

### **Recenzja**

#### **pracy doktorskiej mgr. Dariusza Mężyka**

**pt. „Połączenie metody Mathara i cyfrowej korelacji obrazu (DIC) jako narzędzie precyzyjnego opisu naprężeń własnych w materiałach rurociągu” wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa Politechniki Warszawskiej**

#### **Charakterystyka zagadnienia**

Praca doktorska mgr. Dariusza Mężyka wynika z bieżących potrzeb sektora energetycznego, który w odczuwalny sposób doświadcza efektów transformacji ekologicznej. Sektor ten wzbogacony jest w odnawialne źródła energii (fotowoltaika, farmy wiatrowe, elektrownie wodne) a docelowo uruchomi elektrownie atomowe. Niemniej na obecnym etapie eksploatuje elektrownie tradycyjne, wprowadzając, gdzie to możliwe nadkrytyczne parametry ciśnienia i temperatury. W znacznej części elektrowni w Polsce eksploatowane są urządzenia wytwarzające łącznie około 25 GW energii, których wiek przekracza obliczeniowy czas pracy. Ponieważ „gwarantowany obliczeniowy czas pracy” był określany przez projektanta z nadwyżką większość elektrowni i elektrociepłowni jest dopuszczana przez Urząd Dozoru Technicznego na kolejne okresy eksploatacji w oparciu o szczegółowe badania diagnostyczne. Praca doktorska mgr. Mężyka dotyczy metodyki tych właśnie badań diagnostycznych w zakresie naprężeń własnych materiałów i konstrukcji.

Prognozowanie czasu trwałości eksploatacyjnej oraz dopuszczenie do dalszej eksploatacji elementów ciśnieniowych po długotrwałej eksploatacji bazują na wszechstronnych badaniach materiałowych i mechanicznych. Stosowany w krajowej diagnostyce system oceny stanu materiału, wykorzystuje m.in. opracowane w Łukasiewicz – Górnośląskim Instytucie Technologicznym bazy danych, obejmujące klasyfikacje struktury w zależności od stopnia wyczerpania materiału oraz charakterystyki materiałów o różnym stopniu wyeksploatowania. Przeprowadzana diagnostyka urządzeń ciśnieniowych obejmuje ocenę degradacji struktury i właściwości mechanicznych materiału w odniesieniu do stanu wyjściowego i pozwala oszacować ile dalszego czasu bezpiecznej eksploatacji w dotychczasowych warunkach może przetrwać. Podstawą diagnozy jest więc znajomość stanu wyjściowego oraz oszacowanie szybkości degradacji struktury i właściwości eksploatacyjnych na podstawie znajomości historii eksploatacji.

Podjęta w pracy doktorskiej tematyka dotyczy jednego z elementów diagnostyki konstrukcji energetycznych, jakimi są makronaprężenia własne tzw. szczątkowe, rejestrowane w materiale przy braku

obciążeń zewnętrznych konstrukcji. Ich duża wartość może prowadzić do katastrofalnego uszkodzenia konstrukcji, gdy naprężenia eksploatacyjne, spowodowane naciągami konstrukcyjnymi oraz obciążeniami cieplnymi i mechanicznymi, występującymi np. przy próbach ciśnieniowych instalacji, spowodują przekroczenie wytrzymałości materiału.

### Charakterystyka pracy

Rozprawa doktorska mgr. Dariusza Mężyka zawiera 142 strony i obejmuje następujące rozdziały: wprowadzenie i studium literatury (7 str.), zdefiniowanie celu i tezy pracy (2 str.), badania własne (17 str.), walidacja metody DIC 3D (22 str.), badania stanu naprężeń własnych w elementach rzeczywistych obiektów przemysłowych (13 str.), podsumowanie wyników (3 str.), zestawienie literatury obejmujące 43 pozycje, w tym 6 autorstwa lub współautorstwa Doktoranta (3 str.) oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Uzupełnieniem jest obszerny załącznik, zawierający 68 rysunków, dokumentujących m.in. rozkłady naprężeń i odkształceń w badanych próbkach (69 str.).

