

70.730

P O L S K I E T O W A R Z Y S T W O
M E C H A N I K I T E O R E T Y C Z N E J I S T O S O W A N E J

PL ISSN 0029-3701

27

MECHANIKA TEORETYCZNA I STOSOWANA

KWARTALNIK

TOM 21 · ZESZYT 4

25
LAT
PTM TS



581

SPIS TREŚCI

Od Redakcji	513
От Редакции	
From the Editors	
Z. OLESIAK, Utworzenie i początki działalności Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej	514
Основание и первые года деятельности Польского Общества по Теоретической и прикладной Механике	
Foundation and first years of activity of the Polish Society for Theoretical and Applied Mechanics	
List od profesora J. Mutermilcha	524
Письмо от профессора Е. Мутермилча	
Letter from Professor J. Mutermilch	
Z. BRZOSKA, Refleksje nad przyszłością PTMTiS	524
Рефлексии над будущим Общества	
Reflections upon future of the Society	
W. NOWACKI, Powstanie i działalność Międzynarodowego Centrum Nauk Mechanicznych w Udine (CISM)	527
Основание и деятельность Международного Центра Механических Наук в Удине (ЧИСМ)	
Foundation and activity of the International Centre for the Mechanical Sciences in Udine (CISM)	
Z. KĄCZKOWSKI, O stosowaniu nieprostokątnych elementów czasoprzestrzennych	531
О применении не-прямоугольных временно-пространственных элементов	
On applications of non-rectangular space-time elements	
M. DIETRICH, O modelowaniu w budowie maszyn	543
Моделирование в строительстве машин	
Modelling in machine construction	
B. RADZISZEWSKI, Mechanika Teoretyczna — aktualne kierunki rozwoju	555
Теоретическая механика — современные направления в развитии	
Theoretical mechanics — contemporary trends in development	
K. SOBZYK, Metody stochastyczne w mechanice: stan i tendencje rozwojowe	557
Стохастические методы в механике — состояние и тенденции в развитии	
Stochastical methods in mechanics — state and trends of development	
J. STURNICKI, Mechanika doświadczalna — problemy i kierunki rozwoju	565
Экспериментальная механика проблемы и направления развития	
Experimental mechanics — problems and trends	

P O L S K I E T O W A R Z Y S T W O
M E C H A N I K I T E O R E T Y C Z N E J I S T O S O W A N E J

M E C H A N I K A
T E O R E T Y C Z N A
I S T O S O W A N A

T O M 21 • Z E S Z Y T 4



W A R S Z A W A 1983

P A Ń S T W O W E W Y D A W N I C T W O N A U K O W E

MECHANIKA TEORETYCZNA I STOSOWANA

poświęcona jest pracom przeglądowym, oryginalnym naukowym pracom teoretycznym i doświadczalnym, komunikatom naukowym i bibliografii najważniejszych pozycji wydawniczych. Zawiera również sprawozdania z działalności Towarzystwa, kongresów, konferencji i sympozjów naukowych

*

THEORETICAL AND APPLIED MECHANICS

is devoted to surveys, original theoretical and experimental papers, scientific information and bibliography of important current editions. It contains also reports on the Polish Society for Theoretical and Applied Mechanics activities, on Congresses, Conferences and Symposia

*

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА содержит обзорные работы, оригинальные теоретические и экспериментальные работы, краткие научные сообщения, библиографические обзоры новых печатных работ, отчеты о деятельности Польского Общества Теоретической и Прикладной Механики, сведения о научных конгрессах и конференциях

KOMITET REDAKCYJNY
MAREK DIETRICH—PRZEWODNICZĄCY,
IGOR KISIEL, JERZY MARYNIAK,
WITOLD NOWACKI, JAN SZARGUT,
JÓZEF WIĘCKOWSKI,
ZBIGNIEW OLESIAK—REDAKTOR NACZELNY,
JACEK STUPNICKI—REDAKTOR
ANDRZEJ SZANIAWSKI—REDAKTOR,
CZESŁAW WOŹNIAK—REDAKTOR
MONIKA WĄGROWSKA—REDAKTOR,
MAŁGORZATA JABŁOŃSKA—SEKRETARZ

REDAKCJA

00-901 Warszawa, PKiN, pok. 309, tel. 20-02-11, wewn. 2268

Nakład 670. Ark. wydawniczych 20,0. Ark. drukarskich 15,0. Papier druk. b. sat. kl. IV, 71 g. 70×100
Oddano do składania 5.X.1983 r. Druk ukończono w lipcu 1984 r. Zam. 5097/83. Cena zł 80.—

Drukarnia im. Rewolucji Październikowej, Warszawa

OD REDAKCJI

Z początkiem 1982 roku na jednym z zebrań Komitetu Redakcyjnego postanowiliśmy wydać specjalny numer naszego kwartalnika poświęcony 25-leciu Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej. Mimo, że czas był mało sprzyjający, a opóźnienia w ukazywaniu się poszczególnych zeszytów Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej dochodziły do dwóch lat, zwróciliśmy się do ponad czterdziestu osób z prośbą o napisanie artykułów przeglądowych, lub wspomnień, bądź też o przysłanie wypowiedzi na temat mechaniki i jej rozwoju.

Pierwsza grupa osób, do której zwróciliśmy się to inicjator utworzenia naszego Towarzystwa profesor Witold Nowacki oraz Prezesi Zarządu Głównego PTMTiS ubiegłych kadencji. Na nasze zaproszenie otrzymaliśmy artykuł wspomnieniowy od profesora W. Nowackiego, list od profesora Jerzego Mutermilcha, refleksje o przyszłości PTMTiS od profesora Zbigniewa Brzoski oraz oryginalne artykuły naukowe od profesorów Zbigniewa Kączkowskiego i Marka Dietricha.

Następnie korzystając z istniejącego już opracowania na temat przewidywanego rozwoju mechaniki w najbliższym okresie, przedstawionego na jednym z zebrań Komitetu Mechaniki PAN, zwróciliśmy się z prośbą o opracowanie artykułów do pięciu Autorów wspomnianego zbiorczego opracowania. W ten sposób powstały artykuły o przyszłości poszczególnych gałęzi mechaniki napisane przez profesorów Jacka Stupnickiego, Kazimierza Sobczyka oraz docenta Bogusława Radziszewskiego. Profesor Krzysztof Wilmański włączył uwagi dotyczące przyszłości termodynamiki ośrodków ciągłych do swojego artykułu przeglądowego.

Zaprosiliśmy również ponad trzydziestu Kolegów do napisania artykułów przeglądowych z różnych dziedzin mechaniki. Zdając sobie sprawę z przeciążenia pracą zwłaszcza wielu starszych Kolegów, uniemożliwiającego im poświęcenia potrzebnej ilości czasu, zwróciliśmy się również do młodszych wiekiem, ale już doświadczonych Kolegów. Tu niestety spotykaliśmy się często z odmową, a kilka razy, pierwotnie pozytywna odpowiedź zmieniła się w odmowę napisania artykułu, niestety dopiero w chwili, gdy termin, nawet ten przedłużony o pół roku, już minął. Planowaliśmy by wszystkie artykuły przeglądowe były opracowane na zasadzie referat przeglądowy — koreferat. Postulat w pewnym sensie spełniają jedynie artykuły Kolegów: S. Drobniaka i W. Kani oraz profesora J. Ostrowskiego.

Kilka artykułów przeglądowych ma wpłynąć jeszcze w terminie późniejszym i zostaną one wydrukowane w następnych zeszytach naszego kwartalnika. Wymienimy tu obiecane artykuły przeglądowe z termodynamiki i teorii powłok. Widoczny jest brak artykułów, o które zresztą zabiegaliśmy, przeglądów prac teoretycznych z mechaniki ośrodków ciągłych, zarówno ciała stałego jak i cieczy i gazów. Zamieszczone artykuły obejmują

tylko niewiele działów mechaniki i stanowią w dużej mierze subiektywne spojrzenie Autorów zależne na ogół od ich zainteresowań naukowych. Redakcja chętnie zamieści zarówno wypowiedzi i opinie dotyczące dziedzin mechaniki, na temat których zostały wydrukowane artykuły przeglądowe, jak i nowe prace przeglądowe z innych gałęzi mechaniki. Zapraszamy czytelników do przysyłania takich artykułów, wydaje nam się, że mogą one zainteresować wielu.

Mechanika jest jedną z najstarszych gałęzi nauk ścisłych. Mimo to obserwujemy dalszy burzliwy jej rozwój w latach po drugiej wojnie światowej. Powstały nowe działy tej nauki. Uzupełniliśmy ten Jubileuszowy Zeszyt tłumaczeniem klasyfikacji, jaką od niedawna stosuje Applied Mechanics Reviews. W przekładzie natrafiliśmy na trudności spowodowane brakiem, lub niejednoznacznością terminów polskich.

Zeszyt kwartalnika poświęcony Jubileuszowi Towarzystwa nie może, naszym zdaniem, obyć się bez wspomnień dotyczących powstania i pierwszych miesięcy działalności PTMTiS, a przede wszystkim bez wymienienia osób szczególnie zasłużonych w długoletniej działalności społecznej na rzecz Towarzystwa. Zamieszczamy również listę członków honorowych PTMTiS i listę członków zagranicznych. Stwierdziliśmy z wielkim smutkiem, że wielu naszych Nauczycieli, Kolegów i Przyjaciół odeszło już od nas na zawsze. Spośród 117 członków założycieli nie ma już wśród nas około połowy.

Redakcja

UTWORZENIE I POCZĄTKI DZIAŁALNOŚCI POLSKIEGO TOWARZYSTWA MECHANIKI TEORETYCZNEJ I STOSOWANEJ

Z inicjatywy profesora Witolda Nowackiego sprawa powołania Towarzystwa została przedyskutowana na konferencjach: Zakładu Mechaniki Ośrodków Ciągłych IPPT PAN (sierpień 1957), Zakładu Mechaniki Cieczy i Gazów IPPT PAN (wrzesień 1957) oraz Komitetu Inżynierii Lądowej PAN (sierpień 1957). W owym czasie w konferencjach tych uczestniczyli prawie wszyscy pracownicy nauki z dziedziny mechaniki w Polsce. W wyniku wymiany poglądów uczestnicy konferencji wypowiedzieli się za celowością zorganizowania Towarzystwa.

Założenia programowe i organizacyjne zostały opracowane przez profesorów Witolda Nowackiego, Witolda Wierzbickiego, Wacława Olszaka, Jerzego Mutermilcha, Zbigniewa Kączkowskiego, docenta (wtedy) Henryka Waldena i mgr inż. (również wtedy) Wojciecha Urbanowskiego. Sporządzono listę i wysłano zaproszenia do 119 osób z całej Polski, pracujących naukowo w dziedzinie mechaniki, na zebranie w Warszawie w sprawie utworzenia PTMTiS. Z liczby tej na zebranie przybyły 74 osoby, 21 osób odpowiedziało listownie usprawiedliwiając nieobecność, dalsze 22 osoby spośród zaproszonych zgłosiło w niedługim czasie akces do Towarzystwa.

Za datę utworzenia Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej należy uznać dzień 13 marca 1958 r., kiedy to na zebraniu członków założycieli (w Pałacu Kultury i Nauki, sala 1003, X piętro) postanowiono jednomyślnie powołać Towarzystwo do życia. PTMTiS zostało następnie zarejestrowane w dniu 18 czerwca 1958 r. i wpisane pod nr 645 do rejestru Stowarzyszeń i Związków Prezydium Rady Narodowej w mieście stołecznym Warszawie.

* Poniżej podajemy listę uczestników zebrania założycielskiego oraz osób, które zgłosiły akces do Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teroetycznej i Stosowanej na zaproszenie Komitetu Organizacyjnego. Lista zawiera łącznie 117 nazwisk. Z liczby tej odeszło już od nas na zawsze 53 Kolegów, 4 osoby wyemigrowały z Polski, los 7 osób nie jest mi znany, nazwiska te nie ukazują się już w Nauce Polskiej. Listę podajemy z ówczesnymi tytułami Kolegów.

Uczestnicy zebrania założycielskiego:

Prof. Lucjan Ballenstedt

Prof. dr Maciej Bieniek

Prof. dr Julian Bonder

Prof. dr Zbigniew Brzoska

Prof. dr Jan Buchholtz

Doc. dr Zbigniew Budzianowski

Knt. Eustachy Burka

Z-ca prof. Roman Ciesielski

Doc. knt. Jerzy Czechowicz

Prof. dr Janusz Czulak

Prof. dr Władysław Fiszdon

Z-ca prof. Alfred Haberzak

Doc. Tadeusz Iwiński

Z-ca prof. Franciszek Janik

Prof. dr Marian Janusz

Prof. dr Sylwester Kaliski

Prof. dr Edmund Karaśkiewicz

Doc. Roman Kazimierczak

Prof. dr Stefan Kaufman

Prof. knt. Zbigniew Kączkowski

Doc. Igor Kisiel

Prof. dr Zenobiusz Klębowski

Prof. dr Tadeusz Kozłowski

Prof. dr Jerzy Leyko

Doc. Jerzy Lipka

Prof. dr Michał Łunc

Prof. dr Jan Madejski

Prof. dr Jerzy Mandes

Z-ca prof. Jerzy Mierzejewski

Prof. dr Franciszek Misztal

Doc. knt. Adam Mitzel

Doc. knt. Jerzy Mossakowski

Knt. Zofia Mossakowska

Prof. dr Jerzy Mutermilch

Knt. Janusz Murzewski

Prof. dr Jarosław Naleszkiewicz

Prof. dr Witold Nowacki

Doc. knt. Zbigniew Olesiak

Prof. dr Waław Olszak

Prof. dr Eugeniusz Olszewski

Prof. dr Zbigniew Pączkowski

Prof. dr Tadeusz Pełczyński

Prof. dr Marian Piątek

Prof. Radzimir Piętkowski

Z-ca prof. Jerzy Pindera

Z-ca prof. knt. Kazimierz Piszczek

Prof. dr Wieńczysław Poniż

Doc. knt. Włodzimierz Prosnak

Z-ca prof. Romuald Romicki

Prof. Aleksander Rylke

Prof. dr Antoni Saustowicz

Mgr inż. Antoni Sawczuk

Doc. dr Jerzy Sielski

Doc. dr Celestyn Steckiewicz

Prof. dr Bohdan Stefanowski

Z-ca prof. Jerzy Sułocki

Prof. Ludomir Suwalski

Knt. Andrzej Szaniawski

Prof. dr Edmund Szczepaniak

Prof. dr Jan Szmelter

Prof. inż. Adam Tadeusz Troskoleński

Prof. dr Stanisław Turski

Prof. Feliks Tychowski

Mgr inż. Wojciech Urbanowski

Prof. Janusz Walczak

Doc. knt. Henryk Walden

Prof. dr Zbigniew Wasiutyński

Prof. dr Witold Wierzbicki

Doc. knt. Józef Więckowski

Doc. knt. Marek Zakrzewski

Prof. dr Kazimierz Zarankiewicz

Doc. knt. Jerzy Zawadzki

Prof. dr Stefan Ziemba

Doc. knt. Henryk Zorski

Akces do powstającego PTMTiS zgłosili następujący Koledzy:

