

Prof. dr hab. inż. Piotr Furmański
Instytut Techniki Ciepłej
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Politechnika Warszawska
ul. Nowowiejska 25
Tel: +48-22-234-5276
Fax: +48-22-825-05-65
E-mail: pfurm@itc.pw.edu.pl

**Opinia o rozprawie doktorskiej mgr inż. Olgi Wysockiej-Fotek pt.
"Szacowanie wielkości i położenia defektów podpowierzchniowych za pomocą
impulsowej termografii podczerwieni"**

1. Omówienie rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr inż. Olgi Wysockiej-Fotek dotyczy istotnego zagadnienia wykrywania przy pomocy aktywnej termografii w podczerwieni niewidocznych wad struktury materiału znajdujących się w warstwach podpowierzchniowych. Tematyka ta stanowi przedmiot żywego zainteresowania naukowego wielu ośrodków badawczych na świecie ze względu na jej istotne znaczenie praktyczne. Praca ma zasadniczo charakter doświadczalny i może znaleźć zastosowanie przy określaniu wielkości i położenia defektu pod powierzchnią materiału. Rozprawa napisana jest na 115 stronach i zawiera streszczenie w języku polskim i angielskim, spis oznaczeń, 65 rysunki, 2 tablice, 71 pozycji bibliograficznych i składa się z ośmiu rozdziałów oraz dwóch dodatków.

W krótkim rozdziale pierwszym Autorka uzasadnia celowość wykorzystania promieniowania z zakresu podczerwieni w badaniach nieniszczących wskazując na bezdotykową formę pomiaru temperatury i możliwość wykrywania wad materiałowych różniących się pod względem swych właściwości cieplnych od właściwości materiału badanego.

W rozdziale drugim rozprawy Doktorantka opisuje istotne cechy badań przy pomocy termografii podczerwieni przypominając zakres stosowanych fal oraz podstawowe prawa rządzące promieniowaniem elektromagnetycznym ciała czarnego i ciał rzeczywistych. Następnie omawia sposób wyznaczania pola temperatury na powierzchni obiektu poprzez detekcje promieniowania podczerwonego przez nią emitowanego wskazując na konieczność określenia emisyjności powierzchni przed określeniem wartości jej temperatury. Dalej Autorka wyróżnia dwie metody badań metody biernej i aktywnej termografii podczerwieni opisując różnice między nimi oraz podając przykładowe zastosowania pierwszej z nich w elektronice i elektrotechnice, ciepłownictwie, medycynie i badaniach materiałowych.

W kolejnym (trzecim) rozdziale Autorka skupia się na aktywnej termografii podczerwieni omawiając bardziej szczegółowo jej rodzaje takie jak termografia impulsowa, modulacyjna, impulsowo-fazowa oraz wibrotermografia. Opisuując nie tylko podstawy tych technik, ale również ich wady i zalety w różnych zastosowaniach. Rozdział ten zawiera również krótki podrozdział dotyczący podstawowych zależności związanych z przewodzeniem ciepła w materiałach.

Rozdział czwarty stanowi przegląd stosowanych metod w wykrywaniu obecności, wielkości i położenia podpowierzchniowych wad materiałowych. Autorka opisuje tu dotychczas stosowane metody szacowania wielkości defektu, z obrazu termicznego powierzchni po zastosowaniu impulsowego wymuszenia termicznego, metody szacowania położenia defektu pod powierzchnią badanego materiału wykorzystujące zmiany kontrastu termicznego w czasie. Wskazuje na wpływ wielu czynników na zmienność kontrastu oraz niejednoznaczność określania położenia defektu, o różnej wielkości, pod powierzchnią materiału. W drugiej części tego rozdziału Doktorantka omawia zastosowanie symulacji numerycznej do wykrywania i wyznaczania położenia defektów podpowierzchniowych. Wskazuje na rozbieżności między zmiennością kontrastu temperaturowego powierzchni materiału z czasem stygnięcia uzyskaną doświadczalnie i numerycznie świadczące, w jej mniemaniu, o niedokładności modelowania analizowanego problemu oraz wczesnego etapu rozwoju metod numerycznych służących jego rozwiązaniu.

W rozdziale piątym zostały sprecyzowane cele rozprawy, do których należy zaproponowanie niezależnych metod szacowania wielkości a następnie położenia defektu pod badaną powierzchnią materiału oraz doświadczalne udowodnienie poprawności tych metod poprzez zastosowanie ich do wyznaczenia średnicy i głębokości położenia sztucznie wytworzonego defektu. W rozdziale tym został również krótko opisany szereg działań związanych z zakresem pracy i prowadzących do realizacji wspomnianych celów.

