

SEKCJA FIZYKI BUDOWLI KOMITETU INŻYNIERII LĄDOWEJ I WODNEJ
POLSKIEJ AKADEMII NAUK
INSTYTUT FIZYKI BUDOWLI KATARZYNA I PIOTR KLEMM S.C.

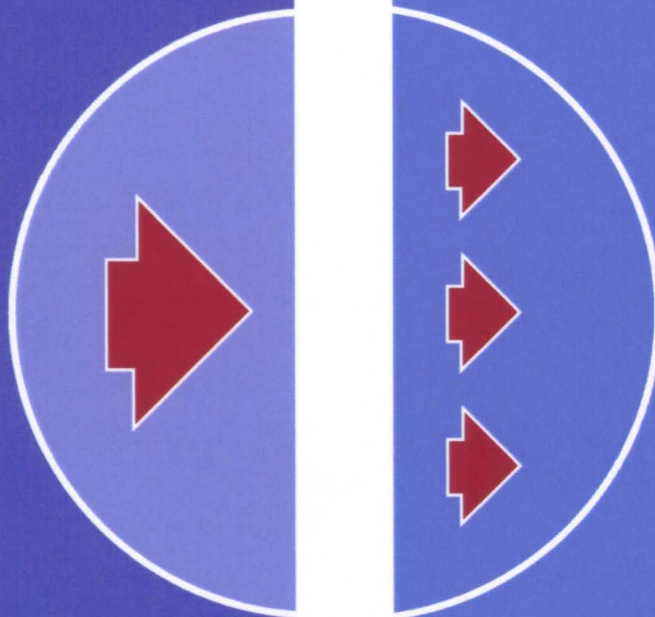
DIVISION OF BUILDING PHYSICS COMMITTEE ON CIVIL ENGINEERING
POLISH ACADEMY OF SCIENCE
INSTITUTE OF BUILDING PHYSICS KATARZYNA & PIOTR KLEMM S.C.

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ

P • M-491
..... GP

FIZYKA BUDOWLI
W TEORII I PRAKTYCE

BUILDING PHYSICS
IN THEORY AND PRACTICE



TOM V, Nr 3

VOLUME V, No. 3

ŁÓDŹ 2010

5.19 1.12

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ

F. M-491
68



SEKCJA FIZYKI BUDOWLI KOMITETU INŻYNIERII LĄDOWEJ I WODNEJ
POLSKIEJ AKADEMII NAUK
INSTYTUT FIZYKI BUDOWLI KATARZYNA I PIOTR KLEMM S.C.

DIVISION OF BUILDING PHYSICS COMMITTEE ON CIVIL ENGINEERING
POLISH ACADEMY OF SCIENCE
INSTITUTE OF BUILDING PHYSICS KATARZYNA & PIOTR KLEMM S.C.

ŁÓDŹ 2010

KOMITET HONOROWY – HONORARY COMMITTEE

Prof. Teresa Jędrzejewska-Ścibak (Poland)
Prof. Maria Stawicka-Wałkowska (Poland)
Prof. Lech Śliwowski (Poland)
Prof. Leszek Wolski (Poland)

KOMITET NAUKOWY – SCIENTIFIC COMMITTEE

Prof. Jacques Beaumont (France)
Prof. Dorota Chwieduk (Poland)
Prof. Wojciech Dzieniszewski (Poland)
Prof. Halina Garbalińska (Poland)
Prof. Dariusz Gawin (Poland)
Prof. Jan Hensen (Netherlands)
Prof. Aleksander Jewtuszenko (Ukraine)
Dr hab. Hanna Jędrzejuk (Poland)
Prof. Piotr Klemm (Poland)
Prof. Agnieszka J. Klemm (Great Britain)
Prof. Elżbieta Kossecka (Poland)
Prof. Jan Kubik (Poland)
Prof. Leszek Laskowski (Poland)
Prof. Wojciech Marks (Poland)
Prof. Henryk Nowak (Poland)
Prof. Stefan Owczarek (Poland)
Prof. Zbigniew Piotrowski (Poland)
Prof. Jerzy A. Pogorzelski (Poland)
Prof. Henk L. Schellen (Netherlands)
Prof. Jan Ślusarek (Poland)
Prof. Robert Wójcik (Poland)

ZESPÓŁ REDAKCYJNY – EDITORIAL BOARD

Przewodniczący Zespołu – Editor-in-chief

Prof. Jan Kubik

Sekretarz Redakcji – Secretary

Dr Dariusz Heim

Komitety Redakcyjny – Editorial Committee

Dr Katarzyna Klemm

Dr Maciej Wojtczak

WYDAWCA – PUBLISHER

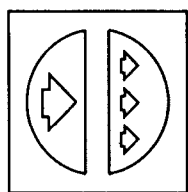
Instytut Fizyki Budowli Katarzyna i Piotr Klemm S.C.
Institute of Building Physics Katarzyna & Piotr Klemm S.C.
ul. Świetlana 7, 91-490 Łódź
e-mail: poczta@fizykabudowli.com.pl

ISSN 1734-4891

SPIS TREŚCI

TABLE OF CONTENTS

HEIM D., JĘDRZEJUK H., SZCZEPAŃSKA E.: Metody określania parametrów oświetlenia dziennego dla potrzeb optymalizacji wielokryterialnej budynków mieszkalnych – komfort wizualny	5
HEIM D., SZCZEPAŃSKA E.: Wstępna walidacja metod obliczania oświetlenia dziennego przy użyciu heliobox-u – pomiary punktowe.....	9
JABŁOŃSKI M.: Analiza własności akustycznych pomieszczenia w zależności od kształtu sufitu.....	13
JĘDRYSIAK J.: Stationary heat conduction in transversally graded laminates with uniform and non-uniform distribution of laminas	17
KLEMM K., KLEMM P., ROŻNIAKOWSKI K.: Domieszkowanie warstwy wierzchniej cegły węglikiem tantalu za pomocą światła lasera rubinowego.....	21
KLEMM K., KLEMM P., ROŻNIAKOWSKI K.: Monitorowanie zjawiska fotonowego czyszczenia powierzchni zabytkowej cegły za pomocą laserowych speckli	27
KLEMM K., PIESZYŃSKI K., ROŻNIAKOWSKI K.: Badania przepływu powietrza wokół obiektu architektonicznego za pomocą transformaty FFT.....	33
KRAJEWSKI G., ŻURAŃSKI J. A.: Wpływ wiatru na odprowadzenie spalin gazu z mieszkań – studium pewnego przypadku.....	41
OSTROWSKI P.: On the fibres shape effect on the temperature field in the two phase hollow cylinder.....	45
RADZIKOWSKA A., OSTROWSKI P.: Heat conduction in TG laminate tolerance modelling and the finite element method	49



METODY OKREŚLANIA PARAMETRÓW OŚWIETLENIA DZIENNEGO DLA POTRZEB OPTYMALIZACJI WIELOKRYTERIALNEJ BUDYNKÓW MIESZKALNYCH – KOMFORT WIZUALNY

Dariusz HEIM*, Hanna JĘDRZEJUK**, Eliza SZCZEPAŃSKA*

* Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: dariusz.heim@p.lodz.pl, eliza.szczepanska@p.lodz.pl

** Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN,
ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa, e-mail: Hanna.Jedrzejuk@ippt.gov.pl

Streszczenie: W referacie przedstawiono metody wyznaczania podstawowych parametrów oświetlenia wewnętrznego. Omówiono wielkości uzyskiwane na podstawie pomiarów *in-situ* w budynkach istniejących, obliczeń symulacyjnych lub obliczeń pośrednich metodami analitycznymi. W pracy rozważano jedynie źródła światła dziennego. Szczegółowo opisano sposoby wyznaczania natężenia oświetlenia, luminancji oraz wskaźnika olśnienia. Wyznaczane parametry służą do oceny komfortu wizualnego, a zatem niezbędne jest ich uwzględnienie w wielokryterialnej optymalizacji budynków mieszkalnych jako jedne z wielu kryteriów decydujących o komforcie wewnętrznym. Praca naukowa została częściowo sfinansowana z środków na naukę w latach 2008-11 w ramach Projektu Badawczego Nr 3989/B/T02/2008/35.

Słowa kluczowe: optymalizacja, oświetlenie, komfort wizualny, pomiary *in-situ*, symulacje.

1. WPROWADZENIE

Każdy budynek mieszkalny musi spełniać szereg wymagań wynikających z jego przeznaczenia jak i sposobu eksploatacji. Dotyczą one przede wszystkim bezpieczeństwa oraz komfortu wewnętrznego. Ponadto, z oczywistych powodów, powinny być uwzględniane takie aspekty jak efektywność ekonomiczna czy troska o środowisko. Zastosowanie w procesie projektowania optymalizacji wielokryterialnej, wspomagającej proces podejmowania decyzji, pozwala na dokonanie racjonalnego wyboru jednego rozwiązania z szeregu możliwych [1].

Oświetlenie wewnętrzne, ze szczególnym uwzględnieniem światła dziennego, jest czynnikiem wpływającym zarówno na jakość środowiska wewnętrznego, jak i nakłady energie-

tyczne ponoszone podczas eksploatacji budynków. Choć nadal zbyt mało miejsca poświęca się projektowaniu nowoczesnych systemów oświetlenia, stale rośnie zainteresowanie kreowaniem przyjaznego środowiska pracy i wypoczynku. Jedynie właściwe wykorzystanie światła dziennego jest w stanie zapewnić odpowiedni komfort wizualny i znacznie ograniczyć koszty utrzymania obiektu.

2. KOMFORT WIZUALNY

Warunki oświetleniowe wywierają wpływ na szybkość, dokładność i wysiłek związany z wykonaniem danej czynności, a także na zdrowie, samopoczucie i funkcjonowanie człowieka. Dlatego też, tak istotne jest stworzenie właściwego komfortu wizualnego wewnątrz pomieszczenia poprzez zapewnienie odpowiednich cech jakościowych i ilościowych oświetlenia. Całościowa ocena komfortu zależy od wielu parametrów osobowych oraz psychofizycznych i jest wielkością niezwykle subiektywną. W ramach rozważań zamieszczonych w niniejszej pracy autorzy zwrócili uwagę jedynie na jego pewne, stosunkowo łatwo mierzalne lub wyznaczalne parametry.

Najzdrowszym dla człowieka rodzajem światła jest światło dzienne. Jego barwa uznawana jest przez oko ludzkie jako „przyjemna”, bowiem jej widmo ma charakter ciągły. Elektryczne źródła światła nie posiadają tych naturalnych i korzystnych dla człowieka i jego środowiska cech. Ze względu na ograniczone powierzchnie świecące oraz wysoką luminancję powodują często uciążliwe olśnienie. Widma sztucznych źródeł światła mają zazwyczaj charakter nieciąg-

gły. Jednak najistotniejszą wadą są koszty utrzymania systemów oświetleniowych, w tym koszty dostarczanej energii elektrycznej, ale także i chłodu niezbędnego do wyeliminowania dodatkowych zysków ciepła. Podejmując się zadania optymalizacji oświetlenia należy przede wszystkim prawidłowo oszacować dostępność i jakość światła dziennego. Uwzględnienie potrzeb związanych z tworzeniem odpowiedniego otoczenia świetlnego, wygody widzenia, wydolności wzrokowej jak i bezpieczeństwa, wiąże się przede wszystkim z określeniem wymagań dotyczących następujących wielkości [2]:

- natężenie i równomierność oświetlenia,
- rozkład luminancji,
- olśnienie,
- kierunkowość światła,
- oddawanie barw i barwy postrzeganej.

Należy zaznaczyć, że olśnienie jest wielkością pośrednio wynikającą z rozkładu natężenia oświetlenia oraz luminancji. Metody wyznaczania olśnienia polegają na odpowiedniej interpretacji ww. parametrów. Kierunkowość światła dziennego polegająca na ocenie udziału promieniowania rozproszonego i ukierunkowanego jest natomiast silnie zależna od warunków pogodowych, głównie stopnia zachmurzenia lub zamglenia. Ponadto, w przypadku budynków mieszkalnych jest to wielkość trudna do zoptymalizowania ze względu na dodatkowe funkcje okien, mających zapewniać kontakt wzrokowy ze środowiskiem zewnętrznym. Natomiast barwa światła i jej wpływu na zachowanie człowieka stanowią oddzielne zagadnienie silnie zależne od indywidualnych preferencji użytkownika. Jedynymi wymaganiami sformułowanymi w sposób ilościowy jest wartość temperatury barwowej źródła światła. Ze względu na specyfikę światła dziennego nie jest to wielkość, która mogłaby być w jakikolwiek sposób kontrolowana i regulowana. Prezentowane przykłady uwzględniają jedynie światło dzienne o zdefiniowanym źródle oraz założonej temperaturze barwowej, zależnej jedynie od pory dnia i pory roku. Dlatego w dalszej części omówiono metody wyznaczania jedynie trzech pierwszych parametrów: natężenia, luminancji oraz olśnienia.

3. NATĘŻENIE OŚWIETLLENIA

Zapewnienie odpowiedniego poziomu natężenia, a także jego rozkładu wpływa na szybkość i obciążenie podczas wykonywania zadania wzrokowego. Niedostateczne oświetlenie powoduje uczucie znużenia, senności pogarszając znacznie samopoczucie obserwatora a dodatkowo może być przyczyną wypadków. Wymagane średnie wartości natężenia oświetlenia w polu pracy, jak i na polu bezpośredniego otoczenia pola pracy określone są w odpowiednich przepisach normowych, BHP, itp. Drugim istotnym parametrem jest równomierność natężenia oświetlenia. Dla czynności ciągłych przyjmuje się, że równomierność oświetlenia na płaszczyźnie roboczej a także w bezpośrednim otoczeniu

świetlnym. Brak równomierności oświetlenia powoduje zmęczenie, co wynika z konieczności adaptacji do zmiennego rozkładu natężenia oświetlenia. Natężenie oświetlenia E_v [lx] w danym punkcie powierzchni wyrażane jest jako stosunek strumienia świetlnego $d\Phi_v$ [lm] padającego na elementarną powierzchnię zawierającą dany punkt do wartości tej powierzchni dA [m²].

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \quad (1)$$

Pomiary natężenia oświetlenia są najprostszym i najczęściej wykonywanym badaniem kontrolnym. Ekspertyzy dotyczą głównie miejsc pracy, dla których sformułowano odpowiednie przepisy. Podstawowym urządzeniem pomiarowym jest luksomierz, służącym do pomiarów punktowych na dowolnie nachylone i zorientowane płaszczyzny. Te same wielkości można wyznaczyć metodami obliczeniowymi zakładając odpowiednie źródło światła – rodzaj nieboskłonu i jego luminancję.

Podstawowe wielkości mierzone lub wyznaczane metodami obliczeniowymi to:

- poziome i pionowe natężenie oświetlenia;
- natężenie oświetlenia dla geometrii cylindrycznej;
- natężenie oświetlenia dla geometrii półsferycznej.

Natężenie oświetlenia dla geometrii cylindrycznej wyznaczane jest jako średnie pionowe natężenie oświetlenia w punkcie, obliczone z wartości natężeń otrzymanych dla różnych położenia płaszczyzny pionowej w trakcie jej pełnego obrotu wokół pionowej osi przechodzącej przez dany punkt. Pół-cylindryczne natężenie oświetlenia jako średnia z wyników otrzymanych dla płaszczyzny pionowej w trakcie jej obrotu o 180°. Natężenie oświetlenia dla geometrii półsferycznej uzyskuje się w wyniku pełnego obrotu płaszczyzny nachylonej pod różnymi kątami (od 0 do 90°).

4. LUMINANCJA

Oko ludzkie ma zdolność adaptacji, tzn. dostosowywania się do widzenia przy luminancji zmieniającej się w bardzo szerokich granicach, jednak do jej zbyt wysokich wartości oko nie jest w stanie się zaadaptować. Pojawia się wtedy uczucie przykrości, a nawet bólu. Dodatkowo przy szybkich zmianach wartości luminancji następuje zmęczenie narządu wzroku. Z tego powodu istotne jest zapewnienie zrównoważonego rozkładu luminancji, czyli unikania zbyt dużych jak i zbyt małych wartości luminancji i jej kontrastów. Zbyt duża luminancja lub zbyt gwałtowna jej zmiana powoduje zjawisko olśnienia. Natomiast praca przy zbyt małych wartościach luminancji powoduje zmęczenie i osłabienie wzroku.

Od wartości luminancji i jej rozkładu zależy poziom adaptacji narządu wzroku, a tym samym jakość oraz wygoda

widzenia. Uważa się, że warunki widzenia są najlepsze, gdy całe obwodowe pole widzenia ma równomierną luminancję (niezbyt małą w porównaniu z luminancją występującą w środkowym polu widzenia) i gdy rozkład luminancji w środkowym polu widzenia jest równomierny. Istotne znaczenie ma luminancja wszystkich powierzchni w pomieszczeniu i jest ona określona przez wartości współczynnika odbicia oraz wartości natężenia oświetlenia tej powierzchni. Zalecane wartości współczynników odbicia znaleźć można w wielu normach i dokumentach. Luminancja świetlna L_v [cd/m^2] w określonym kierunku (zdeteterminowanym przez kąt przestrzenny $d\Omega$ [sr]) oraz określonym punkcie rzeczywistej lub pozornej powierzchni dA [m^2] wywołana strumieniem świetlnym $d\Phi_v$ [lm] przenoszonym przez elementarną wiązkę promieniowania jest zdefiniowana jako:

$$L_v = \frac{d\Phi_v}{dA \cdot \cos \theta \cdot d\Omega} \quad (2)$$

Do pomiaru luminancji stosowane są specjalistyczne mierniki. Mierniki różnią się od siebie wielkością bryłowego kąta pomiaru oraz zakresem pomiarowym.

W pomieszczeniu oświetlonym jedynie światłem naturalnym największą luminancją charakteryzują się zewnętrzne powierzchnie transparentne oraz przegrody wewnętrzne o wysokim współczynniku odbicia światła. Luminancję poszczególnych powierzchni w pomieszczeniu będącymi pozornymi źródłami światła determinują natężenie oświetlenia na poszczególnych płaszczyznach. Obie wielkości fizyczne są ze sobą powiązane następującą zależnością:

$$E_v = \int_{2\pi \text{ sr}} L_v \cdot \cos \theta \cdot d\Omega \quad (3)$$

Jest to jednocześnie równoważna definicja natężenia oświetlenia jako całki liczonej dla półsfery widzianej z danego punktu gdzie L_v [cd/m^2] jest luminancją padającą z różnych kierunków na dany punkt elementarny, wiązek promieniowania rozchodzących się w kątach przestrzennych $d\Omega$ [sr], zaś θ jest kątem między kierunkiem danej wiązki promieniowania a anormalną do powierzchni w danym punkcie.

5. OLŚNIENIE

Olśnieniem nazywa się pewien przebieg (stan) procesu widzenia, przy którym występuje odczucie niewygodę lub zmniejszenie zdolności rozpoznawania przedmiotów (lub jedno i drugie), w wyniku niewłaściwego rozkładu luminancji lub niewłaściwego zakresu luminancji albo nadmiernych kontrastów w przestrzeni lub w czasie.

Z punktu widzenia występujących skutków rozróżniamy trzy rodzaje, olśnienie: przeszkadzające, przykre i oślepi-

jące. Ze względu na warunki powstania rozróżniamy następujące rodzaje olśnienia: bezpośrednie i odbiciowe. Największą luminancją we wnętrzach charakteryzują się same źródła światła (olśnienie bezpośrednie). W przypadku światła dziennego źródłem tym są okna i inne elementy transparentne przegród zewnętrznych. Przy ocenie jakości oświetlenia wewnątrz rozróżnia się wskaźniki służące ocenie olśnienia od źródeł sztucznych oraz od światła naturalnego. W drugim przypadku istnieje wiele metod oceny olśnienia, jednak najpopularniejszą jest wskaźnik *DGI* (ang. *Daylight Glare Index*). Zależność na wskaźnik *DGI* została opracowana na podstawie tzw. formuły Cornell'a [7], zmodyfikowanej przez Chauvel'a [8]. Dla n źródeł olśnienia wskaźnik *DGI* wyrażony jest następująco:

$$DGI = 10 \log \sum_{i=1}^n G_i \quad (4)$$

gdzie:

$$G_i = 0,478 \cdot \left(\frac{L_{vs}^{1,6} \cdot \Omega_i^{0,8}}{L_{vb} + (0,07 \omega^{0,5} \cdot L_{vw})} \right) \quad (5)$$

gdzie:

L_{vs} jest luminancją poszczególnych składowych źródeł olśnienia [cd/m^2],

L_{vb} jest średnią luminancją tła bez uwzględnienia luminancji źródła olśnienia [cd/m^2],

L_{vw} jest średnią ważoną luminancją okna, gdzie współczynnikiem wagowym jest względne pole powierzchni nieboskłonu, elementów przesłaniających oraz gruntu,

ω jest kątem bryłowym utworzonym pomiędzy oknem a punktem obserwacji [sr],

Ω jest kątem bryłowym utworzonym pomiędzy poszczególnymi składowymi źródła olśnienia, a punktem obserwacji z uwzględnieniem kierunku patrzenia [sr], zmodyfikowanym poprzez tzw. indeks położenia P [9]:

$$\Omega = \int_{\omega_s} \frac{d\omega_s}{P^2} \quad (6)$$

Oprócz wskaźnika *DGI*, który jest najstarszą i najbardziej popularną formułą wyznaczania olśnienia na podstawie luminancji źródła światła oraz otoczenia, opracowano również inne metody, wśród których można wymienić:

- nowy wskaźnik *DGI NDGI* (ang. *New Daylight Glare Index*),

oraz metody:

- VCE (ang. *Visual Comfort Evaluation Method*),

- PGSV (ang. *Predicted Glare Sensation Method*),

- VEE (ang. *Vertical illuminance at the eye*).

6. OPTIMALIZACJA JAKOŚCI OŚWIETLLENIA

Rozwiązaniem istotnym z punktu widzenia użytkowników będzie maksymalizacja komfortu wizualnego w wybranym pomieszczeniu (lub na wybranych powierzchniach wewnętrznych) przy minimalizacji kosztów inwestycyjnych oraz kosztów eksploatacyjnych. Jako parametry zadania przyjęto: lokalizację budynku wraz z badanym pomieszczeniem, wymiary pomieszczenia, sposób użytkowania. Zmiennymi decyzyjnymi są: liczba, położenie i wielkość powierzchni przeszklonych (zarówno przeziernych jak i przezroczystych), rodzaj przeszklenia (uwzględniając zmianę rodzaju jak i barwy światła), rodzaj oraz właściwości optyczne materiałów na wewnętrznych powierzchniach pomieszczenia, ponadto obecność urządzeń zacięniających zarówno po stronie wewnętrznej jak i zewnętrznej. Zmienne decyzyjne są dyskretne. Podlegają ograniczeniom wynikającym z geometrii rozpatrywanego pomieszczenia.

Do oceny komfortu wizualnego w pomieszczeniach mogą zostać przyjęte:

- pożądane natężenie oświetlenia w wybranych obszarach:

$$f_1(\mathbf{X}) = \int_A (E_v - E_{v,0})^2 \cdot dA \quad (7)$$

- równomierność oświetlenia:

$$f_2(\mathbf{X}) = \int_A \left(E_v - \frac{\int_A E_v \cdot dA}{\int_A dA} \right)^2 dA \quad (8)$$

- wskaźnik DGI:

$$f_3(\mathbf{X}) = 10 \log \sum_{i=1}^n G_i \quad (9)$$

gdzie:

$\mathbf{X}$ – wektor zmiennych decyzyjnych,

A – wybrane płaszczyzny w pomieszczeniu reprezentatywne do oceny jakości komfortu wizualnego,

$E_{v,0}$ – wymagana wartość natężenia oświetlenia w wybranych obszarach.

W przypadku funkcji $f_1(\mathbf{X})$ poszukiwane będzie rozwiązanie zapewniające minimum odchylenia natężenia oświetlenia od zadanej wartości.

W przypadku funkcji $f_2(\mathbf{X})$ poszukiwane będzie rozwiązanie zapewniające minimum odchylenia natężenia oświetlenia od wartości średniej.

W przypadku funkcji $f_3(\mathbf{X})$ poszukiwane będzie rozwiązanie zapewniające minimum oślnienia.

Koszty inwestycyjne obejmują wszelkie dodatkowe nakłady związane z zapewnieniem określonego efektu końcowego.

Koszty eksploatacyjne związane są z zapewnieniem wymaganych warunków oświetleniowych za pomocą sztucznego oświetlenia.

7. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono możliwości oceny komfortu wizualnego w pomieszczeniach na podstawie pomiarów *in-situ* oraz symulacji. Przedstawiono metodę wyboru najlepszego rozwiązania za pomocą optymalizacji wielokryterialnej. Opisano trzy podstawowe parametry komfortu wizualnego przy założeniu oświetlenia wnętrza światłem dziennym. Określono zmienne decyzyjne zadania optymalizacji oraz sposób poszukiwania rozwiązania optymalnego.

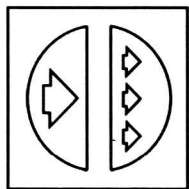
DETERMINATION OF DAYLIGHT PERFORMANCE FOR BUILDING OPTIMISATION – VISUAL COMFORT

Summary: The paper presents physical quantities of visual comfort prediction. Three parameters were selected for multicriterion optimization: illuminance, luminance and daylight glare index. Mathematical formulas and methodology of calculation was described. Finally, the optimization techniques was presented and discussed.

Literatura

- [1] Duda E., Heim D., Jędrzejuk H., Klemm K., Marks W., Walerian E.: Problem optymalizacji wielokryterialnej budynków mieszkalnych z zastosowaniem kryteriów ekonomicznych, komfortu wewnętrznego oraz ochrony środowiska, *Mat. Konf. XII Konferencji. Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce*, Łódź-Słok, s. 45-48, 2009.
- [2] Heim D. (red.): Komputerowa analiza oświetlenia dziennego i ocena parametrów komfortu wizualnego w pomieszczeniach, Łódź 2007.
- [3] Sutherland I.E.: Sketchpad – a man-machine graphical communication system, Technical Report 296, MIT Lincoln Laboratory, 1963.
- [4] Goral C.M., Torrance K.E., Greenberg D.P., Battaile B.: Modeling the interaction of light between diffuse surfaces, *Computer Graphics*, vol. 18(3), 213-222, 1984.
- [5] Whitted T.: An improvement illumination model for shaded display, *Comm. of the ACM*, 23(6), 343-349, 1980.
- [6] Dutre P., Bala K., Bekaert P., *Advanced Global Illumination*, A.K. Peters, Ltd., 2006.
- [7] Hopkinson, R.G.: *Architectural Physics: Lighting. Her Majesty's Stationery Office*, London, 1963.
- [8] Chauvel P., Collins J.B., Dogniaux R., Longmore J.: Glare from windows: current views of problem, *Lighting Research and Technology*, 14(1), 31-46, 1982.
- [9] Guth S.K.: A method of the evaluation of discomfort glare, *Illuminating Engineering*, 58, 1963.

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2008-2011, jako projekt badawczy nr 3989/B/T02/2008/35 „Wielokryterialna optymalizacja budynków mieszkalnych z uwzględnieniem kryteriów: ekonomicznych, ochrony środowiska oraz komfortu w okresie całego roku”.



WSTĘPNA WALIDACJA METOD OBLICZANIA OŚWIETLENIA DZIENNEGO PRZY UŻYCIU HELIOBOX-U – POMIARY PUNKTOWE

Dariusz HEIM^{*}, Eliza SZCZEPAŃSKA^{**}

^{*} Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: dariusz.heim@p.lodz.pl

^{**} Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: eliza.szczepanska@gmail.com

Streszczenie: Praca zawiera opis autorskiej, eksperymentalnej metody walidacji metod wyznaczania wewnętrznego natężenia oświetlenia dziennego dla uproszczonej geometrii pomieszczenia. W części pierwszej przedstawiono podstawy metody TDI - całkowitego wskaźnika oświetlenia dziennego. Następnie omówiono zasady działania urządzenia badawczego Heliobox i założenia dotyczące procedury eksperymentu. Przedstawiono i omówiono wyniki badań dla warunków nieboskłonu bezchmurnego oraz całkowicie pokrytego chmurami. Badania przeprowadzono w miesiącach luty i marzec 2009 roku w Łodzi. Omówiona metoda stanowić będzie podstawę dalszych prac polegających na pełnej walidacji metody TDI.

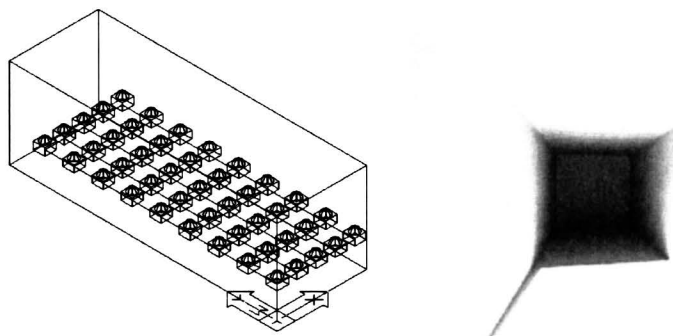
Słowa kluczowe: oświetlenie naturalne, metoda TDI, natężenie oświetlenia, heliobox.

1. WPROWADZENIE

Światło słoneczne charakteryzuje się najlepszymi parametrami jakościowymi ze względu na natężenie, zdolność oddawania barw oraz brak efektów ubocznych np. migotania. Nie do przecenienia jest także rola światła dziennego z punktu widzenia psychofizycznych potrzeb człowieka. Problem ten został szczegółowo omówiony w pracy [1,2,3]. Do podstawowych parametrów komfortu wizualnego należą: natężenia i równomierność oświetlenia, luminancja, kontrast i olśnienie. Ponadto przy prawidłowym kształtowaniu oświetlenia wewnątrz należy brać pod uwagę barwę oraz kierunkowość strumienia świetlnego.

Stopień jasności wewnątrz może być wyrażony poprzez bezpośrednie podanie wartości natężenia światła E w luksach na wybranej płaszczyźnie (poziomej lub pionowej), bądź poprzez wyznaczenie współczynnika światła dziennego DF (Daylight Factor) podawanego w procentach. Obliczenia

natężenia oświetlenia oraz współczynnika światła dziennego dokonywane są dla różnych warunków brzegowych – rodzajów nieboskłonów [4]. Natężenie oświetlenia a zarazem jego równomierność wyznaczone są dla warunków nieboskłonu bezchmurnego, zaś współczynnik oświetlenia dziennego dla nieboskłonu równomiernie pokrytego chmurami. Oba rodzaje nieboskłonów są modelami teoretycznymi opracowanymi na podstawie wieloletnich pomiarów oraz analiz rzeczywistych warunków luminancji nieboskłonu [5]. Ocena możliwości efektywnego wykorzystania światła dziennego do oświetlenia wewnątrz dokonywana jest na różnych etapach projektowania budynków ale także w trakcie jego eksploatacji. W fazie projektowej dokonuje się jej za pomocą obliczeń komputerowych [6]. Natomiast w budynkach istniejących ilość światła dziennego jakie dociera do zadanej płaszczyzny może być dodatkowo mierzona *in situ* dla rzeczywistych, chwilowych warunków pogodowych.



Rys. 1. Geometryczny model Helioboxu.
Fig. 1. Geometrical model of Heliobox.

W ramach realizowanego w latach 2005-07 projektu badawczego opracowano nową, uniwersalną dla różnych wa-

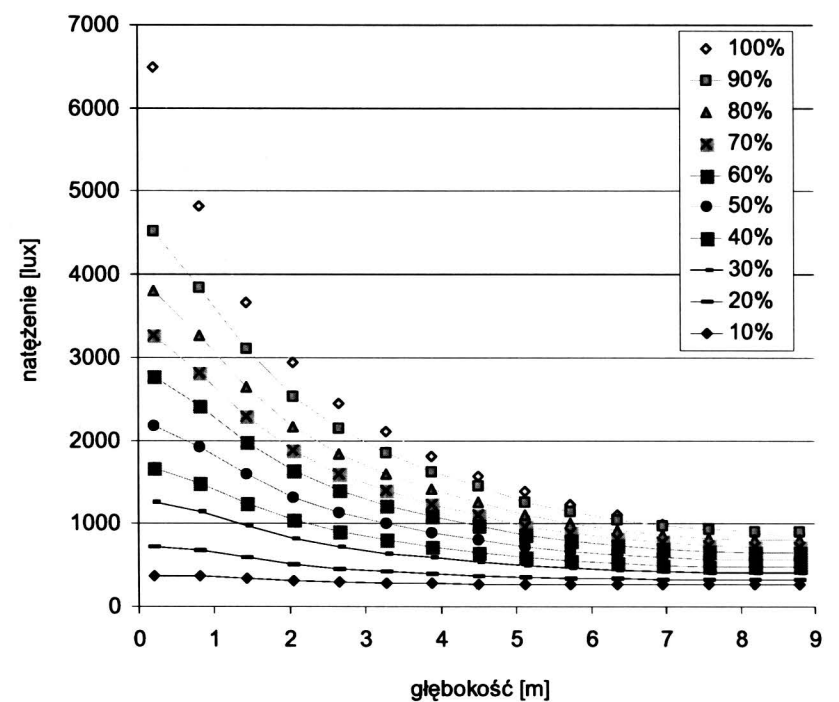
runków pogodowych metodę oceny oświetlenia wnętr światłem dziennym. Zaproponowane podejście polega na wyznaczeniu całkowitego wskaźnika oświetlenia dziennego (*TDI – Total Daylight Index*) w pomieszczeniu, określonego na podstawie natężenia oświetlenia na różnych głębokościach pomieszczenia [6]. Podstawy metody opracowano przy wykorzystaniu zaawansowanych technik symulacji komputerowych [7] dla teoretycznych, wybranych warunków oświetlenia (nieboskłon zachmurzony). Niniejsza praca zawiera podstawy metody *TDI* wraz ze szczegółowym opisem autorskiego stanowiska badawczego. Ponadto przedstawiono wstępne wyniki walidacji uzyskane dla warunków nieboskłonu bezchmurnego oraz częściowo pokrytego chmurami.

