

Recenzja

Rozprawy doktorskiej zatytułowanej

„Monitorowanie stopnia rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych stali kotłowych wspomagane optycznymi systemami pomiarowymi”

autorstwa mgr inż. Adama Brodeckiego

1. Podstawa opracowania

Podstawę opracowania stanowi pismo (sygn. RN-D-0002.8.2024) Sekretarza Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN, sygnowane przez prof. dra hab. inż. Zbigniewa Ranachowskiego i dołączona do niego rozprawa doktorska mgr inż. Adama Brodeckiego pt. „*Monitorowanie stopnia rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych stali kotłowych wspomagane optycznymi systemami pomiarowymi*”. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Zbigniew Kowalewski, a promotorem pomocniczym dr hab. inż. Mateusz Kopec.

2. Omówienie pracy

Recenzowana rozprawa doktorska została napisana w języku polskim, łącznie na 220 stronach maszynopisu formatu A4. W skład jej wchodzi: streszczenie w języku polskim i angielskim, spis symboli, spis treści, spis ilustracji i tabel, 6 rozdziałów, spis literatury obejmujący 201 pozycji, 2 dodatki, lista publikacji Doktoranta, lista abstraktów konferencyjnych oraz zgłoszenia patentowe i patenty. Tytuły poszczególnych rozdziałów są następujące:

- 1 Wstęp
- 2 Usytuowanie tematyki rozprawy w świetle aktualnego stanu wiedzy
- 3 Materiały i metody
- 4 Wstępne badania uszkodzenia materiałów poddanych zmęczeniu klasycznymi metodami niszczącymi
- 5 Propozycja kompleksowej analizy rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych na przykładzie stali 10CrMo9-10 (10H2M)
- 6 Uwagi podsumowujące i wnioski końcowe.

Autor rozprawy doktorskiej zaprezentował rozważania dotyczące oceny możliwości wykorzystania optycznych systemów pomiarowych do określenia wytrzymałości zmęczeniowej stali energetycznych P91 oraz 10H2M, poddanych wstępnie długotrwałej eksploatacji w warunkach obciążeń termomechanicznych. W pracy doktorskiej znalazły się również zagadnienia związane z opisem dynamiki rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych przy

użyciu dwóch parametrów odkształceniowych (odkształceniowego współczynnika zmęczeniowego φ_N oraz parametru zmęczeniowego D).

Zweryfikowanie tez naukowych pracy wymagało od Doktoranta przeprowadzenia wielu badań eksperymentalnych na próbkach wyciętych z rurociągów w stanie dostawy oraz po eksploatacji w temperaturze podwyższonej 540°C: przez 80 000 godzin pod obciążeniem ciśnieniem wewnętrznym 8.4 MPa (ok. 9 lat – stal P91) lub 280 000 godzin pod ciśnieniem 2.9 MPa (ok. 32 lata, stal 10H2M). Obydwa rodzaje materiału (P91 oraz 10H2M) poddano testom wytrzymałościowym i zmęczeniowym, obejmującym:

- statyczną próbę rozciągania (5 próbek w stanie dostawy i 5 próbek po eksploatacji),
- badania zmęczeniowe symetryczne, na próbkach klepsydrycznych, przy sterowaniu naprężeniem (20 próbek w stanie dostawy i 20 próbek po eksploatacji), mające na celu określenie dynamiki rozwoju uszkodzeń metodą niszczącą
- badania zmęczeniowe sterowane naprężeniem odzerowo-tętniącym, na próbkach płaskich (20 próbek w stanie dostawy i 20 próbek po eksploatacji), z jednoczesnym użyciem systemów optycznych do monitorowania rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych.

Dodatkowo przeprowadzono analizę przelomów próbek zmęczeniowych wraz z analizą składu chemicznego (przed i po eksploatacji) oraz analizę mikrostrukturalną.

W rozprawie Doktorant szczegółowo opisał algorytm badań, poszczególne ich etapy związane z użyciem optycznych systemów pomiarowych oraz omówił wady i zalety poszczególnych systemów, **co stanowi cenny materiał** pomocny przy planowaniu i realizacji kolejnych badań eksperymentalnych.

