

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. **Olgi Wysockiej-Fotek**

SZACOWANIE WIELKOŚCI I POŁOŻENIA DEFECTÓW PODPOWIERZCHNIOWYCH ZA POMOCĄ IMPULSOWEJ TERMOGRAFII PODCZERWIENI

Recenzja niniejsza ma charakter odpowiedzi na pytania zazwyczaj stawiane przy okazji oceny rozpraw doktorskich.

1. Jaki jest problem naukowy rozprawy i czy został trafnie i jasno sformułowany?

Autorka zdefiniowała (s. 58) jako **cele rozprawy**:

1. *„Zaproponowanie dwóch niezależnych metod szacowania wielkości i położenia defektów znajdujących się pod badaną powierzchnią”.*
2. *„Wykorzystania zaproponowanych metod do odtworzenia średnicy i głębokości symulowanych defektów w stali austenicznej”.*

Badania skupiła na następujących problemach określających zakres pracy:

1. Doświadczalne wyznaczenie zależności temperatury powierzchni próbki wykonanej z jednorodnego materiału od czasu jej stygnięcia, po uprzednim nagraniu krótkim impulsem cieplnym.
2. Określenie przedziału czasu pozwalającego na wiarygodne przeprowadzenie eksperymentu, uwarunkowane szybkością przepływu ciepła. Oznacza to w praktyce wyznaczenie czasu, w którym badaną próbkę można traktować jako medium o jednokierunkowym przepływie ciepła w głąb materiału.
3. Opracowanie procedur prowadzenia badań oraz przygotowanie stanowiska badawczego wraz z fantomem o określonych parametrach geometrycznych i cieplnych.
4. Przeprowadzenie stosownych eksperymentów na zbudowanym fantomie w celu wykazania, że udało się udowodnić założone tezy i osiągnąć założone cele badawcze.

Zadania powyższe wskazują na poczynione założenia i tezy, które jednak nie zostały w rozprawie wyrażone explicite. Do założeń tych zaliczam:

1. Przyjęcie, że badane struktury zostaną wystarczająco opisane poprzez określenie ich właściwości termicznych i geometrię położenia defektów.
2. Ograniczenie badań do metody termografii aktywnej z impulsowym pobudzeniem optycznym. Oznacza to, że badana struktura jest ogrzewana, a informacje diagnostyczne zawarte są w przejściowym procesie stygnięcia jej powierzchni.
3. Tezę, że *„wystarczającym do identyfikacji wad w strukturze badanych, jednorodnych, dobrze przewodzących ciepło materiałów będzie wyznaczenie pochodnej zmian temperatury badanej powierzchni w czasie, co pozwoli na oszacowanie średnicy występujących defektów”.*
4. Tezę, że *„wyznaczenie znanego parametru, tzw. kontrastu termicznego, w czasie jest wystarczające dla oszacowania odległości defektu od powierzchni, przy znanej średnicy badanych defektów”.*

Punkty 3 i 4 nie były w rozprawie zdefiniowane *explicite* jako tezy; dobrze wobec tego, gdyby doktorantka ustosunkowała się do tego zapisu lub go zmodyfikowała, co pozwoliłoby na podkreślenie, czego dotyczy dowód przeprowadzony w doktoracie.

Cele rozprawy osiągnięte zostały na podstawie procedur klasyfikacyjnych bazujących na analizie kształtu przebiegu pochodnej zmian temperatury w czasie i szacowania średnicy defektu na podstawie aproksymacji kształtu krzywej kontrastu termicznego. Równocześnie ograniczają one zakres pracy do badania defektów o przekroju kołowym, co stanowi znaczne, nieuzasadnione ograniczenie. Defekty materiałowe mogą bowiem przyjmować dowolne kształty, a zaproponowana metoda ich identyfikacji powinna pozwolić na oszacowanie charakteru wady materiałowej.

2. Czy Autor rozwiązał postawiony problem i czy użył do tego właściwych metod?

Doktorantka postanowiła osiągnąć założone cele na drodze eksperymentalnej poprzez opracowanie procedur pomiarowych oraz przebadanie możliwości ich wykorzystania w badaniach fantomów, o znanych parametrach termicznych. Część analityczna rozprawy ograniczona jest do znanych z literatury rozważań przepływu ciepła w czasie, po pobudzeniu krótkim impulsem energii. Wykazanie, że zaproponowane procedury analizy procesów cieplnych widocznych na powierzchni badanej próbki nadają się do szacowania głębokości i średnicy defektów w materiałach dobrze przewodzących ciepło ma charakter doświadczalny.