2. METODA *TDI*

Przedstawiona metoda wprowadza pojęcie Całkowitego Wskaźnika Oświetlenia Dziennego – *TDI* (ang. *Total Daylight Index*). Podejście to ułatwia dokonania ilościowej oceny stopnia wykorzystania światła dziennego w budynku na każdym etapie – od projektu koncepcyjnego do fazy eksploatacji. Potrzebne dane ograniczają się do znajomości geometrii obudowy budynku, podstawowych wymiarów obiektu oraz jego funkcji. W zależności od sposobu użytkowania obiektu oraz wymaganych wartości poziomu natężenia oświetlenia możliwe jest określenie przepuszczalności obudowy oraz stopnia dystrybucji światła we wnętrzu. *TDI* jest wskaźnikiem bezwymiarowym będącym iloczynem współczynnika przenikania światła do wnętrza obiektu przez jego obudowę T oraz współczynnika przenoszenia światła od jego źródła do punktu na płaszczyźnie roboczej D . Jego wartość zmienia się od 0 do 1. Wymagane wartości *TDI* powinny być ustalane indywidualnie w zależności od położenia geograficznego (długość i szerokość geograficzna) jednak bez uwzględniania dodatkowych uwarunkowań zewnętrznych, w tym zabudowy sąsiedniej, elementów zacieniających, zieleni itp. Wszystkie dodatkowe czynniki uwzględniane są poprzez współczynnik korygujący C . Dodatkowo współczynnik korygujący pozwala uwzględnić zróżnicowaną geometrię elewacji i znajdujących się w niej otworów oraz nietypowy sposób rozprowadzania światła we wnętrzu. W pierwszym przypadku uwzględniane jest ewentualne przesunięcie źródła światła względem płaszczyzny roboczej. W drugim zróżnicowane charakterystyki emisyjne górnych, dolnych lub bocznych powierzchni wewnętrznych pomieszczenia.

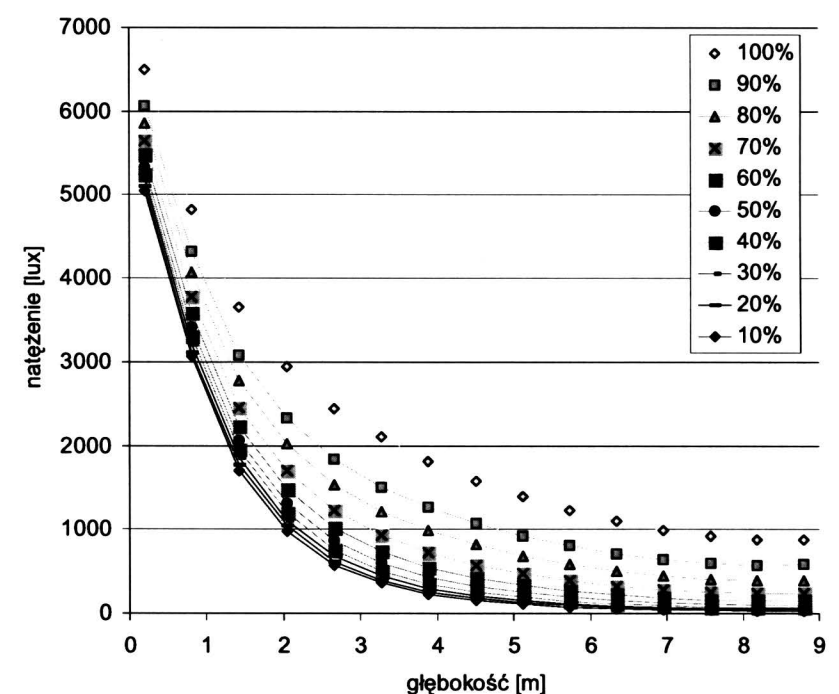
Podstawowe diagramy opracowano dla lokalizacji odpowiadającej obszarowi Polski (52,25N i 21,00E) przy założeniu, że źródłem światła dla wnętrza jest płaszczyzna pionowa. Obliczenia wskaźnika *TDI* przeprowadzono dla godziny 12:00 (południe), dla dnia 21 marca. Przyjęto nieboskłon w pełni zachmurzony o parametrach przyjętych zgodnie z wytycznymi Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) [5] oraz współczynnikiem zmętnienia

atmosfery $T_L=3,75$ [6]. Pozwoliło to na wyeliminowanie wpływu orientacji otworów doświetlających względem stron świata na otrzymane wyniki. Pomieszczenie testowe miało szerokość 3 m, długość 9 m zaś wysokość także 3 m. Maksymalna wielkość powierzchni transparentnej to 9 m^2 co stanowi $\frac{1}{3}$ całkowitej powierzchni podłogi. Profile rozkładu natężenia oświetlenia na głębokości pomieszczeń przy różnych wartościach współczynnika T i D przedstawiono odpowiednio na rysunkach 2 i 3.



Rys. 2. Profil rozkładu natężenia oświetlenia dla zmiennego współczynnika przenikania światła T .

Fig. 2. Daylight illuminance profiles in the room with different transferring (T) properties at external surface.



Rys. 3. Profil rozkładu natężenia oświetlenia dla zmiennego współczynnika dystrybucji światła D .

Fig. 3. Daylight illuminance profiles in the room with different distribution (D) properties of a building interior.

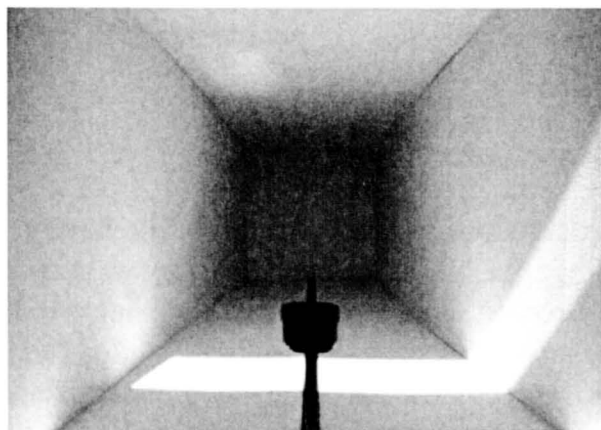
3. HELIOBOX

Weryfikacja metod obliczeniowych oświetlenia dziennego dokonywana jest najczęściej dwiema metodami. Pierwsza z nich polega na pomiarach dokonywanych w rzeczywistych obiektach. Druga poprzez analizę z użyciem sztucznego nieboskłonu na specjalnych, opracowywanych w odpowiedniej skali modelach. Każda z wymienionych metod posiada wiele zalet jak i niedogodności. W pierwszej, możliwe jest dokonanie pomiarów jedynie dla jednego sposobu rozwiązania architektonicznego obudowy budynku oraz zakładanej aranżacji wnętrza. Istnieje natomiast możliwość dokonywania analiz dla różnych, rzeczywistych warunków oświetleniowych. W drugiej metodzie warunki oświetlenia kształtowane są w sposób sztuczny (elektryczne źródło światła z odpowiednio regulowaną mocą) jednak znacznie większe są możliwości zmian parametrów architektonicznych (kształtu, barwy itp.). Celem jaki postawili sobie autorzy niniejszej metody pomiarowej było znalezienie kompromisu pomiędzy uniwersalnością i łatwą adaptacją urządzenia do bieżących potrzeb a możliwością zastosowania naturalnych warunków oświetlenia. W wyniku podjętych działań zbudowano autorskie stanowisko badawcze tzw. skrzynkę słoneczną (Heliobox) oraz opracowano metodę pomiarów dla rzeczywistych warunków pogodowych.

Stanowisko pomiarowe oparto na skrzynce słonecznej będącej modelem prostopadłościennego pomieszczenia o wymiarach 3×3×9 m wykonanego w skali 1:6. Ścianki Helioboxu są wymienne przez co istnieje łatwość zmiany kolorystyki otaczających powierzchni. W środkowej części urządzenia na wysokości odpowiadającej wysokości płaszczyzny roboczej nad powierzchnią podłogi zamocowano przesuwany czujnik światłomierza. Drugi czujnik zainstalowano na poziomej powierzchni zewnętrznej znajdującej się ponad Helioboxem, rys. 5. Urządzenie posiada możliwość wysunięcia poza obrys elewacji na stronę południową. Istnieje również możliwość zmiany położenia urządzenia względem stron świata. Pomiary wykonywane są równolegle (natężenie oświetlenia we wnętrzu oraz na zewnątrz Helioboxu) luksomierzami precyzyjnym o klasie dokładności A.

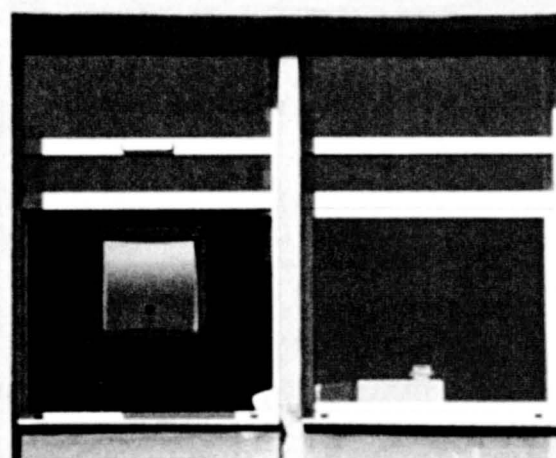
Eksperyment przeprowadzono dla poszczególnych jasności materiałów wnętrza w 3 seriach pomiarowych. W każdej z serii wykonano 8 pomiarów na różnych głębokościach. Jednocześnie monitorowano warunki zewnętrzne: natężenie oświetlenia na zewnątrz budynku, stopień zachmurzenia, wysokość i rodzaj chmur. Wstępne eksperymenty przeprowadzono dla różnych warunków zewnętrznych w miesiącach luty-marzec 2009 roku. Dla potrzeb niniejszej pracy przedstawione wyniki pomiarów ograniczono do dwóch

przypadków – nieboskłon bezchmurny oraz całkowicie zachmurzony.



Rys. 4. Wnętrze Helioboxu.

Fig. 4. Interior of Heliobox.



Rys. 5. Widok Helioboxu po wysunięciu z pomieszczenia.

Fig. 5. Heliobox view from outside.

4. PRZYKŁADOWE WYNIKI POMIARÓW

Eksperyment przeprowadzono dla warunków nieboskłonu całkowicie zachmurzonego oraz bezchmurnego. Pomiary porównano z wynikami symulacji przeprowadzonej dla standardowych nieboskłonów wg CIE [5]. W czasie prowadzonych prób jednorodnie zachmurzony nieboskłon uzyskano jedynie w dniu 24 lutego (8/8). Natomiast w dniu 26 marca o godzinie 11:00 nieboskłon określono jako prawie bezchmurny (2-3/8). Szczegółowe dane dotyczące warunków meteorologicznych w chwili pomiaru zamieszczono w tabeli 1.

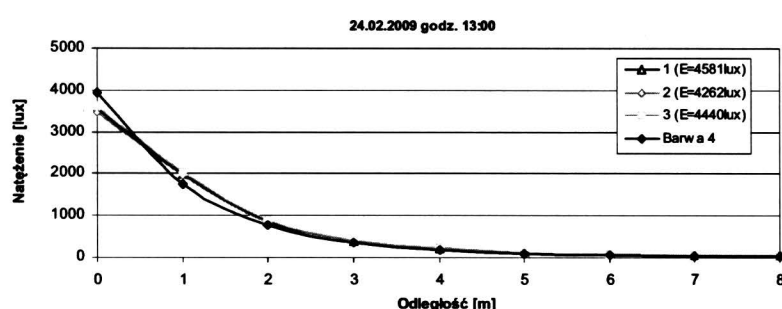
Tabela 1. Warunki meteorologiczne w czasie pomiarów.

Data	24.02.2009	26.03.2009
Czas	13:00	11:00
Pogoda	zachmurzenie zamglenie	prawie bez- chmurnie
Podstawa chmur [m]	100-200	> 2500
Zachmurzenie	8/8	3/8
Rodzaj chmur	Stratus	Cumulus

Dla potrzeb eksperymentu wykonano 4 zestawy szybowe o różnej przepuszczalności promieniowania świetlnego (przenikanie T) oraz zestaw 10 barw w skali szarości o różnych współczynnikach odbicia i pochłaniania światła (przenoszenie - D) [8].

4.1. Nieboskłon zachmurzony

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki pomiarów dla barwy 4 (szarość) oraz 0 (śnieżna biel), którymi pokryto wszystkie powierzchnie Helioboxu. Ścianę zewnętrzną pozostawiono jako niezabudowaną (o przepuszczalności całkowitej światła 100%). Wyniki otrzymane na różnych głębokościach pomieszczenia porównano z wynikami symulacji komputerowej wykonanej metodą wstecznego śledzenia promienia [7]. Dla większości punktów otrzymane wyniki pokrywały się z wynikami obliczeń symulacyjnych.

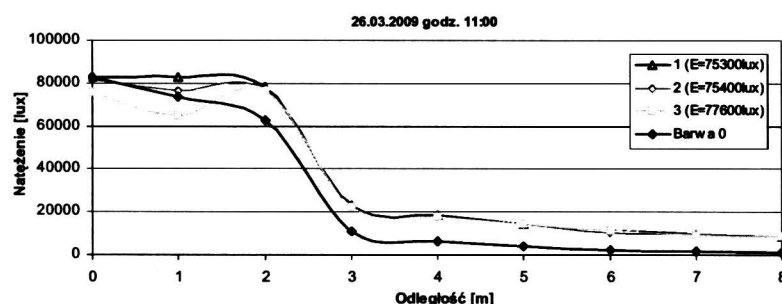


Rys. 6. Rozkład natężenia oświetlenia dla nieboskłonu zachmurzonego.

Fig. 6. Daylight illuminance distribution for overcast sky.

4.2. Nieboskłon bezchmurny

Podobną analizę przeprowadzono dla warunków nieboskłonu prawie bezchmurnego. Wyniki pomiarów porównane z wynikami obliczeń (rys. 7) pokazują na istotne różnice zaobserwowane w głębszej części pomieszczenia. Wartości natężenia oświetlenia otrzymane na drodze symulacji są zdecydowanie zaniżone w stosunku do wyników pomiarów. Niewielka ilość przeprowadzonych pomiarów nie pozwala jednak na sformułowanie bardziej ogólnych wniosków.



Rys. 7. Rozkład natężenia oświetlenia dla nieboskłonu bezchmurnego.

Fig. 7. Daylight illuminance distribution for clear sky.

5. PODSUMOWANIE

Niniejsza praca jest pierwszą próbą badań eksperymentalnych rozkładu natężenia światła dziennego w pomieszczeniach o prostej geometrii. Miały one na celu określenie możliwości wykorzystania autorskiego narzędzia pomiarowego dla potrzeb walidacji obliczeniowych metod symulacyjnych.

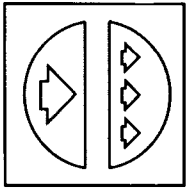
VALIDATION OF DAYLIGHTING PREDICTION METHODS USING HELIOBOX

Summary: The laboratory stand for estimation of daylight distribution in a room of a rectangular geometry is presented. The results of initial validation of Total Daylight Index Methodology (TDI) for overcast and clear sky is compared with numerical results. The daylight illuminance profiles from Heliobox were compared with simulations results obtained by Backward Ray Tracing method.

Literatura

- [1] Klemm P., Światło w pomieszczeniach. *Budownictwo ogólne – Fizyka Budowli*, tom 2, rozdział 7. s. 481-507. Arkady, Warszawa 2005.
- [2] Matusiak B., Wpływ światła dziennego na zdrowie samopoczucie i komfort wizualny, *Problemy Jakości Powietrza Wewnętrzznego w Polsce 2003*, Jędrzejewska-Ścibak T., Sowa J. (red.), s. 161-170, Warszawa 2004.
- [3] Baker N., Steemers K., *Daylight Design of Buildings: A Handbook for Architects and Engineers*. James & James /Earthscan, 2002.
- [4] Szczepańska E., Klemm P., Modele nieboskłonów dla potrzeb numerycznych analiz oświetlenia, *Materiały 51 Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZITB - Krynica 2005, tom IV, Krynica*, 12-17 września 2005, s. 251-258.
- [5] Praca zbiorowa, CIE, Guide on Daylighting of Building Interiors. CIE Technical Committee TC-4.2 Daylighting, 1990.
- [6] Praca zbiorowa (D. Heim red.), *Komputerowa analiza oświetlenia dziennego i ocena parametrów komfortu wizualnego w pomieszczeniach*, Politechnika Łódzka 2007.
- [7] Larson G. W., Shakespeare R., *Rendering with Radiance – The Art and Science of Lighting Visualization*, Morgan Kaufman Publishers Inc., San Francisco, California, 1998.
- [8] Szczepańska E., Konca P., Heim D., Pomiary wielkości fotometrycznych dla powierzchni o zadanej barwie, *Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce tom 3*, s. 113-118, Łódź, 2008.

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2010-2013 jako projekt badawczy nr N N506 267039.



ANALIZA WŁASNOŚCI AKUSTYCZNYCH POMIESZCZENIA W ZALEŻNOŚCI OD KSZTAŁTU SUFITU

Marek JABŁOŃSKI*

* Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: Marek.Jablonski@p.lodz.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono porównanie własności akustycznych pomieszczenia dla różnego rodzaju konstrukcji sufitu. Wykorzystano parametry związane ze stosunkiem energii (C80), przestrzenne (LF), określające zrozumiałość mowy (STI) oraz spadek energii w przestrzeni (DL2).

Słowa kluczowe: parametry akustyczne, ocena akustyczna pomieszczeń, komputerowy model pola akustycznego.

1. WSTĘP

Pod względem wymagań akustycznych pomieszczenia można podzielić na wnętrza o akustyce niekwalifikowanej i kwalifikowanej.

Pierwsza grupa obejmuje pomieszczenia o funkcji, dla której akustyka jest jedynie elementem ogólnie rozumianego komfortu użytkowania. W drugiej grupie mieszczą się pomieszczenia, których funkcja jest w dużym stopniu związana z ich akustyką.

W przypadku pomieszczeń o akustyce niekwalifikowanej projektowanie akustyczne polega głównie na niedopuszczeniu do wystąpienia niekorzystnych zjawisk akustycznych obniżających komfort użytkowania tych pomieszczeń, a czasem wręcz utrudniających korzystanie z nich w sposób zgodny z ich funkcją.

W przypadku pomieszczeń o akustyce kwalifikowanej projektowanie akustyczne obejmuje również, poza eliminowaniem ww. defektów, kształtowanie własności akustycznych ściśle związanych z funkcją pomieszczenia, których akustyka ma istotne znaczenie dla ich funkcji. Istotnym elementem tej funkcji jest słuchanie lub rejestracja dźwięku, z reguły niosącym treść artystyczną lub dydaktyczną, często z udziałem większej liczby osób [1]. Do takich pomieszczeń tradycyjnie zalicza się sale koncertowe, teatralne i wykładowe, studia nagrań itp. Generalnie dźwięk powinien

docierać do każdego słuchacza w czystej i wyraźnej postaci w ten sposób, by wszyscy zebrani mogli odbierać zdarzenie akustyczne w całej okazałości.

2. KRYTERIA OCENY WŁAŚCIWOŚCI AKUSTYCZNYCH POMIESZCZEŃ

Na akustykę pomieszczenia wpływa jego kształt i wielkość, a także chłonność akustyczna powierzchni wewnętrznych pomieszczenia i wszystkich znajdujących się w nim obiektów (elementy wyposażenia, umeblowanie, osoby itp.).

Kształt pomieszczenia na bezpośredni wpływ na charakterystykę dźwięku. Kształt oraz geometria ścian, stropów i podłogi pomaga regulować akustykę pomieszczeń. Kąty, łuki i sklepienia mogą kierować i skupiać dźwięki w obrębie zamkniętej przestrzeni. Kształty te nie powinny spełniać jedynie estetycznych wymogów architektury, lecz być swego rodzaju konsensusem architektoniczno-akustycznym. Okrągłe pomieszczenia mają tendencję do skupiania dźwięków w pojedynczych miejscach, kwadratowe natomiast – z równoległymi ścianami – są źródłem powstawania niebezpiecznych fal stojących będących skutkiem oddziaływania na siebie fal o podobnych długościach.

Pojęcie jakości akustycznej ma naturę subiektywną, ma jednak wyraźny związek z parametrami akustycznymi pomieszczenia. W odniesieniu do sal koncertowych i operowych, związek ten został określony przez Leo L. Berenka [3] oraz Yoichi Ando [2]. Zdefiniowali oni zbiory parametrów odpowiedzialnych za poszczególne czynniki oceny subiektywnej, a następnie określili wkład poszczególnych parametrów w wypadkową ocenę jakości.

Na jakość brzmienia muzyki oraz zrozumiałość mowy wpływa w decydujący sposób wartość oraz charakterystyka częstotliwościowa czasu pogłosu. Aby zapewnić zrozumia-

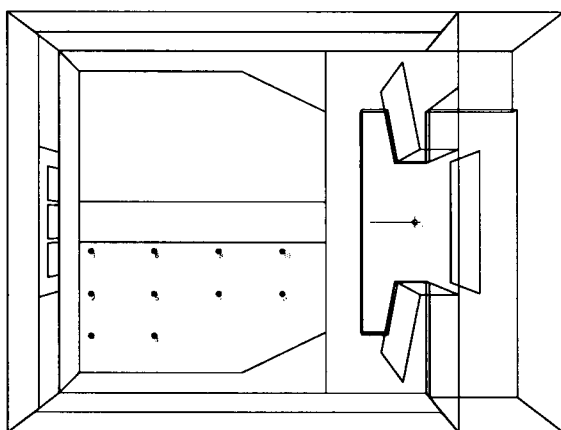
łość słowa mówionego należy zadbać o krótki czas pogłosu, muzyka wymaga znacznie dłuższego czasu pogłosu. Wskaźnik wyrazistości odpowiada wrażeniu przejrzystości muzyki. Duże wartości prowadzą do lepszej zrozumiałości mowy przy konieczności jednoczesnego zachowania odpowiednich wartości dla określonego rodzaju muzyki. Współczynnik zrozumiałości mowy daje bezpośrednią informację o zrozumiałości mowy w audytoriach. Ocenia się ją przy użyciu metody STI [4]. Przestrzenność rozumiana jest jako obraz wnętrza wytworzony w świadomości słuchacza pod wpływem przestrzennego układu docierających do niego fal odbitych. Jest to ważny element oceny jakości pomieszczenia, zależny od kierunków dochodzenia fali bezpośredniej i fal odbitych, ich energii oraz stopnia rozproszenia pola akustycznego w pomieszczeniu. Przestrzenność jest charakteryzowana przez wskaźnik proporcji między energią wcześniej docierającą do miejsca odsłuchu z kierunków bocznych oraz energią docierającą w tym samym czasie, ale bezpośrednio ze źródła [6].

3. CHARAKTERYSTYKA POMIESZCZENIA

Analizowane pomieszczenie ma kształt prostopadłościenny o wymiarach wewnętrznych ok. 22.1m x 16.8m i wysokości około 7.6m. Kubatura wewnętrzna pomieszczenia wynosi około 2800m³. Liczba miejsc około 200.

4. SYMULACJA KOMPUTEROWA

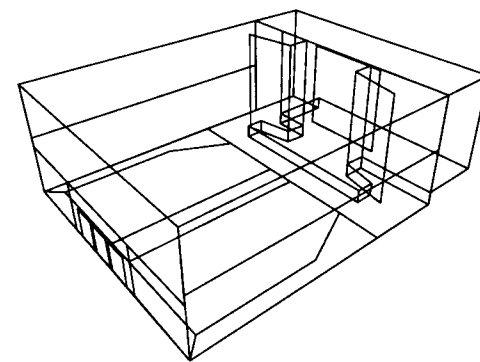
W obliczeniach wykorzystano komputerowy model pola akustycznego, oparty na zmodyfikowanej metodzie promieniowej, przy użyciu którego obliczano parametry opisujące charakter akustyki pomieszczenia [5]. Pomieszczenie zostało zamodelowane jako trójwymiarowa bryła przez zmienną liczbę powierzchni zależną od konstrukcji sufitu. Źródło dźwięku zlokalizowano na scenie i przyjęto wartości jak dla głośno mówiącej osoby. Punkty odbioru usytuowano w miejscach przewidzianych na widowni. Z uwagi na symetryczny kształt pomieszczenia punkty odbioru zlokalizowano tylko po jednej stronie widowni (Rys.1).



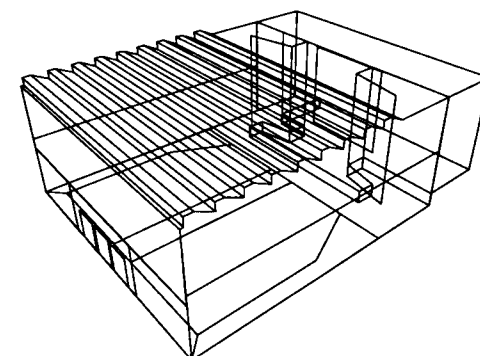
Rys. 1. Usytuowanie źródła i odbiorów.
Fig. 1. Location of the source and receivers.

Model obliczeniowy dla poszczególnych rozwiązań sufitu przedstawiono na Rys.2. Poszczególne warianty różniły się kształtem sufitu. Wariant pierwszy posiadał sufit płaski, wszystkie inne warianty miały sufit o zmiennym kształcie. Były to wyspy sufitowe umieszczone pionowo lub poziomo, sufit skośny oraz sufit przypominający kształtem falę. Żeby można było porównać poszczególne przypadki obliczeniowe materiały sufitu i jego elementów przyjęto tak, aby równoważna powierzchnia dźwiękochłonna wyrażona w m² w każdym z analizowanych przypadków była jednokowa.

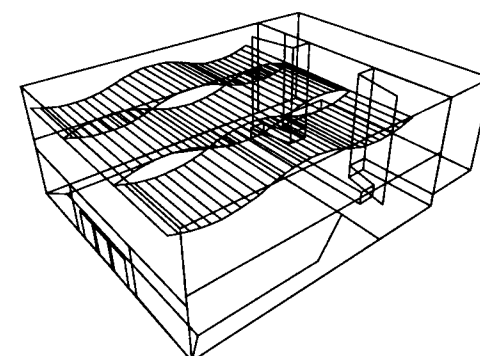
Po wprowadzeniu kształtu sali i współczynników pochłaniania dźwięku przez materiały wykończeniowe, program symulacyjny obliczył odpowiedź pomieszczenia na pobudzenie impulsowe, a na tej podstawie parametry akustyczne sali.



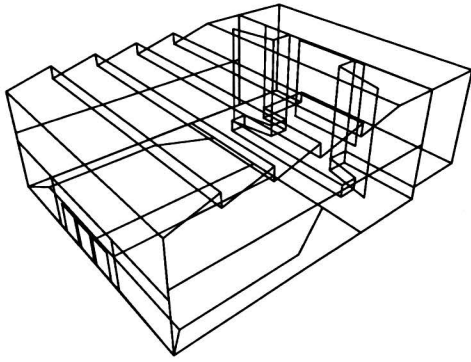
a) wariant I



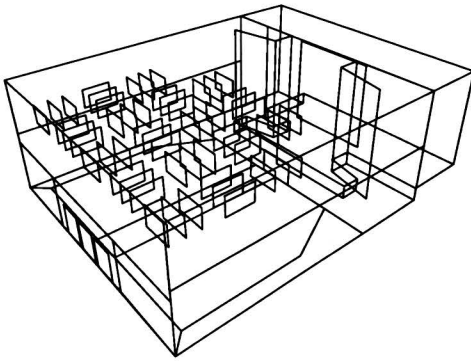
b) wariant II



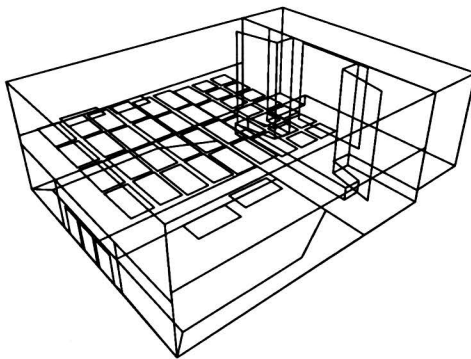
c) wariant III



d) wariant IV



e) wariant V



e) wariant VI

Rys. 2. Obliczeniowy model pomieszczenia dla różnego typu konstrukcji sufitu.

Fig. 2. Computational model of the premises for different types of ceiling construction.

Ocenę wpływu kształtu sufitu na jakość akustyczną pomieszczenia dokonano na podstawie parametrów czasowych i energetycznych opartych na odpowiedzi impulsowej [7]. Parametrami tymi były parametry związane ze stosunkiem energii (C_{80} - wyrazistość), przestrzennością (LF - miara wczesnej energii bocznej). Przy ocenie akustycznej pomieszczeń duże znaczenie ma również problem zrozumiałości mowy. W obliczeniach kierowano się znormalizowaną metodą STI (Speech Transmission Index) określającą zrozumiałość mowy poprzez zidentyfikowanie i ocenę wpływu pomieszczenia tzn. warunków panujących w nim, na sygnał dźwiękowy odbierany przez słuchaczy. Analizo-

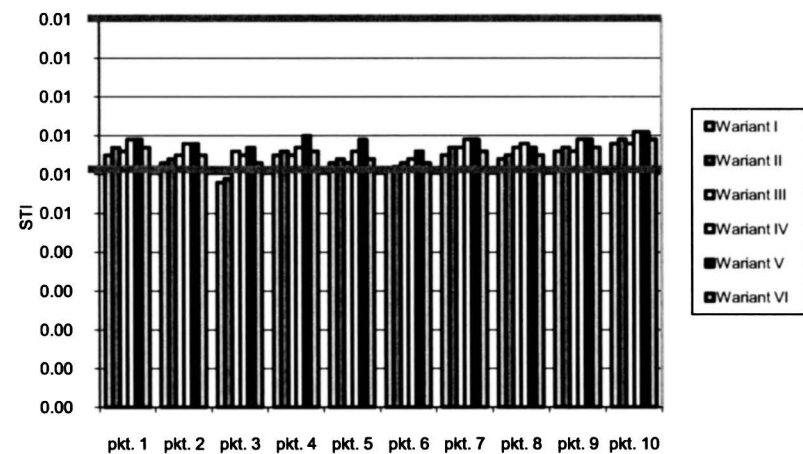
wano również parametr który określa spadek poziomu ciśnienia akustycznego w przestrzeni z podwojeniem odległości (DL2) [8].

Tabela 1. Zalecane wartości parametrów akustycznych
Table 1. Recommended values of the acoustic parameters

Parametr	Wartości zalecane oraz ocena subiektywna			
	excellent	good	fair	poor
C_{80} [dB]	$C > 11$	$C > 5$	$-2 < C < 5$	$C < -2$
STI [-]	$> 0,85$	$0,75 - 0,85$	$0,55 - 0,75$	$0,35 - 0,55$
LF [-]	$0,2 - 0,25$	$0,1 < LF < 0,2$		$LF < 0,1$
DL2 [dB]	$3 - 5$	3		$1 - 3$

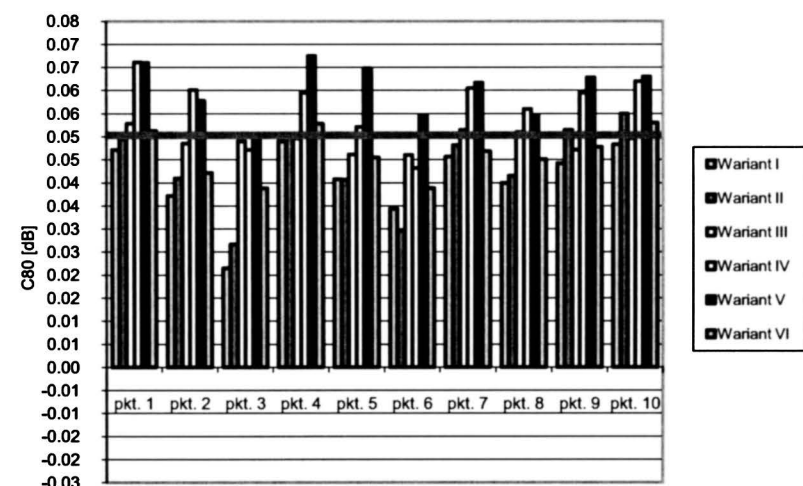
5. WYNIKI ANALIZ

Wartości parametrów akustycznych uzyskane z analizy numerycznej dla geometrii jak na Rys.2, dla wszystkich konstrukcji sufitu, przedstawiono na Rys.3 - 5. Zamieszczono wartości współczynnika zrozumiałości mowy STI, wyrazistości C_{80} , przestrzenność LF oraz spadek poziomu ciśnienia akustycznego w przestrzeni z podwojeniem odległości DL2. Parametr C_{80} i LF przedstawiono jako wartości średnie dla poszczególnych punktów odbioru w zakresie częstotliwości 125–4000Hz. Wartości zalecane (zakresy) zaznaczono na wykresach grubszymi liniami.