Rozdział szósty rozprawy to prezentacja układu pomiarowego oraz wstępnej próbki doświadczalnej z dwoma nieprzelotowymi, okrągłymi otworami. Celem tego rozdziału było przedstawienie metody pomiaru i analizy powierzchniowego rozkładu temperatury przy pomocy termografii podczerwieni oraz określenie wpływu oddziaływania przeciwległej do impulsu stymulującego powierzchni próbki na wyniki pomiarów..

Rozdział siódmy stanowi zasadniczą część rozprawy. Opisano w nim próbkę- płytę pomiarową ze stali austenicznej zawierającej nieprzelotowe otwory o różnej średnicy i znajdujące się na różnych głębokościach pod powierzchnią próbki. Pokazano tu zarejestrowane przy pomocy termografii podczerwieni obrazy rozkładu temperatury dla różnych czasów po wygaszeniu impulsu stymulującego obrazujące pojawianie się i zanikanie śladów termicznych otworów. Przedstawiono również zmierzone różnice średniej temperatury powierzchni nad materiałem jednorodnym i z otworami-defektami jak również zmienność standardowego kontrastu temperaturowego z czasem stygnięcia próbki dla różnych średnic otworów i ich głębokości pod powierzchnią wykazując, że przy zwiększaniu głębokości defektu następuje przesuwanie się maksimum kontrastu w stronę dłuższych czasów oraz, że maksimum kontrastu jest uzależnione, między innymi od średnicy defektu. W rozdziale tym wykazano również, że wybrana grubość płyty z defektami jest wystarczająca z punktu widzenia braku oddziaływania przeciwległej do impulsu powierzchni płyty na wyniki pomiarów. Dalsza część tego rozdziału jest poświęcona metodom szacowania średnicy i głębokości położenia defektu. Średnicę defektu Autorka proponuje wyznaczać w oparciu o rozkład pochodnej temperatury powierzchni a głębokość położenia defektu ze znajomości tej średnicy oraz czasu występowania maksimum kontrastu temperaturowego. Rozdział ten zawiera również porównanie wyznaczonych przy pomocy termografii podczerwieni średnic i głębokości otworów defektów z wartościami rzeczywistymi. W końcu rozdziału siódmego Doktorantka podjęła próbę szacowania błędów pomiaru ograniczając się do różnic między

średnicą i głębokością defektu zmierzoną śrubą mikrometryczną i wyznaczonych przy pomocy zaproponowanych metod.

Wyniki pracy podsumowano w rozdziale ósmym powtarzając jej zasadnicze osiągnięcia, wspominając o wadach zaproponowanych metod oraz podkreślając potrzebę budowy modeli numerycznych w celu bardziej ogólnej analizy problemu wykrywania defektów podpowierzchniowych materiałów.

2. Uwagi natury merytorycznej

Podczas zapoznawania się z rozprawą nasunęło mi się kilka uwag natury merytorycznej.

- a) Dlaczego do przybliżenia zależności kontrastu temperaturowego od czasu (str.76) wybrano wielomian dziesiątego stopnia. Jak przeprowadzono tę aproksymację oraz jaka była jej dokładność?
- b) Dlaczego na rys.7.12 i 7.13 wartość standardowego kontrastu temperaturowego jest mniejsza od jedności dla głębokości defektu 1,5 mm?
- c) Na rys.7.14 i głębokości defektu 0,3 mm występują dwa maksyma kontrastu temperaturowego. Czym spowodowane jest to drugie maksimum?
- d) Na stronie 80 Doktorantka stwierdza, że jednoznaczne określenie zależności maksimum kontrastu temperaturowego od głębokości defektu „...możliwe jest jedynie w zakresie czasu stygnięcia, w którym na wartość kontrastu temperaturowego na badanej powierzchni nie wpływa przeciwległa powierzchnia materiału jednorodnego.” Czym objawia się wpływ przeciwległej powierzchni na kontrast temperaturowy powierzchni poddanej ogrzewaniu?
- e) Zdanie „Badając materiały o wysokiej dyfuzyjności cieplnej takie, jak metale i ich stopy, wpływ konwekcji i promieniowania na transport ciepła można pominąć” – str.83 - jest niezrozumiałe i wymaga wyjaśnienia.
- f) Nie jest zrozumiałe jak dla każdego piksela obrazu termicznego przybliżano funkcją matematyczną zależność temperatury od czasu.
- g) Nie jest jasny dobór czasu stygnięcia do określania średnicy defektu z rozkładu pochodnej temperatury względem czasu. Dlaczego jeden z czasów, pokazanych np. na rys.7.18 czy 7.19, jest jak określa Autorka rozprawy, daje bardziej „wiarygodny wynik” – str.84?
- h) Nie opisano szczegółowo jak „uwzględniając odległość kamery termograficznej od badanej próbki oraz parametry jej obiektywu, piksele leżące na poziomej osi obrazu przeliczano na milimetry” – str.87?
- i) Dlaczego krzywe kalibracyjne mają takie samo nachylenie bez względu na średnicę defektu - str.92 - oraz dlaczego krzywe te są liniowe w przeciwieństwie do otrzymanych z analizy teoretycznej?
- j) Doktorantka twierdzi, że „zastosowanie proponowanych metod (określania średnicy i głębokości defektu) do badania materiałów izolacyjnych wydaje się wymagać wyzwań skromniejszych”. Na czym opiera ten osąd?