Badania jakości materiałów w podczerwieni należą do nowoczesnej dziedziny NDT (non-destructive testing - nieniszczących badań technicznych) i są w ostatnich latach intensywnie rozwijane. Zastosowane środki techniczne, jak i opracowane procedury okazały się efektywne i jak wykazano w części eksperymentalnej mogą być zastosowane w praktyce. Warto podkreślić, że opracowanie aparatury, oprogramowania i wymienionych procedur testowych wiązało się z koniecznością zestawienia zaawansowanych technicznie stanowisk pomiarowych, jak i wykonania szeregu badań, w tym z użyciem nowoczesnego sprzętu termograficznego. Wykonanie badań i interpretacji wyników wymagało poznania i zrozumienia procesów cieplnych zachodzących w testowanych strukturach. W tym celu Doktorantka pokazała modele analityczne procesów cieplnych, które mogłyby być wykorzystane do zbudowania modeli numerycznych, czego jednak nie wykonała. Warto by wykonać ten krok, gdyż można byłoby wówczas dokonać ilościowej analizy warunków pomiarów w celu doboru zoptymalizowanych parametrów procedur testowych.

3. Zakres pracy

Pierwsze cztery rozdziały to w zasadzie wprowadzenie zawierające przegląd literatury, m.in. podstawy fizyczne i przykładowe zastosowania termografii, wprowadzenie do termografii aktywnej i pokazanie możliwości jej wykorzystania w badaniach nieniszczących. Przegląd ten jest chyba zbyt obszerny, biorąc pod uwagę całą objętość pracy. Niepotrzebnie zawarto w nim informacje opisywane w podstawowej literaturze traktującej o termografii podczerwieni, a brak odniesienia do szeregu publikacji bliskich zasadniczemu nurtowi badań nieniszczących, które stanowią istotę rozprawy. W szczególności brak jest odniesienia do badań nieniszczących materiałów prowadzonych z wykorzystaniem techniki podczerwieni w innych polskich ośrodkach. Przykładowo, prace tego typu, w zakresie materiałów kompozytowych, prowadzone są przez dr Grzegorza Gralewicza w Instytucie Ochrony Pracy w Oddziale Łódzkim (obroniony doktorat w 2010), jak i w Wojskowym Instytucie Technicznym Uzbrojenia, przez dr Waldemara Świderskiego (rozprawa habilitacyjna na etapie recenzji). Doktorat z tomografii termicznej w diagnostyce oparzeń obronił w roku 2003 Pan Marcin Hryciuk, który identyfikował położenie i głębokość ran oparzeniowych, a habilitację z

medycyny, wykorzystując termografię dynamiczną w diagnostyce oparzeń, obroniła Pani Alicja Renkielska w roku 2007. Parę innych uwag krytycznych odnoszących się do opisu pierwszych rozdziałów zawarto w dalszej treści recenzji.

W rozdziale 5, na stronach 58 i 59 opisano cele i zakres pracy. Opis, jak rozwiązano zdefiniowane tu problemy, zawarto w rozdziałach 6 i 7. W rozdziale 6 opisano stanowisko pomiarowe, fantom metalowy z defektami w postaci otworów o przekroju okrągłym, umieszczone w różnych odległościach od powierzchni próbki, jak i wstępne wyniki pomiarów rozkładu temperatury na powierzchni fantomu w czasie, po pobudzeniu krótkim impulsem optycznym. Uzyskano wyniki nie odbiegające od znanych z literatury eksperymentów, wykonywanych przy okazji badań nieniszczących stosując metody aktywnej termografii w podczerwieni.

Zasadnicze wyniki oryginalnych badań własnych zawarto w rozdziale 7, gdzie omówiono metodę szacowania średnicy i głębokości defektów. Problem rozwiązano w badaniach eksperymentalnych, na przykładzie płyty wykonanej ze stali austenicznej, w której wywiercono 43 otwory o różnych średnicach i różnych głębokościach pod powierzchnią fantomu. Pokazano szereg obrazów rozkładów temperatury na powierzchni fantomu, wykonanych dla różnych czasów po wygaszeniu impulsu nagrzewającego. W zależności od warunków pobudzenia i parametrów defektów uwidaczniane są obszary, w których zlokalizowano defekty. Następnie pokazano przebiegi czasowe zależności średniej wartości temperatury nad materiałem bez defektu, jak i z defektami. Na tej podstawie obliczono standardowe kontrasty temperaturowe w wybranych obszarach i wykreślono je w funkcji czasu stygnięcia powierzchni fantomu. Z analizy zmian tych parametrów w czasie wynika, że czas stygnięcia liczony od wygaszenia pobudzenia do wystąpienia maksimum kontrastu termicznego zależy od głębokości defektu. Wniosek ten był znany wcześniej, patrz np.: Vavilov V., Maldaque X, Dynamic Thermal Tomography: New Promise In the IR Thermography. Proc. SPIE, 1682, 1992, a metoda określania głębokości położenia defektu na tej podstawie została opatentowana w roku 1985, patrz Vavilov V., Shirayev V., Thermal Tomograph, USSR patent nr 1.266.308, 1985.