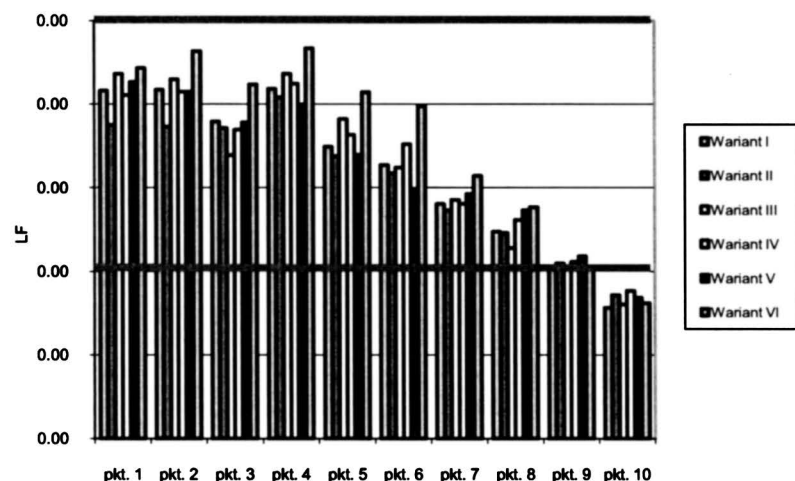
Rys. 3. Wartości STI dla różnych konstrukcji sufitu.

Fig. 3. STI values for different types of ceiling construction.



Rys. 4. Średnie wartości C_{80} dla różnych konstrukcji sufitu.

Fig. 4. C_{80} values for different types of ceiling construction.



Rys. 5. Średnie wartości LF dla różnych konstrukcji sufitu.
Fig. 5. LF values for different types of ceiling construction.

Tabela 2. Wartości DL2 dla poszczególnych wariantów.
Table 2. DL2 values for different variants.

DL2 [dB]					
War. I	War. II	War. III	War. IV	War. V	War. VI
2,83	3,96	3,51	3,48	3,36	3,11

6. OMÓWIENIE WYNIKÓW

Kształt sufitu odgrywa ważną rolę w kształtowaniu akustyki wnętrza. W pracy przeanalizowano sześć różnych typów konstrukcji sufitu.

Wyniki analizy wykazały, że:

- względnie najgorsze parametry akustyczne uzyskano dla płaskiego sufitu (typ konstrukcji I),
- w większości przypadków najkorzystniejsze wartości parametrów uzyskano dla pomieszczenia z konstrukcją sufitu IV i V (silne rozróżnienie powierzchni),
- konstrukcja sufitu III i VI w pewnych punktach odbioru posiada korzystniejsze wartości parametrów niż pozostałe typy konstrukcji (Rys.4), jednak zakrzywione sufity w kształcie kopuł stwarzają duże problemy z dźwiękiem. Wypukłe płaszczyzny mogą powodować skupienie fali dźwiękowej w określonych miejscach, podczas gdy sufit wklęsły naturalnie rozprasza nadmiarową energię dźwiękową,
- parametr określający przestrzenność dźwięku najsilniej zależy od kształtu sufitu oraz od położenia punktu odbioru,
- współczynnik zrozumiałości mowy dla wszystkich punktów odbioru i wszystkich wariantów jest zbliżony co wskazuje na to, że w mniejszym stopniu zależy on od kształtu pomieszczenia a w większym od warunków pogłosowych,
- spadek poziomu ciśnienia akustycznego wraz z podwojeniem odległości tylko w przypadku sufitu płaskiego wykazuje wartości mniejsze od optymalnych.

7. WNIOSKI

Dobre warunki akustyczne wymagają równomiernego rozkładu energii akustycznej w pomieszczeniu, odpowiednich wartości czasu pogłosu, równomiernego zaniku dźwięku (m.in. niewystępowanie echa) oraz odizolowania zakłóceń akustycznych z zewnątrz. Warunki te uzyskuje się przez nadanie odpowiedniego kształtu pomieszczeniu, odpowiednie rozmieszczenie powierzchni dźwiękochłonnych i odbijających oraz zastosowanie ciężkich lub wielowarstwowych przegród budowlanych.

Wrażenie przestrzenności dźwięku, czyli otoczenia dźwiękiem zapewnia wprowadzenie w pomieszczeniu nieregularności. To mogą być dekoracje, rzeźby i inne elementy zapewniające rozproszenie energii. Dotyczy to szczególnie powierzchni bocznych, lecz i powierzchnia sufitu może stanowić element rozpraszający.

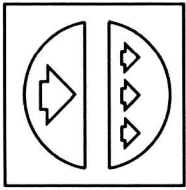
Z przeprowadzonej analizy wynika, że najlepsze wartości parametrów akustycznych otrzymuje się przy zastosowaniu konstrukcji sufitu V (pionowe wyspy akustyczne), która daje odpowiednie rozproszenie dźwięku, oraz zapewnia odpowiednie pochłanianie.

ANALYSIS OF ACOUSTIC PROPERTIES OF ROOM DEPENDENT ON THE SHAPE OF CEILING

Summary: This paper presents a comparison of acoustic properties of room for different types of ceiling construction. We used parameters related to energy ratio (C80), spatial (LF), indicating the speech intelligibility (STI) and a spatial decay (DL2).

Literatura

- [1] Kulowski A.: *Modyfikacja promieniowej metody modelowania pola akustycznego w pomieszczeniach*. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Seria Elektronika nr 74, Gdańsk 1991
- [2] Ando Y.: *Concert hall acoustics*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokio, 1985.
- [3] Berenek L.L.: *Music, acoustics and architectures*. J. Wiley and Sons, New York, 1962.
- [4] Bradley J.S.: *Predictors of speech intelligibility in rooms*. JASA 80(3), 1986, str. 837-845
- [5] ODEON Room Acoustics Program. Version 5.0. User Manual. Industrial, Auditorium and Combined Editions. 2001
- [6] Sadowski J.: *Akustyka architektoniczna*. PWN, Warszawa, 1976, str. 111-122, 208-228.
- [7] PN-EN ISO 3382:2001 – Pomiar czasu pogłosu pomieszczenia w powiązaniu z innymi parametrami akustycznymi.
- [8] PN-EN ISO 11690-1 – Zalecany sposób postępowania przy projektowaniu miejsc pracy o ograniczonym hałasie, wyposażonych w maszyny



STATIONARY HEAT CONDUCTION IN TRANSVERSALLY GRADED LAMINATES WITH UNIFORM AND NON-UNIFORM DISTRIBUTION OF LAMINAS

Jarosław JĘDRYSIAK

Technical University of Łódź, Department of Structural Mechanics
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: jarek@p.lodz.pl

Streszczenie: A problem of stationary heat conduction in laminates with transversally graded structure is analysed. These composites consist of two components, non-periodically distributed as laminas. Averaged (macroscopic) properties of these laminates are slowly and continuously varied along the axis normal to laminas. In this contribution the stationary heat conduction problem is analysed in the framework of the tolerance model, proposed by Jędrysiak and Radzikowska [2,6,3].

Słowa kluczowe: heat conduction, transversally graded laminates, tolerance averaging.

1. INTRODUCTION

Laminates under consideration are made of two components, non-periodically distributed along a direction normal to laminas. Averaged (macroscopic) properties of them are assumed to be continuously varied along this direction, cf. Fig. 1. Their microstructure can be realised in the form of uniform ($\lambda = \text{const}$), cf. Fig. 2a, or non-uniform ($\lambda = \lambda(x)$) distribution of laminas, cf. Fig. 2b. Thus, these laminates can be treated as made of a *functionally graded material* (FGM), cf. Suresh and Mortensen [7]. These composites are called *transversally graded laminates* (TGL), cf. Jędrysiak and Radzikowska [4].

In order to describe thermomechanical phenomena in FG-type composites methods proposed for macroscopically homogeneous materials are usually applied. Some of the fundamental methods are discussed in [7]. It has to be mentioned those approaches based on *the asymptotic homogenization*. Unfortunately, the effect of the microstructure size is usually omitted in governing equations of these models, cf. the book by Cz. Woźniak and Wierzbicki [10] and edited by Cz. Woźniak, Michalak and Jędrysiak [8].

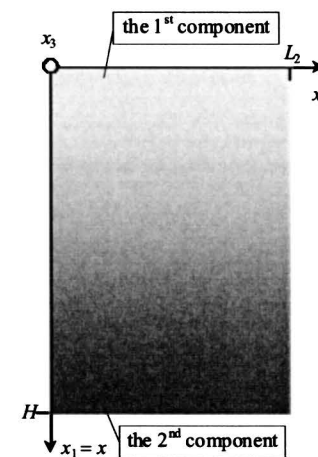


Fig. 1. A fragment of the laminate on the macro-scale

The tolerance modelling is an approach without this drawback, which was proposed for non-stationary problems of periodic composites and structures in [10] and extended on FG-type media in [8] and the book edited by Cz. Woźniak *et al.* [9]. The bibliography of applications of this approach to investigate various problems of FG-type composites can be found in these monographs.

This modelling technique is also applied in the analysis of heat conduction problems, cf. Jędrysiak and Radzikowska [2-4], Michalak, Cz. Woźniak and M. Woźniak [5], Radzikowska and Jędrysiak [6], which are described for FG-type laminates by differential equations with highly oscillating, tolerance-periodic, non-continuous, functional coefficients. Using the tolerance modelling these equations are replaced by the system of differential equations with slowly-varying coefficients. Some applications of this approach for transversally graded structures are also shown in the book by Jędrysiak [1].

The aim of this paper is to show differences between distributions of temperature in transversally graded laminates with uniform and non-uniform distribution of laminas.

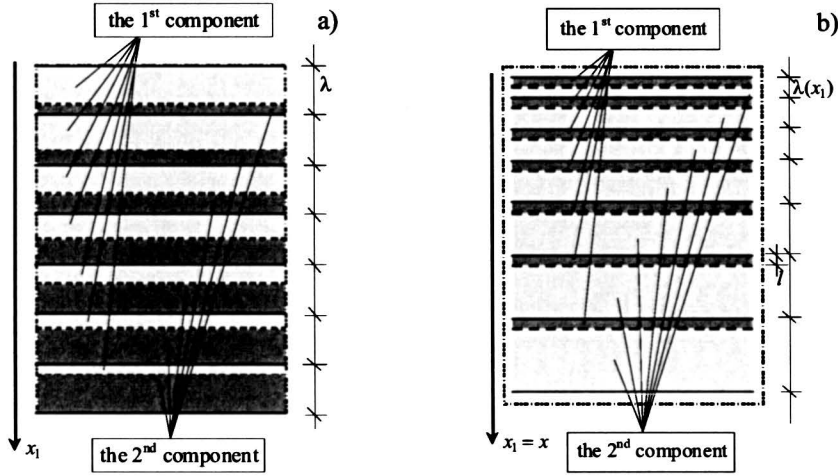


Fig. 2. A fragment of the laminate on the micro-scale:
a) with the uniform distribution of laminas,
b) with the non-uniform distribution of laminas

2. FORMULATION OF THE PROBLEM

Introduce indices related to the Cartesian coordinate system $Ox_1x_2x_3$ by $i, j, \dots$, which run on 1,2,3; and indices related to the system Ox_2x_3 by $\alpha, \beta, \dots$, which run on 2,3. Denote: $\mathbf{x} \equiv (x_2, x_3)$, $x \equiv x_1$. Let derivatives of x_i , $i=1,2,3$, be denoted by $\partial_{i\dots j} \equiv \partial_i \dots \partial_j$, of x_α , $\alpha=2,3$, by $\partial_{\alpha\dots\beta} \equiv \partial_\alpha \dots \partial_\beta$, and of x by ∂ . Let us assume that the considered layer has thickness H along the x -axis and the dimensions L_α along the x_α -axes. The laminate is made of two materials, distributed in M laminas with thickness λ . We assume that $\lambda \ll H$. The heat conduction tensors of these materials have components k'_{ij}, k''_{ij} , $i, j=1,2,3$. The m^{th} lamina ($m=1, \dots, M$) is consisted of two homogeneous sub-laminas having thicknesses λ'_m, λ''_m . For the laminate with non-uniform distribution of laminas the m^{th} lamina has thickness λ_m dependent on x (cf. Fig. 2b) and thicknesses of sub-laminas are equal: $\lambda'_m = l = \text{const}$, $\lambda''_m = \lambda_m - l$ which depends on x . However, for the laminate with uniform distribution of laminas the m^{th} lamina has thickness $\lambda_m = \text{const}$ (independent of x , cf. Fig. 2a) and thicknesses of sub-laminas are equal λ'_m, λ''_m , which (both) depend on x . Let $v'_m \equiv \lambda'_m / \lambda_m$, $v''_m \equiv \lambda''_m / \lambda_m$ be material volume fractions in the m^{th} lamina. Since sequence $\{v'_m\}$, $m=1, \dots, M$, is assumed to be monotone and for every $m=1, \dots, M-1$ to satisfy condition $|v'_{m+1} - v'_m| \ll 1$, the layer can be treated as made of the functionally graded material. Moreover $v'_m + v''_m = 1$. Hence, the above conditions are satisfied also by sequence $\{v''_m\}$. It follows that sequences $\{v'_m\}$, $\{v''_m\}$, $m=1, \dots, M$, can be approximated by continuous functions $v'(\cdot)$, $v''(\cdot)$. These functions determine the distribution of material properties along the x -axis and are called

the fraction ratios of materials. Similarly, sequence $\{\lambda_m\}$ of laminas thicknesses can be approximated by function $\lambda(\cdot)$, called the cell distribution function (which is constant for laminates with uniform distribution of laminas, cf. [1]). Let us also introduce the non-homogeneity ratio v , defined by $v(\cdot) \equiv [v'(\cdot)v''(\cdot)]^{1/2}$. Functions v' , v'' , λ are assumed to be slowly-varying in x , cf. [2,3,5]. A fragment of the layer on the macrolevel is shown in Fig. 1 and on the microlevel in Fig. 2.

Let us assume small oscillations of the unknown temperature field T . Denote by p the intensity of heat sources. Hence, heat conduction in a transversally graded composite is described by the Fourier's equation in the form

$$-\partial_i(k_{ij}\partial_j T) = p, \quad (1)$$

with coefficients $k_{ij} = k_{ij}(x)$, which can be highly oscillating, tolerance-periodic, non-continuous functions in x . To solve heat conduction problems of this type, equation (1) will be replaced by a system of differential equations with slowly-varying coefficients, by using the tolerance averaging technique, cf. [9,2,5,1].

3. TOLERANCE MODELLING

3.1. Modelling assumptions

In the tolerance modelling there are applied introductory concepts, e.g.: the highly oscillating function, the averaging operator, the slowly-varying function, the fluctuation shape function, which are defined and explained e.g. in [8,9]. One of them is the averaging operator defined for an arbitrary integrable function f determined in interval $[0, H]$ in the form

$$\langle f \rangle(\bar{x}) = \lambda^{-1} \int_{\bar{x}-\lambda/2}^{\bar{x}+\lambda/2} f(x) dx, \quad \bar{x} \in [\lambda/2, H-\lambda/2]. \quad (2)$$

The other concept is the fluctuation shape function h , being continuous. It can be assumed for the considered laminate in form (3):

$$h(x) = \begin{cases} -A\sqrt{3} \frac{v(\bar{x})}{v'(\bar{x})} [2\frac{x}{\lambda} + v''(\bar{x})] & \text{for } x \in (\bar{x} - \frac{1}{2}\lambda, \bar{x} - \frac{1}{2}\lambda + \lambda v'(\bar{x})) \\ A\sqrt{3} \frac{v(\bar{x})}{v''(\bar{x})} [2\frac{x}{\lambda} - v'(\bar{x})] & \text{for } x \in (\bar{x} + \frac{1}{2}\lambda - \lambda v''(\bar{x}), \bar{x} + \frac{1}{2}\lambda) \end{cases}$$

where $\bar{x}$ is a centre of interval $[-\lambda/2, \lambda/2]$; A is an amplitude, being of an order of the microstructure parameter in the problem under consideration. It will be assumed that the microstructure parameter is equal $\lambda = \text{const}$ for the TGL with uniform distribution of laminas (hence $A = \lambda$), but for the TGL with non-uniform distribution – it is equal $l = \text{const}$ (i.e. $A = l$).

The fundamental assumption of the tolerance modelling, cf. [8,9,3], is *the micro-macro decomposition*, in which temperature $T=T(x,\mathbf{x},t)$, $x \in [0,H]$, is decomposed as

$$T(x,\mathbf{x},t)=\theta(x,\mathbf{x},t)+h(x)\vartheta(x,\mathbf{x},t), \quad (4)$$

with *macrotemperature* $\theta(\cdot,\mathbf{x},t)$ and *amplitude fluctuation* $\vartheta(\cdot,\mathbf{x},t)$, which are new basic unknowns, being slowly-varying functions in x .

Moreover, in the modelling procedure we use *the tolerance averaging approximation*, i.e. terms of an order $O(\delta)$ are neglected as negligibly small in the comparing to 1 (where δ is a tolerance parameter).

3.2. Tolerance model equations

The modelling procedure presented for FG-type composites in [8,9] and applied for heat conductions in laminates in [2-4,6] leads from equation (1) to the governing equations of *the tolerance model of heat conduction in transversally graded laminates*:

$$\begin{aligned} & \langle k_{\alpha j} \rangle \partial_{j\alpha} \theta + \partial(\langle k_{1j} \rangle \partial_j \theta) + \\ & + \partial(\langle k_{11} \partial h \rangle \vartheta) + \langle k_{\alpha 1} \partial h \rangle \partial_\alpha \vartheta = \langle p \rangle, \\ & \langle k_{1j} \partial h \rangle \partial_j \theta + \langle k_{11} (\partial h)^2 \rangle \vartheta - \langle k_{\alpha\beta} h^2 \rangle \partial_{\alpha\beta} \vartheta = \langle ph \rangle, \end{aligned} \quad (5)$$

where underlined terms depend on the microstructure parameter. Coefficients of equations (5) are slowly-varying functions in x . It can be observed that the above tolerance model equations take into account the effect of the microstructure size.

4. APPLICATION – A STATIONARY HEAT TRANSFER ACROSS LAMINAS

4.1. Analytical solutions

In order to compare distributions of temperature in transversally graded laminates with uniform and non-uniform distribution of laminas it is considered the stationary heat conduction across laminas, i.e. along the x -axis. The basic unknowns are functions of argument x , i.e. $\theta=\theta(x)$, $\vartheta=\vartheta(x)$. We also neglect heat sources p . Denoting:

$$\begin{aligned} K & \equiv \langle k_{11} \rangle, \quad \tilde{K} \equiv \langle k_{11} \partial h \rangle, \quad \tilde{K}^2 \equiv \langle k_{11} (\partial h)^2 \rangle, \\ K^{eff} & \equiv K - \tilde{K}^2 \tilde{K}^{-1}, \end{aligned} \quad (6)$$

from equations (5) we obtain one differential equation for macrotemperature θ and the formula for amplitude fluctuation ϑ in the form:

$$\partial(K^{eff} \partial \theta) = 0, \quad \vartheta = -\tilde{K} \tilde{K}^{-1} \partial \theta, \quad (7)$$

with slowly-varying functional coefficients. Since all these coefficients are determined by the known functions, a solution to equation (7)₁ can be calculated as in papers [2,3].

For the layer under consideration parameters k' , k'' are constant. Hence, using formula (6)₄ and the fluctuation shape function (3) the effective heat conduction coefficient K^{eff} is equal $K^{eff}(x)=k'k''[k'+(k''-k')v'(x)]^{-1}$.

Denoting $N(x)=\int v'(x)dx$ macrotemperature θ , being the solution to (7)₁, is given by

$$\theta(x) = A[x(k'')^{-1} + (k'' - k')(k'k'')^{-1}N(x)] + B, \quad (8)$$

where A , B are constants calculated from boundary conditions. Assuming the boundary conditions in the form

$$x=0: \quad \theta(0)=\theta_0; \quad x=H: \quad \theta(H)=0, \quad (9)$$

these constants are equal:

$$A = \theta_0 \frac{k'k''}{(k'' - k')[N(0) - N(H)] - k'H}; \quad (10)$$

$$B = -\theta_0 \frac{k'H + (k'' - k')N(H)}{(k'' - k')[N(0) - N(H)] - k'H}. \quad (11)$$

Using formula (7)₂ with (8) and substituting the resulting equation and (8) into formula (4) the temperature takes the form:

$$T(x) = \left\{ \frac{x}{k''} + \frac{k'' - k'}{k'k''} [N(x) + \frac{\sqrt{3}}{6} h(x)v(x)] \right\} A + B. \quad (12)$$

Formula (12) with constants A , B determined by (10), (11) describes the distribution of the temperature in both the type of transversally graded laminates under consideration.

4.2. Results

Let us assume for the TGL layer with non-uniform distribution of laminas that *the cell distribution function* $\lambda(x)$ is linear:

$$\lambda(\bar{x}) = \bar{x} \frac{2(H-Ml)}{H(M-1)} + l, \quad (13)$$

where H is the layer thickness coupled with the microstructure parameter l by the relation $H=(2M-1)l$ (M is the number of laminas). The fraction ratios of materials have the form:

$$v'(\bar{x}) = l(\lambda(\bar{x}))^{-1}, \quad v''(\bar{x}) = 1 - v'(\bar{x}). \quad (14)$$

In order to compare and evaluate results we consider four cases of the layer:

1) the first case ($\phi=1$) – the layer with the non-uniform distribution of laminas, given by function (13), for which functions v' , v'' are determined by (14);

2) the second case ($\phi=2$) – the layer with the uniform distribution of laminas, $\lambda=\text{const}$, for which functions v' , v'' are also determined by (14);

3) the third case ($\phi=3$) – the layer with the uniform distribution of laminas, $\lambda=\text{const}$, for which functions v' , v'' are linear:

$$v'(x)=1-x/H, \quad v''(x)=1-v'(x)=x/H; \quad (15)$$

4) the fourth case ($\phi=4$) – the periodic layer, $\lambda(x)=2l$.

Some results are shown in Fig. 3–4. In Fig. 3 there are presented plots of distributions of temperature T across laminas, obtained in the framework of the tolerance model for four aforementioned cases of the layer – $\phi=1,2,3,4$, in interval $[0,H]$. Fig. 4 shows diagrams of temperature T for three of these cases – $\phi=1,2,4$, in interval $[0.36H,0.45H]$. Calculations are made for the layer consisted of $M=20$ laminas, hence: for $\phi=1$ – $l/H=0.026$, for $\phi=2,3,4$ – $\lambda/H=0.05$. It is also assumed that ratios of heat conduction coefficients of both the materials are equal: $k''/k'=0.33$ (a) or $k''/k'=0.2$ (b).

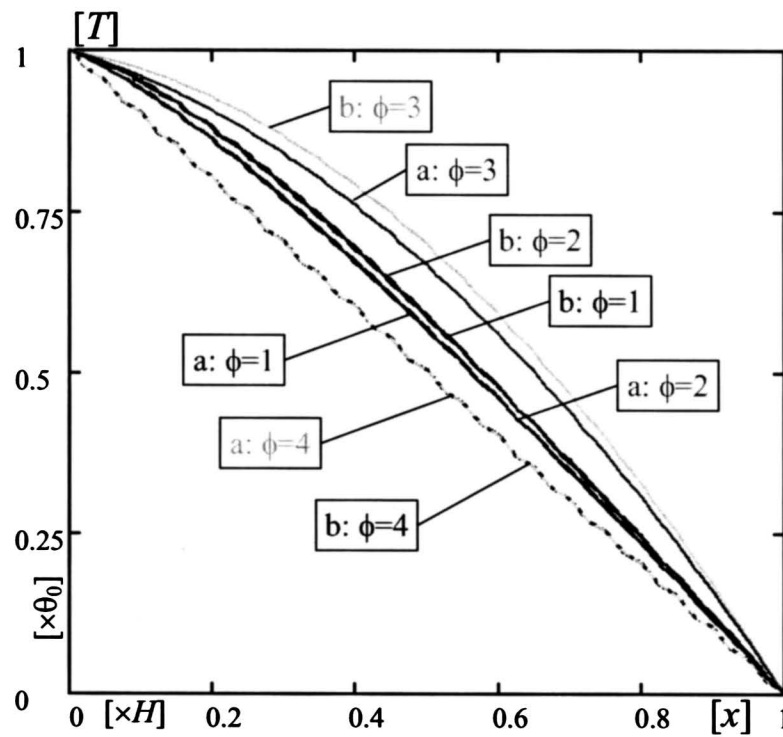


Fig. 3. Plots of temperature T along the layer thickness H for $x \in [0, H]$ (a – for $k''/k'=0.33$, b – for $k''/k'=0.2$)

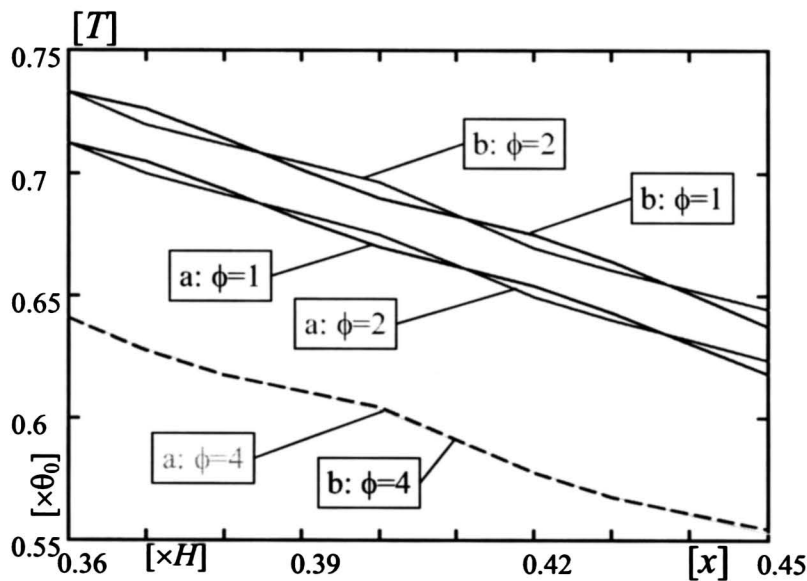


Fig. 4. Plots of temperature T for $x \in [0.36H, 0.45H]$ (a – for $k''/k'=0.33$, b – for $k''/k'=0.2$)

5. FINAL REMARKS

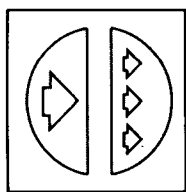
Analysing obtained results some remarks can be formulated:

- Differences between values of temperature T in the layers with non-uniform ($\phi=1$) and uniform ($\phi=2$) distribution of laminas, characterised by the same fraction ratios of materials v' , v'' , (14), are very small (i.e. they are observed on the microlevel), cf. Fig. 4.
- Temperatures in the layers with uniform distribution of laminas, described by linear fraction ratios of materials ($\phi=3$), are higher than those in the layers with non-uniform distribution of laminas, characterised by linear cell distribution function ($\phi=1$), cf. Fig. 3.
- Differences between temperatures in the periodic layers calculated for various ratios k''/k' are very small; they are smaller than in the TGL layers.

Acknowledgements. This contribution is supported by the Ministry of Science and Higher Education under grant No. N N506 398535.

References

- [1] Jędrzyak J. Thermomechanics of laminates, plates and shells with functionally graded structure. *Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2010, (in Polish)*
- [2] Jędrzyak J., Radzikowska A. *On the modelling of heat conduction in a non-periodically laminated layer*. J. Theor. Appl. Mech. 45 (2007), 239-257
- [3] Jędrzyak J., Radzikowska A. *Stationary heat conduction in a laminate with functionally graded macrostructure (FGM)*. Build. Phys. Theory Pract. 3 (2008), 23-26
- [4] Jędrzyak J., Radzikowska A. *Some problems of heat conduction for transversally graded laminates with non-uniform distribution of laminas*. Arch. Civ. Mech. Engng. (2010), (in the course of publication)
- [5] Michalak B., Woźniak Cz., Woźniak M. *Modelling and analysis of certain functionally graded heat conductor*. Arch. Appl. Mech. 77 (2007), 823-834
- [6] Radzikowska A., Jędrzyak J. *The heat conduction in non-periodic composite (FGM)*. Building Physics in Theory and Practice 2 (2007), 239-242, (in Polish)
- [7] Suresh S., Mortensen A. *Fundamentals of functionally graded materials*. The University Press, Cambridge 1998
- [8] Woźniak Cz., Michalak B., Jędrzyak J. [eds.] *Thermomechanics of Heterogeneous Solids and Structures. Tolerance Averaging Approach*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2008
- [9] Woźniak Cz. et al. [eds.] *Mathematical Modelling and Analysis in Continuum Mechanics of Microstructured Media*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010
- [10] Woźniak Cz., Wierzbicki E. *Averaging Techniques in Thermomechanics of Composite Solids*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2000



DOMIESZKOWANIE WARSTWY WIERZCHNIEJ CEGŁY WĘGLIKIEM TANTALU ZA POMOCĄ ŚWIATŁA LASERA RUBINOWEGO

Katarzyna KLEMM^{*}, Piotr KLEMM^{**}, Kazimierz ROŻNIAKOWSKI^{***}

^{}Politechnika Łódzka, Instytut Architektury I Urbanistyki*

Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: katarzyna.klemm@p.lodz.pl

*^{**}Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych*

Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź

*^{***}Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź*

Streszczenie: W pracy przedstawiono charakterystyczne wyniki badań domieszkowania warstwy wierzchniej cegły pochodzącej z obiektów zabytkowej Łodzi przemysłowej. Proces domieszkowania przeprowadzono za pomocą światła lasera rubinowego pracującego w układzie generacji swobodnej. Jako substancji domieszkującej użyto węgliku tantalum w postaci proszku. Zaobserwowano w obszarze laserowego oddziaływania obszary w których węglik tantalum został wtopiony w warstwę wierzchnią a także obszary, w których występuje zjawisko laserowego platerowania.

Słowa kluczowe: Laser rubinowy, cegła, węglik tantalum, domieszkowanie, modyfikacja warstwy wierzchniej.

1. WPROWADZENIE

Restauracja zabytkowych obiektów stała się w okresie ostatnich lat niezwykle istotnym problemem w fizyce materiałów stosowanych w budownictwie. W procesie restauracji niezwykle ważne jest zastosowanie odpowiednich materiałów i metod do zabezpieczenia przed dalszą degradacją warstwy wierzchniej tych obiektów [1].

Wykorzystywanie promieniowania laserowego w inżynierii powierzchni i warstwy wierzchniej [2,3] zależy od bardzo wielu czynników, z których najważniejsze są różne właściwości materiałów podlegających obróbce laserowej oraz różne właściwości wiązki laserowej. Kombinacja różnych właściwości materiałów i wiązki pozwala na zastosowanie obróbki laserowej w wielu różnorodnych obszarach. Dzięki możliwości koncentracji ogromnych gęstości mocy na wybranych fragmentach obrabianych przedmiotów w bardzo krótkim czasie, obróbka laserowa powierzchni w większości przypadków umożliwia uzyskiwanie struktur odmiennych od równowagowych i w konsekwencji pozwala na

poprawę właściwości wytrzymałościowych. Należy jednak zawsze pamiętać o tym, iż zmiany właściwości warstwy wierzchniej dotyczą tylko miejsc oddziaływania wiązki laserowej na obrabiany materiał.