3. Uwagi dotyczące formy redakcyjnej rozprawy

Układ pracy jest poprawny a cele rozprawy i sposób rozwiązania problemu opisane są przejrzysto. W pracy występuje szereg zbędnych powtórzeń. Strona graficzna pracy

została dość staranie przygotowana. Liczba błędów redakcyjnych oraz niedomówień, choć spora nie zmienia ogólnej oceny strony redakcyjnej rozprawy. Do wspomnianych błędów należą:

- str.11: zdolność emisyjna to nie jest energia emitowana w jednostkowym przedziale długości fal. Nazwa – zdolność emisyjna niezgodna z polską normą.
- str. 13: Wzór Kirchoffa dotyczy również tego samego kąta padania i emisji promieniowania.
- str. 15: Brak zależności od temperatury w oznaczeniu $g(\lambda)$
- str.16: Zdanie zaczynające się od słów „Wszystkie zależności opisujące wymianę ciepła ...” jest niezrozumiałe. Jeśli występuje równowaga termodynamiczna między ciałem a otoczeniem to nie ma wymiany ciepła.
- str. 17: Podana modyfikacja prawa Stefana-Boltzmana zawierająca emisyjność nie dotyczy powierzchni ciała rzeczywistego, ale powierzchni modelu ciała szarego.
- str.19: Czy rzeczywiście każda forma techniki aktywnej termografii podczerwieni umożliwia wykrywanie tylko efektów podpowierzchniowych?
- str.21-23: Brak cytatu pozycji literaturowej [8]
- str.23 : wektor gęstości strumienia ciepła jest przeciwny do wektora gradientu temperatury tylko dla ciał izotropowych.
- str.24: Wyprowadzenie równania (3.4) związane jest z kilkoma założeniami: niezależnością właściwości od temperatury, izotropowością i jednorodnością ciała.
- Str.25: Określenie wymiany ciepła między powierzchnią ciała stałego a płynem, jako konwekcję jest „potoczne”. Chodzi, bowiem o przejmowanie ciepła, które jest mechanizmem złożonym przewodzenia i unoszenia ciepła w płynie w pobliżu powierzchni ciała stałego.
- str.28: Określenie „miejsce zdefektowane” nie występuje w języku polskim.
- str.29: Jeśli powierzchni jest nagrzewana modulowanym strumieniem ciepła to wzór (3.10) powinien zawierać amplitudę zależną od tego strumienia.
- str.29: O modyfikacje jakich „powierzchniowych rozkładów amplitudy i fazy” chodzi. Zgodnie ze wzorem (3.10) faza na powierzchni jest zerowa.
- str.30: Zdanie „ rejestracja systemem termograficznym oscylującego pola temperatury w stanie ustalonym ...” jest niezrozumiałe. Jeśli mam stan ustalony to brak jest zmienności w czasie.
- str.30: We wzorze (3.14) zamiast „k” powinno być „ λ ”.
- str.32: Oznaczeni $Re_n(f)$ oraz $Im_n(f)$ są niezrozumiałe. Chodzi chyba o $Re(f_n)$ i $Im(f_n)$.
- str.38: Opis rysunku 4.3 jest niejasny. Co oznaczają różne wykresy dla osi X i Y, gdy defekt jest kwadratowy?
- str.39: Autorka używa słowa „ metoda zaproponowana przez Parkera”. Nie jest jasne, o jaką metodę chodzi. Podany jest tylko wzór na zmianę temperatury w materiale o określonej grubości „L”.
- str.39 i 47: Nie jest jasne, dlaczego wzory (4.2) i (4.4) są różne skoro dotyczą tego samego przypadku. Który jest prawidłowy?