W dalszych rozważaniach zauważono, że można wyznaczyć przedział czasu, w którym rozptył ciepła w badanej strukturze można uznać za jednokierunkowy. Czas ten zależy od grubości badanego, jednorodnego materiału i od jego właściwości termicznych. Kolejna obserwacja dotyczy faktu, że czas wystąpienia standardowego kontrastu termicznego zależy też od średnicy defektu, stąd wysnuto wniosek, że na podstawie tego parametru można określić głębokość defektu jedynie w przypadku znajomości średnicy defektu.

Chyba najważniejszym w rozprawie jest podrozdział 7.1, w którym omówiono jakościową metodę szacowania średnicy defektu. Opiera się ona na określaniu pochodnej rozkładu temperatury na stygnącej powierzchni w czasie. Do obliczania tych zmian wykorzystano oprogramowanie komercyjne. Wyznaczane są rozkłady pochodnej temperatury na badanej powierzchni, nad defektami, w różnych momentach czasu. Określany jest moment czasu, gdy kontrast termiczny dla danego defektu osiąga wartość maksymalną. Dla tych warunków wykreślany jest profil rozkładu wartości kontrastu termicznego wzdłuż linii przechodzącej przez środek defektu. Następnie dokonuje się analizy uzyskanego profilu poprzez wyznaczenie punktów przecięcia stycznych wyznaczonych w połowie profilu z średnią wartością pochodnej temperatury na powierzchni bez defektu. Wyznaczone punkty wyznaczają szacowaną wartość średnicy defektu. Warto byłoby zaproponować ilościową analizę dokładności wyznaczenia konturu.

Kolejnym krokiem jest szacowanie głębokości, na której występuje defekt. Najpierw wyznaczone są zależności kalibracyjne, pokazujące czasy stygnięcia odpowiadające maksimum kontrastu termicznego jako funkcji głębokości defektu. Na tej podstawie możliwe jest szacowanie głębokości defektu o znanej średnicy. Wyznaczanie tych parametrów jest szacunkowe i na obecnym etapie opracowania trudno mówić o dokładności metody. Czy możliwe byłoby zautomatyzowanie procedur wyznaczania położenia i głębokości defektów?

W rozdziale 8 podsumowano wyniki badań. Podsumowanie obejmuje dyskusję wyników i jest zakończone wnioskami, co do praktycznej przydatności przeprowadzonych badań. Niektóre wnioski są dyskusyjne. Brak jednoznacznej deklaracji, co Doktorantka uważa za swoje oryginalne osiągnięcia. Na końcu pracy zamieszczono także dwa dodatki zawierające znane rozważania analityczne.

4. Czy tematyka rozprawy jest aktualna i ważna?

Zagadnienie opracowania efektywnych metod badania jakości materiałów nie jest trywialne i stanowi aktualne wyzwanie technologiczne. Niewątpliwie problemy związane z celami rozprawy wynikają z potrzeb praktycznych. Także wybór techniki obrazowania w podczerwieni jak i aktywnej termografii z zewnętrznym pobudzeniem termicznym są wciąż bardzo aktualne i ważne zarówno teoretycznie jak i praktycznie, gdyż gwałtowny rozwój tych technik w ostatnich latach stanowi bardzo atrakcyjną ofertę w zakresie badań nieniszczących. Badania w tym zakresie prowadzone są przez nieliczne ośrodki naukowo-badawcze.

5. Czy rozprawa świadczy o dostatecznej wiedzy Autora i znajomości współczesnej literatury z dyscypliny naukowej, której dotyczy?