W laserowej inżynierii powierzchni bardzo ważnym jest proces wtapiania, polegającym na wprowadzeniu w obszar działania wiązki laserowej i w obszar przetopionego materiału (podłoża), materiału stopującego w postaci cząstek stałych, na przykład proszków trudno topliwych węglików metali całkowicie lub częściowo rozpuszczalnych w podłożu. Wtapianie może być realizowane za pomocą laserów o pracy ciągłej lub impulsowej (impuls milisekundowy quasi-stacjonarny), gdyż materiał stopujący może być podawany do strefy przetopionej, tylko w momencie nagrzewania laserowego. Celem wtapiania jest uzyskanie warstwy wierzchniej o lepszych niż materiał stopowany i stopujący właściwościach tzn. wytworzenie warstwy kompozytowej. Cząstki stałe materiału stopującego nagrzewają się i nie muszą ulegać stopieniu już przy ich wprowadzeniu w wiązkę laserową, i nie całkowicie roztopione wpadają w obszar jednocześnie topionego materiału stopowanego. Stopowanie wtopnieniowe proszkowe jest realizowane przy użyciu proszków o małej granulacji (rzędu nanometrów i mikrometrów) i o dużej jednorodności wymiarowej.

Drugim istotnym procesem w tej dziedzinie jest laserowe platerowanie realizowane przy parametrach laserowej wiązki zbliżonych do stopowania, polega na stopieniu grubej warstwy materiału natapianego (platerującego) i na podtopieniu bardzo cienkiej warstwy materiału podłoża (platerowanego). Celem platerowania nie jest wymieszanie materiału nakładanego z materiałem podłoża, lecz przetopienie naniesionego lub naniesienie i przetopienie materiału powłokowego dla uzyskania powłoki odporniejszej niż mate-

riał podłoża na erozję, korozję, ścieranie i inne narażenia eksploatacyjne. Przy tym materiał powłokowy może być rozpuszczalny lub nie rozpuszczalny w materiale podłoża [2].

Celem badań z tego obszaru, przedstawionych w tej pracy, jest zjawisko laserowo stymulowanego domieszkowania węglikiem tantalum cegły pochodzącej z obiektów zabytkowej Łodzi przemysłowej. Oczekuje się, że wprowadzony w warstwę wierzchnią tego materiału węgiel tantalum w postaci drobnoziarnistego proszku wytworzy w podłożu kompozyt a na powierzchni warstwę platerowaną. Z badań literaturowych [4] wynika również, że temu zagadnieniu nie poświęcono praktycznie żadnych publikacji. Dlatego też należy sądzić, że badanie tego problemu jest całkowicie unikalne i może przynieść interesujące rezultaty poznawcze i praktyczne.

2. PODSTAWY TEORETYCZNE

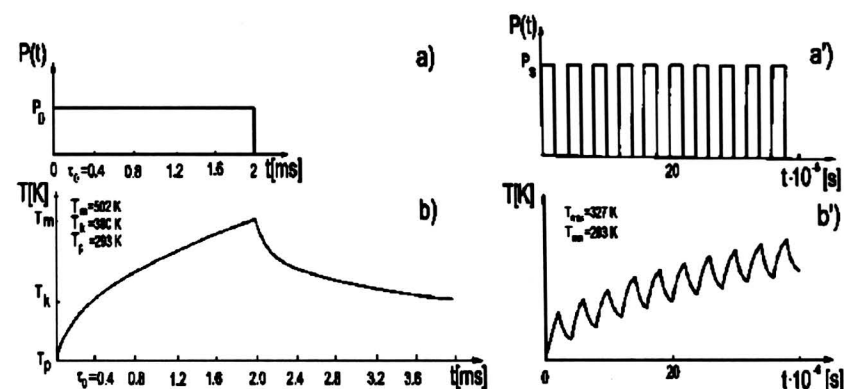
W omawianych w tej pracy badaniach stosowano laser rubinowy pracujący w układzie generacji swobodnej, a więc emitujący ciąg impulsów (spike's), których czas trwania wynosił około 3 μs, a całkowity czas trwania laserowego impulsu około 1 ms. Zwykle przyjmuje się, że obwódka tego ciągu impulsów ma kształt prostokątny lub trójkątny w czasie. Wtedy przyrost temperatury $\Delta T(x,t)$ w półnieskończonej próbce, który może być źródłem informacji o temperaturze T i jej gradiencie w powierzchniowej warstwie próbki, można obliczyć odpowiednio ze wzorów (impuls o obwódce prostokątnej) [3]:

$$P(t) = \begin{cases} P_0 & \text{dla } 0 < t < \tau, \\ 0 & \text{dla } t > \tau, \end{cases}$$

$$\Delta T(x,t) = \begin{cases} 2P_0(1-R)\sqrt{at}K^{-1}\text{ierfc}\left[\frac{x}{2(at)^{1/2}}\right] & \text{dla } 0 < t < \tau \\ 2P_0(1-R)K^{-1}\left[\sqrt{at}\cdot\text{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) - \sqrt{a(t-\tau)}\cdot\text{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a(t-\tau)}}\right)\right] & \text{dla } t > \tau \end{cases}$$

gdzie P_0 – gęstość mocy impulsu laserowego, kierowanego na powierzchnię próbki, τ – czas trwania impulsu, R – współczynnik odbicia światła materiału, α – dyfuzyjność cieplna, K – przewodność cieplna, t – czas, oraz $\text{ierfc}(z) = \pi^{-1/2}\exp(-z^2) - z\text{erfc}(z)$.

Modelowe rozkłady gęstości mocy oraz odpowiadające im historie temperatury (opisane powyższymi wzorami) przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Modelowe gęstości mocy a), a') oraz historie temperatury b), b').

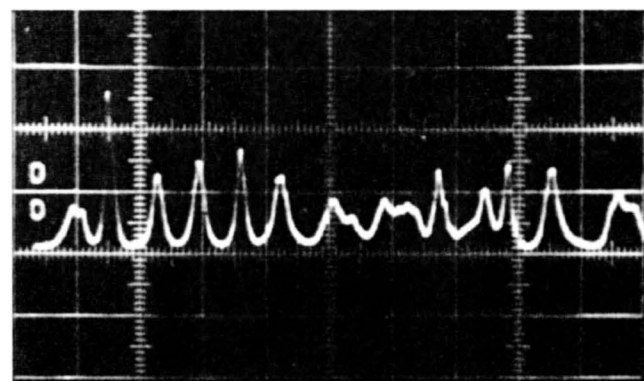
Fig.1. Models of density power and history of temperature.

Z przedstawionych na rys. 1 wykresów wynika, że dla prostokątnego rozkładu gęstości mocy temperatura na powierzchni materiału rośnie monotonicznie, osiągając maximum w chwili kiedy impuls laserowej energii jest wyłączony, rysunki a i b. Analogicznie, także monotonicznie maleje temperatura warstwy wierzchniej po wyłączeniu laserowego impulsu, osiągając minimum po czasie znacznie dłuższym niż czas trwania laserowego impulsu.

Tymczasem z wykresów a' i b', gdzie przedstawiono modelową zmianę gęstości mocy emitowanej przez laser rubinowy (szereg mikrosekundowych impulsów) wynika, że w czasie działania tych impulsów obserwuje się monotoniczny wzrost temperatury (analogiczny jak dla pojedynczego prostokątnego impulsu), ale także okresowe fluktuacje temperatury, nazywane w literaturze problemu "ripples" [3].

3. APARATURA, OBIEKT I METODYKA BADAŃ

W tej pracy źródłem impulsowej energii świetlnej był laser rubinowy, pracujący w układzie generacji swobodnej. Energia impulsu wynosiła $E_i = 1,0\text{J}$, całkowity czas trwania impulsu $\tau = 1,0\text{ ms}$, a długości fali $\lambda = 694\text{ nm}$. Stosowano zbieżną wiązkę światła, $\Delta f = 20\text{mm}$. W ten sposób średnica obszaru oddziaływania na powierzchni próbki wynosiła około 3 mm. W powierzchnię warstwy wierzchniej oddano około kilkadziesiąt "strzałów", tak by obszary oddziaływania zachodziły na siebie (powierzchnia przekrycia wynosiła około 20%). Struktura czasowa laserowego impulsu jest przedstawiona na rys. 2.

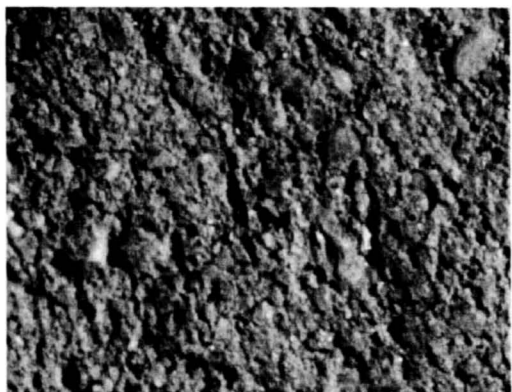


Rys.2. Struktura czasowa (oscylogram) impulsu energii lasera rubinowego w swobodnej generacji.

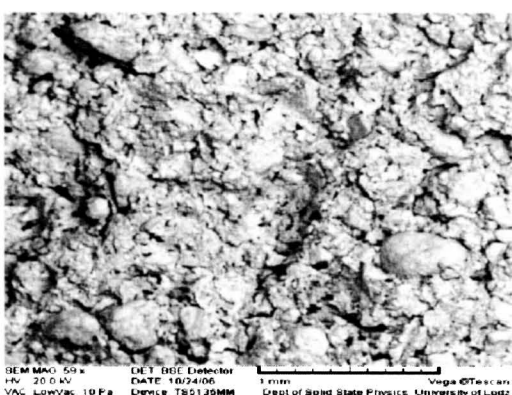
Fig.2. Oscillogram of laser ruby radiation in the free generation regime.

Obiektem badań był szereg próbek cegły, (pochodzącej z zespołu zabytkowej zabudowy przemysłowej Łodzi) o wymiarach 30x30x5 mm. W środkowej części te próbki pokrywano, bardzo delikatnie wcierając, cienką warstwą tantal (TaC) w postaci proszku o rozmiarach ziaren rzędu kilkuset nanometrów.

a)



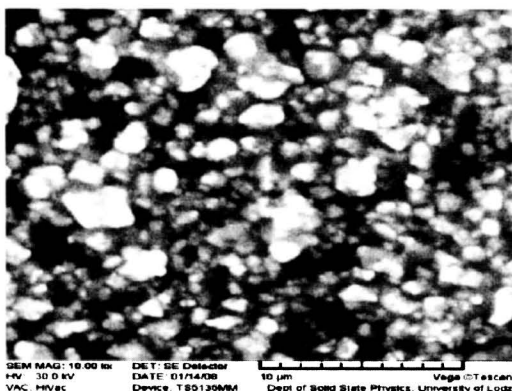
b)



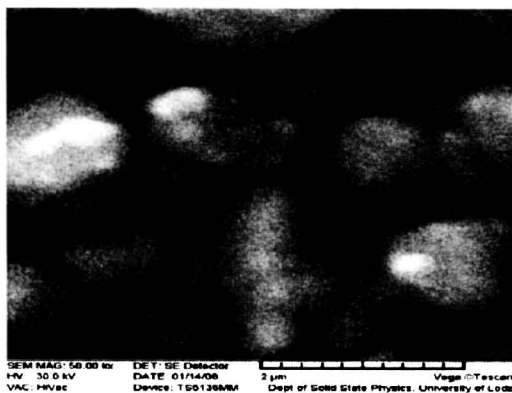
Rys. 3. Fotografie powierzchni cegły wykonane metodą optyczną oraz SEM.

Fig.3. Colour and SEM photographs of surface brick.

a)



b)



Rys. 4. Fotografie SEM węgliku tantal w postaci proszku.

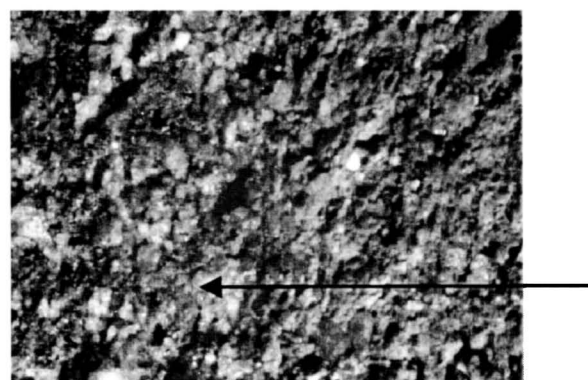
Fig.4. SEM photographs of powder of TaC.

Na rys. 3 i 4 przedstawiono fotografie powierzchni próbki użytej do badań oraz węgliku tantal w postaci proszku.

Obszary laserowego oddziaływania oraz ich najbliższe otoczenia poddano badaniom optycznym (makrofotografia, kilkukrotne powiększenie), mikroskopii elektronowej SEM (powiększenia 100 i 1000 razy) oraz mikroanalizy rentgenowskiej EDX. Rejestrowano średni skład chemiczny w określonym obszarze oraz rozkład powierzchniowy wybranych pierwiastków w obszarach przed i po laserowym oddziaływaniu.

4. WYNIKI BADAŃ

Jeden z charakterystycznych wyników badań laserowego domieszkowania warstwy wierzchniej cegły przedstawiono na rys. 5. Jest to barwna fotografia powierzchni. Lewa strona fotografii przedstawia obszar laserowego oddziaływania z powierzchnią próbki pokrytej warstwą węgliku tantal, natomiast prawa strona fotografii jest „czysta” (nie pokryta węglikiem metalu i nie poddana działaniu laserowej energii). Na lewej stronie rysunku wyraźnie widoczne są dwa rodzaje obszarów w których warstwa węgliku metalu jest w dużej części usunięta z powierzchni próbki oraz zmieniona jest jej barwa. Za pomocą poziomej strzałki zaznaczono obszar, który jest poddany badaniom SEM oraz EDX. W obszarze laserowego oddziaływania widoczne są także ciemniejsze obszary, gruba warstwa węgliku tantal.



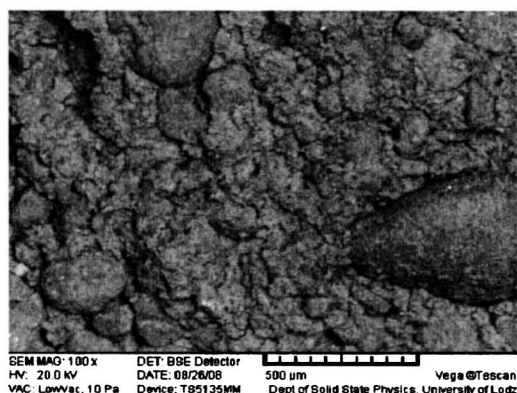
TaC

Rys.5. Fotografia powierzchni cegły poddanej działaniu wiązki światła lasera rubinowego (lewa strona).

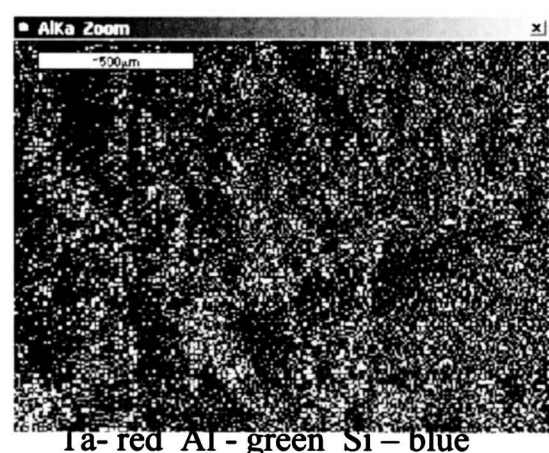
Fig.5. Colour photograph of surface brick after interaction of laser ruby radiation in free generation regime (left side).

Ten rozdział zawiera także wyniki badań SEM oraz mikroanalizy rentgenowskiej za pomocą sondy EDX. Przeprowadzono badania średniego składu chemicznego podłoża (a zwłaszcza poszukiwano tantal, metalu wchodzącego w skład węgliku). Następnie przeprowadzono analogiczne badania z obszarów pokrytych węglikiem tantal i poddanych działaniu wiązki laserowej. Reasumując, te badania przeprowadzono zarówno dla powierzchni czystej - nie poddanej działaniu wiązki laserowej jak i z obszarów w których występowała warstwa węgliku na podłożu cegły, poddanego działaniu laserowej energii. Wyniki tak prze-

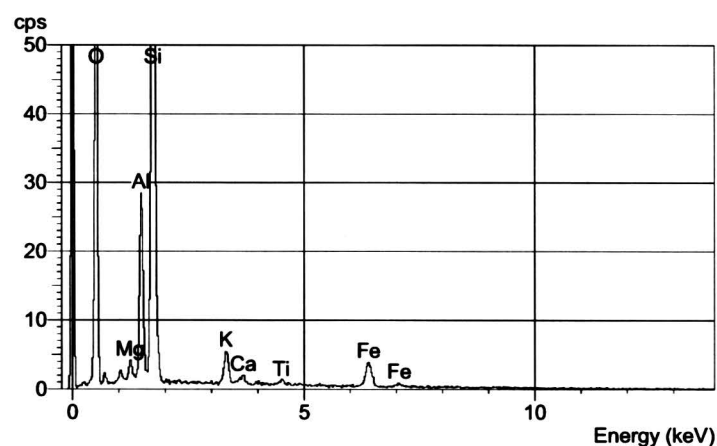
prorowadzonych badań przedstawiono odpowiednio na rysunkach od 6 do 11 oraz w Tabelach 1 i 2.



Rys. 6. Fotografia SEM cegły.
Fig.6. SEM photography of surface brick



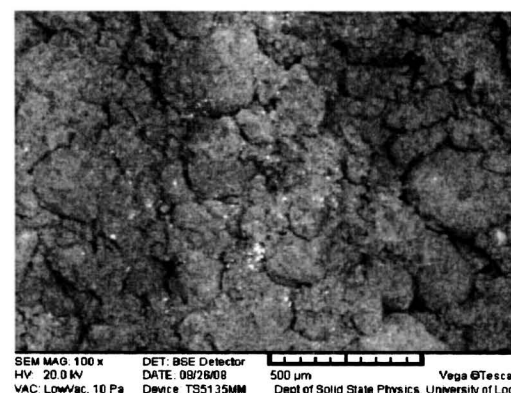
Rys. 7. Powierzchniowa koncentracja elementów w warstwie wierzchniej cegły.
Fig.7. Surface concentration of elements in the surface layer of brick.



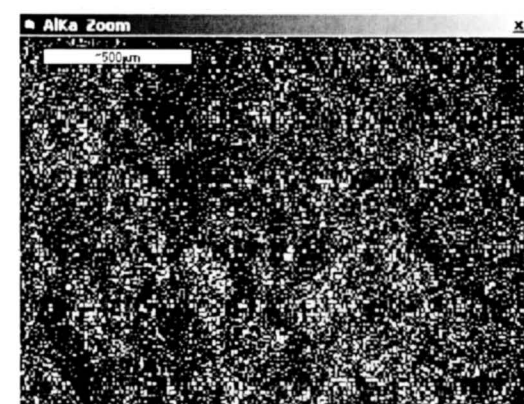
Rys. 8. Koncentracja składników w warstwie wierzchniej czystej cegły.
Fig. 8. Concentration of elements in the surface layer of clean brick.

TABELA 1. Koncentracja składników w warstwie wierzchniej czystej cegły.
TABLE 1. Concentration of elements in the surface layer of clean brick.

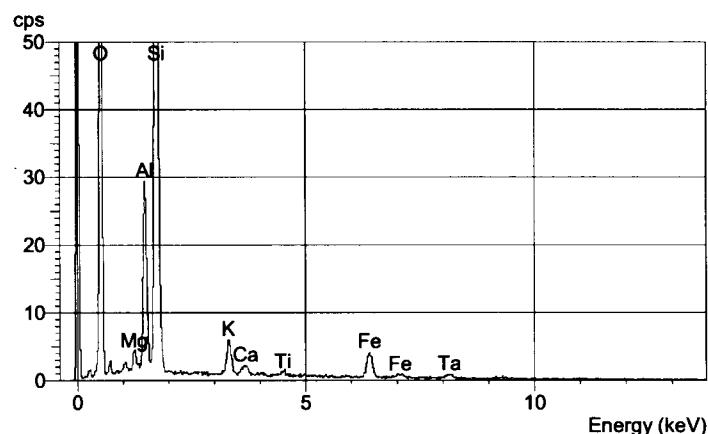
Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	57.81	71.83
Mg	ED	0.65	0.53
AlK	ED	6.22	4.58
SiK	ED	28.72	20.33
KK	ED	1.91	0.97
CaK	ED	0.47	0.23
TiK	ED	0.37	0.16
FeK	ED	3.85	1.37
TOTAL		100.00	100.00



Rys. 9. Fotografia SEM cegły.
Fig.9. SEM photography of surface brick.



Rys. 10. Powierzchniowa koncentracja elementów w warstwie wierzchniej cegły po laserowym oddziaływaniu.
Fig.10. Surface concentration of elements in the surface layer of brick after interaction of laser ruby radiation.



Rys. 11. Koncentracja składników w warstwie wierzchniej cegły domieszkowanej TaC.

Fig. 11 Concentration of elements in the surface layer of brick doped TaC.

TABELA 2. Koncentracja składników w warstwie wierzchniej cegły domieszkowanej TaC.

TABLE 2. Concentration of elements in the surface layer of brick doped TaC.

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	55.96	71.44
Mg	ED	0.59	0.50
AlK	ED	6.16	4.66
SiK	ED	27.86	20.26
KK	ED	1.86	0.97
CaK	ED	0.54	0.27
TiK	ED	0.34	0.15
FeK	ED	3.92	1.43
TaL	ED	2.77	0.31
TOTAL		100.00	100.00

5. WNIOSKI

W tej pracy przedstawiono wyniki badań dotyczące oddziaływania impulsów energii świetlnej z układem cienka warstwa węgliku tantalum na podłożu wykonanym z cegły. Użyty w badaniach laser rubinowy pracował w układzie generacji swobodnej, a więc badany materiał poddawano impulsowemu podgrzewaniu warstwy wierzchniej w ten sposób, że warstwa ta była podgrzewana szeregiem mikrosekundowych impulsów. Jak już powiedziano w części teoretycznej pracy, warstwa wierzchnia była nagrzewana w sposób monotoniczny, ale z jednoczesnym występowaniem fluktuacji temperatury. Ten sposób podgrzewania warstwy wierzchniej (domieszkowania) jest w literaturze problemu zagadnieniem unikalnym.

Z analizy składu chemicznego domieszkowanej powierzchni wynika, że w obszarze poddanym działaniu laserowej wiązki występują miejsca o dużej koncentracji węgliku tantalum (blisko 100%, gruba warstwa) oraz prawie 3 % koncentracja tantalum. W pierwszym przypadku można uważać, że otrzymuje się tutaj warstwę platerowaną węgliku tantalum na powierzchni cegły, natomiast w drugim przypadku w obszarze stopionym występuje węglik tantalum w postaci małych ziaren, rozpuszczonych w podłożu. Zatem, możemy tutaj mówić o warstwie kompozytowej.

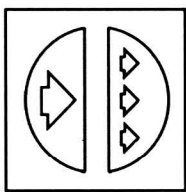
Obecnie na rynku istnieją w sprzedaży lasery, generujące ciąg impulsów o regulowanym czasie trwania. Mogą one z powodzeniem zastąpić chaotyczne w czasie impulsy energii emitowane przez laser rubinowy, którego zastosowanie dla celów praktycznych nie jest zbyt wygodne. Zastosowanie w tej dziedzinie współczesnych laserów impulsowych może być bardzo przydatne w celu wytworzenia określonej warstwy wierzchniej (kompozyt, platerowanie) mającej zastosowanie w inżynierii warstwy wierzchniej materiałów kapilarno-porowatych.

LASER RUBY DOPING OF THE SURFACE LAYER OF BRICK WITH THE TAC

Summary: The work presents the results of experimental examinations of the chemical composition of the brick samples (covered of tantalum carbide) before laser beam interaction. The samples are genesis from Łódź old age buildings, placed Wólczńska 215 street. The electron microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-ray methods were used. Large differences between chemical composition of the surface layer melted by laser beam and before laser exposition were observed.

Literatura

- [1] Fizyka budowli – ochrona zabytków: Metoda wskaźnikowa oceny oddziaływania klimatu na obiekty zabytkowe, pod redakcją Piotra Klemma, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2009.
- [2] Burakowski T., Wierzchoń T., Inżynieria powierzchni metali, WNT, Warszawa 1995
- [3] Roźniakowski K., Zastosowanie promieniowania laserowego w badaniach i modyfikacji właściwości materiałów budowlanych, PAN, Nr.50, Warszawa- Łódź, 2001
- [4] Klemm K., Klemm P., Roźniakowski K., *Laserowo stymulowane domieszkowanie warstwy wierzchniej wybranych materiałów kapilarno-porowatych nanocząstkami trudnotopliwych węglików metali*. Fizyka Budowli – Ochrona Zabytków., Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych, Łódź 2009.



MONITOROWANIE ZJAWISKA FOTONOWEGO CZYSZCZENIA POWIERZCHNI ZABYTKOWEJ CEGŁY ZA POMOCĄ LASEROWYCH SPECKLI

Katarzyna KLEMM^{*}, Piotr KLEMM^{**}, Kazimierz ROŻNIAKOWSKI^{***}

^{*}Politechnika Łódzka, Instytut Architektury i Urbanistyki

Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: katarzyna.klemm@p.lodz.pl

^{**}Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych,

Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: piotr.klemm@p.lodz.pl

^{***}Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź, e-mail: roznikaz@lodd.p.lodz.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań fotonowego czyszczenia powierzchni cegły pochodzącej z obiektów zabytkowej Łodzi przemysłowej. Do monitorowania tego procesu proponowano zjawisko odbicia światła lasera He-Ne od powierzchni tego materiału. Zaobserwowano zależność między liczbą „strzałów” w to samo miejsce próbki, a natężeniem i parametrami laserowych speckli w kierunku zwierciadlanego odbicia. Ta zależność może być przydatna do oszacowania stopnia wyczyszczenia powierzchni próbki za pomocą nanosekundowych impulsów lasera Nd:YAG.

Słowa kluczowe: Lasery Nd:YAG i He-Ne, fotonowe czyszczenie powierzchni, zabytkowa cegła, laserowe speckle.

1. WPROWADZENIE

1.1. Fotonowe czyszczenie warstwy wierzchniej materiałów kapilarno-porowatych.

W tradycyjnych technikach usuwania zanieczyszczeń z warstwy wierzchniej tych materiałów używa się skalpela, proszków ściernych (twardych cząstek), strumieni cieczy i środków chemicznych, które często dają sukces w rekonstrukcji zewnętrznego wyglądu dzieła. Jednakże te techniki wymagają kontaktu środka czyszczącego z powierzchnią, polegają na częstym, subiektywnym zdaniu konserwatora, są nieprzyjemne dla otoczenia i powodują zniszczenie głębszych warstw czyszczonego obiektu.

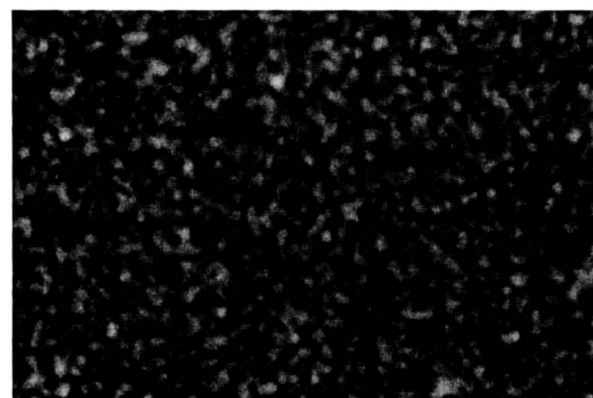
Oczekuje się, że użycie strumienia fotonów generowanych przez odpowiednie lasery, może być bardzo pożyteczne do usunięcia tego rodzaju zanieczyszczeń. Uważa się, że działające na warstwę wierzchnią fotony są w niej absorbowane głównie przez osad (zanieczyszczenie), który jest nagrzewany i następnie ulega odparowaniu lub ablacji. Głębiej

leżące warstwy odbijają dyfuzyjnie dalsze padające fotony. Istota procesu oparta jest zatem na różnicy monochromatycznej odbijalności zanieczyszczonej warstwy wierzchniej i podłoża fotonów emitowanych przez laser.

Z przeprowadzonych dotąd badań literaturowych tego problemu, wynikają następujące ważne kwestie techniczne: efektywność fotonowego czyszczenia zależy od energii stosowanych fotonów; grubości i barwy zanieczyszczeń (ich absorpcyjności); ważne są procesy fizyko-chemiczne zachodzące w materiale poddanym działaniu strumienia fotonów; należy znać optymalną gęstość strumienia fotonów, taką przy której w podłożu nie zachodzą przemiany fazowe; wskazane jest monitorowanie stopnia wyczyszczenia powierzchni materiału [1,2].

1.2. Laserowe speckle

Wiadomo, że spójne światło pochodzenia laserowego po odbiciu od chropowatej powierzchni materiału charakteryzuje się ziarnistą strukturą (rysunek 1), nazywaną w literaturze laserowymi specklami.



Rys. 1. Fotografia laserowych speckli.

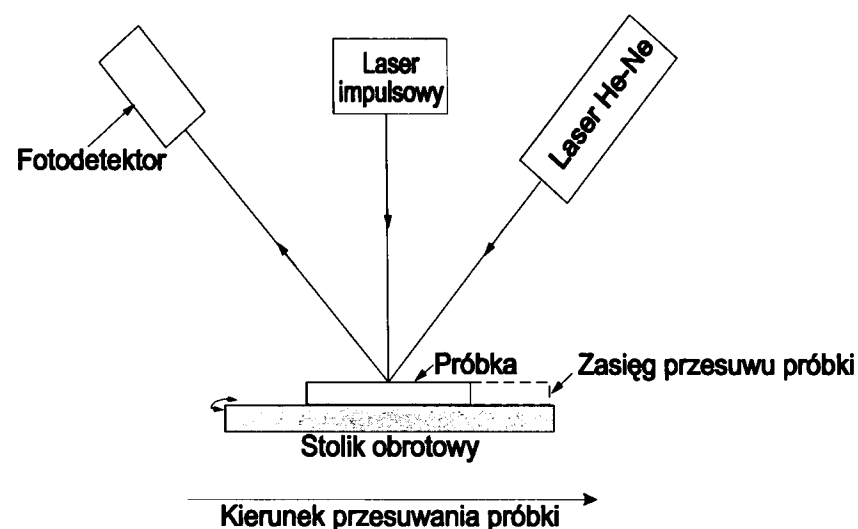
Fig. 1. The colour photograph of laser speckles

Jak widać na fotografii ta ziarnista struktura charakteryzuje się probabilistycznym rozkładem natężenia światła i wielkości speckli.

W badaniach doświadczalnych obraz laserowych speckli otrzymywany z kolorowej fotografii jest konwertowany do postaci mapy bitowej o 256 odcieniach szarości i zapisywany do odpowiedniego pliku. Tak otrzymane zbiory są poddawane analizie za pomocą specjalnie napisanych do tego celu programów. W tych badaniach rejestrowane jest średnie natężenie światła odbitego w kierunku zwierciadlanym, a także parametry otrzymywanych rozkładów natężenia światła, są to: kontrast (K_o), wariancja (W_a), odchylenie standardowe (O_d), skośność (S_k) i kurtoza (K_u) [3,4,5].

2. OBIEKT I METODYKA BADAŃ

Obiektem badań w tej pracy były próbki cegły pochodzącej z zespołu zabytkowej zabudowy przemysłowej Łodzi. Przygotowano 12 próbek do badań. Poddano je naświetlaniu impulsowym strumieniem fotonów, emitowanym przez laser Nd:YAG. Energia impulsu emitowana przez ten laser wynosiła $E = 500$ mJ, długość fali świetlnej odpowiadająca tym fotonom była $\lambda = 1,060$ μm , a czas trwania impulsu $\tau = 10$ ns. Płaszczyzna ogniskowa układu skupiającego laserową wiązkę była „umieszczona” wewnątrz próbki tak, że $\Delta f = 20$ mm. Taka geometria naświetlania spowodowała, że średnica naświetlanego obszaru próbki była równa 20 mm. W kolejne próbki oddano liczbę „strzałów” równą odpowiednio 1,2,3...12. Przed działaniem lasera Nd:YAG, z tego samego miejsca próbki zarejestrowano natężenie światła lasera He-Ne w kierunku zwierciadlanego odbicia. Kąt padania wiązki światła lasera He-Ne był równy $\alpha = 5^\circ$. Zarejestrowano natężenie światła odbitego od powierzchni próbki przed i po działaniu nanosekundowego impulsu. Za pomocą specjalnie do tego celu opracowanego programu „speckle” [5] wyznaczono parametry speckli, w tym także natężenie światła w kierunku zwierciadlanym, w kącie bryłowym, widzianym przez matrycę cyfrowego aparatu fotograficznego (bez obiektywu). Schemat blokowy laserowego układu badawczo-pomiarowego przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat blokowy laserowego układu badawczo-pomiarowego.

Fig. 2. Eksperymental set-up.