Prof. dr Stanisław Błaszkwia

Prof. dr Stanisław Bodaszewski

Knt. Augustyn Borez

Prof. dr Stanisław Brzozowski

Doc. knt. Wojciech Brzozowski

Prof. dr Witold Budryk

Prof. dr Jerzy Bukowski

Prof. dr Włodzimierz Burzyński

Prof. dr Romuald Cebertowicz

Prof. Adam Cybulski

Prof. dr Edward Czetwertyński

Knt. Ryszard Dąbrowski

Prof. dr Stefan Drobot

Doc. Czesław Eimer

Knt. Józef Golecki

Prof. Stanisław Hüchel

Doc. knt. Artur Kacner

Z-ca prof. Lech Kobylński

Prof. dr Aleksander Krupkowski

Prof. dr Mirosław Krzyżański

Prof. dr Aleksander Lisowski

Prof. dr Konstanty Lisowski

Prof. dr Jerzy Litwiniszyn

Doc. Jerzy Łempicki



Knt. Jakób Mames
Prof. Bolesław Majzel

Prof. dr Stanisław Ochęduszko

Prof. dr Jan Oderfeld
Knt. Michał Owczynnikow
Doc. knt. Zdzisław Parszewski
Doc. knt. Stefan Perycz

Prof. dr Wojciech Rubinowicz

Prof. dr Stanisław Rydlewski

Doc. knt. Marek Sokołowski

Prof. dr Franciszek Szelągowski

Prof. dr Robert Szewalski
Knt. Zdzisław Szymański
Doc. knt. Wojciech Truszkowski
Doc. Zenon Wiłun

Prof. dr Kazimierz Wolski

Knt. Kazimierz Wysiatycki

Prof. dr Józef Wysocki

Knt. Michał Życzkowski

Na tym samym zebraniu w dniu 13 marca 1958 r. wybrany został Zarząd Główny w składzie:

Przewodniczący — prof. dr Witold Wierzbicki
Wiceprzewodniczący — prof. dr Witold Nowacki
Wiceprzewodniczący — prof. dr Waclaw Olszak
Sekretarz Generalny — prof. dr Zbigniew Kączkowski
Skarbnik — prof. dr Kazimierz Zarankiewicz
Członek Prezydium — prof. dr Franciszek Misztal
Z-cy członków Z. G.: prof. dr Jarosław Naleszkiewicz
prof. dr Tadeusz Pełczyński.

Wybrano również członków Zarządu Głównego, organizatorów Oddziałów:

prof. dr Marian Piątek — O/Gdański
prof. dr Stanisław Ochęduszko — O/Gliwicki
prof. dr Jerzy Litwiniszyn — O/Krakowski
prof. dr Jan Szmelter — O/Łódzki
prof. dr Edmund Karaśkiewicz — O/Poznański
z-ca prof. Jerzy Sułocki — O/Szczeciński
prof. dr Jerzy Mutermilch — O/Warszawski
doc. dr Adam Mitzel — O/Wrocławski

oraz Główną Komisję rewizyjną w składzie:
Przewodniczący — prof. dr Zenobiusz Kłębowski
Członek Komisji — prof. dr Zbigniew Wasiutyński

Członek Komisji — prof. dr Stefan Ziemba

Z-ca Członka Komisji — doc. dr Igor Kisiel.

Pierwszy został utworzony Oddział PTMTiS w Poznaniu.

W dniu 2 kwietnia 1958 r. wybrano Zarząd Oddziału w składzie:

Przewodniczący — prof. dr E. Karaśkiewicz oraz

członkowie Zarządu — prof. dr E. Kręglewski

dr J. Puchałka

adj. J. Czarnecki

Pięć następnych oddziałów powstało w październiku 1958 r. Były to:

Oddział we Wrocławiu utworzony 13 października. Do pierwszego Zarządu Oddziału weszli:

Przewodniczący — doc. dr Adam Mitzel,

Sekretarz zast. prof. — dr Otton Dąbrowski

członkowie Zarządu — doc. dr J. Zawadzki

doc. dr M. Zakrzewski

15 października ukonstytuował się Zarząd Oddziału w Gdańsku w składzie:

Przewodniczący — prof. Marian Piątek

wiceprzewodniczący — doc. dr W. Brzozowski

sekretarz — dr E. Burka

25 października wybrano Zarząd Oddziału w Warszawie, w składzie:

przewodniczący — prof. dr Jerzy Mutermilch

wiceprzewodniczący — prof. dr J. Naleszkiewicz

sekretarz — doc. dr M. Sokołowski

skarbnik — doc. dr J. Lipka

członkowie Zarządu — prof. dr W. Poniż

prof. F. Janik

prof. dr E. Szczepaniak

28 października zorganizowany został Oddział w Gliwicach, do Zarządu zostali wybrani:

Przewodniczący — prof. dr Marian Janusz

członkowie Zarządu — prof. dr Z. Wusatowski

— doc. dr Z. Budzianowski

29 października wybrany został Zarząd Oddziału w Szczecinie w składzie:

Przewodniczący — prof. dr K. Lisowski

sekretarz — z-ca prof. J. Sułocki

członek Zarządu — z-ca prof. J. Mierzejewski.

Dnia 27 listopada powstał Oddział PTMTiS w Krakowie. Do Zarządu zostali wybrani:

Przewodniczący — prof. dr Antoni Sałustowicz

wiceprzewodniczący — prof. J. Walczak

sekretarz — doc. dr W. Truszkowski

W Oddziale Łódzkim (brak daty założenia) wybrano:

Przewodniczącego — prof. dr Jana Szmeltera

i sekretarza — mgr inż. W. Walczaka

Pod koniec pierwszego kwartału 1959 r. do PTMTiS należało już 236 osób. W inaugu-

racyjnym zebraniu naukowym w Warszawie (1 grudnia 1958) prelegentem był prof. W. Nowacki, a udział w zebraniu wzięły 63 osoby z 6 Oddziałów Towarzystwa.

Pierwszy Zjazd Delegatów, z udziałem 30 osób, w tym 22 delegatów odbył się w Warszawie dnia 30 maja 1959 r. Pierwsze sympozjum PTMTiS zostało zorganizowane w styczniu 1960 w Łodzi na temat metod numerycznych w mechanice budowli, następnie w Gdańsku, Poznaniu i Wrocławiu.

Pierwszy konkurs naukowy PTMTiS, na najlepszą pracę z dziedziny doświadczalnej analizy został ogłoszony w roku 1959. Konkurs został rozstrzygnięty w grudniu 1960 r. Przyznano I nagrodę mgr inż. Zygmuntowi Rolińskiemu i mgr inż. Zdzisławowi Kalewiczowi oraz dwie drugie nagrody doc. dr Zdzisławowi Marciniakowi i dr. inż. Przemysławowi Jastrzębskiemu.

Pierwszym członkiem zagranicznym został prof. B. R. Seth (z Indii), wybrany na zebraniu założycielskim 13 marca 1958 r.

Pierwszymi członkami honorowymi Towarzystwa zostali wybrani, na Zjeździe Delegatów w r. 1966 profesorowie Włodzimierz Burzyński, Bohdan Stefanowski. Przez cztery lata (1959 - 1962), zgodnie z uchwałą Zarządu Głównego z dnia 3 grudnia 1958 r., wydawano, metodą powielaczową, Biuletyn PTMTiS. Ukazało się 12 numerów Biuletynu, redaktorem był prof. Artur Kacner.

W następnych latach powstało dalszych osiem oddziałów Towarzystwa:

Częstochowa — 1969 r.

Bydgoszcz — 1970 r.

Rzeszów — 1972 r.

Opole — 1975 r.

Lublin — 1978 r.

Zielona Góra — 1978 r.

Bielsko-Biała — 1980 r.

Kielce — 1984 r.

Godność członków honorowych Towarzystwa została nadana na kolejnych Zjazdach Delegatów, w uznaniu zasług w rozwoju mechaniki i PTMTiS, następującym Kolegom:

Prof. dr Włodzimierz Burzyński	Gliwice	1966
Prof. dr Bohdan Stefanowski	Warszawa	1966
Prof. dr Edmund Karaśkiewicz	Poznań	1970
Prof. dr Jerzy Mutermilch	Warszawa	1970
Prof. dr Wacław Olszak	Warszawa	1970
Prof. dr Witold Nowacki	Warszawa	1971
Prof. dr Marian Janusz	Gliwice	1974
Prof. dr Janusz Dietrych	Gliwice	1976
Prof. dr Zbigniew Kączkowski	Warszawa	1976
Prof. dr Igor Kisiel	Wrocław	1978
Prof. dr Jan Oderfeld	Warszawa	1978

Zagranicznymi członkami PTMTiS wybrani zostali następujący uczeni:

1. P. R. Seth	Indie	1958
2. I. I. Artobolewski	ZSRR	1969

3. G. Backhaus	NRD	1969
4. A. T. Balewski	Bułgaria	1969
5. G. Brankow	Bułgaria	1969
6. P. Brousse	Francja	1969
7. E. Carafoli	Rumunia	1969
8. P. Csonka	Węgry	1969
9. L. Gauthier	Francja	1969
10. P. Germain	Francja	1969
11. J. P. Hartog	USA	1969
12. G. Heinrich	Austria	1969
13. H. Heinrich	Austria	1969
14. C. Jacob	Rumunia	1969
15. W. T. Koiter	Holandia	1969
16. J. Kozesnik	Czechosłowacja	1969
17. J. Kravtchenko	Francja	1969
18. D. Lazarević	Jugosławia	1969
19. A. W. Łykwow	ZSRR	1969
20. H. Matzke	NRD	1969
21. N. J. Muscheliszwili	ZSRR	1969
22. A. Myslivec	Czechosłowacja	1969
23. H. Parkus	Austria	1969
24. W. M. Rohsenow	USA	1969
25. M. Roy	Francja	1969
26. G. N. Sawin	ZSRR	1969
27. E. Schmid	Austria	1969
28. I. N. Sneddon	Szkocja	1969
29. Z. Sobotka	Czechosłowacja	1969
30. L. Sobrero	Włochy	1969
31. K. Szèchy	Węgry	1969
32. I. I. Wekua	ZSRR	1969
33. A. Ylinen	Finlandia	1969
34. L. G. Łojcjanskij	ZSRR	1973
35. G. Rieder	RFN	1972
36. O. C. Zienkiewicz	Wielka Brytania	1972
37. B. I. Dołapczjew	Bułgaria	1974
38. H. Görtler	RFN	1973
39. B. F. Veubeke	Belgia	1972
40. L. Escande	Francja	1974
41. F. I. Nirdson	Dania	1974
42. Cz. Rodkiewicz	Kanada	1980
43. J. Moszyński	USA	1980
44. A. K. Oppenheim	USA	1980
45. Ch. Massonnet	Belgia	1980
46. S. Crandall	USA	1980

47. K. Frołow	ZSRR	1980
48. Prof. Aleksander Čyras	ZSRR	
49. Prof. Pierre Čapodanno	Francja	1983
50. Prof. Manfred Hoffmeister	NRD	1983
51. Prof. Aleksiej Iliuszyn	ZSRR	1983
52. Prof. Ülo Lepik	ZSRR	1983
53. Prof. Theodor Lehmann	RFN	1983
54. Prof. Sandor Kaliszky	Węgry	1983
55. Prof. Giulio Maier	Włochy	1983
56. Prof. Leonard Maunder	Anglia	
57. Prof. John H. Argyris	W. Brytania + RFN	1983
58. Prof. Jan Hult	Szwecja	1983
59. Prof. Sumio Murakami	Japonia	
60. Prof. Philip G. Hodge	Wielka Brytania	

W przeciągu XXV lat istnienia PTMTiS liczba członków Towarzystwa przekroczyła 1030 osób. Duża część spośród tych osób ofiarnie pracowała i pracuje społecznie w Oddziałach Towarzystwa, w Zarządzie Głównym, przy organizacji sympozjonów i konkursów naukowych, kursów naukowych, wygłasza referaty na zebraniach naukowych, itd. Poniżej publikujemy honorową listę tych działaczy Towarzystwa, którzy jak się wydaje szczególnie hojnie i to przez długi okres czasu poświęcali swój czas działalności społecznej w ramach PTMTiS.

Oddział w Bielsku-Białej

Profesor Stanisław Gdula

Oddział w Częstochowie

Profesor Jerzy Kołakowski

Profesor Janusz Elsner

Profesor Roman Janiczek

Docent Waldemar Bachmacz

Oddział w Gdańsku

Profesor Roman Kazimierzczak

Profesor Piotr Wilde

Profesor Eugeniusz Bielewicz

Profesor Wojciech Pietraszkiewicz

Profesor Jan Kruszewski

Profesor Józef Więckowski

Oddział w Gliwicach

Profesor Jerzy Antoniak

Profesor Szczepan Borkowski

Dr inż. Remigiusz Ćwik

Profesor Janusz Dietrych

Profesor Marian Janusz

Docent Walery Szuścik

Profesor Andrzej Tylikowski (również Oddział w Warszawie)
Profesor Józef Wojnarowski

Oddział w Krakowie

Profesor Władysław Bogusz

Profesor Roman Ciesielski
Profesor Zbigniew Engel
Docent Stanisław Kasprzyk
Profesor Wiesław Krzyś
Profesor Zenon Waszczyszyn
Profesor Michał Życzkowski

Oddział w Łodzi

Profesor Jan Szmelter

Profesor Zdzisław Parszewski
Docent Władysław Walczak
Docent Janusz Lipiński
Docent Kazimierz Grossman

Oddział w Poznaniu

Profesor Edmund Karaśkiewicz

Profesor Jarosław Stefaniak
Profesor Czesław Cempel
Profesor Henryk Mikołajczyk

Oddział w Szczecinie

Profesor Jerzy Sułocki (również w Łodzi)
Docent Jerzy Mierzejewski
Docent Czesław Mickiewicz
Docent Karol Grudziński
Docent Henryk Ostapiuk
Magister inż. Mieczysław Kosecki

Oddział w Warszawie

Doktor Kazimierz Borsuk
Profesor Zbigniew Brzoska
Profesor Marek Dietrich
Profesor Stanisław Dubiel
Profesor Przemysław Jastrzębski

Profesor Artur Kacner

Profesor Zbigniew Kączkowski
Profesor Jan Mutermilch
Profesor Witold Nowacki
Profesor Zbigniew Olesiak

Profesor Wacław Olszak

Profesor Zbigniew Osiński
Docent Edward Radwański
Profesor Jacek Stupnicki

Profesor Witold Wierzbicki

Profesor Stefan Zahorski

Oddział we Wrocławiu

Profesor Augustyn Borcz
Profesor Eugeniusz Brzuchowski
Profesor Adam Cybulski
Profesor Igor Kisiel

Profesor Adam Mitzel

Profesor Jerzy Zawadzki

Zbigniew Olesiak

Wielce Szanowny Panie Redaktorze!