W trakcie procesów technologicznych produkcji elementów konstrukcyjnych stosowane są różne typy obróbki, wywołujące wstępną deformację materiału, która może mieć wpływ na jego właściwości mechaniczne. Również okres i warunki eksploatacji tworzą historię deformacji, która determinuje bieżące parametry mechaniczne wpływające na wytrzymałość i żywotność konstrukcji. W związku z tym podjęta przez Doktoranta tematyka badania wpływu historii deformacji na właściwości mechaniczne materiału **ma bardzo duże znaczenie praktyczne**. Oryginalnym elementem pracy jest zastosowanie do oceny stanu degradacji materiału dwóch różnych optycznych technik badawczych, takich jak elektroniczna interferometria plamkowa (Electronic Speckle Pattern Interferometry) oraz cyfrowa korelacja obrazu (Digital Image Correlation), a następnie porównanie ich efektywności. Doktorant podkreślił przewagę techniki DIC, która umożliwia monitorowanie zachowania zmęczeniowego i precyzyjne wskazanie obszarów inicjacji uszkodzeń zmęczeniowych. Podstawową wadą ograniczającą przydatność techniki ESPI jest jej wysoka czułość na drgania maszyn wytrzymałościowych podczas testów zmęczeniowych. Wyniki badań potwierdzają duży potencjał wykorzystania systemów optycznych w monitorowaniu stanu mechanicznego konstrukcji pracujących w ekstremalnych warunkach eksploatacyjnych. Pozwalają one na uzyskanie danych, które trudno byłoby zebrać przy użyciu tradycyjnych pomiarów mechanicznych.

Na uwagę zasługuje również metoda określania granicznej wartości amplitudy naprężenia przy zmęczeniu na podstawie stanu uszkodzenia. Polega ona na wyznaczeniu ewolucji odkształceniowego wskaźnika uszkodzenia zmęczeniowego oraz parametru uszkodzenia

zmęczeniowego dla różnych amplitud naprężenia, a następnie aproksymowaniu wyników funkcjami wykładniczymi. Zależność wykładników tych funkcji od amplitudy naprężenia aproksymowana jest linią prostą. Przecięcie liniowej aproksymacji tej zależności z osią amplitudy naprężenia wyznacza graniczną amplitudę naprężenia (wytrzymałość zmęczeniową). W punktach przecięcia wykładniki funkcji aproksymujących przebieg ewolucji parametrów uszkodzenia są bowiem równe zero, zatem poziom uszkodzeń w materiale staje się niezależny od liczby cykli. Podejście to stanowi alternatywny sposób oceny granicznej wartości amplitudy naprężenia przy zmęczeniu w stosunku do klasycznej metody bazującej na krzywej $S-N$. Metoda ta wydaje się szczególnie korzystna w aplikacjach przemysłowych wymagających ciągłego monitorowania stanu materiału.

W pracy doktorskiej znalazła się też informacja o dotychczasowym dorobku naukowym Doktoranta. Warto podkreślić, że mgr inż. Adam Brodecki jest współautorem 28 publikacji, 39 abstraktów konferencyjnych oraz 4 zgłoszeń patentowych.

3. Uwagi krytyczne

Podkreślając bogactwo materiału doświadczalnego, nowoczesne metody badawcze oraz osiągnięcie oryginalnych, interesujących zależności zmuszona jestem również stwierdzić, że praca zawiera wiele niedociągnięć i niejasności. Są to w większości błędy natury edycyjnej, ale także problemy z nieprecyzyjnym opisem matematycznym. Do pierwszej kategorii zaliczam między innymi:

- Niekonsekwentną konwencję znakowania wielkości mechanicznych. Te same wielkości raz są oznaczane pismem pochyłym, innym razem prostym. Indeksy w jednym równaniu stają się parametrami w innym równaniu (dotyczy to na przykład wzorów (1.8)-(1.11)). Niekonsekwentnie stosowane są indeksy górne i dolne (por. np. równanie (2.4)-(2.7) oraz (2.20)).
- Błędy we wzorach (1.8), (1.9), (1.10). Zostały w nich użyte różne rodzaje funkcji logarytmicznych (logarytmy dziesiętne i logarytmy naturalne). We wzorze (1.8) występuje parametr a oraz błąd obliczeniowy ϑ , natomiast w objaśnieniach do wzoru pojawiają się oznaczenia α i ε .
- Odształcenia oznaczane są dwoma różnymi symbolami: ε oraz ϵ (por. np. wzory (1.14) oraz (2.20)). Czy oznaczają one różne miary odształcenia?
- We wzorze (2.5) brakuje znaku „=”.
- We wzorze (2.19) zastosowano w mianowniku symbol „p”, powinno być „ ρ ”. We wzorach (2.6) i (2.9) dla oznaczenia współczynnika Poissona zastosowany jest symbol „v”, podczas gdy we wzorach (2.23)-(2.25) jest to symbol „ ν ”. Jeszcze inne oznaczenie współczynnika Poissona występuje we wzorach (3.22) i (3.23). We wzorach (2.26) i (2.27) brakuje znaku „ \sim ”.
- Na stronie 46 (w przedostatniej linijce) mikrotwardość materiału bez uszkodzeń zdefiniowana jest przy użyciu zmiennej D i jest taka sama, jak mikrotwardość materiału z uszkodzeniami.
- W równaniach (3.1) oraz (3.2) zamiast górnego indeksu „*” powinien zostać użyty dolny indeks „1”, wtedy wzory te byłyby spójne z oznaczeniami na Rys. 3.9. i z równaniem (3.4).
- We wzorze (3.5) kwadrat powinien być za nawiasem, tak jak to ma miejsce we wzorze (3.6).