Rozprawa omawia ważne problemy związane z wykorzystaniem technik podczerwieni w nieniszczących badaniach materiałów. Prezentowany w rozprawie przegląd literatury obejmuje 71 pozycji, w tym 5 pozycji współautorskich prac własnych. Są to 3 publikacje konferencyjne, w tym jedna na konferencji QIRT w Krakowie (Proc. QIRT z 2008 roku), jedna praca opublikowana w materiałach konferencji TTP 2006, jeden artykuł w czasopiśmie krajowym, *Rudy i Metale Nieżelazne* i jedna praca wysłana do opublikowania w czasopiśmie *NDT & E International*. Zestaw cytowanych prac obejmuje w praktyce większość nazwisk autorów działających obecnie w obszarze nieniszczących badań z wykorzystaniem dynamicznych metod termografii w podczerwieni. Jednak nie wszystkie najważniejsze prace z tego obszaru wiedzy zostały zacytowane. W szczególności brakuje szeregu publikacji polskich autorów, którzy od paru lat są tu bardzo aktywni. Szkoda, że Doktorantka nie przeszledziła materiałów konferencji QIRT i TTP, które są dostępne w Polsce. Warto było też oprzeć przegląd ogólny na bardziej aktualnych pozycjach bibliograficznych, których parę wydanych było w ostatnich latach w Polsce, co pozwoliłoby na używanie aktualnie obowiązującego słownictwa.

6. Na czym polega oryginalny dorobek oraz jakie jest jego znaczenie poznawcze lub praktyczne?

Autorka rozprawy doktorskiej zaproponowała nowy, technicznie prosty sposób i procedurę szacowania położenia i głębokości defektów w jednorodnej strukturze materiałów dobrze przewodzących ciepło. Badania miały charakter eksperymentalny, poparty wskazaniem znanych rozważań analitycznych rozptyłu ciepła. Weryfikacja tez rozprawy miała charakter doświadczalny na drodze przeprowadzenia badań na fantomach testowych. Zakres przeprowadzonych eksperymentów jest ograniczony do defektów walcowych i dobrze byłoby go uzupełnić o analizę defektów o przekroju innym niż koło. Sama metoda termografii impulsowej jest dobrze znana i opisana.

Warto wskazać na praktyczne znaczenie zaproponowanej metody, gdyż jest prosta i łatwo można ją zaimplementować w praktyce badań nieniszczących, a jej wyniki mogą być bezpośrednio wdrożone w nowoczesnych systemach nadzoru jakości produkcji materiałów. W porównaniu z metodami tomografii termicznej, które obecnie stanowią główny front badań nad możliwościami efektywnej identyfikacji defektów w analizowanych strukturach i analizy zjawisk przepływu ciepła w nieniszczących badaniach materiałów, zaproponowana w rozprawie uproszczona metoda szacowania położenia defektów jest znacznie prostsza i szybsza z punktu widzenia praktycznej implementacji.

7. Czy rozprawa napisana jest poprawnie językowo i stylistycznie oraz jakie są wady i słabe strony rozprawy - uwagi krytyczne i dyskusyjne:

Praca jest napisana starannie jednak Autorka nie uniknęła szeregu drobnych błędów redakcyjnych. Szata graficzna rozprawy jest przejrzysta, a zaprezentowane rysunki, fotografie i wykresy są w większości starannie opracowane. Język pracy jest poprawny. Drobne błędy redakcyjne zaznaczono w rozprawie i nie są one tu omawiane, gdyż można je uznać za nieistotne. Jak wynika z wcześniejszego tekstu można zgłosić następujące uwagi krytyczne:

- Zamieszczony opis klasycznych podstaw i aplikacji termografii w podczerwieni jest niepotrzebny, za to przydałaby się szersza analiza stanu wiedzy w zakresie wykorzystania tej techniki w nieniszczących badaniach materiałów.
- Za brak rozprawy uznaję niedostateczne zaprezentowanie stanu prac dotyczących szerszego kontekstu badań materiałowych, w tym prac zrealizowanych w Polsce; dotyczy to także przeglądu stanu wiedzy, w szczególności w zakresie tomografii termicznej, która stawia te same pytania, których dotyczy rozprawa, na co zwróciłem uwagę wcześniej. W tej sytuacji zwracam uwagę, że problem identyfikacji defektów struktury, ich kształtu i położenia w trójwymiarowej próbce, także identyfikacji właściwości termicznych jest przedmiotem szeregu prac, a więc nie może być traktowany jako odkrycie zdefiniowane dopiero w tej rozprawie. Zdanie nad rysunkiem 4.19 jest ewidentnie nieprawdziwe!
- W opisie podstaw termografii zastosowano archaiczne słownictwo. Zwracam uwagę, że wydano w Polsce normę odnoszącą się do pomiarów temperatury metodą detekcji promieniowania podczerwonego i optycznego. Inna drobna uwaga, podane na stronie 15 równanie to tzw. *prawo przesunięć Wiena*, a pojęcie *prawo Wiena* znane jest jako uproszczona postać równania Plancka.
- Brak w podsumowaniu ustosunkowania się do problemu, co autorka uważa za swoje oryginalne osiągnięcia. Stwierdzenie na str. 55 (przed zdefiniowaniem celu rozprawy, na stronie 58!), że otrzymane wyniki potwierdziły tezę zdefiniowaną w niniejszej pracy, jest co najmniej przedwczesne.
- Zwracam uwagę na konieczność precyzyjnego wyrażania swoich myśli. Przykładowo w zdaniu na stronie 58, pkt. d, chodzi o próbkę rzeczywistą, a nie jej model numeryczny, więc defekty są rzeczywiste, a nie symulowane!
- Brak informacji, jaki wpływ na rozróżnialność wad może mieć ograniczona dokładność pomiarów. Problem ten ma charakter zarówno teoretyczny jak i praktyczny. Praktyczny został pokazany, bo przykłady wskazują o jakiej średnicy wady zostały wykryte.
- Niedosyt budzi brak analiz numerycznych, w szczególności odniesionych do innych niż okrągłe kształty wad materiałowych.