Zaproszony do wypowiedzenia się na łamach jubileuszowego numeru „Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej” zmuszony jestem, ze względu na osobistą sytuację, ograniczyć się do niniejszego listu. Starość ma to do siebie, że lata biegną coraz szybciej. Dlatego trudno mi uwierzyć, że to już ćwierć wieku istnieje i działa Polskie Towarzystwo Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej, do którego założycieli należałem wraz z profesorami; W. Wierzbickim, W. Nowackim, W. Olszakiem, Z. Kączkowskim, H. Waldenem i W. Urbanowskim. Po śmierci nieodżałowanego pierwszego Prezesa Towarzystwa, profesora Witolda Wierzbickiego, miałem zaszczyt być wybranym na Jego następcę. Wspominam lata swojej skromnej na tym stanowisku działalności jako ogniwo w całym łańcuchu ludzi dobrej woli, którzy w miarę swych możliwości przyczyniali się do rozwoju Towarzystwa. Sądzę, że Towarzystwo nasze ma pełne prawo obchodzić swe 25-lecie w przekonaniu, iż jego działalność miała istotne znaczenie dla integracji wielu dziedzin mechaniki i upowszechnienia jej osiągnięć. Święto Towarzystwa jest też świętem jego organu, kwartalnika „Mechanika Teoretyczna i Stosowana”, który zdobył już sobie ugruntowaną poważną pozycję w środowisku naukowym.

Przy okazji Jubileuszu składam Polskiemu Towarzystwu Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej serdeczne życzenia dalszej owocnej działalności dla dobra mechaniki i rozwoju jej zastosowań.

Jerzy Mutermilch
czł. honorowy PTMTiS

Refleksje nad przyszłością PTMTiS

Jubileusz 25-lecia Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej jest, jak każdy jubileusz, dobrą okazją do refleksji nad przebytą drogą i przyszłością Jubilata. Nie pretendując do nieomyślności i nie mając zamiaru wyrażania Zarządu Towarzystwa

w jego funkcjach chciałbym jedynie przedstawić swoje przemyślenia i poglądy, być może kontrowersyjne. Wydaje się jednak, że tylko taka kontrowersyjność jest warta przedstawienia, gdyż stymuluje krytyczne odruchy i daje impuls do zmian niezbędnych w życiu każdego organizmu.

Zacznijmy przede wszystkim od kwestii, czy zmiany są potrzebne, a jeśli tak to jakie. Jest faktem, że Towarzystwo nasze, którego głównym celem miała i powinna być nadal integracja środowiska naukowego, stymulacja prac badawczych i krzewienie nowych idei, powstawało w odmiennych niż obecnie warunkach. W szczególności ówczesne środowisko naukowe było conajmniej kilkakrotnie mniej liczne, niż obecnie, umożliwiając tym samym łatwość bezpośrednich kontaktów oraz lepsze niż obecnie rozeznanie w tematyce prac naukowych poszczególnych ośrodków. Ponadto między placówkami naukowymi Uczelni a jednostkami gospodarki albo nie było w ogóle barier, albo jeśli były to ich przekroczenie nie sprawiało trudności. Podkreślam to, gdyż w moim przekonaniu między nauką i praktyką musi istnieć sprzężenie zwrotne korzystne dla obojgu partnerów. Z jednej bowiem strony sprzężenie to umożliwia łagodzenie bolączek przemysłu przez naukę występującą w charakterze „lekarza”, z drugiej strony daje naukowcom punkt wyjścia do formułowania problemów o charakterze poznawczym, wykraczających poza konkretne bolączki. W chwili obecnej mamy do czynienia z barierami przepisów jak wprowadzone w 1968 roku odcięcie szkolnictwa od przemysłu, bądź z barierami organizacyjnymi. W rezultacie tego środowisko zarówno naukowców jak i potencjalnych naukowców, w szczególności pracowników instytutów resortowych i ośrodków badawczo-rozwojowych jest ściśle zdeintegrowane. Szczególnie ta ostatnia grupa potencjalnych naukowców jest moim zdaniem bardzo odseparowana, chociaż jej techniczne możliwości działania nie ustępują, a niejednokrotnie przewyższają możliwości Uczelni. Wreszcie nie bez znaczenia są zmiany jakie nastąpiły w psychice środowiska naukowego. Nie idealizując sytuacji sprzed ćwierćwiecza stwierdzam jedynie, że ówczesny stopień zaangażowania i wiary w celowość pracy były zdecydowanie większe niż obecnie. Widowym objawem tego są między innymi prace doktorskie i habilitacyjne, których poziom, przeciętnie biorąc, uległ wyraźnemu obniżeniu i których motywacja wypływa często raczej z chęci spełnienia kryteriów wymaganych przez ustawę o szkolnictwie wyższym aniżeli z przesłanek merytorycznych.

Te obiektywnie zmienione okoliczności powodują, że Towarzystwo nasze znajduje się, jak i wiele innych stowarzyszeń, w sytuacji znacznie trudniejszej niż poprzednio. Na skutek tego tradycyjne i sprawdzone w poprzednich warunkach pod względem efektywności formy działania Towarzystwa powinny być zmodyfikowane. Generalnie biorąc, należy zastanowić się co zrobić, aby Towarzystwo odtworzyło swą poprzednią rolę rzeczywistego forum wymiany poglądów i dyskusji naukowej.

Dla spełnienia tego zasadniczego celu wydaje się celowe:

- a) rozszerzenie bazy działania Towarzystwa przez szersze niż dotąd wciągnięcie do współpracy stojącej obecnie na uboczu grupy ludzi zatrudnionych poza uczelniami,
- b) upowszechnienie wśród członków Towarzystwa znajomości kłopotów, czy zagadnień nurtujących środowisko inżynierskie,
- c) nie negując istotnej roli zebrań Towarzystwa jako forum dyskusji nad pracami już zakończonymi, warto by się jednak pokusić nad szerszym wprowadzeniem referatów

typu przeglądowego, relacjonujących nie tylko stan wiedzy obecnej lecz także formułujących problemy, których rozwiązanie jest pożądane. Ten ostatni element mógłby odegrać istotną rolę jako stymulator działania zwłaszcza młodych pracowników naukowych.

Wymienione punkty nie wyczerpują wszystkich możliwości w kierunku uaktywnienia naszej działalności. Dodatkowym niezbędnym jednak warunkiem jest odtworzenie większej regularności działania naszych ogniw terenowych i narzucenie sobie pewnej dyscypliny. Nie trzeba bowiem zapewniać, że o ostatecznym efekcie pracy decyduje wytrwałość.

Kończąc swoją wypowiedź przepraszam, jeśli mimo woli kogoś uraziłem, proszę mi jednak wierzyć, że uwagi moje sformułowałem mając na widoku jedynie dobro Towarzystwa.

Zbigniew Brzoska

POWSTANIE I DZIAŁALNOŚĆ MIĘDZYNARODOWEGO CENTRUM NAUK MECHANICZNYCH W UDINE (CISM)¹⁾

WITOLD NOWACKI

PAN

Na tym miejscu opiszę inicjatywę naukowo-organizacyjną w wielkim stylu, mianowicie powołanie Międzynarodowego Centrum Nauk Mechanicznych (Centre Internationale des Sciences Mecaniques) w Udine, zwanego w skrócie CISM. Geneza CISM wiąże się z konferencją naukową zorganizowaną w 1959 roku przez Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa w Krynicy. Wśród delegatów zagranicznych poznałem wówczas prof. Luigi Sobrero, dyrektora Instytutu Mechaniki z Uniwersytetu w Trieście, który reprezentował włoskie Stowarzyszenie Inżynierów Cywilnych.

Była to osobowość niezwykła. Oto garść faktów z jego życia. Urodzony w Turynie w 1909 roku, ukończył dwa wydziały: Inżynierii Lądowej oraz Fizyki i Chemii. Był asystentem wybitnego mechanika T. Levi-civita na uniwersytecie w Rzymie. Karierę naukową rozpoczął od profesury w Rio de Janeiro, gdzie wykładał mechanikę racjonalną. Po powrocie do kraju w 1942 r. został profesorem inżynierii elektrycznej i chemicznej Uniwersytetu w Cagliari. Od 1946 roku był profesorem mechaniki racjonalnej w Uniwersytecie w Triście. W Rio de Janeiro opublikował monografię „Teoria sprężystości” w języku portugalskim, tłumaczoną później na język angielski w Stanach Zjednoczonych Ameryki Półn. Wydał traktat o maszynach termicznych i hydraulicznych. Ważną publikacją była monografia elektromagnetyzmu. Prace jego z teorii sprężystości miały doniosłe znaczenie, zaś zastosowanie hyperanalitycznych funkcji i uogólnionego wektora typu Galerkina w teorii sprężystości są szeroko znane. Na uwagę zasługują jego badania w dziedzinie fotosprężystości i nomografii. Zasłynął wreszcie we Włoszech jako konstruktor śmiałych powłok cienkościennych. Był doradcą mediolańskiej firmy budowlanej „Volte Sottili s.p.a.”. Wszechstronnie uzdolniony i wykształcony, czynił wrażenie twórcy z epoki Odrodzenia.

Na konferencji w Krynicy omawialiśmy możliwość zorganizowania Międzynarodowego Centrum Nauk Mechanicznych w Polsce, czy też w innym kraju. Dyskutowaliśmy w gronie: Luigi Sobrero, Zbigniew Wasiułyński i ja. Chodziło tu pierwotnie o powołanie takiej instytucji, w której mogliby się spotykać wybitni uczeni z różnych krajów i w spo-koju prowadzić badania oraz doskonalić młodą kadrę naukową (doktorantów).

¹⁾ Jest to fragment z moich „Materiałów Autobiograficznych (w druku PWN).

Prof. Sobrero zapalił się do tej propozycji i po powrocie do Włoch rozpoczął rozmowy z działaczami państwowymi i komunalnymi. Uzyskał przychylność władz komunalnych regionu Trieste, Friuli i Gulia-Venezia. Proponowano najpierw umieszczenie Centrum w Villa Manin. Był to dawny pałac letni dożów weneckich, w miejscowości Campofornio, w której Napoleon podpisał pokój z Austriakami w roku 1797. Jednak ten wariant odpadł. Również i propozycje umiejscowienia Centrum w pałacu Fortuna w Wenecji okazały się nierealne. Ostatecznie zdecydowano się na ulokowanie Centrum w Udine, którego władze miejskie dały do dyspozycji pałac del Torso i sąsiednią willę.

Mając zapewnione locum można było przystąpić do prac organizacyjnych. Powołano międzynarodowy komitet promotorów w składzie: prof. Luigi Broglio z Rzymu, prof. Matteo Decleva (prawnik) i prof. Luigi Sobrero z Triestu, prof. Witold Nowacki i prof. Wacław Olszak z Polski, prof. D. Onicescu z Rumunii, prof. Julios Palacios z Madrytu (prezes Królewskiej Akademii Nauk) oraz prof. H. Schaefer z Braunschweigu (RFN).

Komitet ten działał w wymienionym składzie przez kilka lat. W 1967 roku zebrał się na zaproszenie PAN w Jabłonie. W czasie kilkudniowych obrad (6-8 czerwca) zostały przyjęte podstawowe dokumenty Centrum: statut, struktura organizacyjna, zasady i źródła finansowania. W 1969 roku Centrum zostało formalnie powołane.

Pewnej modyfikacji w stosunku do pierwotnego projektu uległo sformułowanie celów Centrum: głównym jego zadaniem miało być podnoszenie kwalifikacji naukowych młodych pracowników nauki poprzez organizowanie szkół letnich i sympozjów naukowych. Ważnym zadaniem miało być doksztalcanie kadr dla krajów rozwijających się. Centrum miało służyć całej międzynarodowej społeczności naukowej mechaników, bez różnic państwowych i narodowościowych.

Przy tworzeniu CISM prof. Sobrero wspaniale wygrał ambicje miasta Udine. Od wielu bowiem lat Udine bezskutecznie starało się o utworzenie filii uniwersytetu z Triestu, względnie z Padwy. W tej sytuacji chwyciło hasło Sobrero: my wam dajemy „superuniversita” w postaci instytutu międzynarodowego, wy nam dajecie lokal i pieniądze. Na budżet CISM składały się dotacje regionu w Trieste, z prowincji Friuli, dotacja miejska z Udine, dotacja UNESCO i kilka dotacji pomniejszych (jak np. kasy oszczędnościowej w Udine itd.). Do tego dochodziły dotacje Akademii (i tak PAN płaci 15 tys. dolarów rocznie, ale wpłacanych w złotówkach) i uniwersytetów (również po 15 tys. dolarów). Do tego dochodziły dotacje jednorazowe. I tak np. Fundacja Volkswagena zakupiła dla CISM duży komputer.

Instytut został wspaniale wyposażony. Sale wykładowe miały komplet rzutników, urządzenia slajdowe, kabiny tłumaczy itd. Stworzona została najnowocześniejsza baza poligraficzna dla druku preprintów a później książek. Centrum posiada poważną bibliotekę, ostatnio wzbogaconą zapisem biblioteki prywatnej prof. W. Pragera. Wykłady były wysoko opłacane, po 80\$ za godzinę. Mieściło się w tej sumie honorarium za skrypt wykładowy, który trzeba było obowiązkowo dostarczyć na kilka miesięcy przed wykładami.

Pracami CISM do 1978 roku kierował prof. Sobrero. Robił to z całym oddaniem, talentem i zrecznością. Stroną merytoryczną: przygotowanie programu kursów, szkół letnich i sympozjów należało do prof. Olszaka, rektora CISM. Kierował on działalnością naukową Centrum przez 12 lat. Jego odejście było dla CISM wielką stratą. Obecnie obo-

wiązki sekretarza CISM pełni prof. G. Bianchi z Politechniki w Mediolanie. Rektorem wybrano na dwa lata prof. W. Koitera, byłego prezesa IUTAM. Obecnie rektorem jest prof. A. Sawczuk. Raz do roku odbywa się zebranie Rady Naukowej, które zatwierdza program prac CISM i przyjmuje sprawozdania. Od początku działalności CISM uczestniczyłem w obradach Rady Naukowej.

CISM organizował dwie sesje wykładowe: pierwszą w czerwcu i lipcu, drugą we wrześniu i październiku. Podam kilka danych z lat 1969 - 1979, charakteryzujących działalność Centrum. W tym dziesięcioleciu wykładało 474 profesorów (wywodzących się z 30 krajów), na 572 szkołach letnich i kursach. Ilość słuchaczy w tym okresie wyniosła 2610 osób rekrutujących się z 69 krajów. Długa jest lista wykładów organizowanych dla pracowników naukowych trzeciego świata, głównie z Ameryki Południowej. Liczne były również sympozja (ok. 40) organizowane przez CISM w dekadzie 1969 - 1979.

Bogaty jest dorobek wydawniczy: 140 skryptów i monografii z najnowszych dziedzin mechaniki drukowanych w Udine i rozpowszechnianych w świecie przez znaną firmę J. Springer Verlag, Wien.

Dodać należy, że CISM jest organizacją afiliowaną do IUTAM (Międzynarodowa Unia Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej).

Na czele CISM stoi Vinizio Turello, adwokat z Udine. Był przez wiele lat przewodniczącym prowincji Friuli (jak gdyby wojewodą). W CISM sprawował jednocześnie stanowisko przewodniczącego Rady Administracyjnej. W rękach swych trzymał finanse.