- We wzorach (3.21) i (3.27) liczba 2 w mianowniku pod pierwiastkiem powinna być podniesiona do kwadratu.
- Na Rys.3.21 brakuje jednostki.
- W pracy pojawiają się również zdania niepoprawne gramatycznie lub stylistycznie.

Uważam, że powyższe błędy **nie obniżają w sposób znaczący** wartości merytorycznej pracy, świadczą jedynie o braku należytej staranności Doktoranta przy pisaniu rozprawy.

Druga grupa problemów dotyczy sposobu opisu tematyki naukowej pracy:

- W opisie klasycznych modeli związanych z wyznaczaniem trwałości zmęczeniowej parametry modeli oznaczone są tak samo, pomimo że są to fizycznie różne wielkości.
- Równanie (2.7) wprowadza siłę termodynamiczną Y sprzężoną ze zmienną stanu uszkodzenia D , jako pochodną swobodnej energii Helmholtza po zmiennej D . Tak zdefiniowana siła termodynamiczna jest ujemna. Jaka jest jej interpretacja fizyczna?
- Wiele wzorów sprawia wrażenie przypadkowych. Na przykład, w jakim celu znalazły się w pracy dobrze znane wzory (3.20)-(3.27) na naprężenia i odkształcenia główne? Moim zdaniem znacznie ciekawsze byłoby pokazanie przekształceń pokazujących jak z mapy fazowej „przejść” na wielkości mechaniczne (przemieszczenia, naprężenia, odkształcenia).
- Ważną wielkością w rozważaniach Doktoranta jest odkształceniowa miara uszkodzenia, w tekście pracy oznaczona jako φ_N . Zgodnie z definicją (2.45) jest to wielkość kumulatywna. Ilustracją tej definicji jest rysunek 2.14c, jednak tam miara uszkodzenia oznaczona jest innym symbolem, ϕ i nie jest sumowana. W Dodatku A zawarto zaś wykresy wielkości oznaczonej jako φ . Czy chodzi o φ_N zdefiniowane zależnością 2.45, czy też ϕ z rysunku 2.14c? Nie jest dla mnie jasne, jaką definicją Doktorant się posłużył przy wyznaczaniu granicznej amplitudy naprężenia (Rys. 4.10).
- W Dodatku A zawarto wykresy ilustrujące wyznaczanie wykładników parametru uszkodzenia zmęczeniowego D oraz wskaźnika uszkodzenia zmęczeniowego φ dla stali P91 w stanie dostawy oraz po eksploatacji. Co oznaczają funkcje wykładnicze umieszczone na wykresach? Krzywe pokazane na wykresach nie odpowiadają tym funkcjom.

4. Pytania merytoryczne oraz uwagi dyskusyjne

- 1) Nie jest dla mnie jasny wzór (2.45). Wynika z niego, że miara uszkodzenia φ_N jest sumą odkształceń $\varepsilon_{max}(\sigma = \sigma_m)$ co potwierdzają rysunki 2.14c i 2.15c. Czy jest to miara zaproponowana przez Doktoranta, czy też zaczerpnięta z literatury? Jaki jest sens fizyczny tak zdefiniowanej miary (w szczególności sumowania odkształceń średnich, czyli przesunięć pętli histerezy)? Czy ma znaczenie sposób przeprowadzenia testu (sterowanie naprężeniem, sterowane odkształceniem)? Czy przy sterowaniu naprężeniem właściwe jest sumowanie ε_m i ε_w bez użycia wag? Moje wątpliwości budzi też fakt, że zastosowanie takiej miary stanu uszkodzenia prowadzi do niepokojącego wniosku, że poziom uszkodzeń w materiale w stanie dostawy jest wyższy niż w materiale po eksploatacji (patrz Rys. 5.30), co generalnie przeczy drugiej zasadzie termodynamiki.
- 2) Na bazie miary uszkodzenia φ_N wprowadzono znormalizowany parametr uszkodzenia D (wzór 2.42) zawarty w przedziale $\langle 0,1 \rangle$. Czy można rozważyć również inne definicje

D (na przykład $D = \frac{\varphi_N}{(\varphi_N)_{max}}$)? W niektórych publikacjach dotyczących oceny stopnia uszkodzenia zmęczeniowego występują podobne miary (np. Azari, 1984; Socha, 2003; Kukla i inni, 2011). Podobnie jak w przypadku φ_N , nie jest jednak dla mnie jasny fizyczny sens takiej wielkości. Na wątpliwą interpretację fizyczną parametru uszkodzenia D może wskazywać Rys. 4.8 z którego wynika, że w stanie po eksploatacji poziom uszkodzenia zmęczeniowego jest niższy, niż dla materiału w stanie dostawy – aż do osiągnięcia liczby cykli równej około 1000, po której następuje zamiana kolejności.