3. WYNIKI BADAŃ

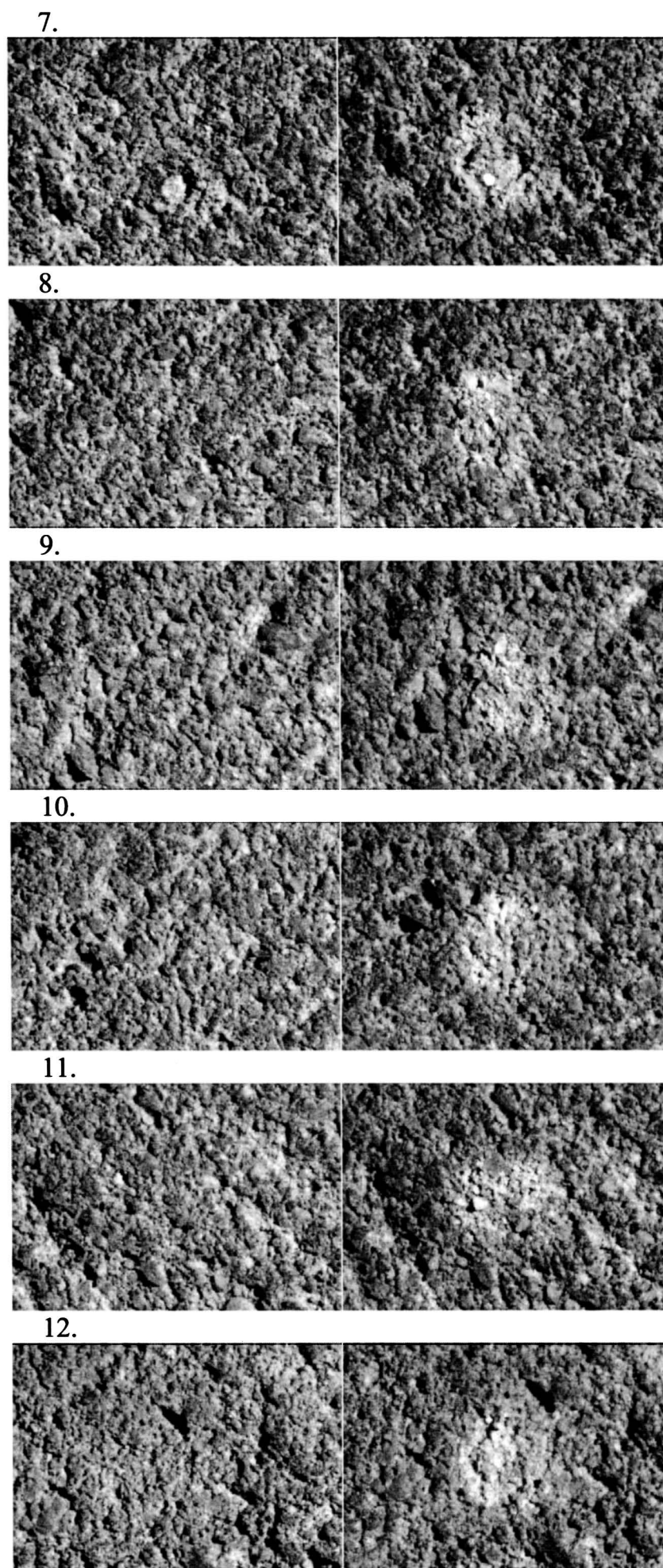
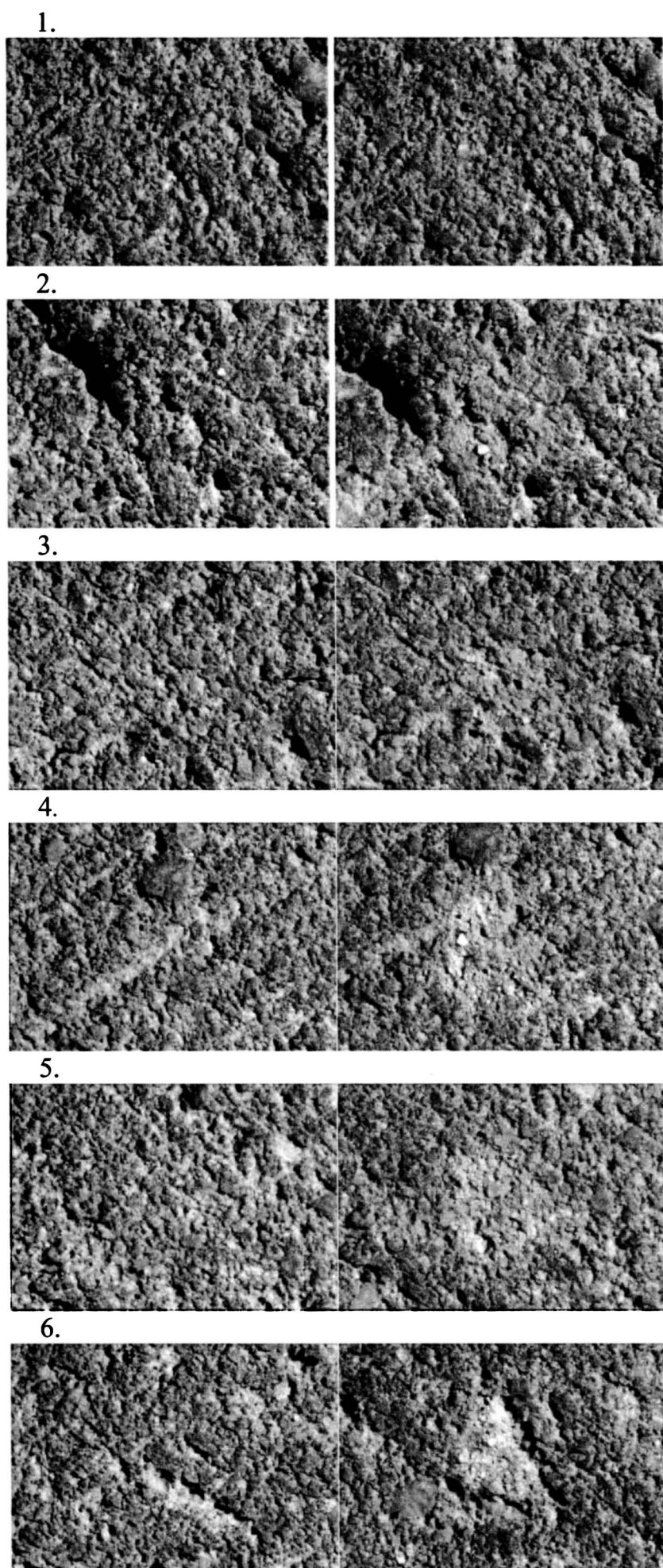
Na rysunku 3 przedstawiono wyniki badań fotonowego czyszczenia, zarejestrowane za pomocą cyfrowego aparatu fotograficznego, stosując pięciokrotne powiększenie. Na tym rysunku widoczne są fotografie tej samej powierzchni próbki, przed (lewa fotografia) i po laserowym oddziaływaniu (prawa fotografia). Numer kolejnej fotografii oznacza jednocześnie liczbę „strzałów” oddanych w to samo miejsce próbki.

Z wizualnej analizy tych fotografii wynika, że po 5 strzałach w obszarze naświetlonym pojawia się lokalna zmiana barwy cegły. Zatem, naświetlanie tego obszaru większą liczbą „strzałów” powoduje usunięcia zanieczyszczenia z powierzchni, ale także zniszczenie podłoża (odbarwienie).

W Tabeli 1, przedstawiono zależność natężenia światła lasera He-Ne odbitego od powierzchni badanych próbek w kierunku zwierciadlanym dla powierzchni zanieczyszczonej J_z oraz dla powierzchni poddawanej działaniu strumienia fotonów (umownie powierzchni „czystej”) J_c . Widać z tych pomiarów, że natężenie światła odbitego zmienia się wraz z liczbą „strzałów” skierowanych na powierzchnię próbki.

W Tabelach 2 i 3, przedstawiono analogiczne zależności dla parametrów laserowych speckli. Wyraźnie widać z tych pomiarów, że dla pierwszych 5 próbek zależności zmieniają się w przybliżeniu liniowo wraz z liczbą „strzałów”.

Natomiast dla liczby „strzałów” większych od pięciu, zależności te są także liniowe, ale praktycznie nie zależą od liczby strzałów.



Rys. 3. Fotografie powierzchni próbek przed (lewa) i po (prawa) działaniu laserowych fotonów.

Fig. 3. The photographs of surface samples before (left) and after (right) laser photons interactions.

Tabela 1. Natężenie światła laserowych speckli w kierunku zwierciadlanym dla powierzchni zanieczyszczonej J_z i po działaniu strumienia fotonów J_c .

Table 1. The intensity of laser speckles before (J_z) and after (J_c) laser photons interactions.

Nr próbki	J_z [r.u.]	J_c [r.u.]	J_c/J_z
1	305	311	1,02
2	255	321	1,26
3	274	336	1,23
4	269	379	1,41
5	272	376	1,38
6	273	363	1,33
7	289	388	1,34
8	273	384	1,41
9	265	380	1,43
10	300	389	1,30
11	254	381	1,50
12	281	366	1,30

Tabela 2. Parametry laserowych speckli dla powierzchni zanieczyszczonych (przed działaniem strumienia fotonów).

Table 2. The parameters of laser speckles before laser photons interactions

Nr próbki	Ko.	Wa.	Od.	Sk.	Ku.
1	0,44	504	22,5	0,71	3,15
2	0,48	410	20,2	0,91	3,77
3	0,46	445	21,1	0,80	3,37
4	0,48	462	21,5	0,90	3,61
5	0,47	447	21,1	0,82	3,40
6	0,46	442	21,0	0,84	3,52
7	0,45	480	21,9	0,84	3,46
8	0,47	448	21,2	0,88	3,58
9	0,47	440	21,0	0,86	3,57
10	0,45	493	22,2	0,75	3,27
11	0,47	393	19,8	0,93	3,84
12	0,46	465	21,6	0,83	3,47

Tabela 3. Parametry laserowych speckli dla powierzchni „wyczyszczonych” (po działaniu strumienia fotonów)

Table 3. The parameters of laser speckles after laser photons interactions

Nr próbki	Ko.	Wa.	Od.	Sk.	Ku.
1	0,42	474	21,8	0,68	3,22
2	0,42	495	22,3	0,57	2,43
3	0,41	517	22,7	0,53	2,87
4	0,38	582	24,1	0,35	2,52
5	0,39	585	24,2	0,36	2,58
6	0,39	568	23,8	0,37	2,55
7	0,38	606	24,6	0,36	2,59
8	0,38	603	24,6	0,34	2,52
9	0,39	606	24,6	0,40	2,62
10	0,38	610	24,7	0,35	2,55
11	0,39	605	24,6	0,41	2,64
12	0,39	590	24,3	0,42	2,66

4. WNIOSKI

W pracy przedstawiono wyniki eksperymentalnych badań dotyczące oddziaływania impulsowego (nanosekundowego) strumienia fotonów z warstwą wierzchnią zanieczyszczoną, zabytkowej cegły. W pracy zaproponowano innowacyjną metodę monitorowania stopnia zanieczyszczenia (usuwania zanieczyszczeń) za pomocą laserowych speckli. Z pomiaru i analizy parametrów laserowych speckli wynika, że mogą one być przydatne do oceny wyników procesu oddziaływania impulsowego strumienia fotonów z układem cienką warstwą – podłożem.

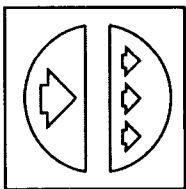
Obecnie istnieje techniczna możliwość zbudowania takiego układu techniczno badawczego w którym monitorowanie zjawiska fotonowego czyszczenia powierzchni (za pomocą laserowych speckli) może być realizowane w systemie online. Taka metoda monitorowania mogłaby znacznie przyspieszyć i poprawić jakość procesu fotonowego czyszczenia powierzchni.

LASER SPECKLE MONITORING METHOD OF THE LASER PHOTON CLEANING OF THE SURFACE OF AN- CIENT BRICK

Summary: The work presents the results of experimental examinations of the laser photon cleaning of the surface of ancient brick. Lasers (He-Ne) speckles are proposed to monitoring these phenomenon. The parameters of lasers speckles were analysed. Large differences between number of laser “shots” and parameters of lasers speckles were observed.

Literatura

- [1] Klemm P., Rożniakowski K.: Fotonowe czyszczenie powierzchni, DWN S.A., Łódź 1997.
- [2] Klemm P., Klemm A.J., Rożniakowski K.: *Laserowe usuwanie zanieczyszczeń i modyfikacja warstwy wierzchniej*, w: Fizyka Materiałów I Konstrukcji Budowlanych: red. Klemm Piotr, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Monografie PŁ, Łódź 2001.
- [3] Rożniakowski K., Wojtatowicz T.W.: *Speckle laserowe*, w: Badania przemian fazowych zachodzących w warstwie wierzchniej ciała porowatego za pomocą promieniowania laserowego, red.: T.W.Wojtatowicz, sprawozdanie KBN 7T07E00214, Łódź 2000, s.21-32
- [4] Wojtatowicz T.W.: *Komputerowa analiza obrazu*, w : Badania przemian fazowych zachodzących w warstwie wierzchniej ciała porowatego za pomocą promieniowania laserowego, red.: T.W.Wojtatowicz, sprawozdanie KBN 7T07E00214, Łódź 2000, s.43-52.
- [5] Gerstenkorn T., Śródka T.: Kombinatoryka i rachunek prawdopodobieństwa, PWN, Warszawa 1978.



BADANIA PRZEPŁYWU POWIETRZA WOKÓŁ OBIEKTU ARCHITEKTONICZNEGO ZA POMOCĄ TRANSFORMATY FFT

Katarzyna KLEMM*, Krzysztof PIESZYŃSKI**,
Kazimierz ROŻNIAKOWSKI**

**Politechnika Łódzka, Instytut Architektury i Urbanistyki*

Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: katarzyna.klemm@p.lodz.pl

***Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki ul. Wólczańska 219, 90-924 Łódź*

Streszczenie: W pracy oszacowano parametry transformaty FFT dla sygnału optycznego, powstającego w wyniku propagacji wąskiej wiązki światła lasera w strefie napływu powietrza na nieopływową przeszkodę. Badania przeprowadzono w tunelu aerodynamicznym, którego poprzeczne rozmiary były dużo większe od rozmiarów modelu. Analizę wyników badań przeprowadzono zarówno w oparciu o parametry transformaty FFT jak i na podstawie parametrów zaproponowanego w pracy równania opisującego obwiednię krzywej $F(v) \cdot v$ w funkcji v .

Słowa kluczowe: parametry FFT, model obiektu, laser, propagacja światła.

1. WPROWADZENIE

Wiadomo, że za pomocą transformaty Fouriera $F(v)$ funkcji $f(t)$ zależnej od czasu, dokonuje się przekształcenia przestrzeni czasowej w przestrzeń częstotliwościową. Ta transformacja jest w niniejszej pracy opisywana związkiem [1]:

$$F(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i2\pi vt} dt \quad (1)$$

gdzie v – oznacza częstotliwość, t - czas

Mówiąc bardzo zwięźle, sens fizyczny transformaty można wyrazić stwierdzając, że przedstawia ona sobą widmo składowych harmonicznym budujących funkcję $f(t)$. Ponieważ z zasady transformata Fouriera jest funkcją zespoloną zmiennej rzeczywistej v , oznacza to, że niesie ona informację o dwóch parametrach. Najprościej wyjaśnić można rolę tych parametrów w oparciu o przedstawienie Eulera liczby zespolonej. Duże wartości modułu $F(v)$ w określonym zakresie częstotliwości oznaczają duży wkład związa-

nych z tymi częstotliwościami harmonicznymi w budowę funkcji $f(t)$. Analogicznie, małe wartości modułu $F(v)$ oznaczają mały wkład związanych z tymi częstotliwościami harmonicznymi w budowę tejże funkcji. Analiza związków fazowych poszczególnych harmonicznymi nie będzie przedmiotem tej pracy.

Szczególnie istotna jest informacja o rozkładzie energii na poszczególne harmoniczne, tworzące czasowy przebieg $f(t)$. Ponieważ energia w ruchu harmonicznym jest proporcjonalna do iloczynu kwadratu amplitudy i kwadratu częstości, stąd właśnie w wielu badaniach analizowany jest iloczyn $F(v) \cdot v$.

Ponadto, ze względu na fakt, że w tych badaniach dane eksperymentalne nie mogą być zbierane w sposób ciągły, to w rzeczywistości liczone dyskretną transformatę Fouriera. Dla przyspieszenia tych obliczeń zastosowano algorytm szybkiej transformaty Fouriera (FFT).

Celem badań przeprowadzonych w tej pracy jest wykazanie, na drodze eksperymentalnej, że umieszczenie w tunelu, w przepływającej strudze powietrza modelu obiektu w postaci sześciangu, powoduje zmiany parametrów charakteryzujących FFT (dokładniej parametrów obwiedni) w stosunku do przepływu nie zakłóconego obecnością modelu.

2. EKSPERYMENT

Szczegółowy opis przeprowadzonych badań eksperymentalnych, jak parametry tunelu i modelu obiektu, pomiar prędkości przepływu powietrza, parametrów wiązki laserowej, detekcję sygnału optycznego oraz procedurę badań opisano w pracy [2].

3. WYNIKI BADAŃ

Otrzymane wyniki badań podzielono jak w pracy [2] na dwie, następujące grupy zagadnień pomiarowych:

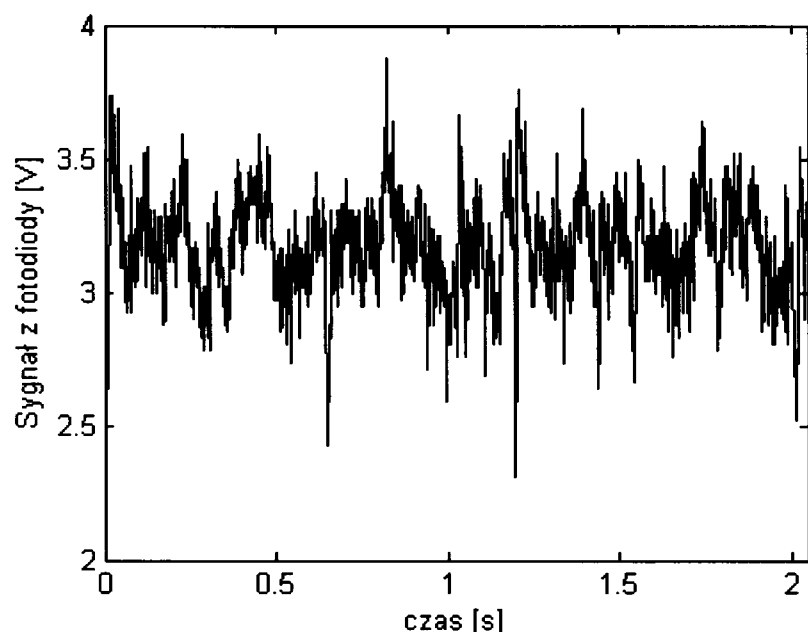
1. badania parametrów FFT laserowego sygnału optycznego podczas przepływu powietrza w tunelu, w którym nie jest umieszczony model,
2. badania parametrów FFT sygnału optycznego w obecności modelu obiektu, od strony napływającego powietrza w różnych odległościach od modelu.

Zarejestrowane sygnały (w obu przypadkach) opracowano w następujący sposób: a) obliczono $FFT_s(\nu)$ sygnału b) obliczono $FFT_{sz}(\nu)$ sygnału bez przepływu powietrza (szum), następnie od wielkości obliczonej w punkcie a) odjęto wielkość obliczoną w punkcie b), otrzymany wynik pomnożono przez częstotliwość ν .

Przykładowy sygnał optyczny przedstawiono na rysunku 1, jego transformatę FFT na rys. 2, a ostateczny wynik opisanych wyżej obliczeń na rys. 3. Zatem, na tym rysunku, na osi pionowej przedstawiono wielkość eksperymentalną, opisaną równaniem :

$$y_{eksp} = [FFT_s(\nu) - FFT_{sz}(\nu)] \cdot \nu \quad (2)$$

a na osi poziomej częstotliwość ν .



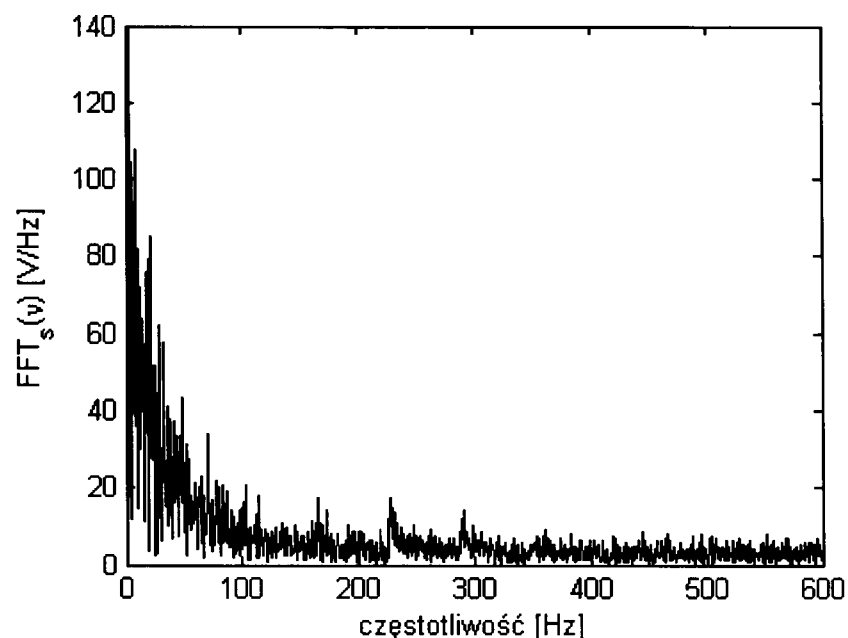
Rys. 1. Fluktuacje natężenia światła w funkcji czasu dla prędkości 0,5 m/s powietrza przepływającego w tunelu.

Fig.1. Time fluctuation of the light intensity. The air in the wind tunnel flew with the speed 0.5m/s.

Następnie, tak obliczoną funkcję (przedstawioną graficznie na rysunku 3 za pomocą czarnej linii) aproksymowano stosując metodę najmniejszych kwadratów według formuły (linia biała na rysunku 3):

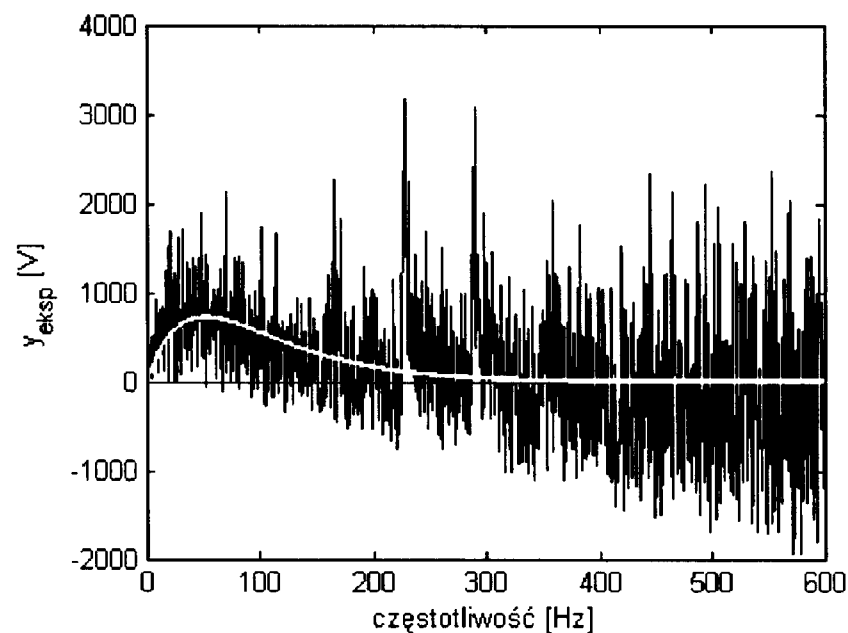
$$y = a \cdot x \cdot \exp(-(x - b)/c). \quad (3)$$

gdzie: a, b, c są wielkościami stałymi (parametrami wyznaczanymi w tych badaniach), natomiast x jest częstotliwością ($x=\nu$).



Rys. 2. Transformata Fouriera FFT dla fluktuacji natężenia światła (sygnału) przedstawionych na rys. 1.

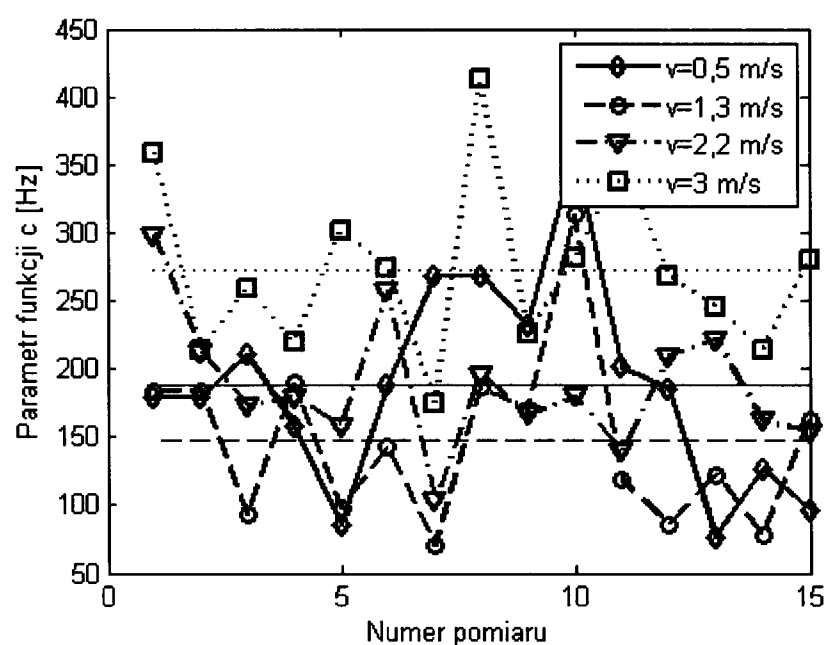
Fig.2. Fourier transform of the curve (time fluctuation of the light intensity) which is shown in Fig. 1.



Rys. 3. Graficzny wynik przekształcenia: (FFT sygnału – FFT szumu) po pomnożeniu przez częstość w zależności od częstości.

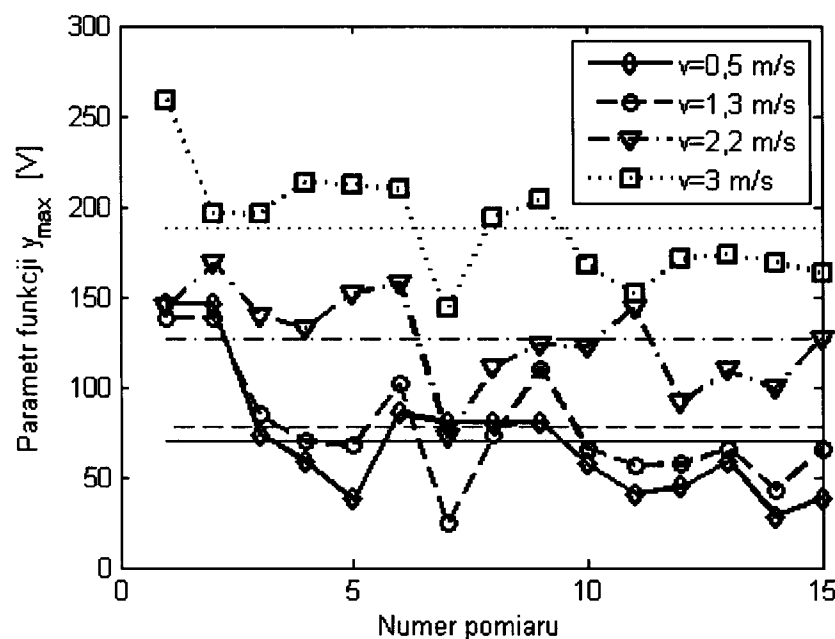
Fig.3. The black line shows the y_{eksp} in Eq.(2). The white line (y in Eq.(3)) was fitted to the points laying on the black line using the least squares method.

Wyniki obliczeń dla przypadku przepływu bez modelu (swobodny przepływ powietrza w tunelu) przedstawiono na kolejnych rysunkach: 4,5,6,7,8,9,10,11.



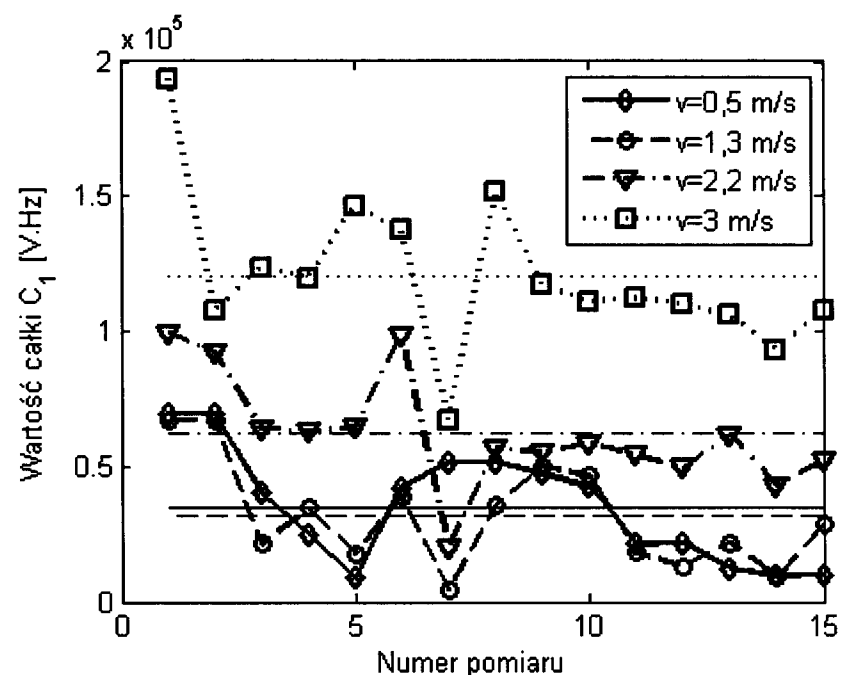
Rys. 4. Parametr c funkcji y w zależności od numeru pomiaru (serii) z wymuszonym przepływem powietrza w tunelu (prędkości przepływu podano na rysunku).

Fig.4. The value of c parameter of y function (Eq.(3)) for four (0.5m/s, 1.3 m/s, 2.2 m/s, 3 m/s) different speeds of air flow in the wind tunnel. For the each speed the c parameter was measured 15 times.



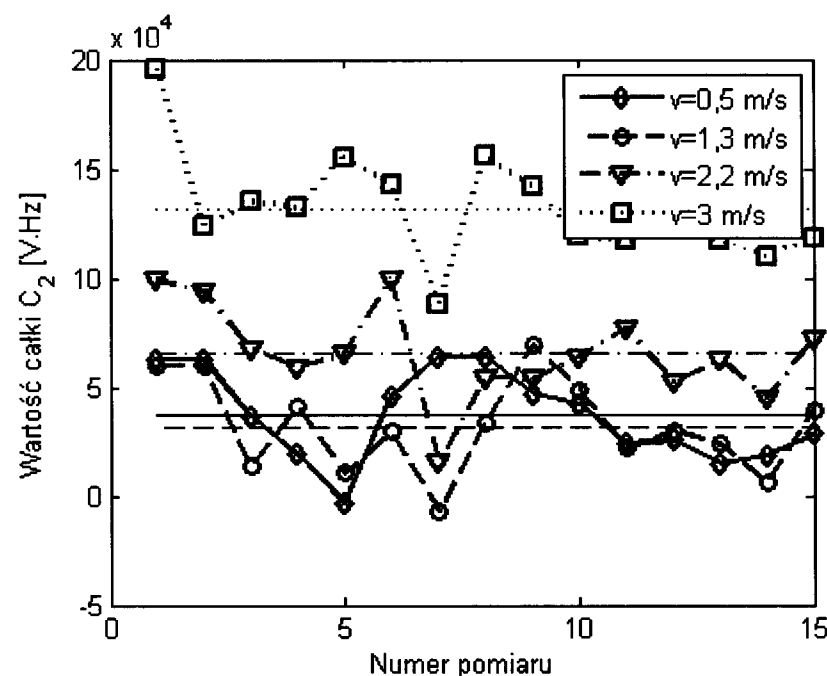
Rys. 5. Parametr $y_{\max}$ funkcji y w zależności od numeru pomiaru (serii) z wymuszonym przepływem powietrza w tunelu (prędkości przepływu podano na rysunku).

Fig.5. The value of $y_{\max}$ implicit parameter of y function (Eq.(3)) for four (0.5m/s, 1.3 m/s, 2.2 m/s, 3 m/s) different speeds of air flow in the wind tunnel. For the each speed the c parameter was measured 15 times.