- Nie zgadzam się z jedną z końcowych uwag, że próbki **muszą być** czernione. Mała wartość współczynnika absorpcji=emisji nie stanowi ograniczenia, jeżeli dysponujemy kamerą o wystarczająco korzystnym parametrze MRTD!
- **Proszę udowodnić (ilościowo?) prawdziwość stwierdzenia (s.83 na dole), że „rozkład pochodnej temperatury na badanej powierzchni względem czasu stygnięcia jest lepszy do zobrazowania wielkości defektów, niż zależność rozkładu temperatury na powierzchni od czasu stygnięcia”.**
- Zaproponowany sposób wyznaczenia średnicy i głębokości wad ma być może uzasadnienie jedynie w przypadku badań wad o charakterze dobrze zdefiniowanych obszarów kołowych. Tu komentarz – napisałem „być może”, gdyż brak w pracy głębszej analizy ilościowej, są tylko przykładowe obrazki. Istnieje wątpliwość, czy zaproponowana procedura pozwoli na wyznaczenie wad o złożonych kształtach i czy nadaje się do wykrywania wad rozległych, gdy trudno zidentyfikować obszar referencyjny. Brak analizy dokładności, co powoduje, że podane liczby nie są w pełni wiarygodne.
- Na cytowanym rysunku 4.13 nie wiadomo jaki jest opis osi.
- Sugestia, że zaproponowana metoda nadaje się też do badań materiałów słabo przewodzących ciepło, **co byłoby łatwiejsze** niż w badaniach materiałów dobrze przewodzących ciepło, wymagałaby udowodnienia.
- Uwagi dyskusyjne, dotyczące kontynuacji prac:
 - Większość eksperymentów w badaniach materiałowych wykonywana jest w konfiguracji: źródło po jednej stronie badanego materiału, a kamera termiczna po drugiej stronie. Jest to bardzo wygodna sytuacja, gdyż możliwa jest rejestracja i analiza obrazu termicznego zarówno w fazie nagrzewania jak i naturalnego chłodzenia. O możliwości takiej konfiguracji Autorka nie wspomina!
 - Wyniki analiz termicznych warto byłoby wesprzeć automatycznymi procedurami segmentacji i klasyfikacji obrazów wykrytych wad, gdyż mogłoby to jeszcze lepiej uwidocznić i zunifikować procedury wykrywania defektów struktury.

Reasumując, rozprawę zaliczam do kategorii spełniającej wymagania stawiane rozprawom doktorskim w zakresie nauk technicznych na poziomie dostatecznym. Doktorantka udowodniła, że można zrealizować postawione na początku rozprawy cele, a opracowane metody i procedury mogą być wdrożone do praktyki diagnostycznej materiałów dobrze przewodzących ciepło. Dobrze, gdyby w pracy pokazano możliwość wykrywania defektów nie tylko o przekroju okrągłym, dlatego **sugeruję uzupełnienie rozważań o uwzględnienie innych niż tylko kołowe przekroje defektów, n.p. kwadrat i prostokąt o stosunku boków 3:1**. Analiza może być uzupełniona na drodze badań eksperymentalnych lub na drodze symulacji numerycznych.

Biorąc pod uwagę przedstawioną powyżej ocenę rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Olgi Wysockiej-Fotek wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Prof. dr hab. inż. Antoni Nowakowski