We wstępie Doktorant przedstawił motywację wyboru tematyki badań. Wskazał na potrzeby przemysłu energetycznego w zakresie diagnozowania stanu eksploatowanych elementów ciśnieniowych oraz na znaczenie naprężeń własnych w procesie degradacji materiału. Podkreślił, że monitorowanie naprężeń jest istotnym czynnikiem zapewnienia bezpieczeństwa eksploatacji rurociągów.

Studium literatury obejmuje zdefiniowanie najczęściej stosowanych metod pomiaru naprężeń własnych: fotoelastometrii, ultradźwiękowej, dyfrakcji rentgenowskiej, dyfrakcji neutronów, metod magnetycznych oraz metod optycznych pomiarów pól odkształceń, w tym interferometrii Moiré'a, elektronicznej interferometrii plamkowej i cyfrowej korelacji obrazu oraz metody Mathara. Dwie ostatnie metody tj. metodę cyfrowej korelacji obrazu (DIC) i metodę Mathara opisał szerzej wskazując ich zalety i ograniczenia.

Na podstawie wieloletniego dorobku zawodowego i badań własnych mgr Dariusz Mężyk uznał, że *stan naprężeń własnych materiału rurociągów jest jednym z podstawowych wskaźników stopnia ich degradacji eksploatacyjnej*. Na podstawie podobnych przesłanek sformułował tezę pracy doktorskiej, którą stanowi stwierdzenie, że *naprężenia własne rurociągów można wyznaczyć z dokładnością wymaganą do diagnostyki ... przy zastosowaniu pomiarów półtrepanacyjnych metodą cyfrowej korelacji obrazu DIC 3D*.

Badania własne obejmowały budowę stanowiska pomiarowego dla wykonania powtarzalnych pomiarów naprężeń szczytkowych metodami cyfrowej korelacji obrazu i otworkowej metody Mathara. Ocenę przydatności metody DIC 3D Doktorant określił na podstawie porównawczych

pomiarów naprężeń metodą Mathara oraz obliczeń metodą elementów skończonych MES na płytach laboratoryjnych poddanych obciążeniu i zginaniu.

Walidację metody DIC 3D przeprowadził na próbce płaskiej ze stali P91 poddanej rozciąganiu w szczękach maszyny wytrzymałościowej. Wykonał pomiary naprężeń własnych obu metodami, przy czym metodą DIC 3D wykonał szereg obrazów odkształceń wokół nawierconych otworów. Pomiary metodą DIC 3D powtórzył na 12 próbkach z różnych materiałów, uznając użyteczność metody.

Dalsze badania weryfikacyjne mgr Dariusz Mężyk przeprowadził poprzez określenie stanu naprężeń własnych w elementach rzeczywistych obiektów przemysłowych. W tym celu wykonał metodami DIC 3D i Mathara pomiary naprężeń w rurociągach ze stali P91 na bloku elektrowni Bełchatów, budując do tego celu specjalną konstrukcję rusztowania, mocującą aparaturę pomiarową.

W podsumowaniu wyników swoich badań Doktorant stwierdził, że metoda DIC 3D jest użytecznym narzędziem do określania naprężeń własnych w materiałach rurociągów, przy czym w stosunku do metody Mathara dostarcza dodatkowych informacji o rozkładzie naprężeń.

### Ocena pracy

Podjęta przez Doktoranta tematyka badawcza obejmująca doskonalenie metodyki badań naprężeń własnych w rurociągach energetycznych w pełni kwalifikuje się jako przedmiot rozprawy doktorskiej, a jednocześnie posiada duży potencjał aplikacyjny. Opracowana i zweryfikowana w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych metoda badań i pomiaru naprężeń została przygotowana w wersji nadającej się do wdrożenia przemysłowego. Stanowi znaczące uzupełnienie metod diagnostycznych stosowanych do oceny degradacji materiałów po długotrwałej eksploatacji w rurociągach energetycznych poddawanych działaniu wysokiej temperatury i ciśnienia. Uzyskane pomiary naprężeń własnych oraz rozkłady odkształceń w przebadanych materiałach mają jednocześnie duży potencjał poznawczy i użyteczny dla oceny stanu badanego rurociągu.