Opiszę teraz mój udział w pracach merytorycznych CISM. Brałem udział w zorganizowaniu szeregu szkół letnich jako ich inicjator i koordynator.

W roku 1970 przygotowaliśmy wspólnie z prof. C. A. Eringenem, prof. R. Stojanovicem i prof. M. Sokołowskim szkołę letnią na temat „Mikropolarnej teorii sprężystości”. Mieliśmy 19 słuchaczy, głównie z Europy. Tematem wykładów była liniowa i nieliniowa teoria ośrodków Cosseratowskich oraz teorii uproszczonej R. D. Mindlina. Z tej okazji wyszły u J. Springera moje wykłady w postaci związanej monografii „Theory of micropolar elasticity” CISM — courses and lectures No 25, J. Springer, Verlag Wien 1970.

W roku 1971 zorganizowaliśmy grupę wykładów z termosprężystości, prowadzonych przez ludzi aktywnych, twórczych w rozwoju tej dziedziny. W skład tej grupy wchodził prof. C. A. Eringen, R. D. Mindlin, H. Parkus, J. N. Sneddon, R. Stojanovic i ja. Mieliśmy do dyspozycji 50 godzin wykładowych. Ja przedstawiłem 18-godzinny wykład „Dynamic problems of thermoelasticity”.

W 1974 roku w ramach grupy międzynarodowej: prof. G. Eason, I. N. Sneddon, Z. Olesiak i ja, przygotowaliśmy szkołę letnią pt. „Integral transformes in solid mechanics”. Wykłady moje ukazały się w zbiorze „Applications of integral transformes in the Theory of Elasticity” CISM — courses and lectures, No 220, J. Springer Verlag, Wien 1975.

W roku 1975, z inicjatywy prof. J. Mandel'a z Ecole Polytechnique w Paryżu, odbyła się szkoła letnia zatytułowana „Propagation of Elastic and Inelastic Waves”. Wzięli w niej udział prof. J. Mandel, H. Kolsky, W. Nowacki, P. Perzyna, L. Brun oraz docenci: W. K. Nowacki, B. Raniecki. Moje wykłady dotyczyły propagacji fal mikropolarnych. Ukazały się one w książce „Mechanical Waves in Solids” CISM — courses and lectures No 202, J. Springer Verlag, Wien 1975.

Wreszcie w 1977 roku brałem udział w szkole letniej organizowanej przez prof. H. Parkusa z Technicznego Uniwersytetu w Wiedniu. Przedmiotem wykładów były efekty elektromagnetyczne w ciałach stałych odkształcalnych. Grupa wykładowców była liczna: prof. prof. H. Parkus, K. Hutter, J. B. Alblas, G. A. Maugin, W. Nowacki, A. Precht. Moje wykłady dotyczyły liniowej piezoelektryczności i magnetotermosprężystości. Ukazały się w książce „Electromagnetic Interactions in Elastic Solids”, CISM courses and lectures No 257, J. Springer Verlag, 1979.

W roku 1972 wspólnie z Olszakiem zorganizowaliśmy sympozjum poświęcone zagadnieniom teorii niesymetrycznej sprężystości. Referaty generalne tego sympozjum ukazały się we wspólnie z Olszakiem wydanej książce „Micropolar Elasticity”. Zawierała ona referaty prof. prof. G. Grioli'ego, R. Stojanovic'a, W. Nowackiego i Cz. Woźniaka. Książka ta została wydana przez CISM w Udine w 1974 roku jako pozycja nr. 151.

W 1974 roku współorganizowałem, również z prof. Olszakiem, sympozjum „Thermomechanics of Solids”. Celem tego sympozjum było przedyskutowanie dalszych tendencji rozwojowych termosprężystości. Z okazji tego sympozjum wspólnie z prof. Olszakiem wydaliśmy zbiór referatów generalnych „Termomechanics of Solids” No 223, Udine 1976.

W uznaniu wielkich zasług prof. Luigi Sobrero dla nauki i CISM, jego koledzy i przyjaciele wydali tom „Topics in Contemporary Mechanics”. W tym zbiorze umieściłem pracę „On the Galerkin Vectors for the Micropolar Elasticity”, w której uogólniłem znaną metodę prof. Sobrero z klasycznej teorii sprężystości na mikropolarną.

W okresach trwania szkół letnich i sympozjów spotkać można było w Udine wielu wybitnych uczonych. Słuchacze mieszkali w Domu Studenckim oraz w konwiktie seminarium duchownego. Profesorowie umieszczano zazwyczaj w hotelu „Astoria Italia”, położonym o 3 minuty drogi od Palazzo del Torso, siedziby CISM. Dyskusje przenosiły się z sal wykładowych do hoteli.

Znaczenie CISM dla rozwoju mechaniki teoretycznej i stosowanej było, i jest nadal, bardzo poważne. Powstało forum dyskusyjne, platforma spotkań wybitnych twórców współczesnych dziedzin mechaniki i młodzieży naukowej z całego świata. Powstała platforma spotkań uczonych ze Wschodu i Zachodu, nawiązane zostały liczne znajomości i przyjaźnie. Rozwinęła się rzeczywista współpraca naukowa uczonych, bez względu na ich narodowość i przekonania polityczne.

Praca została złożona w Redakcji dnia 13 czerwca 1983 roku.

O STOSOWANIU NIEPROSTOKĄTNYCH ELEMENTÓW CZASOPRZESTRZENNYCH

ZBIGNIEW KĄCZKOWSKI

Warszawa

*Praca napisana na jubileusz XXV-lecia Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej
i Stosowanej*

1. Wstęp

W dotychczasowych pracach poświęconych metodzie Skończonych Elementów Czasoprzestrzennych (SKECZ) przyjmowano, że podział konstrukcji na elementy w przestrzeni trójwymiarowej jest ustalony, a każdy z elementów czasoprzestrzennych obejmuje wycinek czasoprzestrzeni rozpięty na obszarze odpowiedniego elementu przestrzennego i ograniczony dwiema kolejnymi chwilami. Założenie to doprowadziło do algorytmów (por. KĄCZKOWSKI [1 - 3]) podobnych do tych, do jakich dochodzi się przy stosowaniu innych metod bezpośredniego całkowania numerycznego równań ruchu (por. BATHE, WILSON [4]).

Jednakże stosowanie w metodzie SKECZ wyłącznie takich, szczególnego typu elementów, które skrótowo nazywać będziemy elementami prostokątnymi, jest istotnym ograniczeniem możliwości kryjących się w obmyślonej przez nas metodzie. Stąd zarówno praca autora, [3], o „ogólnym sformułowaniu” metody SKECZ jak i praca KĄCZKOWSKIEGO i LANGERA, [5], o „syntezie metody” odnoszą się de facto do szczególnej odmiany metody SKECZ, bazującej na czasoprzestrzennych elementach prostokątnych.

W pracy niniejszej wskażemy podstawowe zalety stosowania nieprostokątnych elementów czasoprzestrzennych. Ponieważ zaś rozpatrywane tu zadania będą się odnosiły do ustrojów prętowych, przeto ich elementy czasoprzestrzenne będą miały formę trójkątów. Uogólnienie rozważań na ustroje powierzchniowe wymagałoby wprowadzenia elementów czasoprzestrzennych o formie ostrosłupa, a w przypadku rozpatrywania ciał trójwymiarowych trzeba będzie budować hiperostrosłupy czterowymiarowe.

2. Drgania poprzeczne struny wywołane przesuującą się siłą

W pracy [1] zajmowaliśmy się nietłumionymi drganiami struny, której ruch można opisać następującym układem równań macierzowych:

$$(2.1) \quad \mathbf{s} = \partial w, \quad \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E}\mathbf{s}, \quad \partial^T \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{p} = 0,$$

w których jest¹⁾

$$(2.2) \quad \varepsilon = \{\varphi_x, \varphi_t\}, \quad \sigma = \{Q_x, Q_t\}, \quad \partial = \left\{ \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial t} \right\},$$

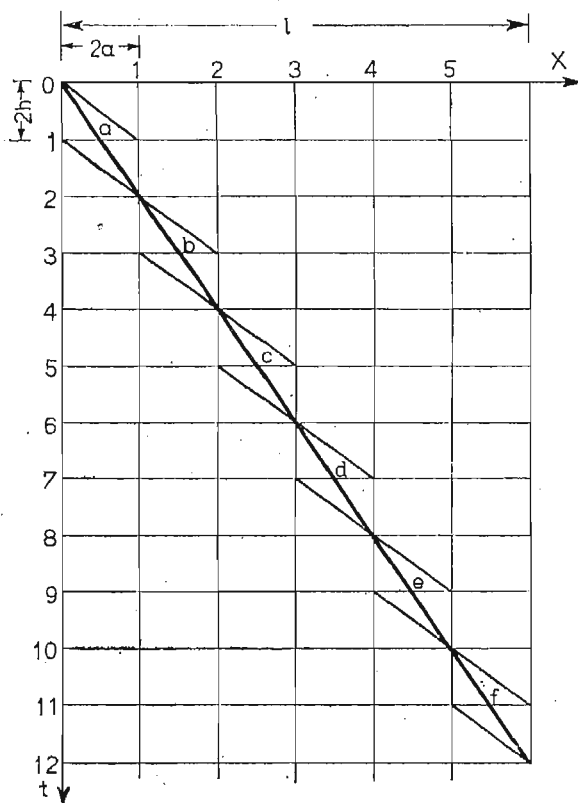
$$(2.3) \quad E = [N_x, -\mu].$$

We wzorach tych oznaczają: φ_x — kąt nachylenia struny odkształconej do osi poziomej x , φ_t — prędkość przemieszczeń pionowych, μ — masę przypadającą na jednostkę długości struny, N_x i Q_x — składowe poziomą i pionową siły naciągu struny, Q_t — pęd masy μ ze znakiem ujemnym, $p = p(x, t)$ — obciążenie poprzeczne struny.

W cytowanej pracy [1] znaleźliśmy metodą SKECZ rozwiązanie następującego zadania. Wzdłuż struny ze stałą prędkością, równą połowie prędkości c rozchodzenia się fali poprzecznej,

$$(2.4) \quad c = \sqrt{N_x/\mu},$$

przesuwała się stała, bezmasowa siła P . Uzyskane rozwiązanie było obarczone błędem, wynikającym z zastosowania wyłącznie prostokątnych elementów czasoprzestrzennych. Funkcja kształtu elementu czasoprzestrzennego nie mogła bowiem uwzględnić załamania linii ugięcia struny, występującego w miejscu przyłożenia siły skupionej.



Rys. 1. Podział obszaru czasoprzestrzennego na elementy w przypadku przesuwającej się siły

¹⁾ W klamry $\{ \}$, $[\]$ ujmujemy macierze odpowiednio: jednokolumnowe i diagonalne.

Nic nie stoi jednak na przeszkodzie takiemu podzieleniu obszaru czasoprzestrzennego, aby punkt przyłożenia siły znajdował się stale na linii oddzielającej od siebie dwa elementy czasoprzestrzenne (rys. 1).

W sąsiedztwie siły pojawiają się więc elementy trójkątne trojakięgo rodzaju, pokazane na rys. 2. Ich macierze sztywności znajdujemy w sposób typowy, opisany m.in. w monografii ZIENKIEWICZA [6]. Macierze kształtu przyjęliśmy w postaci:

$$(2.5) \quad \begin{aligned} N_a &= \left[1 - \frac{x}{2a} - \frac{t}{2h}, \frac{x}{2a}, \frac{t}{2h} \right], \\ N_b &= \left[1 - \frac{x}{a} - \frac{t}{2h}, \frac{x}{a}, \frac{t}{2h} \right], \\ N_c &= \left[1 - \frac{x}{a} + \frac{t}{2h}, \frac{x}{a} - \frac{t}{h}, \frac{t}{2h} \right]. \end{aligned}$$

Po wykonaniu na tych macierzach operacji

$$(2.6) \quad B_e = \partial N_e, \quad e = a, b, c,$$

otrzymujemy:

$$(2.7) \quad B_a = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2a} & \frac{1}{2a} & 0 \\ -\frac{1}{2h} & 0 & \frac{1}{2h} \end{bmatrix}, \quad B_b = \begin{bmatrix} -\frac{1}{a} & \frac{1}{a} & 0 \\ -\frac{1}{2h} & 0 & \frac{1}{2h} \end{bmatrix}, \quad B_c = \begin{bmatrix} -\frac{1}{a} & \frac{1}{a} & 0 \\ \frac{1}{2h} & -\frac{1}{h} & \frac{1}{2h} \end{bmatrix}$$

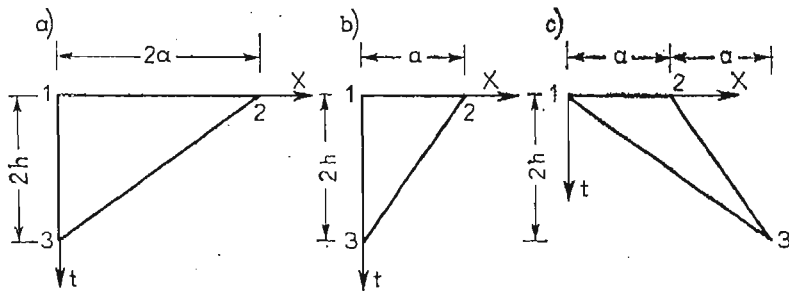
Macierze sztywności znajdujemy na podstawie ogólnego wzoru

$$(2.8) \quad K_e = \int_{\Omega} B^T E B d\Omega.$$

otrzymując dla

$$(2.9) \quad \lambda = \frac{a}{hc} = 1,$$

kolejno:



Rys. 3. Element czasoprzestrzenny masy skupionej

$$\begin{aligned}
 (2.10) \quad K_a &= \frac{N_x h}{2a} \begin{bmatrix} 1 - \lambda^2 & -1 & \lambda^2 \\ -1 & 1 & 0 \\ \lambda^2 & 0 & -\lambda^2 \end{bmatrix} = \frac{N_x}{2c} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \\
 K_b &= \frac{N_x h}{4a} \begin{bmatrix} 4 - \lambda^2 & -4 & \lambda^2 \\ -4 & 4 & 0 \\ \lambda^2 & 0 & -\lambda^2 \end{bmatrix} = \frac{N_x}{4c} \begin{bmatrix} 3 & -4 & 1 \\ -4 & 4 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \\
 K_c &= \frac{N_x h}{4a} \begin{bmatrix} 4 - \lambda^2 & -4 + 2\lambda^2 & -\lambda^2 \\ -4 + 2\lambda^2 & 4 - 4\lambda^2 & 2\lambda^2 \\ -\lambda^2 & 2\lambda^2 & -\lambda^2 \end{bmatrix} = \frac{N_x}{4c} \begin{bmatrix} 3 & -2 & -1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 2 & -1 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

Macierz sztywności elementu prostokątnego wyprowadziliśmy w pracy [1]:

$$\begin{aligned}
 (2.11) \quad K_e &= \frac{N_x h}{6a} \begin{bmatrix} 2 - 2\lambda^2 & -2 - \lambda^2 & 1 + 2\lambda^2 & -1 + \lambda^2 \\ -2 - \lambda^2 & 2 - 2\lambda^2 & -1 + \lambda^2 & 1 + 2\lambda^2 \\ 1 + 2\lambda^2 & -1 + \lambda^2 & 2 - 2\lambda^2 & -2 - \lambda^2 \\ -1 + \lambda^2 & 1 + 2\lambda^2 & -2 - \lambda^2 & 2 - 2\lambda^2 \end{bmatrix} = \\
 &= \frac{N_x}{2c} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

Globalny układ równań metody SKECZ zapiszemy w postaci:

$$(2.12) \quad \begin{bmatrix} K^{00} & K^{01} & & & & & \\ K^{10} & K^{11} & K^{12} & & & & \\ & & & & & & \\ & & K^{21} & K^{22} & K^{23} & & \\ & & & & & & \\ & & & K^{32} & K^{33} & K^{34} & \\ & & & & & & \\ & & & & & & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w^0 \\ w^1 \\ w^2 \\ w^3 \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F^0 \\ F^1 \\ F^2 \\ F^3 \\ \dots \end{bmatrix}.$$

Na podwektory w^s (F^s) składają się wszystkie przemieszczenia (impulsy) występujące w chwili s . Podwektory o numerach parzystych ($s = 0, 2, 4, \dots$) zawierają więc po pięć składowych $w_i^s(F_i^s)$, ($i = 1, 2, 3, 4, 5$), a podwektory o numerach nieparzystych — po sześć składowych. Np.:

$$\begin{aligned}
 (2.13) \quad w^1 &= \{w_a^1, w_1^1, w_2^1, w_3^1, w_4^1, w_5^1\}, \\
 w^3 &= \{w_1^3, w_b^3, w_2^3, w_3^3, w_4^3, w_5^3\}, \dots
 \end{aligned}$$

W związku z tym podukłady równań o numerach parzystych ($s = 0, 2, 4, \dots$) składają się z pięciu równań o sześciu nowych niewiadomych w chwilach $s+1 = 1, 3, 5, \dots$, a podukłady równań o nieparzystych numerach składają się z sześciu równań zawierających po pięć nowych niewiadomych, składowych wektorów w^s ($s = 2, 4, 6 \dots$).

