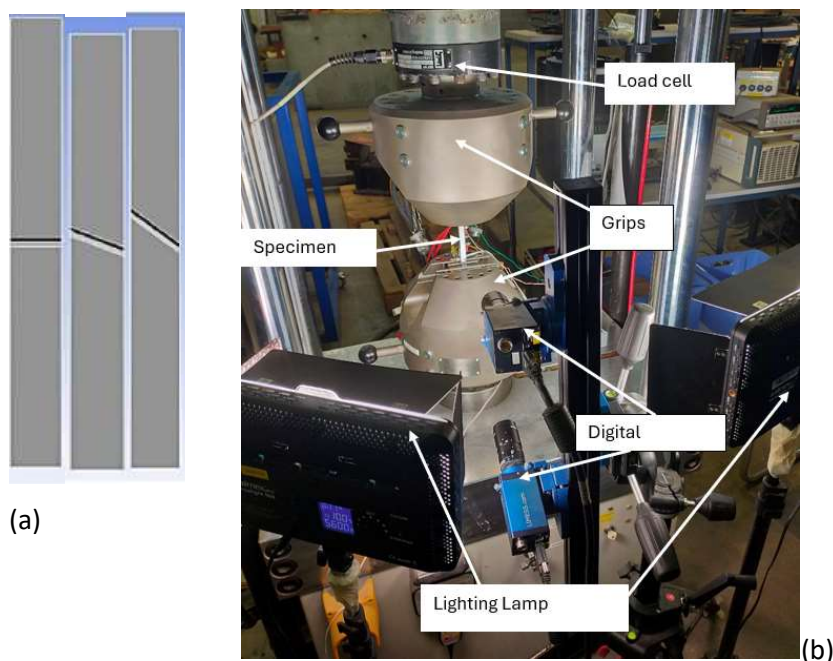
Biorąc pod uwagę złożone naprężenia w orurowaniu kotła energetycznego i ukośną orientację pęknięć, obciążenie w trybie mieszanym I/III odgrywa podczas eksploatacji znaczącą rolę w propagacji pęknięć.

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 pęknięcie 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.

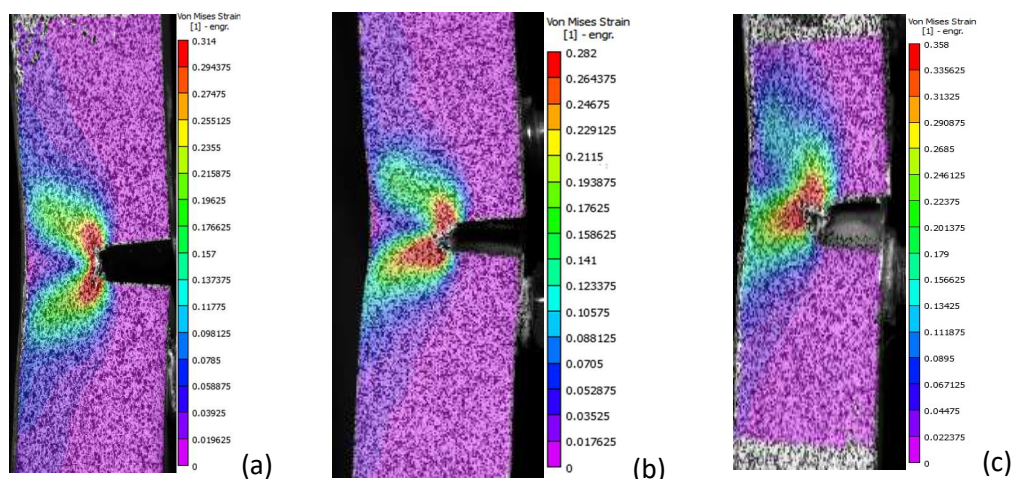
Z badań parametrycznych wynika, że istnieje silny wpływ kąta nachylenia karbu na δ_5 . Zwiększenie kąta nachylenia prowadzi do zwiększenia składowej rozwarcia w trybie III. Próbkę z prostymi karami charakteryzowały się stosunkowo niższą odpornością na pękanie. Wytrzymałość na pękanie wzrastała wraz z 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).



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



RYSUNEK 3. Odształcenie zastępcze HMH 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 pękania.

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.

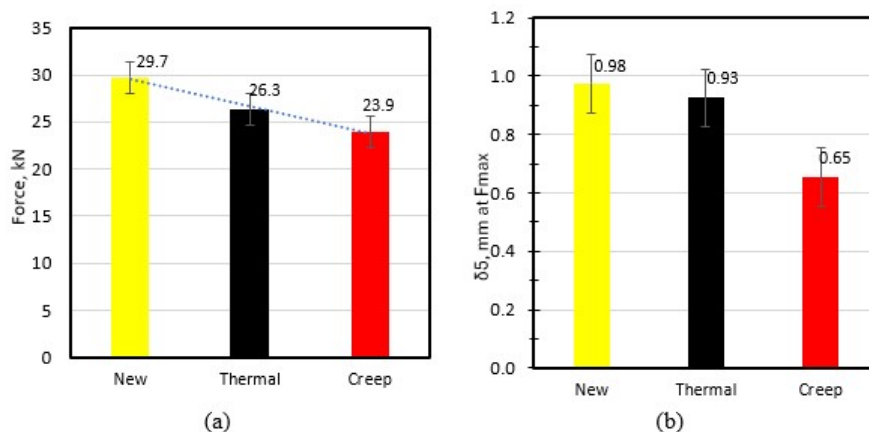
Wyniki odporności na pękanie wykazały, że próbki nieobrobione cieplnie, wykazywały najwyższy CTOD przy maksymalnym obciążeniu ($\delta m = 0,98$ mm), następnie próbki degradowane izotermicznie

($\delta m = 0,93$ 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 ciągliwe. 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 pochylonym 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 δ_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 ciepłej. 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 pękania 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.