Praca jest napisana jasnym i poprawnym językiem, a uzyskane wyniki zostały zobrazowane w postaci tabel i poglądowych zdjęć. Swoje doświadczenie zawodowe Doktorant wykorzystał przy formułowaniu poprawnych i użytecznych w praktyce wniosków. Proponowaną do wykorzystania metodę DIC 3D poddał szczegółowej walidacji i weryfikacji doświadczalnej, szacując jej dokładność i użyteczność.

Przy ocenie walorów poznawczych pracy i zawartych w niej stwierdzeń Doktoranta nasuwają się następujące uwagi krytyczne i dyskusyjne:

- Dyskusyjna wydaje się teza o dominującej roli naprężeń własnych w procesie degradacji eksploatacyjnej rurociągów. Przy prawidłowej eksploatacji instalacji energetycznych

podstawowym procesem powodującym ich zużycie są procesy degradacji struktury, przemiany fazowe, wydzielanie i rozrost po granicach ziaren węglików i faz międzymetalicznych, powodujących zubożenie osnowy w umacniające składniki stopowe, zarodkowanie mikropustek i mikropęknięć, a w efekcie obniżenie wytrzymałości mechanicznej materiału.

- Nie jest również do końca przekonująca teza Doktoranta na temat wyższej użyteczności metody DIC 3D w praktycznym zastosowaniu do pomiaru naprężeń własnych w stosunku do metody Mathara, która uzyskała akceptację UDT do diagnostyki naprężeniowej obiektów przemysłowych. Obie metody dają porównywalne wyniki, przy czym metoda DIC, którą preferuje Doktorant, jest bardziej pracochłonna, wymaga pomiarów kalibracyjnych stosowanych kamer i stosowania skomplikowanych rusztowań w warunkach przemysłowych.
- Doktorant w swojej ocenie pominął pozostałe metody wyznaczania naprężeń własnych, w zasadzie poprzestając na ich definicji. Tymczasem metoda rentgenowska dzięki upowszechnieniu przenośnych rentgenowskich analizatorów znajduje dość szerokie zastosowanie praktyczne.
- We wnioskach końcowych Doktorant odnosi się jedynie do zalet metody DIC 3D, pomimo, że tytuł pracy wskazuje, że „połączenie metody Mathara i cyfrowej korelacji obrazu (DIC) stanowi narzędzie precyzyjnego opisu naprężeń własnych”.

Reasumując należy stwierdzić, że mimo wskazanych powyżej zastrzeżeń o charakterze dyskusyjnym Doktorant zrealizował zaplanowany program badań i osiągnął założony cel pracy. Uzyskał potwierdzenie tezy badawczej oraz uzyskał zaplanowane wyniki. Na uznanie zasługuje Jego dobra praktyczna znajomość inżynierii materiałowej w odniesieniu do zaawansowanych metod pomiaru naprężeń własnych. Należy również podkreślić, że Doktorant wykonał obszerny zakres badań laboratoryjnych i przemysłowych

#### **Wniosek końcowy**

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr. Dariusza Mężyka stanowi wykonane na wymaganym poziomie naukowym opracowanie zagadnienia, określonego tezą i celem pracy. Posiada bezpośrednie odniesienie do światowego dorobku w dyscyplinie inżynierii materiałowej stali żarowytrzymałych eksploatowanych w warunkach wysokiego ciśnienia i temperatury. Zawiera aspekty praktyczne w postaci komplementarnej metodyki pomiaru naprężeń szczególnie przydatnej w badaniach diagnostycznych rurociągów w przemyśle energetycznym. Spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim. Stawiam więc wniosek o dopuszczenie pracy doktorskiej mgr. Dariusza Mężyka do publicznej obrony.