Dlatego też, chcąc dojść do wzorów rekurencyjnych należy układ (2.12) podzielić na podukłady w sposób oznaczony liniami przerywanymi. Każdy z owych podukładów będzie zawierał po 11 równań z 11 niewiadomymi. Ogólna postać takiego podukładu będzie następująca:

$$(2.14) \quad J^{2r, 2r-1} W^{2r-1} + J^{2r, 2r+1} W^{2r+1} = G^{2r}, \quad r = 1, 2, 3, \dots$$

przy czym jest:

$$(2.15) \quad J^{2r, 2r-1} = \begin{bmatrix} K^{2r, 2r-1} & K^{2r, 2r} \\ 0 & K^{2r+1, 2r} \end{bmatrix},$$

$$J^{2r, 2r+1} = \begin{bmatrix} K^{2r, 2r+1} & 0 \\ K^{2r+1, 2r+1} & K^{2r+1, 2r+2} \end{bmatrix},$$

$$(2.16) \quad W^{2r-1} = \begin{bmatrix} w^{2r-1} \\ w^{2r} \end{bmatrix}, \quad W^{2r+1} = \begin{bmatrix} w^{2r+1} \\ w^{2r+2} \end{bmatrix}, \quad G^{2r} = \begin{bmatrix} F^{2r} \\ F^{2r+1} \end{bmatrix}.$$

Na podstawie równania (2.14) otrzymujemy następujący wzór rekurencyjny:

$$(2.17) \quad W^{2r+1} = (J^{2r, 2r+1})^{-1} (G^{2r} - J^{2r, 2r-1} W^{2r-1}),$$

obowiązujący również dla $r = 0$ przy podstawieniu

$$(2.17) \quad W^{-1} = \begin{bmatrix} 0 \\ w^0 \end{bmatrix}.$$

Co się tyczy obciążeń zewnętrznych, to występują one w postaci impulsów $2Ph$ w węzłach znajdujących się na linii działania siły. Mamy zatem:

$$(2.18) \quad F^0 = \{0, 0, 0, 0, 0\}, \quad F^1 = \{2Ph, 0, 0, 0, 0\},$$

$$F^2 = \{2Ph, 0, 0, 0, 0\}, \quad F^3 = \{0, 2Ph, 0, 0, 0\}, \text{ itd.}$$

W rezultacie prostych obliczeń otrzymujemy kolejno rzędne przemieszczeń zestawione w tablicy 1. Wszystkie zawarte w tej tablicy liczby należy pomnożyć przez wspólny czynnik

$$(2.19) \quad \gamma = \frac{2}{3} \frac{Pa}{N_x}.$$

Tablica 1. Przemieszczenia struny wywołane przesuwaniem się siły bezmasowej

$$\text{Mnożnik: } \gamma = \frac{2}{3} \frac{Pa}{N_x}$$

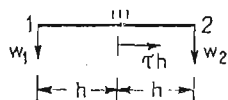
$s \backslash i$	a	1	b	2	c	3	d	4	e	5	f
0		0		0		0		0		0	
1	1	0		0		0		0		0	
2		2		0		0		0		0	
3		2	3	2		0		0		0	
4		2		4		2		0		0	
5		2		4	5	4		2		0	
6		2		4		6		4		2	
7		2		4		6	7	6		4	
8		2		4		6		8		4	
9		2		4		6		6	6	4	
10		2		4		4		4		4	
11		2		2		2		2		2	2
12		0		0		0		0		0	

Należy podkreślić, że zastosowanie trójkątnych elementów czasoprzestrzennych pozwoliło nam w tym przypadku uzyskać wynik ścisły, co przy stosowaniu elementów prostokątnych było niemożliwe.

Tok obliczeń nie uległby istotnym zmianom, gdybyśmy założyli, że siła $P = mg$ jest ciężarem masy m przesuwaną się wzdłuż struny. Na linii przesuwania się tej masy (rys. 1) należałoby tylko założyć istnienie dodatkowych jednowymiarowych elementów czasoprzestrzennych. W zagadnieniach statyki podobne elementy wprowadza się w miejscu występowania zębów usztywniających konstrukcję powierzchniową.

Założmy, że macierz kształtu elementu przedstawionego na rys. 3 wyraża się następująco:

$$(2.20) \quad N = \frac{1}{2}[1 - \tau, 1 + \tau].$$



Rys. 2. Czasoprzestrzenne elementy trójkątne

Dalej znajdujemy kolejno:

$$(2.21) \quad B = \frac{d}{dt} N = \frac{1}{2h} [-1, 1],$$

$$(2.22) \quad K_e = \int_{-1}^1 B^T (-m) B h d\tau = \frac{m}{2h} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}.$$

Przy założeniu

$$(2.23) \quad m = 2\mu a,$$

i wykorzystaniu związków (2.4) i (2.9), otrzymujemy

$$(2.24) \quad K_e = \frac{N_x}{c} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}.$$

Tablica 2. Przemieszczenia struny wywołane przesuwanem się masy skupionej

$$\text{Mnożnik: } \gamma = \frac{2}{3} \frac{mga}{N_x}$$

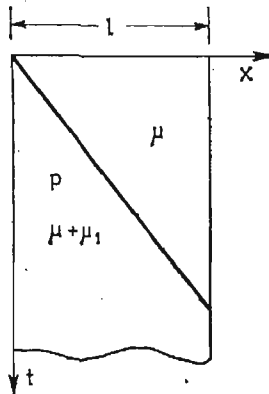
$s \backslash i$	a	1	b	2	c	3	d	4	e	5	f
0		0		0		0		0		0	
1	1	0		0		0		0		0	
2		2		0		0		0		0	
3		2	3	2		0		0		0	
4		2		4		2		0		0	
5		2		4	5	4		2		0	
6		2		4		6		4		2	
7		2		4		6	7	6		4	
8		2		4		6		8		4	
9		2		4		6		8	7	4	
10		2		4		6		4		6	
11		2		4		2		4		4	3
12		2		0		2		2		0	

Tabl. 2 zawiera zestawienie rzędnych ugięcia wywołanych opisanym obciążeniem inercyjnym. Zjawisko przebiega początkowo identycznie jak w przypadku przesuwania się siły bezmasowej. Dopiero od momentu spotkania się przesuwającej masy z falą odbitą, co następuje w chwili $s = 8$, przebieg drgań ulega zaburzeniu.

3. Drgania struny o zmiennej masie

W przypadku przesuwania się wzdłuż struny inercyjnego obciążenia ciągłego o masie μ_1 masa drgająca struny μ przed frontem obciążenia będzie mniejsza niż łączna masa $\mu + \mu_1$ przypadająca na jednostkę długości struny obciążonej (rys. 4). Ponadto w obszarze obciążonym działać będą równomiernie rozłożone siły $p = \mu_1 g$. Wobec zwiększenia się masy właściwej struny, w odpowiedniej jej części prędkość rozchodzenia się fal poprzecznych będzie odpowiednio mniejsza i wyniesie:

$$(3.1) \quad c_1 = \sqrt{\frac{N_x}{\mu + \mu_1}}$$



Rys. 4. Struna o zmieniającej się masie

Umożliwia to stosowne wydłużenie kroku całkowania po czasie, który to krok najlepiej przyjąć, podobnie jak w części nieobciążonej, na podstawie wzoru:

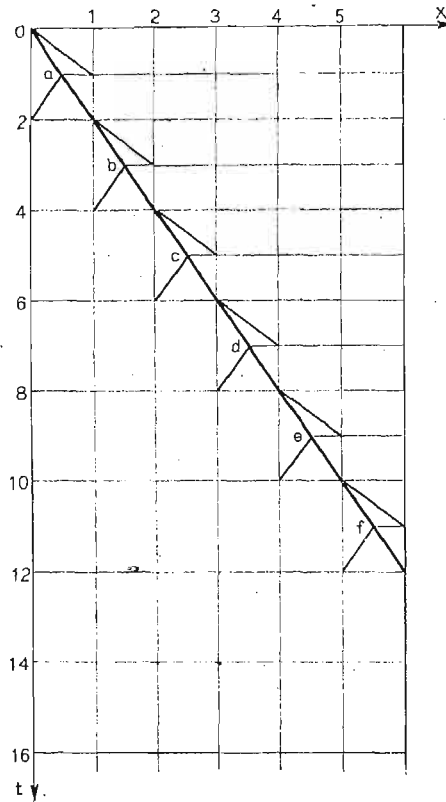
$$(3.2) \quad h_1 = a/c_1.$$

W strefie przejścia od struny obciążonej do nieobciążonej konieczne będzie zastosowanie czasoprzestrzennych elementów trójkątnych.

Założmy dla przykładu, że prędkość nasuwania się obciążenia będzie — podobnie jak w przykładach poprzednich — równa połowie prędkości c rozchodzenia się fali w strunie nieobciążonej. Niech ponadto przesuwająca się masa μ_1 będzie trzy razy większa od masy struny μ . Mamy wówczas:

$$(3.3) \quad \mu + \mu_1 = 4\mu, \quad c_1 = 1/2c, \quad h_1 = 2h,$$

a obszar czasoprzestrzenny dzielimy na elementy w sposób przedstawiony na rys. 5.



Rys. 5. Podział obszaru czasoprzestrzennego na elementy w przypadku przesuwającego się ciągłego obciążenia inercyjnego

Macierze sztywności elementów o masie 4μ , pokazanych na rys. 6 znajdujemy w sposób opisany wyżej. Mają one postać:

$$(3.4) \quad K_a = \frac{N_x}{c} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ -1 & 2 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad K_b = \frac{N_x}{c} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$K_c = \frac{N_x}{c} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Globalny układ równań dzielimy na podukłady tak, aby w każdym z nich liczba równań odpowiadała liczbie niewiadomych. Podukłady te mają następującą budowę:

$$(3.5) \quad \begin{aligned} K^{00}w^0 + K^{01}w^1 &= F^0, \\ K^{s,s-1}w^{s-1} + K^{s,s}w^s + K^{s,s+1}w^{s+1} &= F^s. \end{aligned}$$

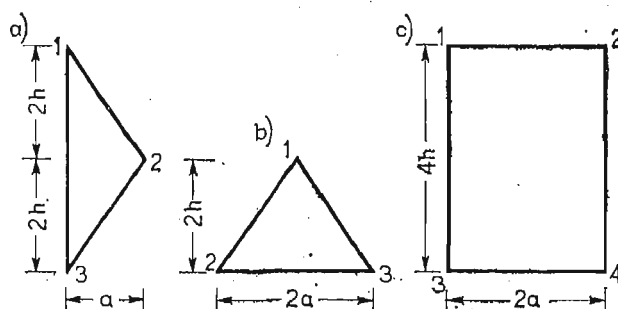
Występujące w nich podwektory mają składowe podane niżej:

$$(3.6) \quad \begin{aligned} w^s &= \{w_1^s, w_2^s, w_3^s, w_4^s, w_5^s\}, \quad s = 0, 1; \\ w^2 &= \{w_a^1, w_1^2, w_2^2, w_3^2, w_4^2, w_5^2\}, \\ w^3 &= \{w_2^3, w_3^3, w_4^3, w_5^3\}, \quad w^4 = \{w_1^4, w_b^3, w_2^4, w_3^4, w_4^4, w_5^4\}, \\ w^5 &= \{w_3^5, w_4^5, w_5^5\}, \quad w^6 = \{w_1^6, w_2^6, w_c^5, w_3^6, w_4^6, w_5^6\} \text{ itd.} \end{aligned}$$

Niewiadome te wyznaczamy z podukładów równań wyrażających warunki równowagi dynamicznej odpowiednich węzłów. I tak, chcąc uzyskać składowe podwektora w^1 korzystamy z warunków równowagi impulsów działających na węzły 1-5 w chwili $s = 0$, sześć składowych wektora w^2 wyznaczamy z sześciu równań równowagi węzłów w chwili $s = 1$, cztery składowe wektora w^3 — z czterech równań równowagi węzłów 2-5 w chwili $s = 2$, sześć składowych wektora w^4 — z sześciu równań odnoszących się do węzłów: 1 w chwili $s = 2$ oraz b i 2-5 w chwili $s = 3$ itd.