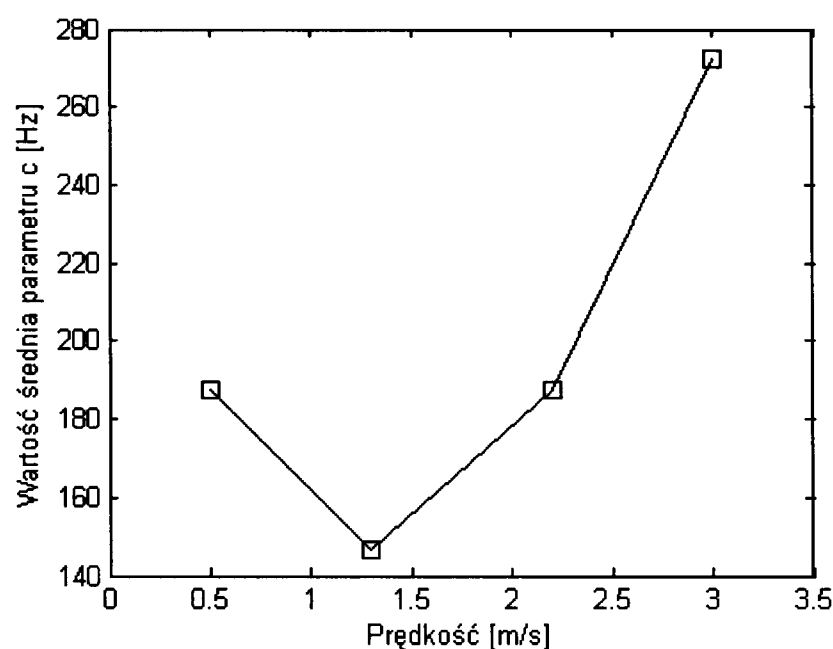
Rys. 6. Parametr C_1 (całka) funkcji y w zależności od numeru pomiaru (serii) z wymuszonym przepływem powietrza w tunelu (prędkości przepływu podano na rysunku).

Fig.6. The value of C_1 parameter (the integral of y function (Eq.(3))) for four (0.5m/s, 1.3 m/s, 2.2 m/s, 3 m/s) different speeds of air flow in the wind tunnel. For the each speed the c parameter was measured 15 times.

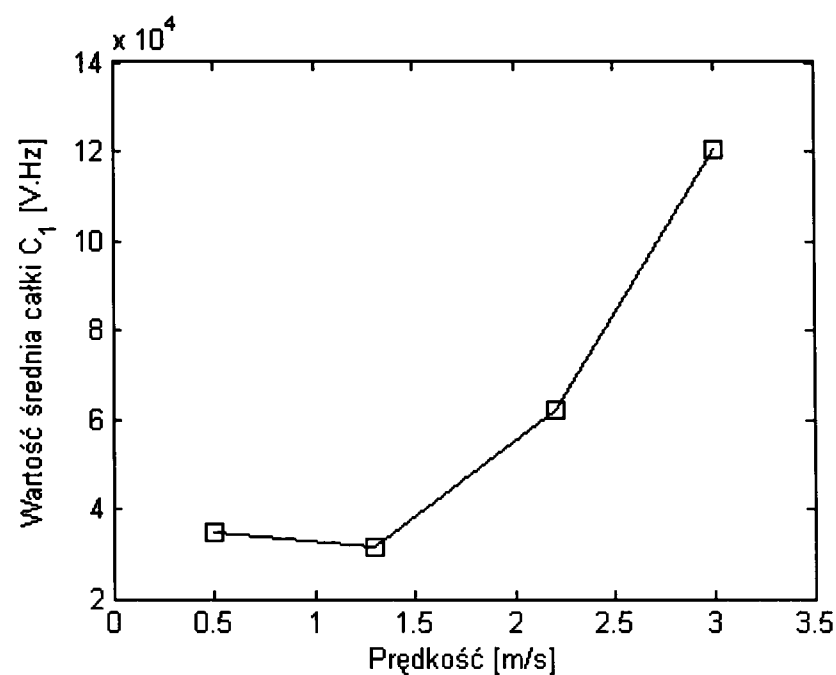


Rys. 7. Parametr C_2 (całka z pomiarów eksperymentalnych) w zależności od numeru pomiaru (serii) z wymuszonym przepływem powietrza w tunelu (prędkości przepływu podano na rysunku).

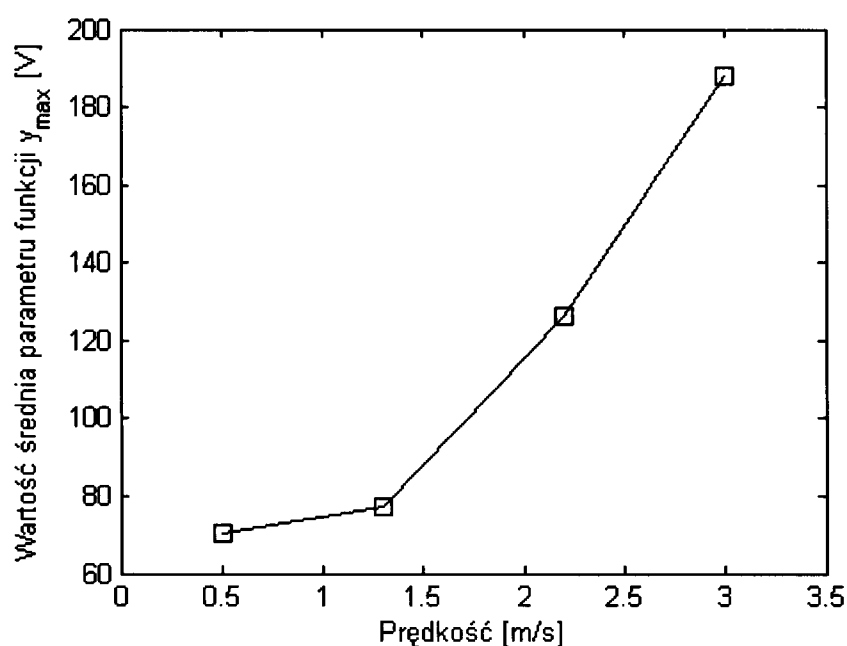
Fig.7. The value of C_2 parameter (the integral of y_{exp} function (Eq.(2))) for four (0.5m/s, 1.3 m/s, 2.2 m/s, 3 m/s) different speeds of air flow in the wind tunnel. For the each speed the c parameter was measured 15 times.



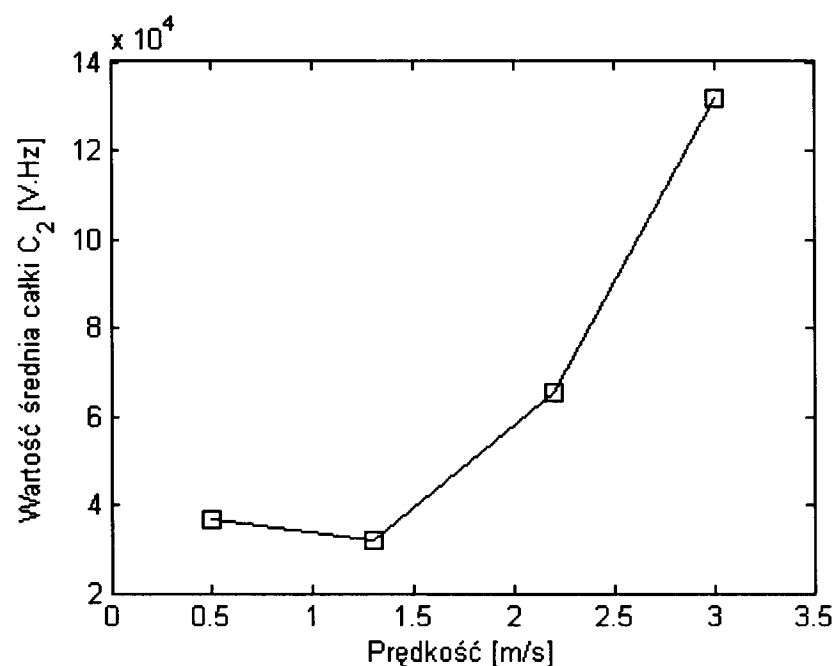
Rys. 8. Zależność parametru c (wartość średnia) od prędkości napływu powietrza w tunelu (bez modelowego obiektu).
Fig.8. The dependence of the c parameter mean value on the speed of the air inflow in the wind tunnel without object model.



Rys. 10. Zależność wartości całki C_1 (wartość średnia) od prędkości napływu powietrza w tunelu, bez modelu obiektu.
Fig.10. The dependence of the C_1 parameter mean value on the speed of the air inflow in the wind tunnel without object model.



Rys. 9. Zależność parametru y_{max} (wartość średnia) od prędkości napływu powietrza w tunelu (bez modelu obiektu).
Fig.9. The dependence of the y_{max} parameter mean value on the speed of the air inflow in the wind tunnel without object model.

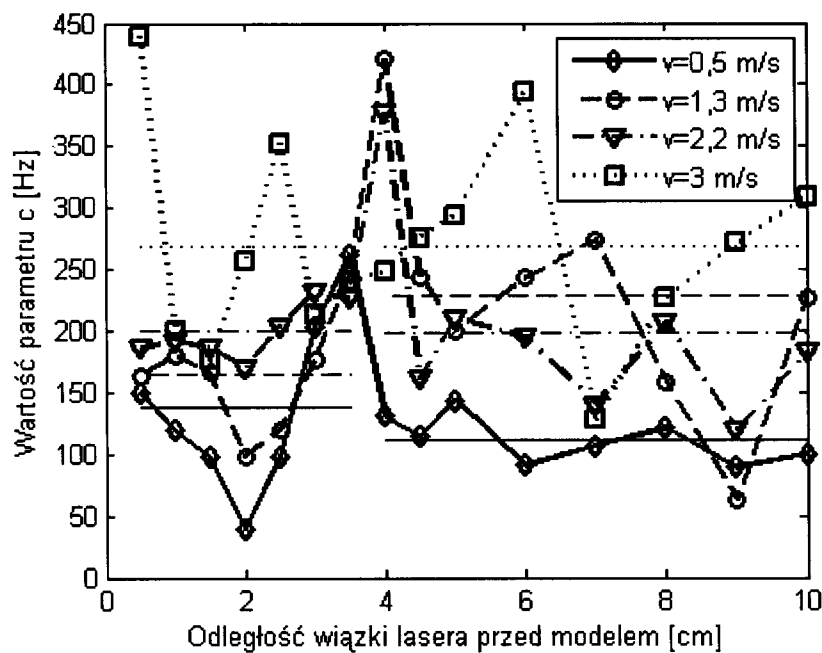


Rys. 11. Zależność wartości całki C_2 (wartość średnia) od prędkości napływu powietrza w tunelu, bez modelu obiektu.
Fig.11. The dependence of the C_2 parameter mean value on the speed of the air inflow in the wind tunnel without object model.

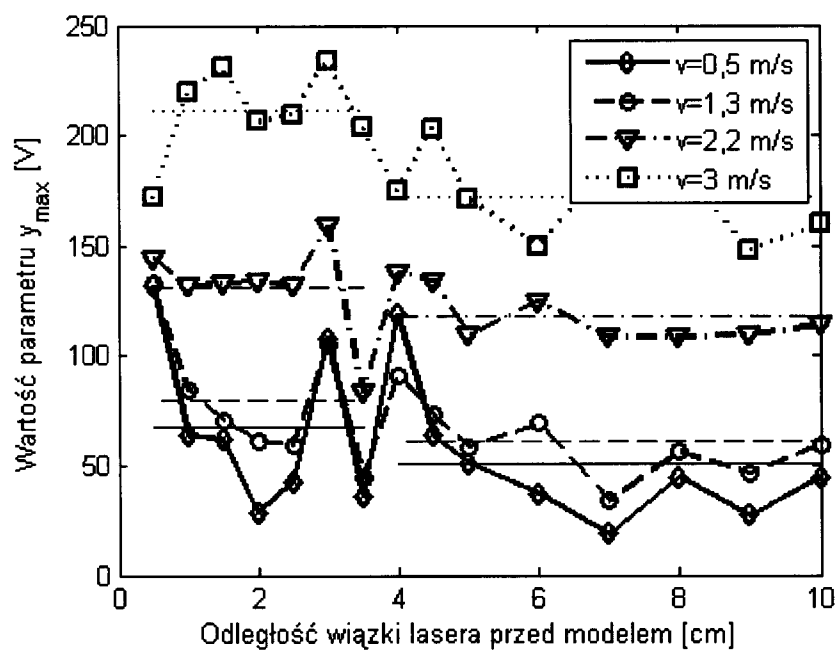
Na rysunkach 4,5,6,7 liniami poziomymi zaznaczono wartości średnie odpowiednich parametrów dla różnych prędkości, natomiast na rysunkach 8,9,10,11 przedstawiono te średnie wartości parametrów w funkcji prędkości napływającego powietrza.

W analogiczny sposób wyznaczono parametry funkcji y dla sygnału optycznego w przypadku, gdy w tunelu umieszczony jest modelowy obiekt. Laserowa wiązka jest propagowana od strony napływającego powietrza, zmieniano odległość wiązki od badanego obiektu w zakresie takim jak w pracy [1].

Otrzymane wyniki badań eksperymentalnych i obliczeń przedstawiono na rysunkach: 12, 13, 14, 15.

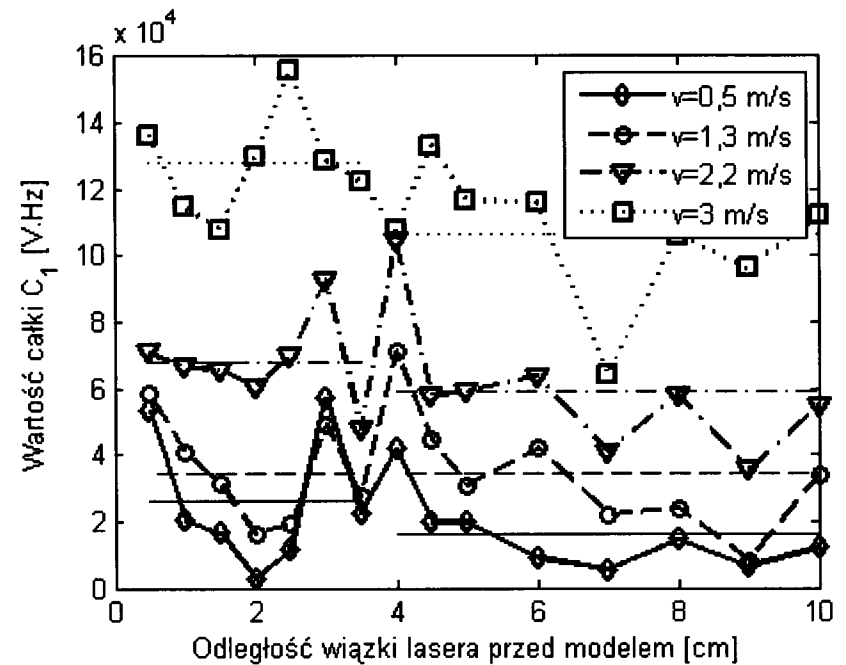


Rys. 12. Parametr c w zależności od odległości od modelu obiektu budowlanego, z wymuszonym przepływem powietrza w tunelu (prędkość napływu podano na rysunku).
Fig.12. The value of c parameter of y function (Eq.(3)) versus the distance from the building object model for four (0.5m/s, 1.3 m/s, 2.2 m/s, 3 m/s) different speeds of air flow in the wind tunnel.

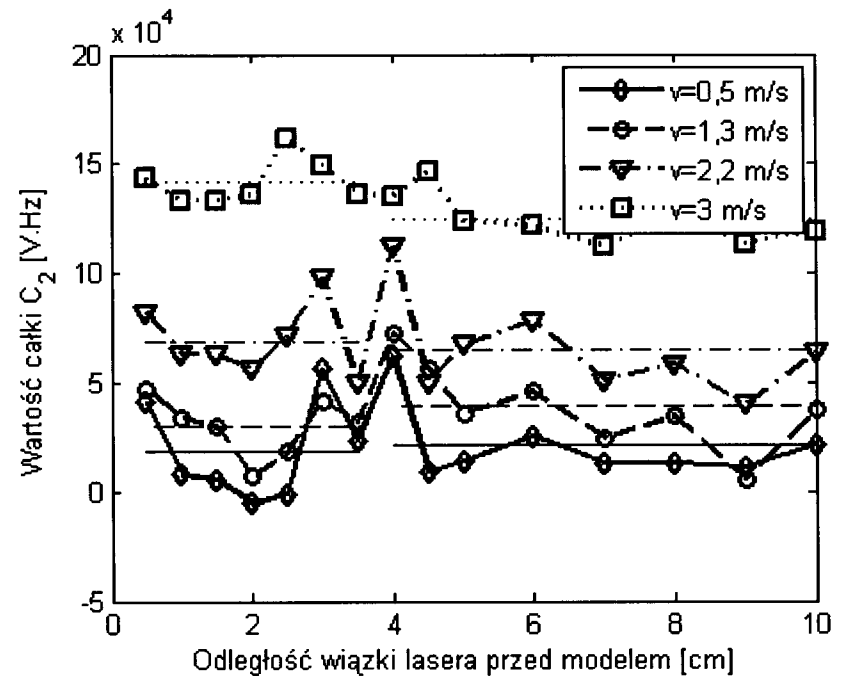


Rys. 13. Parametr funkcji $y_{\max}$ w zależności od odległości od modelu obiektu budowlanego, z wymuszonym przepływem powietrza w tunelu (prędkość napływu podano na rysunku).
Fig.13. The value of $y_{\max}$ implicit parameter of y function (Eq.(3)) versus the distance from the building object model for four (0.5m/s, 1.3 m/s, 2.2 m/s, 3 m/s) different speeds of air flow in the wind tunnel.

Analogicznie jak w pierwszym przypadku, linie poziome oznaczają wartości średnie parametru dla różnych prędkości. Wartości te były obliczone dla dwóch różnych zakresów odległości, to znaczy od 0,5 do 3,5 cm i od 4 do 10 cm.

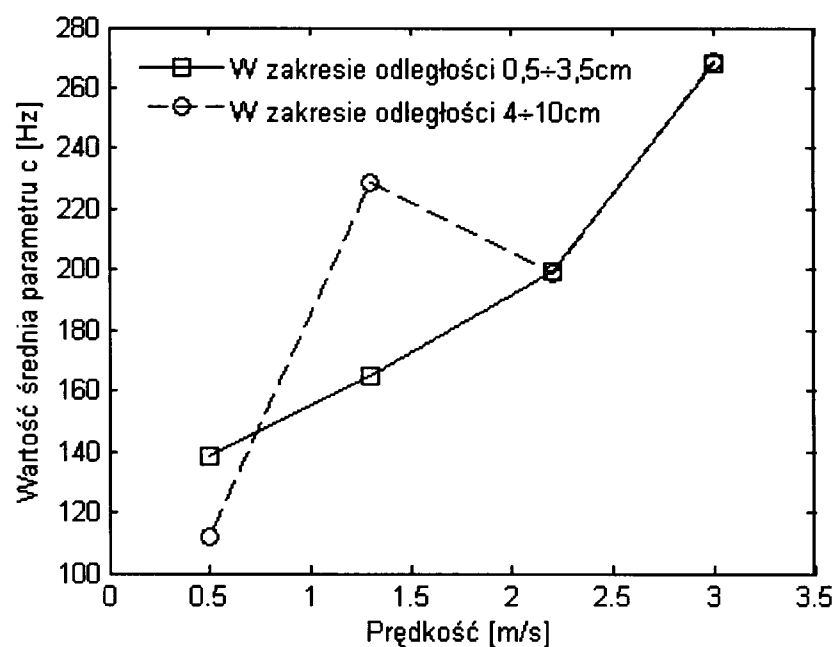


Rys. 14. Wartość całki C_1 w zależności od odległości od modelu obiektu budowlanego, z wymuszonym przepływem powietrza w tunelu (prędkość napływu podano na rysunku).
Fig.14. The value of C_1 parameter (the integral of y function (Eq.(3))) versus the distance from the building object model for four (0.5m/s, 1.3 m/s, 2.2 m/s, 3 m/s) different speeds of air flow in the wind tunnel.



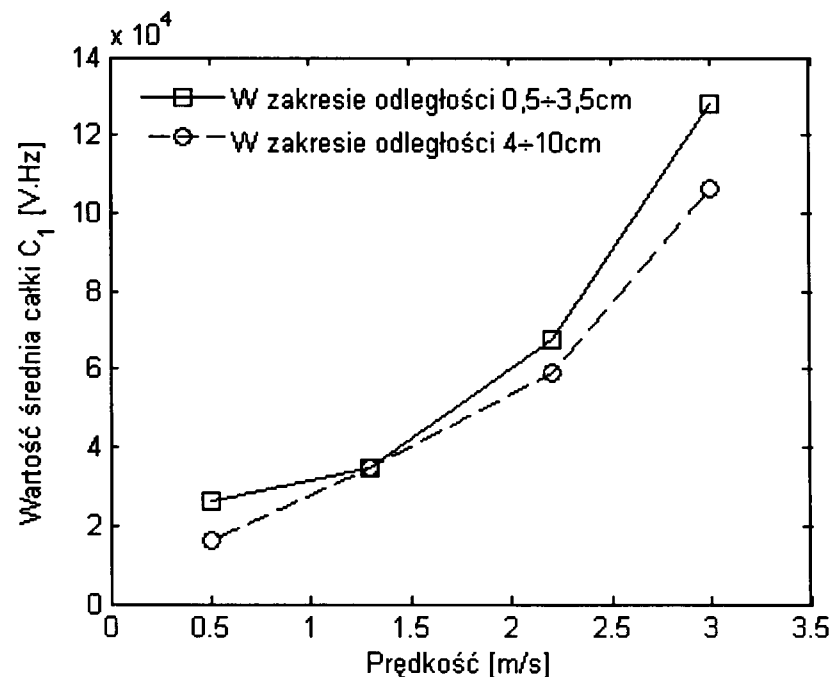
Rys. 15. Wartość całki C_2 (z eksperymentu) w zależności od odległości od modelu obiektu budowlanego, z wymuszonym przepływem powietrza w tunelu (prędkość napływu podano na rysunku).
Fig.15. The value of C_2 parameter (the integral of y_{exp} function (Eq.(2))) versus the distance from the building object model for four (0.5m/s, 1.3 m/s, 2.2 m/s, 3 m/s) different speeds of air flow in the wind tunnel.

Na rysunkach 16,17,18,19 przedstawiono te średnie wartości parametrów w funkcji prędkości, przy czym linia ciągła oznacza zakres od 0,5 do 3,5 cm, a linia przerywana od 4 do 10 cm.



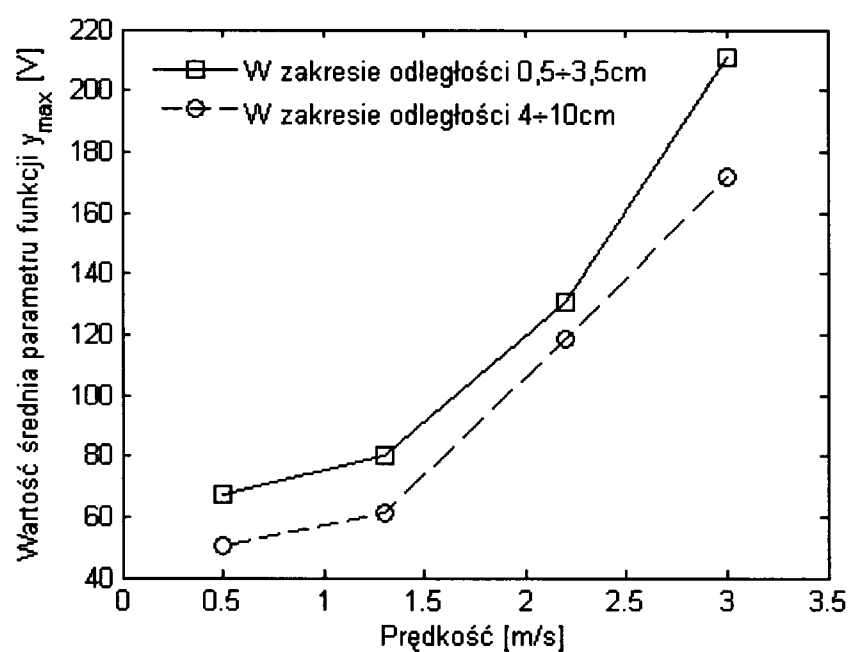
Rys. 16. Wartość średnia parametru c w zależności od prędkości napływu powietrza w tunelu (przedziały odległości od modelu podane na rysunku).

Fig.16. The mean value of the c parameter as the function of air inflow speed in the wind tunnel. Solid line - mean value of the c parameter was calculated when the range of distance between object model and a laser beam ranged from 0.5 cm to 3.5 cm. Dashed line - mean value of the c parameter was calculated when the range of distance between object model and a laser beam ranged from 4cm to 10cm.



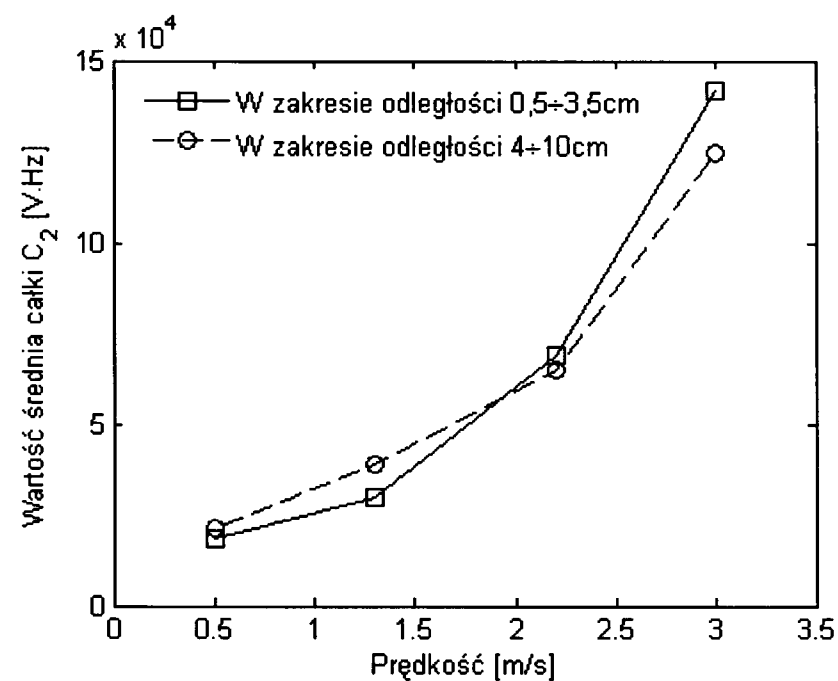
Rys.18. Wartość średnia całki C_1 w zależności od prędkości napływu powietrza w tunelu (przedziały odległości od modelu podane na rysunku).

Fig.18. The mean value of the C_1 parameter as the function of air inflow speed in the wind tunnel. Solid line - mean value of the C_1 parameter was calculated when the range of distance between object model and a laser beam ranged from 0.5 cm to 3.5 cm. Dashed line - mean value of the C_1 parameter was calculated when the range of distance between object model and a laser beam ranged from 4cm to 10cm.



Rys. 17. Wartość średnia parametru y_{max} w zależności od prędkości napływu powietrza w tunelu (przedziały odległości od modelu podane na rysunku).

Fig.17. The mean value of the y_{max} parameter as the function of air inflow speed in the wind tunnel. Solid line - mean value of the y_{max} parameter was calculated when the range of distance between object model and a laser beam ranged from 0.5 cm to 3.5 cm. Dashed line - mean value of the y_{max} parameter was calculated when the range of distance between object model and a laser beam ranged from 4cm to 10cm.



Rys.19. Wartość całki C_2 z eksperymentu w zależności od prędkości napływu powietrza w tunelu (przedziały odległości od modelu podane na rysunku).

Fig.19. The mean value of the C_2 parameter as the function of air inflow speed in the wind tunnel. Solid line - mean value of the C_2 parameter was calculated when the range of distance between object model and a laser beam ranged from 0.5 cm to 3.5 cm. Dashed line - mean value of the C_2 parameter was calculated when the range of distance between object model and a laser beam ranged from 4cm to 10cm.

Tabela 1. Średnie wartości badanych parametrów w przypadku braku modelu w tunelu.

Table 1. The mean values of the investigated parameters in the absence of a object model in the wind tunnel.

Prędkość napływu powietrza	Średnie wartości parametrów			
	c	y _{max}	C ₁	C ₂
m/s	[Hz]	[V]	[V·Hz]	[V·Hz]
0,5	1,88E+02	7,03E+01	3,48E+04	3,68E+04
1,3	1,47E+02	7,73E+01	3,17E+04	3,20E+04
2,2	1,87E+02	1,26E+02	6,22E+04	6,56E+04
3,0	2,72E+02	1,88E+02	1,20E+05	1,32E+05

Tabela 2. Średnie wartości badanych parametrów w obecności modelu w tunelu.

Table 2. The mean values of the investigated parameters in the presence of the object model in the wind tunnel.

Prędkość napływu powietrza	Średnie wartości parametrów			
	c	y _{max}	C ₁	C ₂
m/s	[Hz]	[V]	[V·Hz]	[V·Hz]
0,5	1,38E+02	6,75E+01	2,63E+04	1,83E+04
	1,12E+02	5,07E+01	1,62E+04	2,14E+04
1,3	1,65E+02	7,98E+01	3,46E+04	3,00E+04
	2,29E+02	6,10E+01	3,46E+04	3,91E+04
2,2	1,99E+02	1,31E+02	6,77E+04	6,93E+04
	1,99E+02	1,18E+02	5,94E+04	6,53E+04
3,0	2,68E+02	2,11E+02	1,28E+05	1,42E+05
	2,69E+02	1,72E+02	1,07E+05	1,25E+05

4. DYSKUSJA I WNIOSKI

Porównując wartości parametrów funkcji y (równanie (3) oraz odpowiednie rysunki i tabele) dla przypadków bez modelu i z modelem widoczna jest największa różnica w wartościach tego parametru, w badanym zakresie prędkości dla odległości 0-3,5cm od modelu, a więc w obszarze, gdzie występuje wir podkowiasty oraz podstawowe punkty separacji (pierwotny i wtórny). Ponadto, w tym obszarze występuje także ujemny gradient ciśnienia i zmiana kierunku przepływu powietrza nad powierzchnią (nad podłożem nad którym umieszczony jest obiekt) [3].

W przedziale odległości od 4cm do 10cm obserwuje się znacznie mniejsze różnice w wartościach parametrów dla przypadków przepływu z obiektem w tunelu i bez obiektu (górny wiersz liczb w Tabeli 2 dotyczy odległości 0,5cm do

3,5 cm od modelu, natomiast dolny wiersz odległości od 4cm do 10cm).

Przeprowadzone badania (podobnie jak w pracy [2]), mogą stanowić podstawę zastosowania optycznej metody laserowej, wykorzystując do tego celu rejestrację fluktuacji natężenia światła laserowego, powstających podczas jego propagacji w strefie napływającego powietrza na prostopadłościenną bryłę. Na podstawie tych pomiarów wyznaczono parametry FFT (obwiedni funkcji y). Z wyników badań tych parametrów widać, że zawarta jest w nich informacja o charakterze strumienia przepływającego powietrza wokół modelu.

Ponieważ zastosowana w tej metodzie laserowa wiązka światła nie zaburza przepływu strumienia powietrza, w przeciwieństwie do czujników stosowanych w metodach konwencjonalnych, to dlatego też, ta metoda może być szczególnie przydatna w przypadku gdy badania propagacji światła prowadzone są przed obiektem na który napływa strumień powietrza.

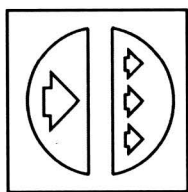
Metoda ta ma także zalety w stosunku do metod wizualizacji, ponieważ można przy jej pomocy wyznaczyć wartości liczbowe parametrów występujących w opisie tego zjawiska za pomocą FFT (parametrów propagacji laserowej wiązki w powietrzu w którym występują fluktuacje gęstości, temperatury, ciśnienia – czyli współczynnika załamania światła).

EXAMINATION OF THE AIR FLUCTUATION SPECTRUM FLOWING AROUND ARCHITECTURAL OBJECT USING FOURIER TRANSFORM

Summary: In this paper, the Fourier transform parameters were assessed for optical signal which was obtained in consequence of narrow laser beam propagation through the air inflow zone in front of non-streamlined body. The investigations were carried out in the wind tunnel. The cross section of the wind tunnel was a square and the length of the square side was much bigger than the size of architectural object (model of building object). Experimental outcomes were analyzed taking into account both parameters of Fourier transform and parameters of the formula which was proposed in this paper.