- 3) Stal P91 charakteryzuje się niewielką różnicą granic plastyczności po stronie ściskania i rozciągania (patrz Egner i inni, International Journal of Plasticity 2020). Co więcej, w temperaturze podwyższonej 600°C granica plastyczności przy rozciąganiu jest wyższa niż przy ściskaniu (co powoduje przesuwanie się pętli histerezy w lewo przy obciążeniach symetrycznych), a w temperaturze pokojowej większą wartość ma granica plastyczności przy ściskaniu, co przyczynia się do przesuwania się pętli histerezy w prawo. Efekt ten nie wynika z istnienia uszkodzeń zmęczeniowych i zaburza obiektywność zastosowanych w pracy miar stanu uszkodzenia zmęczeniowego. Czy w toku realizacji pracy były przeprowadzane badania parametrów mechanicznych stali P91 dla ściskania, w szczególności granicy plastyczności? Czy były przeprowadzane testy zmęczeniowe stali w podwyższonej temperaturze, w której stale te poddawane są eksploatacji?
- 4) Przedstawione w pracy rozważania opierają się na próbach sterowanych naprężeniem. Jednak warunki eksploatacji elementów konstrukcyjnych bywają różne, nie zawsze jest to obciążenie sterowane siłą. Czy rozwijane w pracy metody oceny stanu uszkodzenia zmęczeniowego materiału mogą mieć zastosowanie również dla sterowania odkształceniem?

5. Ocena końcowa przedłożonej rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Adama Brodeckiego posiada przede wszystkim ważny aspekt praktyczny. Posługując się nowoczesnymi narzędziami badawczymi w postaci technik optycznych DIC oraz ESPI Autor wykazał prawdziwość następujących tez naukowych pracy:

- a) *Poziom degradacji materiału, powodując zmiany w mikrostrukturze i obniżenie właściwości wytrzymałościowych materiału wskutek długotrwałej ekspozycji wysokotemperaturowej, determinuje charakter i dynamikę rozwoju jego uszkodzenia w warunkach eksploatacyjnych.*
- b) *Dobrze zdefiniowane mierzalne wskaźniki uszkodzenia zmęczeniowego mogą stanowić konkurencyjną alternatywę dla określania wytrzymałości zmęczeniowej z wykresów Wöhlera dając jednocześnie znacznie więcej danych o stopniu uszkodzenia materiałów poddawanych obciążeniom cyklicznym, zwłaszcza na wczesnym etapie jego rozwoju.*
- c) *Wybór optycznego systemu pomiarowego może mieć istotny wpływ na efektywne monitorowanie stopnia degradacji materiału i jego postępu wskutek cyklicznego obciążania.*

Na podstawie wykonanych badań i analiz Doktorant wypracował szereg wartościowych wyników, do których można zaliczyć następujące:

- Analiza zmian mikrostrukturalnych w stalach P91 i 10H2M po długotrwałej eksploatacji w podwyższonej temperaturze. Badania wykazały, że w stali P91

nastąpiły znaczne rozrosty ziaren ferrytu i pojawiły się nowe wydzielenia węglików, co pogorszyło wytrzymałość stali. W stali 10H2M nastąpiły wyraźne zmiany w składzie i dystrybucji faz, skutkujące zmniejszeniem granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie.

- Zaproponowanie metody wyznaczania trwałości zmęczeniowej na podstawie odkształceniowego parametru stanu uszkodzenia. Metoda została zweryfikowana przez porównanie z wykresami Wöhlera.
- Ocena przydatności wybranych optycznych systemów pomiarowych do monitorowania stanu uszkodzenia zmęczeniowego. Dzięki wysokiej rozdzielczości i możliwości nieinwazyjnego pomiaru, systemy te mogą być skutecznie stosowane do monitorowania stanu mechanicznego elementów konstrukcyjnych.

6. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji praca doktorska mgr inż. Adama Brodeckiego pt „*Monitorowanie stopnia rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych stali kotłowych wspomagane optycznymi systemami pomiarowymi*” przedstawia oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i **spełnia wymagania** stawiane pracom doktorskim przez *Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*. **Wnioskuje o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

Julia Egner