Równomiernie rozłożone obciążenie $p = 3\mu g$ zastępujemy impulsami skupionymi w węzłach elementów czasoprzestrzennych. W szczególności we wszystkich wierzchołkach elementów trójkątnych pokazanych na rys. 6a, b wystąpią impulsy wynoszące po $\frac{2}{3}pah$, a w węzłach elementu prostokątnego (rys. 6c) — impulsy $2pah$. Zatem podwektory F^s występujące w układzie (3.5) będą miały następujące składowe:

$$(3.7) \quad \begin{aligned} F^0 &= \{0, 0, 0, 0, 0\}, \quad F^1 = \{2, 0, 0, 0, 0, 0\} \frac{2}{3} pah, \\ F^2 &= \{0, 0, 0, 0\}, \quad F^3 = \{5, 2, 0, 0, 0, 0\} \frac{2}{3} pah, \\ F^4 &= \{0, 0, 0\}, \quad F^5 = \{11, 5, 2, 0, 0, 0\} \frac{2}{3} pah, \\ F^6 &= \{0, 0\}, \quad F^7 = \{12, 11, 5, 2, 0, 0\} \frac{2}{3} pah, \\ F^8 &= \{0\}, \quad F^9 = \{12, 12, 11, 5, 2, 0\} \frac{2}{3} pah, \\ F^{10} &= \{12, 12, 12, 11, 5, 2\} \frac{2}{3} pah \text{ itd.} \end{aligned}$$



Rys. 6. Elementy czasoprzestrzenne o masie 4μ

Tablica 3. Przesunięcia struny wywołane przesuwaniem się masy równomiernie rozłożonej

$$\text{Mnożnik: } \gamma = 2 \frac{\mu g a^2}{N_x}$$

$s \backslash i$	a	1	b	2	c	3	d	4	e	5	f
0		0		0		0		0		0	
1	2	0		0		0		0		0	
2		4		0		0		0		0	
3			6	4		0		0		0	
4		3,5		8		4		0		0	
5					10	8		4		0	
6		15		6,5		12		8		4	
7							14	12		8	
8		15		30		10		16		8	
9									6	8	
10		27		30,5		45		7,5		-4	
11											0
12		27,5		54		40		36		4	
14		39		49		57		48,5		51	
16		33,5		54		69,5		84		56,5	
18		27		66		93		89,5		45	
20		44,5		78		98		66		45	
22		63		88,5		63		65,5		33	
24		56		60		68		42		32,5	
26		8		47,5		51		47		21	
28		3,5		11		38,5		42		26,5	
30		15		6,5		14		30		33	
32		15		30		10		17		15,5	
34		27		30,5		45		7,5		-4	
36		27,5		54		40		36		4	

Wyniki obliczeń zestawiono w tabl. 3. Zauważmy, że w chwilach $s = 10$ i $s = 34$ rozpoczynają się identyczne cykle przesunięć. Wynika stąd, że podstawowy okres drgań struny o masie 4μ wynosi:

$$(3.8) \quad T = 24h_1 = 24 \frac{a}{c_1} = \frac{2l}{c_1},$$

a odpowiednia częstość kołowa:

$$(3.9) \quad \omega_1 = \frac{2\pi}{T} = \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{N_x}{4\mu}}.$$

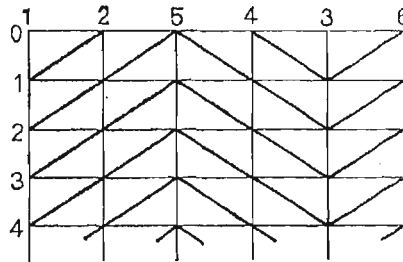
Jest to wynik ścisły.

4. Możliwości rozseparowania układu równań dynamiki

W znanych metodach bezpośredniego całkowania równań ruchu podstawową trudność stwarza konieczność wielokrotnego rozwiązywania dużych układów równań o liczbie niewiadomych równej liczbie stopni swobody całego układu. Jest to zwłaszcza kłopotliwe

wtedy, gdy wobec nieliniowości zagadnienia, macierze wymagające odwrócenia zmieniają się po każdym kroku całkowania i gdy trzeba stosować metodę iteracji. Jak dotąd, jedynie stosując metodę analizy modalnej można było problem całkowania cząstkowych równań różniczkowych ruchu sprowadzać do problemu rozwiązania układu niesprzężonych, zwyczajnych równań różniczkowych. Metoda ta wymaga jednak uprzedniego wyznaczenia wartości własnych i odpowiadających im — funkcji lub wektorów własnych.

Okazuje się że podobny efekt można uzyskać metodą SKECZ bez potrzeby przeprowadzania wprzód kłopotliwej rachunkowo analizy modalnej. Wystarczy każdy z czasoprzestrzennych elementów prostokątnych stosowanych w przypadku stacjonarnego podziału konstrukcji prętowej na elementy podzielić przekątną na dwa elementy trójkątne.



Rys. 7. Podział obszaru czasoprzestrzennego prowadzący do rozseparowania układu równań

Na rys. 7 przedstawiliśmy przykładowy podział obszaru czasoprzestrzennego na elementy trójkątne oraz ponumerowaliśmy węzły zgodnie z kolejnością, w jakiej należy wykonywać obliczenia. Numeracja ta została ustalona w taki sposób, aby w kolejnych równaniach pojawiała się zawsze tylko jedna niewiadoma. Pod pojęciem „niewiadoma” rozumiemy tu wektor o wymiarze odpowiadającym liczbie k stopni swobody jednego węzła. Łatwo spostrzec, że rozpatrując równowagę kolejnych węzłów w chwili s mamy za każdym razem układ k równań na k nieznanach składowych wektora przemieszczeń odpowiedniego węzła w chwili $s + 1$, niezależnie od liczby stopni swobody całego układu.

W niniejszej pracy poprzestaniemy na zasygnalizowaniu jedynie opisanej możliwości rozseparowania układu równań, zapowiadając jednocześnie zamieszczenie odpowiednich przykładów w następnych pracach.

5. Uwagi końcowe

Jak widać z rozwiązanych wyżej przykładów, stosowanie obok czasoprzestrzennych elementów prostokątnych również elementów trójkątnych stwarza możliwość nie tylko dostosowywania podziału obszaru czasoprzestrzennego do przebiegu obciążenia, ale także rozwiązywania takich zadań nieliniowych, w których drgania ustroju spełniają różne równania różniczkowe w zmieniających się w czasie przedziałach. Warto podkreślić, że — wobec warunkowej stabilności rozwiązań uzyskiwanych metodą SKECZ — może być pożyteczne stosowanie różnej długości kroków całkowania po czasie w różnych częściach konstrukcji. W strefie pośredniej potrzebne będzie stosowanie w tym przypadku elementów nieprostokątnych.

Przykłady liczbowe zamieszczone w niniejszej pracy dotyczyły wyłącznie struny, ale opisany sposób postępowania można bez istotnych zmian stosować i do innych, bardziej złożonych ustrojów konstrukcyjnych, zarówno sprężystych jak i lepkosprężystych.

Szczególnie nęcąca wydaje się możliwość rozseparowywania układów równań dynamiki w wyniku stosowania elementów trójkątnych, o czym była mowa w p. 4. Sprawa ta wymaga jednak bardziej szczegółowej analizy.

Ostatnio autor natknął się na pracę J. T. Odena: *A general theory of finite elements*, International Journal of Numerical Methods in Engineering, 1, (1969), 205 - 221, 247 - 259, w której zasygnalizowano możliwość stosowania elementów czasoprzestrzennych oraz zwrócono uwagę na niektóre korzyści, jakie mogą płynąć ze stosowania elementów trójkątnych. (Uwaga dopisana przy korekcie).

Literatura cytowana w tekście

1. Z. KĄCZKOWSKI, *The method of finite space-time elements in dynamics of structures*, Journal of Technical Physics, 1, 16, (1975), 69 - 84.
2. Z. KĄCZKOWSKI, *Metoda czasoprzestrzennych elementów skończonych*, Archiwum Inżynierii Lądowej, 3, 22, (1976), 365 - 378.
3. Z. KĄCZKOWSKI, *General formulation of the stiffness matrix for the space-time finite elements*, Archiwum Inżynierii Lądowej, 3, 25, (1979), 351 - 357.
4. K. BATHE, E. WILSON, *Numerical methods in finite element analysis*, Prentice-Hall, New Jersey, 1976.
5. Z. KĄCZKOWSKI, J. LANGER, *Synthesis of the space-time finite element method*, Archiwum Inżynierii Lądowej, 1, 26, (1980), 11 - 17.
6. O. C. ZIENKIEWICZ, *Metoda elementów skończonych*, Arkady, Warszawa, 1972.

Praca została złożona w Redakcji dnia 20 czerwca 1983 roku.

O MODELOWANIU W BUDOWIE MASZYN

MAREK DIETRICH

Politechnika Warszawska

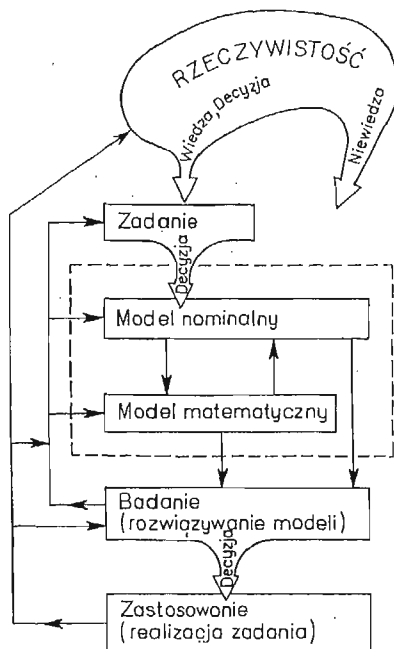
Długo zastanawiałem się jak ustosunkować się do propozycji publikacji w tym specjalnym numerze *Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej*. Redaktor pozostawiając mi do uznania zarówno treść jak i formę wypowiedzi stworzył duże możliwości, ale jednocześnie poważny kłopot. Zanim zdecydowałem się na zamieszczenie publikacji musiałem odpowiedzieć sobie na pytanie jakiego rodzaju wypowiedź byłaby tu właściwa i jakiej wypowiedzi czytelnik spodziewałby się ode mnie.

Rozpatrując tę kwestię doszedłem do wniosku, że spośród różnych możliwości: artykuł naukowy, problemowy, przeglądowy, programowy czy wspomnienie lub ocena, chyba najwłaściwsze będzie podzielenie się z czytelnikami pewnymi przemyśleniami związanymi z zastosowaniem mechaniki w dziedzinie, którą się zajmuję, a więc w budowie maszyn. Wybór ten uzasadniam też tym, że działając w Polskim Towarzystwie *Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej* z racji zajmowania się mechaniką stosowaną bądź nawet zastosowaniami mechaniki, na ten temat powinienem się wypowiedzieć w tym specjalnym numerze naszego pisma. Tym bardziej, że problematyka inżynierskich zastosowań mechaniki rzadko znajduje miejsce na jego łamach.

Swoje rozważania skoncentruję więc na problematyce modelowania w budowie maszyn. Przedstawię uwagi na ten temat powstałe w wyniku analizy działalności inżynierskiej, piśmiennictwa naukowego i technicznego, dyskusji w środowisku naukowym oraz prowadzenia różnego rodzaju wykładów i seminariów. Będę się starał pokazać problemy modelowania inżynierskiego, szczególnie te, które odróżniają je od modelowania w nauce oraz zwrócić uwagę na sprawy podstawowe, wydawać by się mogło że oczywiste, o których jednak często się zapomina, a co w konsekwencji może prowadzić do poważnych błędów rozumowania, błędnych wyników i błędnych decyzji.

Po to, żeby przedstawić problematykę modelowania trzeba jasno określić cel twórczych działań inżynierskich, nie bez racji często zwanych sztuką inżynierską, cel którego realizacji ma służyć modelowanie. Ogólnie rzecz biorąc celem tym jest świadome przekształcanie przyrody (tworzenie nowych wytworów materialnych, ustalanie sposobu ich działania, przewidywanie efektów). Jest on różny od celu nauki, która zajmuje się głównie poznawaniem prawdy. Chcąc celowo przekształcić rzeczywistość — wykonać maszynę realizującą założone zadania, opracować proces przebiegający w sposób zamierzony czy też sprawną organizację — trzeba uświadomić sobie cel, któremu działanie inżynierskie ma służyć, czyli sformułować zadanie. Dopiero wtedy można przystąpić do formułowania

modelu danej maszyny, jej elementu, procesu w niej zachodzącego czy też innego zadania inżynierskiego. Przebieg realizacji danego celu ilustruje w bardzo uproszczony sposób rys. 1.



Rys. 1

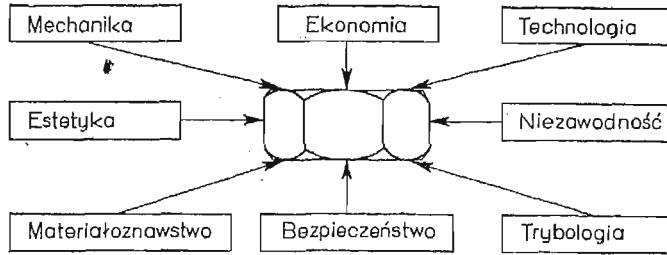
Każdy obiekt materialny zawiera w sobie ilość informacji przekraczającą możliwość równoczesnego ogarnięcia ich umysłem, a tym bardziej opisaną. Jeśli jednak znany jest cel działania to można wybrać informacje, które są ważne w realizacji tego celu.

Wyobraźmy sobie zwykłą kulę materialną; z grubsza rzecz biorąc jej ogólny opis może dotyczyć problemów geometrycznych, fizycznych, chemicznych, technologicznych, estetycznych i innych. Ogólny opis tej kuli byłby więc trudny, długi a przede wszystkim praktycznie zbędny. Jeśli jednak wiadomo, że opis kuli ma służyć do analizy jej ruchu pod działaniem sił (dynamika) to wystarczy podać tylko bardzo niewiele informacji — jej średnicę i gęstość materiału, z którego jest wykonana lub nawet tylko jej masę. Tworzy się wtedy myślowy opis kuli materialnej właściwy do analizy dynamicznej. Gdyby postawić inny cel to model kuli byłby inny.

Poza modelami abstrakcyjnymi, których przykład podany został powyżej tworzy się również modele materialne imitujące pod wybranym kątem widzenia rzeczywiste obiekty zainteresowań, służące wybranemu celowi analizy lub syntezy.

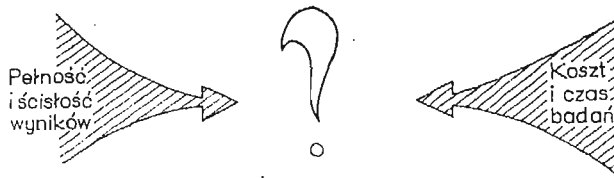
Ogólna definicja modelu jest trudna, w związku z czym w literaturze można znaleźć co najmniej kilka mniej lub bardziej różniących się między sobą definicji. Można znaleźć na przykład takie sformułowanie pojęcia modelu: modelem danego rzeczywistego obiektu jest układ dający się wyobrazić lub materialnie zrealizować, który odzwierciedlając lub odtwarzając obiekt zdolny jest zastępować go tak, że badanie tego układu dostarcza no-

wych, nadających się do dalszego sprawdzenia informacji o obiekcie. Budując model zjawiska, procesu czy obiektu, wykorzystuje się posiadaną na ten temat wiedzę; im więcej wiemy, tym lepszy możemy zbudować model. Wraz z podnoszeniem się stanu wiedzy ulepsza się modele. Zawsze jednak będzie pozostawał pewien stopień niewiedzy, który też powinien być uwzględniony w modelowaniu. W każdym razie trzeba pamiętać, że model nie jest i nie może być bezpośrednim odzwierciedleniem rzeczywistości, jest natomiast odzwierciedleniem naszej wiedzy o tej rzeczywistości.