Literatura

- [1]. Encyklopedia Fizyki, Tom 1, PWN, Warszawa 1972.
- [2]. Klemm K., Pieszyński K., Rożniakowski K., "Wizualizacja turbulentnego przepływu powietrza w strefie obiektu architektonicznego za pomocą parametru Cn", Fizyka budowli w teorii i praktyce, Tom V, Nr 2, Łódź 2010, 27-34.
- [3]. Hosker R.P., Flow and diffusion near obstacles, in D.Randerson (ed), Atmospheric Science and Power Production, U.S.Department of Energy, Chap. 7, 1984



WPLYW WIATRU NA ODPROWADZENIE SPALIN GAZU Z MIESZKAŃ – STUDIUM PEWNEGO PRZYPADKU

Grzegorz KRAJEWSKI*, Jerzy Antoni ŻURAŃSKI**

* Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Badań Ogniwych
ul. Ksawerów 21, 02-656 Warszawa, e-mail g.krajewski@itb.pl

** Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Konstrukcji i Elementów Budowlanych
ul. Filtrowa 1, 00-611 Warszawa, e-mail:j.zuranski@itb.pl

Streszczenie: Na przykładzie obliczeń numerycznych odprowadzenia spalin gazu z mieszkania w warunkach silnego wiatru przedstawiono wpływ szczególnego ukształtowania dachu na działanie wentylacji naturalnej. Przedstawiono także wpływ zmian w układzie wentylacji mieszkań na odprowadzenie spalin gazu.

Słowa kluczowe: Wiatr, odprowadzenie spalin gazu, wentylacja naturalna, zatrucie, obliczenia numeryczne, CFD.

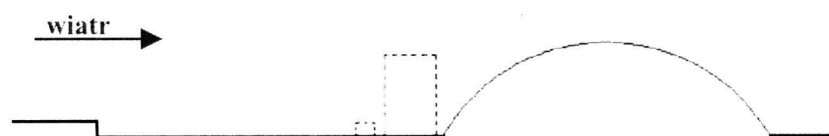
1. WPROWADZENIE

W jednym z miast o starej zabudowie, wśród budynków o wysokości 6 pięter, wybudowano „plombę” o dachu łukowym, przewyższającym o kilka metrów dachy sąsiednie. Zmieniło to charakterystykę aerodynamiczną sąsiedniego budynku w otoczeniu wylotów z przewodów wentylacyjnych i spalinowych (kominów). Niektóre z nich podwyższono, innych nie podwyższono. Po kilku latach, jesienią podczas wiatru, uległ śmiertelnemu zatruciu tlenkiem węgla jeden z mieszkańców tego budynku. W celu oceny skuteczności funkcjonowania istniejącej instalacji odprowadzającej spaliny przeprowadzono szereg symulacji komputerowych opartych na metodzie numerycznej mechaniki płynów (CFD).

Obliczenia numeryczne zostały przeprowadzone przy użyciu oprogramowania Fluent 6.3.26 produkcji firmy ANSYS. W początkowej fazie analiz przeprowadzono szereg symulacji CFD dla wariantu 2D. Szczegółowej analizie zostały poddane trzy warianty:

- 1) z okresu przed wybudowaniem plomby między budynkami – brak dachu łukowego, niskie kominy
- 2) w momencie wypadku (rys.1) – dach łukowy, podwyższona część kominów,

- 3) stan zalecany (rys. 2) – dach łukowy, podwyższone wszystkie kominy.



Rys. 1. Stan w momencie wypadku.
Fig.1. Situation in the moment of accident.

W wariantcie 2) wykonano obliczenia dla dwóch sytuacji, z otworem bocznym w kanale spalinowym i bez tego otworu. Po wstępnej interpretacji uzyskanych wyników zbudowano trójwymiarowe modele (3D) analizowanej przestrzeni w celu jak najdokładniejszego odwzorowania panujących warunków.

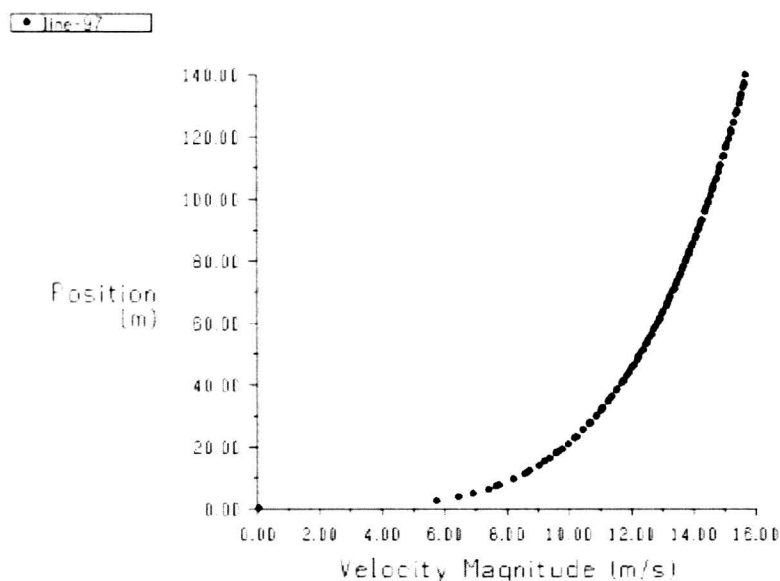


Rys. 2. Stan zalecany.
Fig. 2. Recommended solution.

2. DANE WEJŚCIOWE

Warunki początkowe, prędkość i kierunek wiatru w czasie wypadku, przyjęto na podstawie pomiarów z najbliższej, lotniskowej stacji meteorologicznej. Średnia 10 - minutowa prędkość wiatru na wysokości 13 m nad terenem z kierunku zachodniego wynosiła 11 m/s, w porywach do 19 m/s, a temperatura powietrza 9 °C. Przeliczenia prędkości wiatru na warunki miejskie dokonano przyjmując rodzaj terenu B według [1] po nawietrznej stronie (zachodniej) anemometru lotniskowego i stosując profil potęgowy o wykładniku $\alpha = 0,19$ oraz wysokość wiatru gradientowego 400 m, natomiast dla terenu miejskiego C przyjmując $\alpha = 0,24$ oraz wysokość wiatru gradientowego 500 m. Prędkość wiatru w rejonie rozpatrywanego budynku obliczano według wzoru

$$U(z) = 4,8 \cdot z^{0,24} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (1).$$



Rys. 3. Profil wiatru zastosowany w obliczeniach numerycznych.
Fig. 3. Wind profile used in numerical calculations.

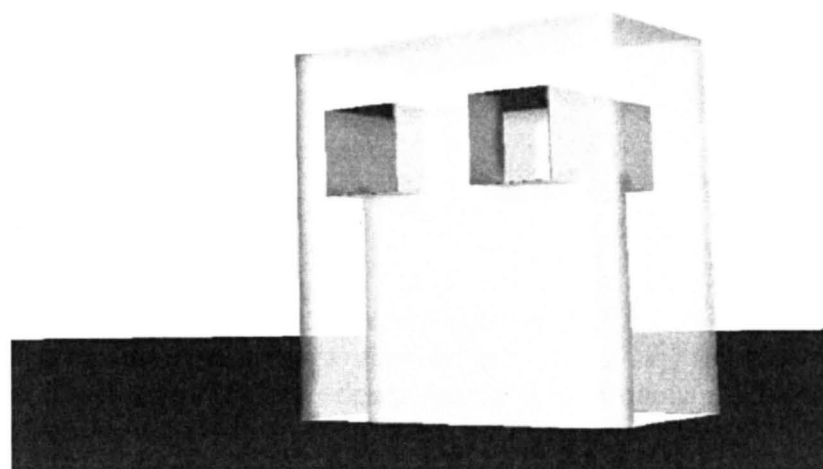
Obliczenia wykonano dla średniej, stałej w czasie prędkości wiatru, nie uwzględniano porywów wiatru. Prędkość wiatru, określoną za pomocą wzoru (1), odliczano od poziomu terenu w odległości ok. 130 m od rozpatrywanego wylotu z komina. Odwzorowano ciąg budynków, od strony nawietrznej w stosunku do tego, w którym zdarzył się wypadek, oraz budynki w postaci dwuwymiarowej przeszkody zamykające od strony nawietrznej kanion ulicy, prostopadły do linii rozpatrywanych budynków.

Trójwymiarowy model analizowanej przestrzeni zbudowano na podstawie planów architektonicznych budynku, danych kominiarskich oraz zeznań świadków zdarzenia.

Na podstawie informacji uzyskanych z akt prokuratury założono, iż wszystkie okna w pokojach mieszkania poddanej szczegółowej analizie były szczelnie zamknięte, jedynie okno w kuchni było uchylone. W symulacji uwzględ-

niono także nieszczelności drzwi wejściowych do klatki schodowej, mieszkań oraz nieszczelności okien na strychu. Szczegółowej analizie poddano obszar wylotu z komina prowadzącego z łazienki, do którego podłączony był przepływowy podgrzewacz gazowy oraz obszar znajdujący się w sąsiedztwie czopucha podgrzewacza, na którym to zamontowany był wentylator.

Komin przewodu spalinowego, będącego jednocześnie przewodem wentylacyjnym, gdyż innego w łazience nie było, wystawał ok. 0,60 m ponad powierzchnię dachu (rys. 2), zaś środek otworów wylotowych, wychodzących na obie strony znajdował się na wysokości ok. 0,40 m.



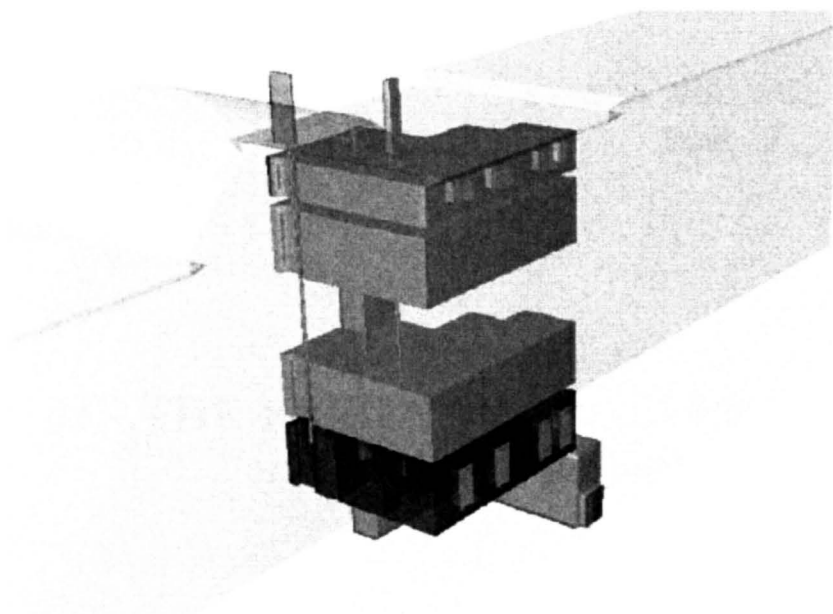
Rys. 4. Wylot komina w chwili wypadku.
Fig. 4. Outlet of chimney in the moment of accident..

Kierunek wiatru był równoległy do obu ścian bocznych komina, w których były otwory wylotowe.

W rozpatrywanym mieszkaniu był przewód wentylacyjny odprowadzający powietrze z kuchni oraz przewód dymowy kominka znajdującego się w pokoju. Wyloty tych przewodów zostały podwyższone po wybudowaniu dachu łukowego do wysokości odpowiadającej wymaganiom normy [2]. Nie podwyższono natomiast wylotu przewodu spalinowego łazienkowego (rys. 4).

3. OBLICZENIA NUMERYCZNE

W celu przeprowadzenia obliczeń numerycznych został przygotowany trójwymiarowy model (3D) budynku wraz z mieszkaniem, w którym doszło do zatrucia, oraz lokalami łączącymi się z analizowanym pomieszczeniem przewodami wentylacyjnymi (rys. 5). Analizowany obszar został podzielony za pomocą niestrukturalnej tetrahedralnej siatki numerycznej na skończoną liczbę objętości kontrolnych. Całkowita liczba elementów wynosiła ok. 7 400 000 o wymiarach od 2,5 cm w okolicy szczelin oraz w ciągach kominowych, do 100 cm na obrzeżach domeny.



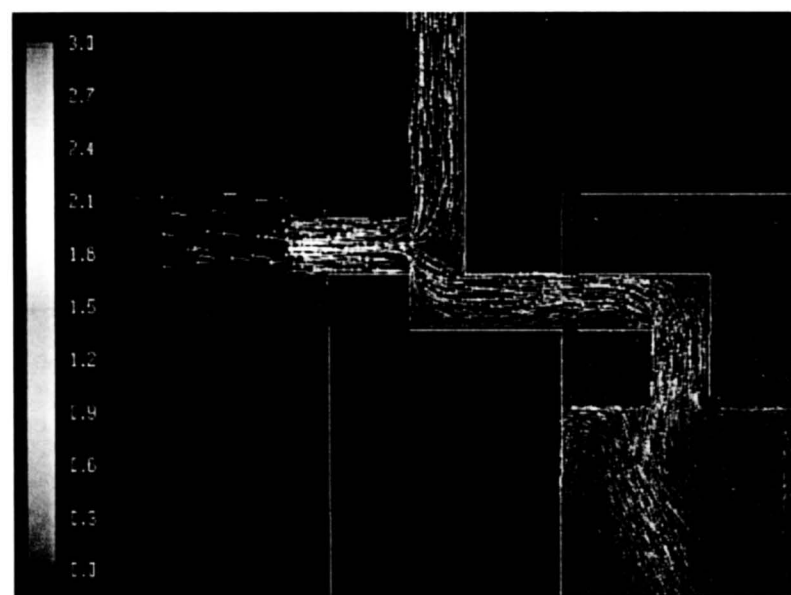
Rys. 5. Trójwymiarowy fragment modelu analizowanej przestrzeni.

Fig. 5. Three-dimensional model of the area under consideration.

Obliczenia przeprowadzono przy wykorzystaniu modelu turbulencji Realizable k- ϵ .

W celu odwzorowania panujących warunków do obliczeń numerycznych zaimplementowano źródło ciepła imitujące palnik w podgrzewaczu gazowym znajdującym się w łazience, tak by temperatura spalin wynosiła ok. 180 °C.

Po wykonaniu obliczeń, z krokiem czasowym 0,5 s, stwierdzono, iż w przypadku takiej konstrukcji komina jak i warunków zewnętrznych panujących w czasie wypadku, w początkowej fazie działania podgrzewacza gazowego spaliny nie były odprowadzane na zewnątrz, lecz wyrzucane do przestrzeni łazienki przez otwór, w którym był nieczynny wentylator, zainstalowany na tym samym przewodzie, (rys. 6).

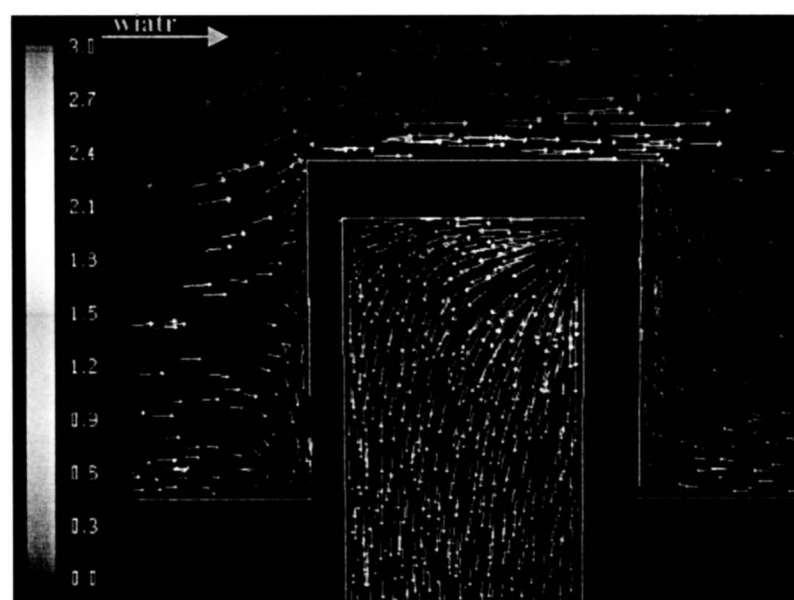


Rys. 6. Wektory prędkości w przekroju podłużnym przez komin w okolicach czopucha przepływowego podgrzewacza gazowego
Fig. 6. Vectors of flow speed in the longitudinal cross section of the chimney close to the entrance of the combustion product from gas heater.

Odpływ spalin przez komin był blokowany przez zimne powietrze napływające do komina (rys. 7). Dopiero po kilkunastu sekundach od włączenia podgrzewacza gazowego ustalał się prawidłowy kierunek przepływu spalin.

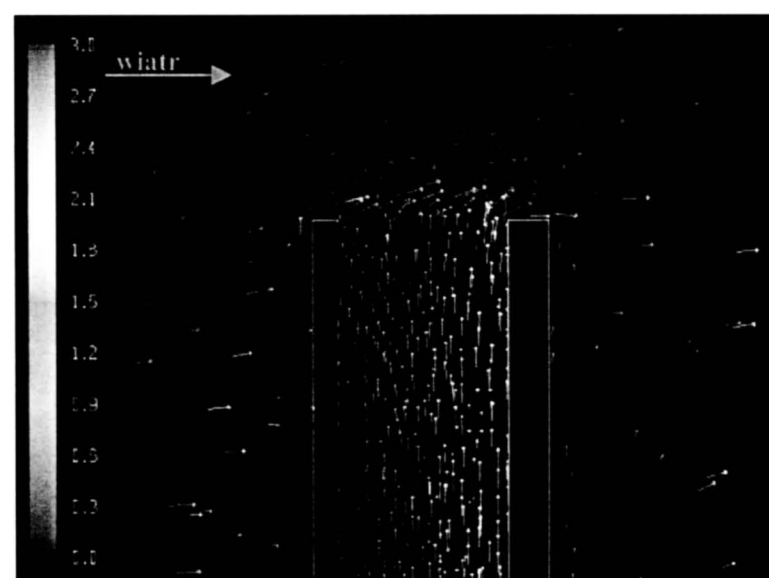
Obliczenia wykonane w wariantcie zaślepiętego otworu bocznego po wentylatorze wykazały podobny efekt blokowania przepływu przez napływające zimne powietrze i wypływu spalin do łazienki, lecz tym razem poprzez gazowy grzejnik wody przepływowej. W tym przypadku czas potrzebny do ukształtowania się prawidłowego odpływu spalin był krótszy.

Problem napływu zimnego powietrza zewnętrznego do komina, mógłby zostać wyeliminowany przez podwyższenia komina oraz wykonania otworu wylotowego w górnej jego części (rys. 8).



Rys. 7. Wektory prędkości w przekroju podłużnym komina w okolicach wylotu.

Fig. 7 Vectors of flow speed in the longitudinal cross section of the chimney at its former outlet.



Rys. 8. Wektory prędkości w przekroju podłużnym komina w okolicach wylotu-prawidłowa konstrukcja.

Fig. 8. Vectors of flow speed in the longitudinal cross section of the chimney at its correct outlet.

4. UWAGI KOŃCOWE

Na podstawie przeprowadzonych analiz i obliczeń numerycznych przedstawiono jak duży wpływ na prawidłowe funkcjonowanie instalacji wentylacji ma prawidłowa wysokość komina jak i sposób umieszczenia otworów wylotowych. Wykazano także negatywny wpływ dowolnych zmian dokonanych przez lokatorów na działanie wentylacji naturalnej mieszkań. Niedopatrzenia takie mogą prowadzić do licznych wypadków, często tragicznych w skutkach.

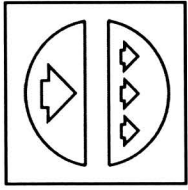
Dzięki obliczeniom wykonanym za pomocą metod numerycznej mechaniki płynów było możliwe wykrycie nieprawidłowego przepływu spalin w początkowej fazie procesu spalania gazu w przepływowym podgrzewaczu wody.

EFFECT OF WIND ON EVACUATION OF BURNED GAS FROM HOME GAS APPLIANCES – A CASE STUDY

Summary: The aim of the article is an analysis of natural ventilation system and fumes exhaust from the flat, during the strong wind weather and influence of the roof shape on it. There is shown an influence of some changes in ventilation system inside building, on the way how it works.

Literatura

- [1] PN-77/B-02011 Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenie wiatrem
- [2] PN-89/B-10425 Przewody dymowe, spalinowe i wentylacyjne murowane z cegły. Wymagania techniczne i badania przy odbiorze
- [3] ANSYS Fluent 6.3.26 User's Guide



ON THE FIBRES SHAPE EFFECT ON THE TEMPERATURE FIELD IN THE TWO-PHASE HOLLOW CYLINDER

Piotr OSTROWSKI*

*Department of Structural Mechanics, Technical University in Łódź
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: postrow@p.lodz.pl

Summary: The unidirectional stationary heat conduction in two-phase hollow cylinder is considered. The conductor is made of two-phase stratified composites and has, in special cases, as-smooth gradation of effective properties in the radial direction. Therefore, we deal here with a special case of functionally graded materials, FGM (cf. [6]). The formulation of mathematical model of the conductor is based on the tolerance averaging approach (TAA), cf. [8]. Application to the stationary heat conduction and a comparison of tolerance model with asymptotic model (cf. [7]) will be shown. The effect of fibres shape and width on the temperature field will be examined.

Keywords: Heat conduction, FGM, composite.

1. BASIC CONCEPTS

1.1. Subject of Contribution

The main aim of this paper is to consider the heat conduction in two-phase hollow cylinder. This consideration concerns only with the stationary heat transfer problem in two-phase composite with a deterministic microstructure, which is, for a fixed radius ρ , periodic along the angular axis and has smooth and functional (uniform for periodic structure) effective properties in the radial direction (Fig.1).

Therefore, we deal here with a special case of functionally graded materials, FGM, cf. [6].

The analysis of the heat transfer in a hollow cylinder made from functionally graded materials we can find in [2, 5], where material properties are expressed as power of exponential functions of the radial coordinate. In paper [1] we can find application of higher-order theory for thermal analysis in functionally graded materials.

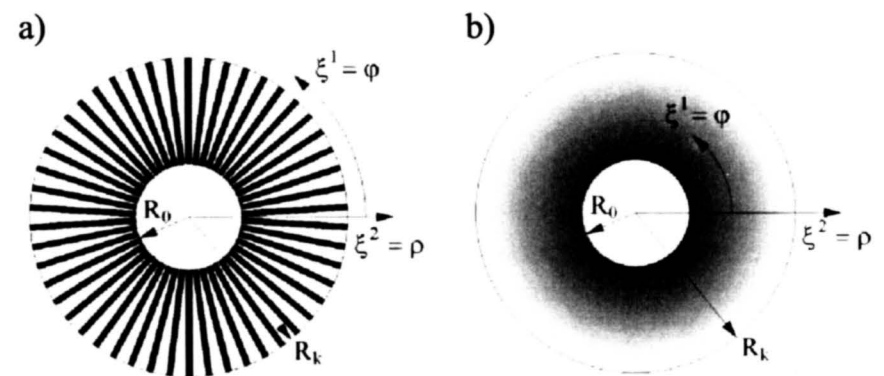


Fig. 1. Structure of the two-phase functionally graded composite in a) micro- and b) macro-scale.

1.2. Model Equations

The physical phenomenon of the non-stationary heat transfer is described by well known Fourier equation

$$c\dot{\Theta} - \nabla \cdot (\mathbf{k} \cdot \nabla \Theta) = Q_v, \quad (1)$$

which contains (in this case) highly oscillating and discontinuous coefficients $\mathbf{k}$ - heat conduction tensor, and c - specific heat, Q_v - internal thermal sources.

The modelling problem is how to describe microheterogeneous conductor by certain averaged equations. The formulation of the macroscopic mathematical model for the analysis of heat transfer in the conductor under consideration will be based on the tolerance averaging technique, cf. [7-8]. The general description of this technique and application to analysis of longitudinally graded stratified media can be found in [4, 7].

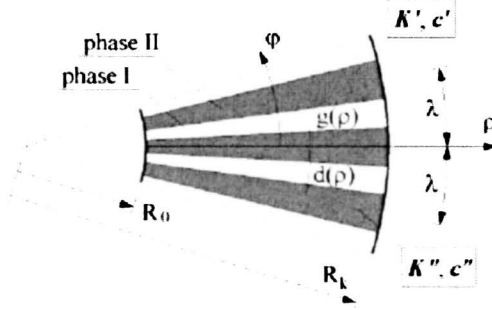


Fig. 2. Deterministic microstructure of composite.

The object of our considerations is a hollow conductor with microstructure given on Fig.2. This microstructure is determined by the unit cell Δ with the diameter of $\lambda = 2\pi/N$, where N is a number of cells in considered composite. The fibres width g is in general given by

$$g(\rho) = \eta \lambda R_0 \frac{R_k - \rho}{R_k - R_0} + \omega \lambda R_k \frac{\rho - R_0}{R_k - R_0}, \quad (2)$$

for $\eta, \omega \in (0,1)$, which implies functional macroscopic material properties in ρ -direction. Volume fractions of homogeneous layers are denoted by $\nu'(\rho) = d(\rho)/\lambda\rho$ and $\nu''(\rho) = g(\rho)/\lambda\rho$, where $d(\rho) = \lambda\rho - g(\rho)$. Dimensionless function $\nu = \sqrt{\nu'\nu''}$ is referred to as the distribution of heterogeneity.

The one of the fundamental assumptions in tolerance averaging approach concerns with the temperature field decomposition

$$\Theta(\varphi, \rho) = \theta(\varphi, \rho) + h(\varphi, \rho) \cdot \psi(\varphi, \rho), \quad (3)$$

where $\varphi \in [0, 2\pi)$, $\rho \in [R_0, R_k]$. Functions of averaged temperature θ and oscillation amplitude temperature ψ are assumed to be slowly varying, i.e. $\theta(\cdot, \rho), \psi(\cdot, \rho) \in SV_\delta^1(\Omega, \Delta)$. The exact definition of the *slowly varying* and *tolerance periodic* function can be found in [11]. The expected form of the temperature oscillations, caused by discontinuity of the coefficients in (1), is assured by the "saw-type" *locally periodic* function, which would be called the fluctuation shape function h .

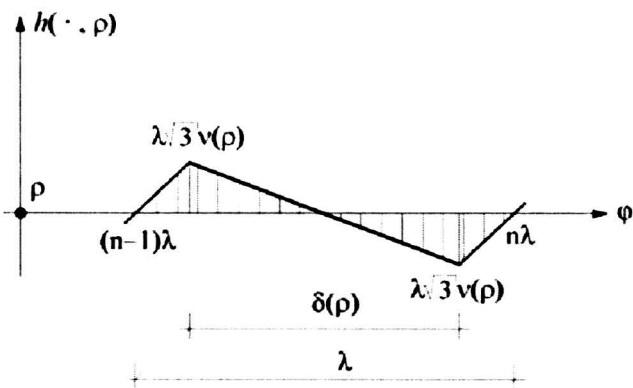


Fig. 3. Deterministic microstructure of composite.

The second concept of the modelling technique is the averaging operation

$$\langle f \rangle(\varphi, \rho) = \frac{1}{|\Delta|} \int_{\varphi - \lambda/2}^{\varphi + \lambda/2} f(z, \rho) dz, \quad (4)$$

where $|\Delta| = \lambda$. On the grounds of this definition we can formulate the second modelling assumption, the tolerance averaging approximation. In the course of modelling it is assumed that terms $O(\delta)$ are negligibly small, where δ is a certain tolerance parameter, cf. [7]. For the arbitrary tolerance periodic function $f \in TP_\delta^1(\Omega, \Delta)$, slowly varying function $F \in SV_\delta^1(\Omega, \Delta)$ and fluctuation shape function $h \in FS_\delta^1(\Omega, \Delta)$ we have

$$\begin{cases} \langle fF \rangle = \langle f \rangle F + O(\delta) \\ \langle f \nabla(hF) \rangle = \langle f \partial h \rangle F + \langle fh \rangle \bar{\nabla} F + O(\delta) \end{cases} \quad (5)$$

tolerance model. Bearing in mind the mean value definition (4) and all model assumptions, we conclude to the system of averaged equations (cf. [7])

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\langle k \rangle \nabla \theta + \langle k \partial h \rangle \psi) = 0 \\ \bar{\nabla} \cdot (\langle kh^2 \rangle \bar{\nabla} \psi) - \langle k \partial h \rangle \nabla \theta - \langle k \partial h^2 \rangle \psi = 0 \end{cases} \quad (6)$$

describing two dimensional heat conduction in two-phase hollow cylinder, where internal thermal sources Q_v and time derivatives are neglected. The coefficients

$$\begin{cases} \langle k \rangle = k' \nu' + k'' \nu'' \\ \langle kh^2 \rangle = \lambda^2 \nu^2 \langle k \rangle \end{cases}, \quad \begin{cases} \langle k \partial h \rangle = 2\nu \sqrt{3} (k' - k'') \\ \langle k \partial h^2 \rangle = 12(k' \nu'' + k'' \nu') \end{cases} \quad (7)$$

are continues and functional.

If we come with $\lambda \rightarrow 0$, coefficients in (7), which are order of $O(\lambda^2)$, can be omitted in (6), what leads to the equations

$$\nabla \cdot \left[\left(\langle k \rangle - \frac{\langle k \partial h \rangle^2}{\langle k \partial h^2 \rangle} \right) \nabla \theta \right] = 0 \quad \text{and} \quad \psi = - \frac{\langle k \partial h \rangle}{\langle k \partial h^2 \rangle} \nabla \theta. \quad (8)$$

This model is known as asymptotic model, cf. [7]. The gradient operators in the above equations have the form

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial \varphi}, \frac{\partial}{\partial \rho} \right), \quad \partial = \left(\frac{\partial}{\partial \varphi}, 0 \right), \quad \bar{\nabla} = \left(0, \frac{\partial}{\partial \rho} \right). \quad (9)$$

The obtained averaged differential equations (6) have smooth functional coefficients in contrast to coefficients in equation (1). To obtain the results, numerical methods had

to be used. This model takes into account the effect of microstructure size on the overall heat transfer behaviour.

2. EXAMPLES OF APPLICATION

The main aim of this chapter is to display an effect of parameters η and ω in (2) on the temperature field. These considerations concern the unidirectional heat transfer for a two-phase conductor with deterministic microstructure (Fig.2) of $N = 60$ cells for geometric values of $R_0 = 1 [m]$ and $R_k = 3 [m]$. In general we shall denote full anisotropic tensor of conductivity for each of components

$$\mathbf{k} = k \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0.25 \\ 0.25 & 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

where fixed values of conductivity are listed below.

Table 1. Material properties.

	phase I	phase II
$k [Wm^{-1}K^{-1}]$	58	0.045

Because of the decomposition, two unknown functions, θ and ψ , must be defined on the boundary. For a φ -constant function of temperature on the boundaries $\Theta_0(R_0) = 100 [^{\circ}C]$, $\Theta_k(R_k) = 0 [^{\circ}C]$, we calculate

$$\begin{cases} \theta(R_0) = \langle \Theta_0 \rangle = \Theta_0 \\ \psi(R_0) = \frac{\langle \Theta_0 h \rangle}{\langle h^2 \rangle} = 0 \end{cases} \text{ and } \begin{cases} \theta(R_k) = \langle \Theta_k \rangle = \Theta_k \\ \psi(R_k) = \frac{\langle \Theta_k h \rangle}{\langle h^2 \rangle} = 0 \end{cases} \cdot (10)$$

All above conditions and formulations will be used for all following examples in subsequent part of this paper.

2.1. Effect of the fibres shape

Let us consider two-phase hollow cylinder (Fig.1), where fibres width is expressed by (2) for $\eta = 0.5$. Three different values of parameter ω are considered:

- $\omega = 1/6$ means ρ -constant fibres width,
- $\omega = 5/6$ means ρ -constant matrices width,
- $\omega = 1/2$ means periodic structure.

The obtained results are quite distinct as well for averaged temperature as for amplitude oscillation temperature.

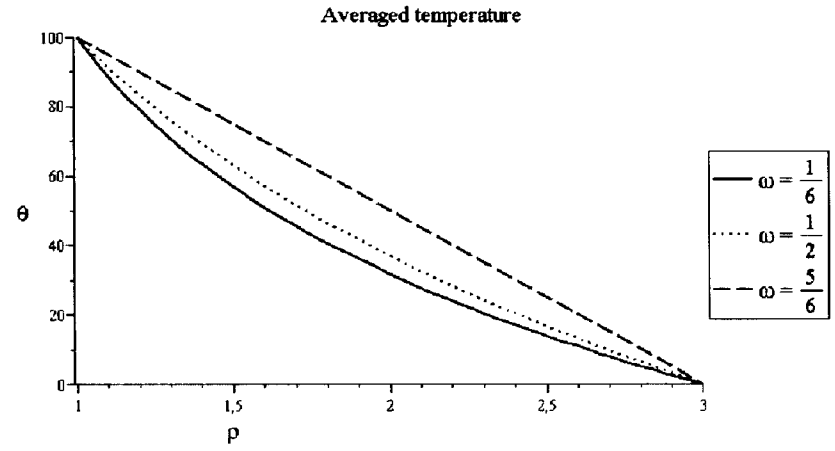


Fig. 4. Fibres shape effect on averaged temperature.