- str.41: Jak wygląda wymuszenie cieplne dla kontrastu temperaturowego zamieszczonego na rys.4.5.
- str.45: Opis pracy [36] jest niezrozumiały.
- str.47: Symbole $T_n(t_k)$ i $T_{n-2L}(t_k)$ są niezrozumiałe. Co oznacza „n” i „k”?
- str.49: Nie jest jasne, czym różnią się czasy t i t' .
- str.52: Opis rysunku 4.13 jest niezrozumiały. Dlaczego występuje ciągle zróżnicowanie temperatury na powierzchni. Może chodzi tu o powierzchnię boczną próbki?
- str.53. Zdanie „ równomiernie nagrzanej z gęstością powierzchniową ...” jest niejasne. Czy chodzi tu o gęstość strumienia ciepła czy o całkowitą pochłoniętą w czasie impulsu energię?
- str. 53: Jakie warunki brzegowe przyjęto dla symulacji numerycznej, której wyniki pokazano na rys.4.14?
- str.54: Na jakiej podstawie Doktorantka wnioskuje, że „rozkłady temperatury na stygnącej powierzchni (rys.15), były zgodne z rozkładami otrzymanymi doświadczalnie (rys.4.16)” jeśli widoczne są znaczne różnice?
- str.62: Skąd wzięto taka wartość emisyjności grafitu – brak cytatu.
- str.67 oraz str.83: Stwierdzenie, że występuje akumulacja energii wewnętrzne w obszarach zdefektowanych wywołana niższą wartością dyfuzyjności cieplnej tych obszarów jest dziwaczne i niezrozumiałe z punktu widzenia fizyki.
- str.82: Koniec zdania „ ...czas pojawienia się maksimum kontrastu temperaturowego odpowiada mniejszej głębokości defektu oraz wyższemu maksimum.” jest niezrozumiały.
- Tablica 1 i 2: Dlaczego udało się odtworzyć średnicę i głębokość defektu tylko dla wybranych głębokości? Po co zamieszczano puste miejsca w tych tabelach?
- str.106: Nie jest zrozumiałe ostatnie oznaczenie we wzorach (A.2).
- str.107: Niezgodne oznaczenie funkcji schodkowej Heavside’a we wzorach (A.11) i (A.12).
- str.108: Skąd wiadomo, że rozwiązaniem (A.5) jest funkcja (A.14) – brak cytatu.
- str.108: Błąd w nazwie funkcji Greena.
- str.108: Skąd wynika ograniczenie $\bar{t} \geq 1$ dla wzoru obrazującego różnicę temperatur $\bar{T} - \bar{T}_0$?
- str.109; Rozwinięcie w szereg Taylora dotyczy chyba obszaru wokół punktu $\xi = 0$.
- str.110: Stwierdzenie „.... sprawność źródła stymulacji jest mniejsza od jedności ...” jest niezrozumiałe. Co to jest sprawność źródła?
- str.112: Dlaczego drugi człon wzoru (B.10) można pominąć dla błędu pomiaru temperatury mniejszego od 1%. Jak jest zdefiniowany ten błąd?
- str.114: Skąd wzięto wartości właściwości cieplnych podanych na końcu tej strony i jakiego materiału dotyczą?

WNIOSEK KOŃCOWY

Recenzowana rozprawa doktorska podejmuje trudną, chociaż coraz bardziej popularną tematykę związaną z wykorzystaniem nieinwazyjnych metod pomiaru do wykrywania wad materiałowych. Praca jest praktycznie czysto doświadczalną. Szkoda, że nie spróbowano wyjaśnić obserwowanych doświadczalnie zależności poprzez symulację numeryczną. Nie powinno to sprawiać większych trudności ale pozwoliłoby uogólnić zaproponowane metody na różne rodzaje materiałów i cechy termiczne wad. Szkoda również, że Autorka nie odniosła się w swej pracy do wielu innych pozycji bibliograficznych ostatnio licznie występujących w literaturze w tym również publikowanych w Polsce. Autorka rozprawy zaproponowała oryginalną metodę określenia średnicy defektu w oparciu o rozkład pochodnej temperatury powierzchni a głębokość położenia defektu ze znajomości tej średnicy oraz czasu występowania maksimum kontrastu temperaturowego. Swoją tezę udowadnia eksperymentalnie, co uważam za cenne osiągnięcie. Na podstawie zamieszczonego na końcu rozprawy spisu literatury można również wnioskować, że wyniki rozprawy nie zostały jeszcze w wystarczającym stopniu rozpowszechnione na forum międzynarodowym.

Oceniając rozprawę doktorską mgr inż. Olgi Wysockiej-Fotek stwierdzam, że spełnia ona wymagania określone w „Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dnia 14 marca 2003 r. oraz późniejszej ustawie z dnia 18 marca 2011 r o zmianie ustawy; „Prawo o szkolnictwie wyższym, ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz o zmianie niektórych innych ustaw.” W mojej opinii Kandydatka zasługuje, zatem na nadanie mu stopnia naukowego doktora nauk technicznych. W związku z tym **wnioskuję o dopuszczenie rozprawy mgr inż. Olgi Wysockiej-Fotek do publicznej obrony.**