Rys. 2

Modele, którymi operuje się w odrębnych dziedzinach nauki mają jednorodny charakter. Projektując maszynę mamy do czynienia ze znacznie bardziej złożoną problematyką, wchodzącą w zakres różnych dyscyplin nauki, wielu działów techniki a również dotyczącą ekonomii, estetyki itd. (rys. 2). Modele, którymi trzeba operować w projektowaniu maszyn są więc (lub powinny być) bardziej rozbudowane i niejednorodne, a co za tym idzie trudniejsze w badaniu. Stąd też często trzeba je bardzo upraszczać w celu uzyskania odpowiedniej efektywności ich badania.



Rys. 3

Jak sformułować kryterium poprawności modelowania? Najprościej można sformułować je następująco: model powinien dostatecznie wiernie odtwarzać badany obiekt rzeczywisty pod wybranym kątem widzenia, a jednocześnie być możliwie prosty i łatwy w badaniu (rys. 3). Właściwy model powinien więc być kompromisem pomiędzy tymi przeciwstawnymi tendencjami. Pod pojęciem dostatecznej wierności należy rozumieć dostateczną zgodność rezultatów badań modelu i obiektu rzeczywistego; wynika z tego oczywiście zależność modelu od wymogów stawianych dokładności rezultatów jego badania. Zbytnie uproszczenie modelu może doprowadzić do niedopuszczalnych nieścisłości, bądź nawet do pominięcia istotnych własności modelowego obiektu. Zbytnie rozbudowanie modelu może narazić na niepotrzebne straty związane z jego tworzeniem i badaniem.

Czynnik łatwości i szybkości operowania modelem, badania modelu, w wielu zastosowaniach jest decydujący. Dla przykładu modele stosowane w sterowaniu automatycznym, na przykład raket, muszą umożliwiać ich badanie w czasie rzeczywistym. Ta konieczność kompromisu stanowi istotną cechę odróżniającą modele stosowane w technice od modeli stosowanych w nauce, gdzie przede wszystkim chodzi o ogólność i ścisłość wyników.

Modelowanie obejmuje zwykle dwa zasadnicze etapy — zbudowanie tak zwanego modelu nominalnego i modelu matematycznego. (Ten ostatni nie zawsze pojawia się w sposób wyraźny).

Model nominalny powinien przedstawiać w wyidealizowany, uproszczony sposób badaną rzeczywistość, operując właściwymi tej rzeczywistości pojęciami. Na przykład mechanika, termodynamika czy optyka operują pojęciami fizycznymi — występujące tam modele nominalne to modele fizyczne.

Jak już wspomniałem, przy konstruowaniu mamy do czynienia z problemami nie tylko fizycznymi ale również ekonomicznymi, społecznymi itd., odpowiednie modele nominalne wyrażają się więc w różnorodnych kategoriach.

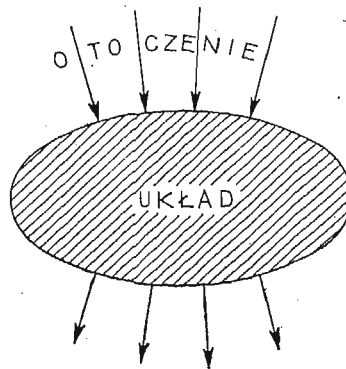
Model matematyczny to formalizacja modelu nominalnego prowadząca do podania zależności matematycznych pomiędzy jego parametrami.

Czytając piśmiennictwo dotyczące nauk technicznych, czy też zastosowań nauki w technice, można stwierdzić, że ogromna większość prac dotyczy problematyki badania modeli, czasami, choć rzadko, poruszając też sprawy budowania modeli matematycznych. Natomiast na problematykę budowania modeli nominalnych przeważnie nie zwraca się uwagi. Tymczasem w budowie maszyn najtrudniejsze i najistotniejsze jest moim zdaniem zbudowanie właściwego modelu nominalnego. Nie można przecież tutaj posłużyć się żadną procedurą czy algorytmem. Nie można znaleźć jednoznacznego przejścia pomiędzy rzeczywistością a jej modelem, nie można mieć nawet pełnej informacji o rzeczywistości. Modelowanie jest więc trudnym i odpowiedzialnym procesem decyzyjnym. Błędy popełniane przy badaniu (rozwiązywaniu) modelu często można wychwycić już w samym procesie jego badania. Błędy popełniane w procesie modelowania są bardzo trudne do zauważenia i niejednokrotnie ujawniają się dopiero po zastosowaniu jego wyników.

Dlatego też procesowi modelowania trzeba przypisywać szczególne znaczenie w rozwiązywaniu zadań inżynierskich a przyjęte modele weryfikować możliwie jak najczęściej i jak najdokładniej. Jedną z powszechnie stosowanych tu metod jest opisywanie rzeczywistości różnymi modelami, najlepiej różnymi jakościowo, i porównywanie wyników ich badania. Jednym z takich modeli może być model abstrakcyjny badany teoretycznie, drugim model materialny badany eksperymentalnie. Powstaje wtedy pytanie, który z tych modeli jest lepszy lub wiarygodniejszy? Często można spotkać się ze stanowiskiem, że wynik eksperymentalny jest bardziej wiarygodny. Tymczasem odpowiedzi na tak sformułowane pytanie nie ma, oba sposoby modelowania są równoprawne i równoważne, a ich badanie dostarcza wyników odnoszących się bezpośrednio tylko do tych modeli. Lepszy natomiast jest ten model (z punktu widzenia ścisłości), który daje wyniki lepiej odnoszące się do rzeczywistości. Wspomniany sposób myślenia u dużej liczby osób zajmujących się techniką wynika z częstego utożsamiania modelu materialnego z rzeczywistością i odnoszenia wyników badań eksperymentalnych bezpośrednio do rzeczywistości. Do modeli abstrakcyjnych takie rozumowanie rzadziej stosuje się, choć można i tu pokazać przy-

padki mieszania modeli i rzeczywistości. Znane są również przypadki prawidłowości wyników modelowania abstrakcyjnego mimo ich niezgodności (pozornej) z wynikami badań eksperymentalnych. Ostatnio niektórzy badacze zajmujący się metodami eksperymentalnymi w naukach technicznych stwierdzają, że metody pomiarowe poszły tak daleko, że brak jest odpowiednich teorii, dzięki którym można by badać różne nowe zjawiska eksperymentalnie tymi znanymi już zaawansowanymi metodami pomiarowymi.

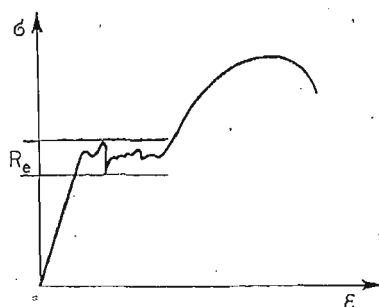
Początek modelowania to zbieranie informacji o modelowanym obiekcie i ustalenie zakresu wiedzy oraz stopnia niewiedzy o nim. Skąd można uzyskać wiedzę o przedmiocie, procesie, systemie, którego jeszcze nie ma, a który należy zaprojektować? Informacje te można uzyskać na podstawie piśmienictwa, specjalnie przeprowadzanych eksperymentów, badania problemów podobnych, wreszcie na podstawie tradycji i doświadczenia inżynierskiego. Szczególnie dwa ostatnie źródła informacji wymagają tutaj podkreślenia. Po zebraniu odpowiednich informacji, trzeba dokonać podziału tych informacji na bardziej i mniej istotne z punktu widzenia badanego problemu i operując tymi pierwszymi przystąpić do budowania modelu nominalnego. Podstawową decyzją jaką należy podjąć przy modelowaniu jest określenie układu i wydzielenie go z otoczenia (środowiska) (rys. 4). Jako kryterium takiego podziału przyjmuje się zwykle jednostronność oddziaływania (przepływu informacji): przyjmuje się, że otoczenie oddziałuje na układ a układ nie oddziałuje na otoczenie, stan obiektu zależy więc od stanu otoczenia, a stan otoczenia nie zależy od stanu obiektu.



Rys. 4

Czy mogą jednak istnieć obiekty wyizolowane nie oddziałujące na środowisko? Po co je budować; przecież celem działań technicznych, celem budowy maszyn nie jest samo ich tworzenie a dopiero ich użytkowanie, a więc oddziaływanie na środowisko. Właściwym kryterium jest więc brak sprzężenia zwrotnego między oddziaływaniem układu na otoczenie a oddziaływaniem otoczenia na układ. Istnienie lub nie istnienie sprzężenia zwrotnego stosunkowo łatwo rozpoznać w przypadku modeli jednorodnych, dotyczących jednej dziedziny nauki, choć i tu popełnia się błędy. Natomiast w przypadku modeli niejednorodnych, takich jakimi operować powinna budowa maszyn, sprawa jest znacznie trudniejsza; sprzężenia takie mogą powstawać w różny sposób, choćby w wyniku działania człowieka operującego maszyną. Dla ilustracji błędów, o których wspomniałem, przedsta-

wię dwa przykłady. Pierwszy to tak zwana krzywa rozciągania (rys. 5). Jeszcze do lat pięćdziesiątych wyniki tak przeprowadzanych badań wytrzymałościowych uważano za wielkości charakteryzujące próbkę rozciąganą, stanowiące pewne znormalizowane własności materiałowe. Działo się tak, ponieważ do układu zaliczano tylko próbkę, a maszynę wytrzymałościową traktowano jako otoczenie. Teraz już dobrze wiadomo, że analizując wyniki pomiaru trzeba brać pod uwagę zarówno próbkę jak i maszynę wytrzymałościową (próbka i maszyna stanowią układ) i że zarejestrowane wyniki zależą zarówno od własności materiału (próbki) jak i od własności maszyny. Na przykład przebieg w okolicy R_e opisuje drgania maszyny wytrzymałościowej wywołane procesami dyslokacyjnymi zachodzącymi w próbce. Chcąc określić własności samej próbki trzeba opisać drgania maszyny z próbką, tworząc odpowiedni model dynamiczny i dopiero wtedy, na podstawie zarejestrowanego wyniku odtworzyć przyczynę drgań, a więc to co się działo w próbce.



Rys. 5

Inny przykład to jedna z dotychczasowych norm dotycząca połączeń śrubowych. W wyniku nie uwzględnienia w modelu (jako układ) smaru na powierzchniach styku elementów złącza wskazania normy prowadzą w wielu przypadkach do zniszczenia połączeń i to szczególnie połączeń odpowiedzialnych, wykonywanych bardzo starannie.

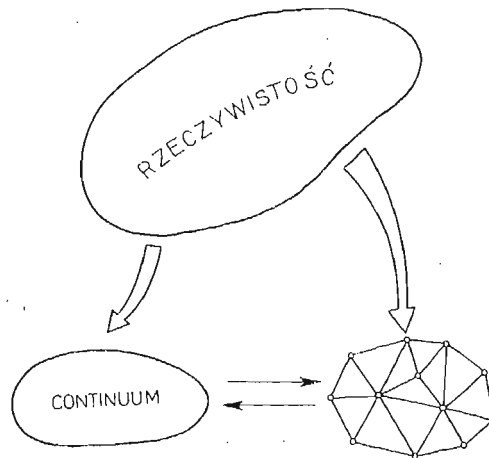
Proces rozdzielania układu i otoczenia jest zwykle trudny i niejednoznaczny, a musi być przeprowadzony bardzo starannie, gdyż decydując się na pominięcie pewnych oddziaływań można w sposób istotny zniekształcić własności stanu rzeczywistego i doprowadzić do zbudowania niewłaściwego modelu, prowadzącego do błędnych wyników. Jest jednak rzeczą oczywistą, że im „mniejszy” wybierze się układ, to znaczy im więcej zaliczy się do otoczenia, tym analiza układu może być łatwiejsza i szybsza. Ale czy dostatecznie wierna?

Tu znów chciałbym zwrócić uwagę na często występującą w literaturze technicznej niefrasobliwość w procesie ustalania układu, określenia oddziaływań i warunków brzegowych. A przecież ile procesów technicznych zależy przede wszystkim od brzegu układu! To rozdzielanie układu i otoczenia jest trudne w dziedzinie fizyki ale znacznie trudniejsze w ekonomii (choćby dla określenia kosztów ciągnionych), a co dopiero powiedzieć o innych dziedzinach mających wpływ na technikę.

Następnym etapem modelowania jest analiza przepływu oddziaływań (sprzężeń) wewnątrz układu i ustalenie jego struktury. I tu, podobnie jak poprzednio, im struktura układu jest prostsza, tym łatwiej jest go badać. Trzeba więc starać się rozróżnić oddziały-

wania istotne i nieistotne i te ostatnie pominąć przy ustalaniu struktury układu. W układach mechanicznych najważniejsza jest decyzja dotycząca liczby stopni swobody układu, w tym decyzja najbardziej ogólna czy traktować układ jako dyskretny czy jako ciągły.

Oba podejścia mają swoje zalety i wady. Modele dyskretny są często prostsze od ciągłych i dlatego są chętnie stosowane; na tych modelach trudno jednak analizować pewne zjawiska, na przykład zjawiska falowe, jak również wyniki ich badania są trudniejsze w analizie i interpretacji. W każdym konkretnym przypadku należy więc zastanowić się nad wyborem właściwego modelu. Trzeba tu podkreślić pełną równowagę modeli ciągłych i dyskretnych w zagadnieniach technicznych. Wśród mechaników panuje bowiem przekonanie o nadrzędności modeli ciągłych i traktowanie modeli dyskretnych jako pewnego uproszczenia modeli ciągłych. Modelowanie rzeczywistości za pomocą modeli dyskretnych trzeba się jednak starać robić wprost (rys. 6), a nie tak, jak to dotychczas



Rys. 6

zwykle się robi, najpierw konstruując model ciągły a potem dyskretyzując go. Oba rodzaje modeli podlegają pewnym ograniczeniom. Jeśli buduje się model dyskretny wprost, trzeba uwzględnić tylko właściwe mu ograniczenia; jeśli dyskretyzuje się model ciągły to trzeba uwzględnić zarówno ograniczenia modelu ciągłego jak i dyskretnego. W wielu przypadkach bardzo wygodny jest model dyskretny oparty na pojęciu elementu skończonego, obecnie bardzo często stosowany przy analizie nawet bardzo złożonych zjawisk. Po ustaleniu struktury układu należy w odpowiedni sposób określić oddziaływanie otoczenia na obiekt i obiektu na otoczenie.

Trzeba jeszcze wyraźnie podkreślić, że modelowanie nominalne nie jest operacją jednoznaczna. Jednemu rzeczywistemu zagadnieniu mogą odpowiadać różne modele, w różny sposób je opisujące. Po określeniu modelu nominalnego można przystąpić do formalizowania jego cech i procesów w nim zachodzących. Formalizacja ta prowadzi do podania pewnego zbioru zależności matematycznych noszącego nazwę modelu matematycznego. Model matematyczny powinien w sposób jednoznaczny odpowiadać modelowi nominalnemu, choć może on mieć różną postać, przystosowaną do przewidywanego sposobu jego rozwiązywania.