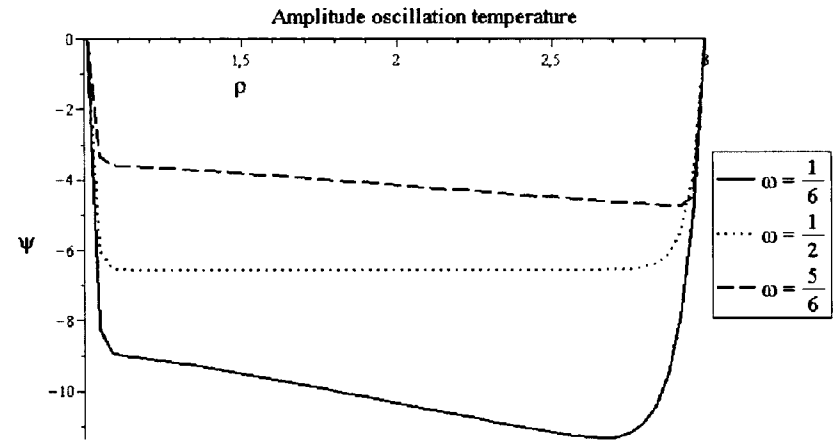


Fig. 5. Fibres shape effect on amplitude oscillation temperature.

The more matrices volume fraction on the outer boundary (matrice is far more better conductor then fibre), the more decreasing of temperature near the inner boundary, but the larger oscillations formed, though.

2.2. Effect of the fibres width

The following example reveals similar effect as in 3.1, but this time fibres width is ρ -constant assumed, i.e. for $\omega = \eta / 3$. Various values of parameter η are considered and theirs effect on averaged temperature:

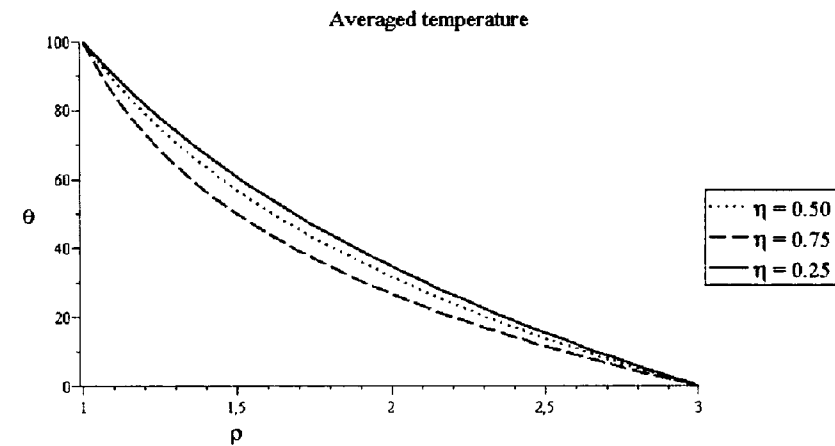


Fig. 6. Fibres width effect on averaged temperature.

and amplitude oscillation temperature:

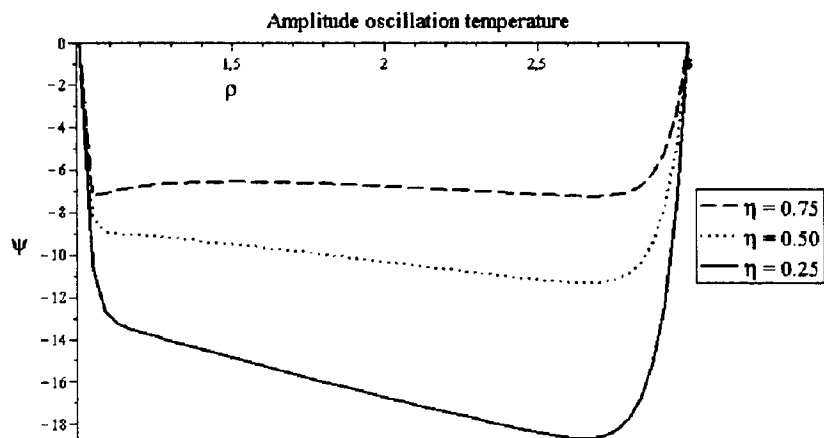


Fig. 7. Fibres shape effect on amplitude oscillation temperature.

The results are quite opposite in comparison with those from 3.1. The wider fibres, the faster decreasing of temperature near the inner boundary, and the smaller oscillations.

2.3. Benchmark results

The last example deals with comparison of tolerance model with asymptotic model. This case was evaluated for $\eta = 0.5$ and $\omega = 1/6$, i.e. for constant fibres width along ρ -axis.

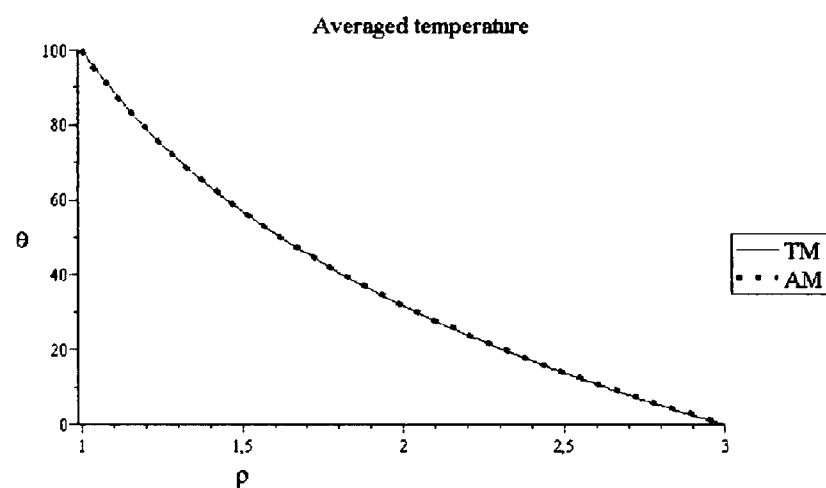


Fig. 8. Comparison of tolerance model (TM) with asymptotic model (AM) for averaged temperature.

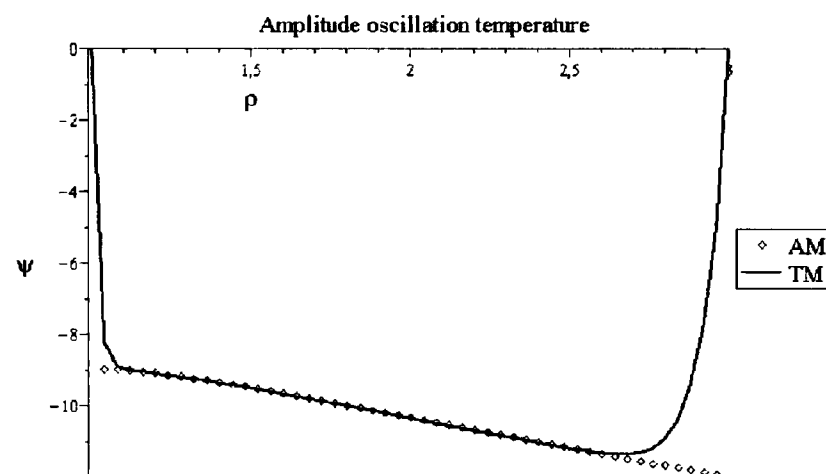


Fig. 9. Comparison of tolerance model (TM) with asymptotic model (AM) for amplitude oscillation temperature.

The diagram on Fig.9 reveals that boundary values of ψ -function for asymptotic model apparently do not overlap with boundary conditions for tolerance model. It might be result of relatively small number of cells N in considered composite, but it needs to be still investigated.

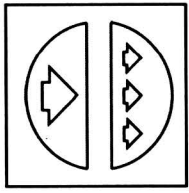
3. SUMMARY

The tolerance averaging approximation leads to the mathematical model of composites conductor with functionally graded material properties. The obtained model equations have continuous coefficients in opposition to a discrete model, where they are strongly oscillating. Since the proposed model equations have smooth functional coefficients then in most cases solutions to specific problem, for heat conductor under consideration, have to be obtained using well known numerical methods. The tolerance model takes into account an effect of the microstructure size on the temperature field. Moreover, by changing volume fractions on both of boundaries, we can obtain desirable temperature field inside composite.

Acknowledgment. This contribution is supported by the Ministry of Science and Higher Education under grant No. NN506398535.

References

- [1] Aboudi J., Pindera M.J., Arnold S.M., 1999, *Higher-order theory for functionally graded materials*, Composites: Part B, 30, 777-832.
- [2] Hosseini S.M., Akhlaghi M., Shakeri M., 2008, *Heat conduction and heat wave propagation in functionally graded thick hollow cylinder base on coupled thermoelasticity without energy dissipation*, Heat Mass Transfer, 44, 1477-1484.
- [3] Jikov V.V., Kozlov C.M., Olejnik O.A., 1994, *Homogenization of Differential Operators and Integral Functionals*, Springer, Heidelberg.
- [4] Michalak B., Woźniak Cz., Woźniak M., 2007, *Modeling and analysis of certain functionally graded heat conductor*, Arch. Appl. Mech., 77, 823-834.
- [5] Ootao Y., Tanigawa Y., 2006, *Transient thermoelastic Analysis for a Functionally Graded Hollow Cylinder*, J. Therm. Stresses, 29, 1031-1046.
- [6] Suresh S., Mortensen A., 1998, *Fundamentals of functionally graded materials*, Cambridge, The University Press.
- [7] Woźniak Cz., Michalak B., Jędrzyński J. [ed], 2008, *Thermomechanics of micro-heterogeneous solids and structures. Tolerance averaging approach*, Wyd. Pol. Łódzkiej, Łódź.
- [8] Woźniak Cz., Wierzbicki E., 2000, *Averaging techniques in thermomechanics of composite solids. Tolerance averaging versus homogenization*, Wyd. Pol. Częst., Częstochowa



HEAT CONDUCTION IN TG LAMINATE TOLERANCE MODELLING AND THE FINITE ELEMENT METHOD

Alina RADZIKOWSKA*, Piotr OSTROWSKI**

* Department of Structural Mechanics, Technical University of Łódź,
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: alina.radzikowska@p.lodz.pl

** Department of Structural Mechanics, Technical University of Łódź,
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: postrow@p.lodz.pl

Streszczenie: In this paper a problem of heat conduction in the laminate is investigated. The laminate is made of two conductors, non-periodically distributed as micro laminas along one direction. A macrostructure of such laminate is assumed to be functionally graded along this direction. In order to analyse the heat conduction, two modelling methods are applied: the tolerance averaging technique and the finite element method. The first approach is based on the book edited by Cz. Woźniak, Michalak and Jędrysiak [6], the second one is used in the numerical system ABAQUS. The results of applying both methods are compared for two different cases of the distribution of the conductors.

Słowa kluczowe: heat conduction, functionally graded laminate, tolerance modelling, the finite element method.

1. PRELIMINARIES

The main object under consideration is the laminate made of two conductors. These conductors are distributed non-periodically along the direction normal to the laminas. Every lamina has the thickness λ (λ is constant). It consists of two sub-laminas (the thickness of each sub-lamina changes in every lamina). From the macroscopic point of view averaged (macroscopic) properties of this laminate are continuously varied along one direction, cf. Fig. 1a. However, the microstructure of the laminate can be defined by some distribution functions, which determine of the thicknesses of sub-laminas, cf. Fig. 1b.

The laminates of this kind can be treated as made of the functionally graded materials (FGM), cf. Suresh and Mortensen [5], and can be called the transversally graded laminates (TG laminates).

There are many modelling techniques we can use to research thermo-mechanical problems of the functionally

graded materials. In this paper we focus on the tolerance averaging technique (the tolerance modelling).

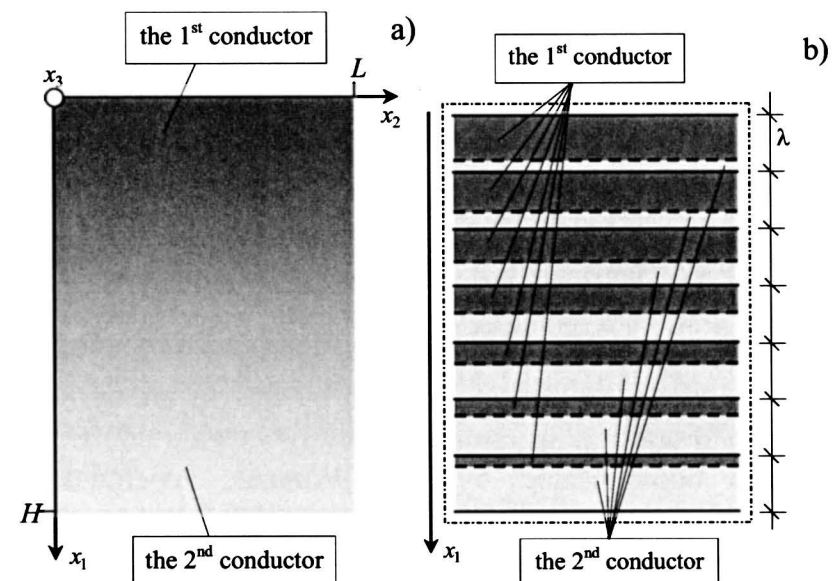


Fig. 1. A cross section of a transversally graded laminate: a) the macroscopic point of view, b) the microscopic point of view.

Using this technique to the modelling FG-type materials is presented in the books edited by Cz. Woźniak, Michalak and Jędrysiak [6] and by Cz. Woźniak et al. [7].

2. MODELLING FOUNDATIONS

Let subscripts $i, j, \dots$, related to the coordinate system Ox_1x_2 , run over 1, 2. Introduce denotations: $x \equiv x_1$; t as the time coordinate; ∂_i as derivatives of x_i ; and also $\partial \equiv \partial_1$. Let H be the laminate thickness along the x -axis, and L be the length dimension along the x_2 axis. We assume that the laminate under consideration occupies the region $\Omega \times \Xi$ on

the plane Ox_1x_2 , where $\Omega \equiv (0, H)$, $\Xi \equiv (0, L)$. This laminate is made of two conductors distributed in m laminas with the constant thickness λ . Properties of these conductors are described by: specific heats c' , c'' and heat conduction tensors with the components k'_{ij} , k''_{ij} , $i, j=1, 2$. It is assumed that the thickness λ satisfies the condition $\lambda \ll H$ and is called the microstructure parameter. Every n^{th} lamina consists of two homogeneous sub-laminas with thicknesses: λ'_n and $\lambda''_n = \lambda - \lambda'_n$, which are not constant, cf. Fig. 1b. We can introduce the material volume fractions in the n^{th} lamina defined as $v'_n \equiv \lambda'_n / \lambda$, $v''_n \equiv \lambda''_n / \lambda$. Sequence $\{v'_n\}$, $n=1, \dots, m$, is monotone and satisfies the condition $|v'_{n+1} - v'_n| \ll 1$, for $n=1, \dots, m-1$. Because $v'_n + v''_n = 1$ sequence $\{v''_n\}$ satisfies similar conditions. Sequences $\{v'_n\}$, $\{v''_n\}$, $n=1, \dots, m$, can be approximated by continuous functions $v'(\cdot)$, $v''(\cdot)$, describing the gradation of material properties along the x axis. The functions $v'(\cdot)$, $v''(\cdot)$ can be called the fraction ratios of materials. Let us also define the non-homogeneity ratio by $v(\cdot) \equiv [v'(\cdot)v''(\cdot)]^{1/2}$. Moreover, these functions ($v'(\cdot)$, $v''(\cdot)$, $v(\cdot)$) are assumed to be slowly-varying (cf. the book edited by Cz. Woźniak, Michalak and Jędrzyśiak [6]).

Let T denote the unknown temperature field. Moreover, the heat conduction problem in the TG laminate will be analysed in the framework of the Fourier's model, i.e. described by the following equation (without heat sources):

$$\partial_i (k_{ij} \partial_j T) - c \dot{T} = 0. \quad (1)$$

For the TG laminate all coefficients in equation (1), i.e. $k_{ij} = k_{ij}(x)$, $c = c(x)$, are highly-oscillating, tolerance-periodic, non-continuous functions in x . Using the tolerance modelling, equation (1) can be replaced by the differential equations with continuous, smooth, slowly-varying coefficients, cf. the book edited by Cz. Woźniak, Michalak and Jędrzyśiak [6] and by Cz. Woźniak et al. [7].

The tolerance averaging technique was used to analyse heat conduction in the transversally graded laminates by Jędrzyśiak and Radzikowska [1, 2] and in the longitudinally graded composites by Michalak and M. Woźniak [4], Michalak, Cz. Woźniak and M. Woźniak [3].

3. TOLERANCE MODELLING

The tolerance modelling concepts, the modelling assumptions and the modelling procedure can be found in the books [6, 7]. Below, only few of them are reminded.

For an arbitrary integrable function f (which can also depend on x_2 and t), defined in $\bar{\Omega}$, the averaging operator is given by:

$$\langle f \rangle (x) = \lambda^{-1} \int_{x-\lambda/2}^{x+\lambda/2} f(\xi) d\xi, \quad (2)$$

for $x \in [\lambda/2, H - \lambda/2]$.

It can be shown that for the tolerance-periodic function f of x , its averaged value calculated from (2) is a slowly-varying function in x (cf. the books [6, 7]).

The first assumption is the micro-macro decomposition, in which it is assumed:

$$T(x, x_2, t) = \vartheta(x, x_2, t) + \varphi(x) \psi(x, x_2, t), \quad (3)$$

The basic unknown is the function $\vartheta(\cdot, x_2, t)$ called the macrotemperature; an additional basic unknown is the fluctuation amplitude $\psi(\cdot, x_2, t)$; $\varphi(\cdot)$ is the known fluctuation shape function. The function $\varphi(\cdot)$ is assumed to be continuous, linear across every sub-lamina thickness and of an order $O(\lambda)$, i.e. it can be given by:

$$\varphi(x) = \begin{cases} \lambda \sqrt{3} \frac{v(\bar{x})}{v'(\bar{x})} [2x + v''(\bar{x})] & \text{for } x \in (-\lambda/2, -\lambda/2 + v'(\bar{x})) \\ \lambda \sqrt{3} \frac{v(\bar{x})}{v''(\bar{x})} [-2x + v'(\bar{x})] & \text{for } x \in (\lambda/2 - v''(\bar{x}), \lambda/2) \end{cases} \quad (4)$$

where $\bar{x}$ is a centre of a cell with a length dimension λ , cf. the book [6].

4. TOLERANCE MODEL EQUATIONS

Let denote the following smooth functional coefficients:

$$K \equiv \langle k_{11} \rangle, \quad \tilde{K} \equiv \langle k_{11} \partial \varphi \rangle, \quad \tilde{\tilde{K}} \equiv \langle k_{11} \partial \varphi \partial \varphi \rangle, \\ K_{22} \equiv \langle k_{22} \rangle, \quad C \equiv \langle c \rangle.$$

For the laminate under consideration, the tolerance modelling procedure leads to the averaged heat conduction equations (cf. [1, 2]) in the form:

$$\begin{aligned} \partial(K \partial \vartheta) + K_{22} \partial_{22} \vartheta - C \dot{\vartheta} + \partial(\tilde{K} \psi) &= 0, \\ \tilde{K} \partial \vartheta + \tilde{\tilde{K}} \psi + \lambda^2 v^2 (C \dot{\psi} - K_{22} \partial_{22} \psi) &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

In equations (5) some terms depend explicitly on the microstructure parameter λ . Equations (5) have the coefficients being slowly varying functions in x , in contrast to equation (1), which has the functional, non-continuous, highly oscillating coefficients.

5. APPLICATIONS: STATIONARY HEAT CONDUCTION ACROSS LAMINAS

Let us assume that the laminate under consideration be subjected to a thermal gradient in the direction parallel to the x -axis. Moreover, let the problem of the heat conduction be stationary. Thus, temperature T and then the basic unknowns in the tolerance model, ϑ and ψ , are the functions of x , i.e. $T = T(x)$, $\vartheta = \vartheta(x)$, $\psi = \psi(x)$. Denote by

$k \equiv k_{11}, k' \equiv k'_{11}, k'' \equiv k''_{11}$ heat conduction coefficients in sub-laminas.

Introducing notations: $K(x) \equiv v'(x)k' + v''(x)k''$,

$\tilde{K}(x) \equiv 2\sqrt{3}v(x)(k' - k'')$, $\tilde{K}(x) \equiv 12(v'(x)k'' + v''(x)k')$, equations (5) take the form:

$$\begin{aligned} \partial[K(x)\partial\vartheta + \tilde{K}(x)\psi] &= 0, \\ \tilde{K}(x)\partial\vartheta + \tilde{K}(x)\psi &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

The fluctuation amplitude ψ can be calculated from equation (6)₂:

$$\psi = -\tilde{K}(x)[\tilde{K}(x)]^{-1}\partial\vartheta. \quad (7)$$

Substituting (7) into equation (6)₁ and denoting:

$$K^{eff}(x) \equiv K(x) - [\tilde{K}(x)]^2[\tilde{K}(x)]^{-1}, \quad (8)$$

we obtain the following equation:

$$\partial[K^{eff}(x)\partial\vartheta] = 0. \quad (9)$$

The above equation together with the formula (7) for the fluctuation amplitude ψ and the micro-macro decomposition (3), describes the stationary heat conduction across laminas.

Equation (9) has slowly-varying coefficients, defined by known functions, e.g. by v' , v'' , v , φ , cf. (4). Hence, integrating equation (9) we can write the solution as:

$$\vartheta(x) = C_1 \int [K^{eff}(x)]^{-1} dx + C_2, \quad (10)$$

with the constants C_1, C_2 determined by the boundary conditions. For the considered laminate with constant coefficients k', k'' and the fluctuation shape function given by (4), the averaged heat conduction coefficient K^{eff} , (8), is equal:

$$K^{eff}(x) = k'k''[k' + (k'' - k')v'(x)]^{-1}. \quad (11)$$

For the macrotemperature ϑ we assume the following boundary conditions:

$$x = 0: \quad \vartheta(0) = T_0; \quad x = H: \quad \vartheta(H) = 0. \quad (12)$$

Denoting $f(x) = \int v'(x)dx$ and combining the boundary conditions (12) with formulas (10), (11) we arrive at constants C_1, C_2 :

$$\begin{aligned} C_1 &= T_0 \frac{k'k''}{(k'' - k')[f(0) - f(H)] - k'H}, \\ C_2 &= -T_0 \frac{k'H + (k'' - k')f(H)}{(k'' - k')[f(0) - f(H)] - k'H}. \end{aligned} \quad (13)$$

Hence, the macrotemperature (10) has the form:

$$\vartheta(x) = C_1 [x(k'')^{-1} + (k'' - k')(k'k'')^{-1}f(x)] + C_2, \quad (14)$$

however, the fluctuation amplitude ψ can be written as:

$$\psi(x) = \frac{\sqrt{3}}{6} (k'' - k')(k'k'')^{-1} v(x) C_1. \quad (15)$$

Combining (14) and (15) with the micro-macro decomposition, the temperature T is equal:

$$T(x) = \left\{ x(k'')^{-1} + (k'' - k')(k'k'')^{-1} \left[f(x) + \frac{\sqrt{3}}{6} \varphi(x) v(x) \right] \right\} C_1 + C_2. \quad (16)$$

Formula (16) describes the “exact” distribution of the temperature in the TG laminate by the tolerance model.

6. RESULTS

In this section some effects of comparing of two models of heat conduction in the laminate are presented.

Let the layer thickness H be coupled with the microstructure parameter λ by the relation $H = m\lambda$ (m is the number of laminas). The fraction ratios of the materials are defined as:

- 1) the linear functions $v'(x) = x/H$, $v''(x) = 1 - v'(x)$,
- 2) the exponential functions

$$v'(x) = [1 - \exp(2x/H)]/[1 - \exp(2)], \quad v''(x) = 1 - v'(x).$$

Some calculation results are shown in Fig. 2-5. These plots are made for $m=19$, thus the ratio $\lambda/H \approx 0.05$; for $T_0=100$ and $k''/k' = 1289$. In Fig. 2-5 are presented curves of the temperature T given by formula (16) – the tolerance model, and the results of ABAQUS, the numerical program, which in the finite element method is used. Fig. 2 and 4 present the temperature comparison for $m=19$ laminas, in Fig. 3 and 5 the laminas with the biggest differences between models are shown.

In Fig. 2-3, the plots are made for the linear function ratios of the materials.

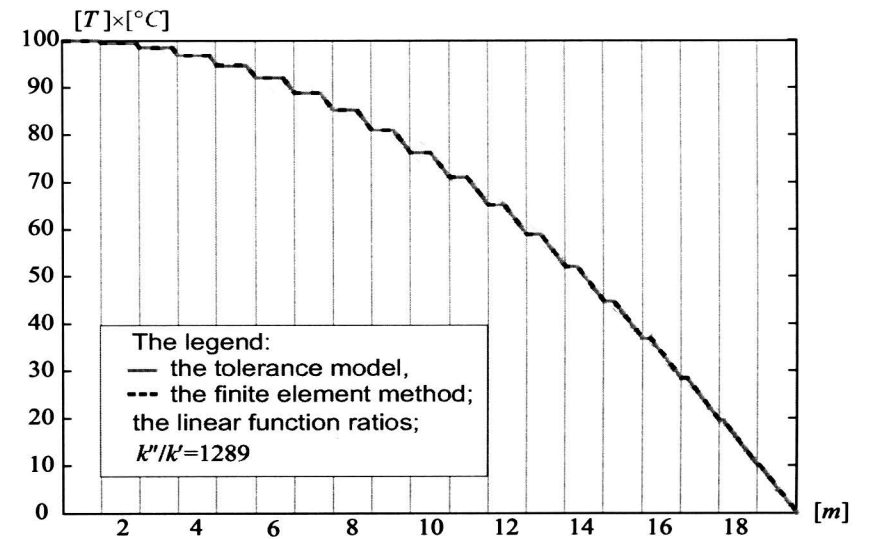


Fig. 2. The temperature distribution for the tolerance model and the finite element method with the linear function ratios.

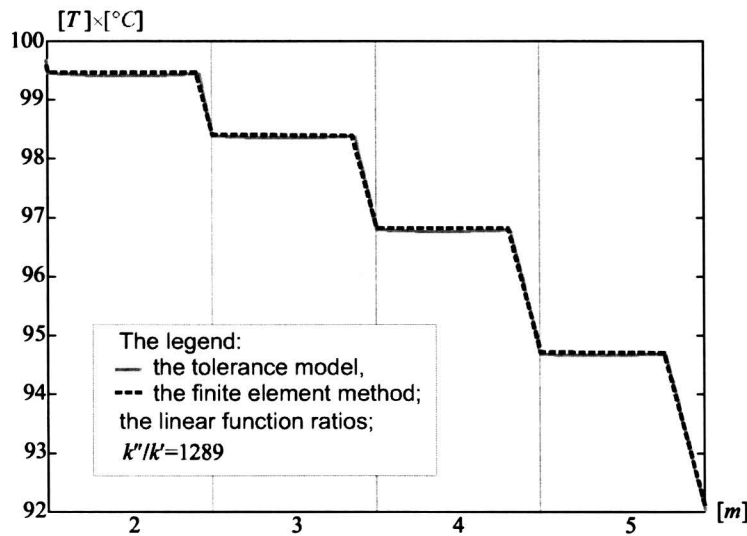


Fig. 3. A fragment of the temperature distribution for the tolerance model and the finite element method with the linear function ratios.

In Fig. 4-5, the plots are made for the exponential function ratios of the materials.

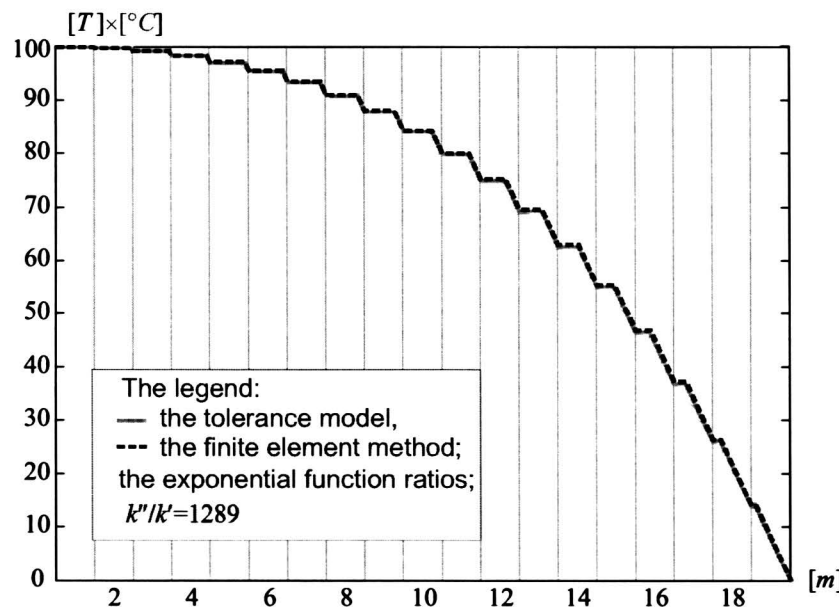


Fig. 4. The temperature distribution for the tolerance model and the finite element method with the exponential function ratios.

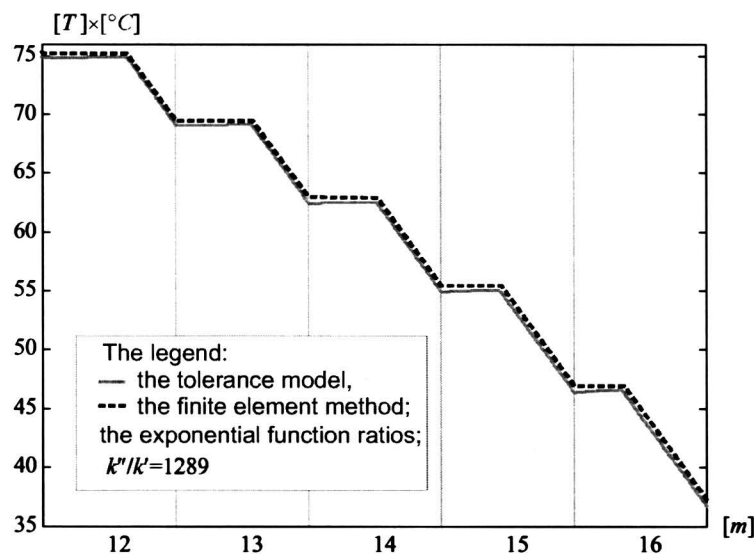


Fig. 5. A fragment of the temperature distribution for the tolerance model and the finite element method with the exponential function ratios.

7. REMARKS

Comparing two models: the tolerance averaging technique and the finite element methods, for the stationary heat conduction in the transversally graded laminate, we can observe:

- the distributions of the temperature depend on the fraction ratios of materials,
- for two fraction ratios, which are analysed, in the both cases, the values of the temperature are a little bit higher then the temperature from the tolerance model,
- the differences between the results of both methods are smaller for the linear function ratios of the materials (less then 0.5%) in comparing with the results for the exponential function ratios (less then 1%).

The results of applying both methods were compared for ratios $k''/k' \in \{1/2, 1/4, 1/8, 2, 4, 8\}$ also. Differences between the values of the temperature in all these cases are no bigger then 0.2%.

Acknowledgements. This contribution is supported by the Ministry of Science and Higher Education of Poland under grant No. N N506 398535. All computations in ABAQUS system was made thanks to ACK CYFRONET AGH in Kraków under grant No. MNiSW/IBM_BC_HS21/PŁódzka/048/2010.

References

- Jędrzyak J., Radzikowska A.: *On the modelling of heat conduction in a non-periodically laminated layer*, J. Theor. Appl. Mech., 45 (2007) 239-257
- Jędrzyak J., Radzikowska A.: *Stationary heat conduction in a laminate with functionally graded macrostructure (FGM)*, Build. Phys. Theory Pract., 3 (2008) 23-26
- Michalak B., Woźniak Cz., Woźniak M.: *Modelling and analysis of certain functionally graded heat conductor*, Arch. Appl. Mech. 77 (2007) 823-834
- Michalak B., Woźniak M.: *On the heat conduction in certain functionally graded composites*, in: Selected Topics in the Mechanics of Inhomogeneous Media, ed. by Cz. Woźniak, R. Świtka, M. Kuczma, Zielona Góra (2006) 229-238
- Suresh S., Mortensen A.: *Fundamentals of functionally graded materials*, The University Press, Cambridge 1998
- Woźniak Cz., Michalak B., Jędrzyak J., (eds): *Thermomechanics of microheterogeneous solids and structures. Tolerance averaging approach*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2008
- Woźniak Cz., et al., (eds): *Mathematical modelling and analysis in continuum mechanics of microstructured media*, Publishing House of Silesian University of Technology, Gliwice 2010

ISSN 1734-4891