Badając (rozwiązując) model matematyczny poszukuje się informacji o pewnych jego właściwościach. Im model jest bardziej skomplikowany, tym trudniej go badać. Czasem uzyskanie odpowiedzi na interesujące pytania co do skomplikowanego modelu jest wręcz niemożliwe. Budując więc model matematyczny niejednokrotnie weryfikuje się model nominalny, często go upraszczając. Tu znów należy zwrócić uwagę na często pojawiające się w praktyce błędne postępowanie polegające na upraszczaniu samego tylko modelu matematycznego, bez odpowiedniej weryfikacji modelu nominalnego np. fizycznego. Takie postępowanie prowadzić może, i niekiedy w praktyce prowadzi, do istotnych błędów, bowiem niewielka wydawałoby się zmiana modelu matematycznego może prowadzić do tak poważnej zmiany modelu fizycznego, że przestaje on odpowiadać rzeczywistości.

Podjęcie decyzji dotyczącej wymaganej dokładności rezultatów badania modelu matematycznego jest sprawą konstruktora maszyny; błąd w jedną stronę stwarza stan niebezpieczeństwa, błąd w drugą stronę prowadzi do niepotrzebnych strat.

Budując model matematyczny przede wszystkim ustala się zbiór zmiennych opisujących stan badanego obiektu czyli tzw. zbiór zmiennych stanu. Następnie na podstawie praw fizyki (w miarę potrzeby innych nauk) takich jak zasady dynamiki, równania ciągłości, bilanse energii buduje się zależności matematyczne między tymi zmiennymi stanu mające postać równań lub nierówności. W zależnościach tych występują wielkości charakteryzujące model, czyli tak zwany zbiór parametrów. Poważne trudności pojawiają się tu wtedy, gdy w modelu matematycznym występują wielkości trudno do zdefiniowania, precyzyjnego opisu i do kwantyfikacji. Tak jest wtedy, gdy w modelowaniu inżynierskim uwzględnić estetykę, wygodę a nawet technologię. Można wtedy posłużyć się teorią liczb rozmytych i zbiorów rozmytych, metodą ekspertów itp.

Celem badania modelu może być określenie wartości zmiennych stanu, na przykład w funkcji czasu, przy zadanych wartościach parametrów (analiza) lub dobór odpowiednich parametrów do realizacji zadanego przebiegu zmiennych stanu (synteza). Z tym ostatnim zagadnieniem spotykamy się zwykle przy konstruowaniu maszyn. Ważną cechą modelu matematycznego jest jego wrażliwość na zmianę wartości parametrów. Parametry modelu matematycznego są zwykle określone w pewnym przybliżeniu. Jeśli model matematyczny opisuje jakąś istniejącą konstrukcję poddaną analizie, to wartości jego parametrów uzyskuje się poprzez identyfikację na drodze badań eksperymentalnych, wykonywanych oczywiście z pewną dokładnością. Jeśli badanie modelu matematycznego ma być podstawą do syntezy konstrukcji, to również w wyniku jej materialnej realizacji wartości parametrów mogą ulegać zmianie w granicach tolerancji. Licząc się z tym, trzeba budować takie modele matematyczne, które są odpowiednio mało wrażliwe na niewielkie zmiany parametrów. Mało wrażliwe to znaczy takie, w których niewielka zmiana wartości parametrów prowadzi do niewielkiej zmiany przebiegu badanych procesów (w żadnym przypadku nie prowadzi do zmiany jakościowej zachodzących procesów). Z drugiej strony jeśli budowany model ma służyć zbadaniu wpływu pewnego parametru na przebieg procesu, to model ten musi być dostatecznie wrażliwy na zmianę tego parametru. W przeciwnym przypadku rezultaty badania mogą być mało dokładne, a nawet błędne.

Pojęciem blisko związanym z wrażliwością jest stateczność. Badanie stateczności

pozwała na uzyskiwanie istotnych informacji jakościowych o zachowaniu się modelu, a poprzez to o zachowaniu się procesów zachodzących w rzeczywistości.

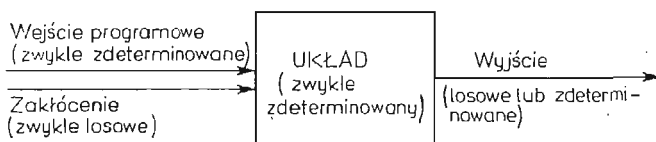
Relacje stanowiące model matematyczny zawierają parametry liczbowe lub funkcyjne, których wartości dopiero trzeba ustalić. Wartości te można albo wprost zmierzyć na obiekcie rzeczywistym, jeśli obiekt taki istnieje, albo założyć na podstawie wiedzy ogólnej, pomagając sobie, gdy trzeba, pomiarami na obiektach podobnych, gdy obiekt jeszcze nie istnieje. W tym ostatnim przypadku wartości parametrów powinny być oczywiście weryfikowane na obiekcie rzeczywistym po jego wykonaniu. Niektóre parametry modeli matematycznych można wyznaczyć bezpośrednio drogą analizy teoretycznej lub pomiarów. Oczywiście jest na przykład, że parametry modelu matematycznego konstrukcji kratowej, takie jak wartości współrzędnych węzłów, pola przekroju prętów, moduł sprężystości materiału, można zmierzyć wprost na istniejącej konstrukcji poddanej analizie, bądź wyznaczyć na podstawie posiadanej wiedzy ogólnej. Są jednak przypadki inne, gdy parametrów układu nie można zmierzyć bezpośrednio a trzeba je oszacować na podstawie globalnego badania analizowanego obiektu, bądź obiektu podobnego. Takie sytuacje występują często w zagadnieniach dynamiki i sterowania maszyn. W zagadnieniach dynamiki, przy określeniu wartości parametrów dyskretnego modelu dynamicznego trzeba wyznaczyć wartości elementów macierzy mas, sztywności, tłumień. Elementów tych macierzy zwykle nie można wyznaczyć teoretycznie ani zmierzyć wprost na żadnym realnym obiekcie mechanicznym. Można natomiast wprowadzić obiekt w drgania i wyznaczyć amplitudy drgań (lub amplitudy prędkości czy przyspieszeń) wybranych punktów układu rzeczywistego, wyznaczyć częstotliwości i postacie drgań i na podstawie tych wyników wyznaczyć poszukiwane wartości elementów macierzy mas, sztywności i tłumień. Postępowanie takie nosi nazwę identyfikacji parametrów modelu.

Trzeba jeszcze raz podkreślić, że w zagadnieniach, z jakimi mamy do czynienia w procesie projektowania maszyn nie można przeprowadzać eksperymentów na gotowych obiektach, bo ich jeszcze nie ma. Trzeba wtedy posługiwać się obiektami podobnymi (urządzeniami o podobnych parametrach technicznych, w podobny sposób rozwiązanych konstrukcyjnie), bądź budować specjalne modele materialne, zgodnie z zasadami podobieństwa i na nich prowadzić eksperymenty. Ostateczna weryfikacja modelu może być jednak dokonana dopiero po wykonaniu modelowanego obiektu rzeczywistego.

W procesie projektowania, dokonując syntezy maszyny, jej elementów lub procesów w niej zachodzących, dokonuje się często zmian w odpowiednich modelach matematycznych po to, żeby w efekcie otrzymać takie modele, których właściwości odpowiadają stawianym wymaganiom. Postępowanie takie nosi nazwę modyfikacji modelu. Budując model trzeba więc zadbać o możliwość takiej modyfikacji.

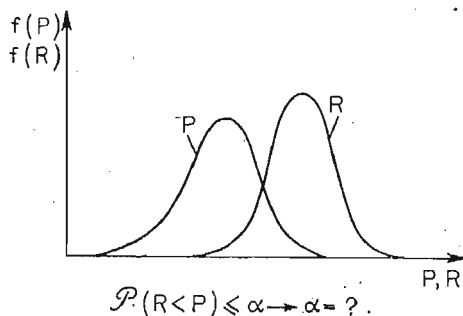
Gdy rozporządzamy dostatecznie pełną informacją, pełną tak jakościowo jak i ilościowo, o istotnych własnościach modelowanej rzeczywistości, to parametry modelu układu i oddziaływania środowiska możemy traktować jako zdeterminowane. Są jednak sytuacje inne, gdy posiadamy odpowiednie informacje jakościowe a nie mamy odpowiednich informacji ilościowych. Możemy nie znać konkretnych wartości parametrów układu lub nie mieć jednoznacznie określonego oddziaływania środowiska. Wtedy wielkości te można traktować jako zmienne losowe lub, gdy są funkcjami zmiennych zdeterminowanych, na przykład czasu, jako procesy stochastyczne. Badanie takiego modelu prowadzi do in-

formacji również w sensie stochastycznym. Modele te mają jeszcze jedną wielką zaletę — pozwalają ująć zarówno posiadaną wiedzę o maszynie jak i zorientować się w zakresie niewiedzy o niej. Odpowiednio operując własnościami probabilistycznymi takich modeli można uzyskać informacje o stopniu niepewności podejmowanych decyzji konstrukcyjnych. Stąd też modele stochastyczne są coraz częściej stosowane w budowie maszyn, powszechne są w teorii niezawodności, coraz częściej pojawiają się w badaniu bezpieczeństwa maszyn, dynamice maszyn, trybologii, zmęczeniu materiałów itp.



Rys. 7

W modelach stochastycznych najczęściej za pomocą zmiennych losowych lub procesów stochastycznych opisuje się tylko oddziaływanie otoczenia na układ oraz w konsekwencji tego oddziaływania układu na otoczenie (rys. 7). A przecież w technice typowe są zagadnienia o niepełnej informacji (w sensie deterministycznym) również na temat samego układu. Trzeba wtedy również sam układ opisywać za pomocą parametrów losowych lub funkcji losowych. Jako takie losowe parametry można wymienić wielkości wynikające z procesu eksploatacyjnego maszyny jak np. masy przenoszonych ładunków, zmienne sztywności elementów, zmienne momenty bezwładności, własności zastosowanych materiałów, zmęczenie i zużycie poszczególnych elementów, luzy w granicach tolerancji itp. Badanie modeli z losowymi parametrami układu jest znacznie trudniejsze, a odpowiednie teorie matematyczne znacznie mniej rozwinięte. Trzeba też jeszcze wspomnieć, że w piśmiennictwie światowym najczęstsze są publikacje na temat badania modeli stochastycznych dotyczące tylko pewnych uśrednień wchodzących w zakres teorii korelacji, badania bardzo przydatne w różnych dziedzinach nauki i techniki. W budowie maszyn mamy jednak często do czynienia z zagadnieniami nie nadającymi się do uśrednienia (np. problemy zniszczenia), a tu odpowiednie metody matematyczne są znacznie mniej rozwinięte. Wymienić tu można na przykład ważną metodę przewyższeń.



Rys. 8

Metody stochastyczne pozwalają na uzyskanie bardziej racjonalnych informacji o maszynie. Np. klasyczny warunek wytrzymałościowy wymaga użycia współczynnika

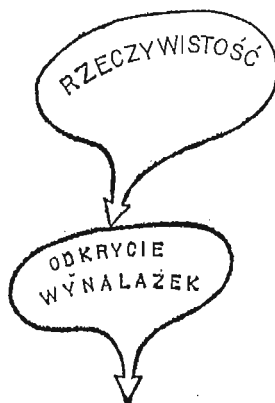
bezpieczeństwa, wielkości niezbyt określonej, liczby niewiele mówiącej. Tymczasem potraktowanie zagadnienia na gruncie probabilistycznym (rys. 8) i porównanie rozkładu uogólnionego obciążenia P oraz uogólnionej nośności (obciążenia niszczącego) R pozwala na określenie prawdopodobieństwa awarii α . Oczywiście dalej pozostaje problem jakie α uznać za dopuszczalne. Jest to problem decyzyjny o wielu aspektach, w którym jednak powinna dochodzić do głosu etyka i to w sposób jawny. Ujęcie probabilistyczne pozwala, a nawet zmusza do takiego potraktowania bezpieczeństwa, eksponując też omawianą już złożoność problematyki inżynierskiej.

Oczywiście modelowanie stochastyczne nie jest jedynym możliwym do zastosowania, gdy chce się uwzględnić w modelu niepełną informację o rzeczywistości. Inną drogą jest na przykład budowanie modeli zgodnie z zasadami teorii gier. Takie ujęcie często jest stosowane w problematyce wojskowej, a ogólnie w zagadnieniach dotyczących strategii postępowania (nas interesuje strategia działania i eksploatacji maszyn). Wydaje się, że ta dziedzina może odgrywać istotną rolę w projektowaniu inżynierskim. Powinna ona na przykład stanowić podstawę racjonalnego systemu norm i przepisów, odgrywających tak istotną rolę w budowie maszyn. Jeszcze inną drogą ujmowania niepewności w modelach matematycznych jest stosowanie teorii liczb rozmytych i zbiorów rozmytych, o czym już wspomniałem. Wiele wielkości można określić tylko jakościowo — duży, średni, mały, bardzo mały lub co najwyżej oszacować ilościowo, nie mając przekonania co do precyzji tej oceny, ani w sensie deterministycznym ani probabilistycznym. Wtedy użyteczne staje się pojęcie liczby rozmytej oraz stosowanie aparatu teorii liczb rozmytych. Podejście to ma wiele korzyści w porównaniu na przykład z operowaniem oszacowaniami punktowymi. Działania na liczbach rozmytych prowadzą zwykle do wielkości coraz bardziej rozmytych, coraz bardziej nieprecyzyjnych, co odpowiada rzeczywistemu procesowi operowania wielkościami nieprecyzyjnymi. Podejście to umożliwia uzyskanie dobrego materiału do właściwego podejmowania decyzji inżynierskich oraz stwarzają przesłanki do oceny stopnia zaufania co do trafności tych decyzji.

Na podstawie wyników badania modeli matematycznych podejmuje się decyzje. Zwykle poszukujemy decyzji najwłaściwszej, dającej w efekcie najlepszy rezultat pod wybranym względem. Jeśli jakość rezultatu ocenia się według jakiegoś kryterium dającego się sformułować matematycznie, to model można rozbudować o to kryterium otrzymując model optymalizacyjny. Z modelu takiego, stosując odpowiednie procedury, można uzyskać rozwiązanie optymalne, czyli najlepsze pod względem wybranego kryterium. I tu jasno uwypukla się wspomniana już potrzeba możliwie szerokiego, kompleksowego, wielodyscyplinarnego podejścia do modelowania w budowie maszyn. Pominięcie jakiegś dziedziny powoduje zubożenie modelu optymalizacyjnego i może skłaniać do wyciągania na podstawie jego badania niewłaściwych wniosków. Z kolei modele ogólne wymagają również ogólnych funkcji kryteriów uwzględniających różne czynniki, a więc prowadzą do polioptymalizacji. Trzeba tu jednak wyraźnie podkreślić, że nawet najgłębszy i najbardziej rozbudowany model optymalizacyjny nie zlikwiduje sytuacji decyzyjnej i nie zwolni konstruktora od decyzji co do wyboru takiego czy innego rozwiązania konstrukcyjnego. Wynika to choćby z niejednoznaczności procesu odzwierciedlenia rzeczywistości i tworzenia modelu, o czym już wspomniałem.

Przedstawiłem w wielkim skrócie podstawową problematykę modelowania w budowie

maszyn i swoje uwagi na ten temat. Oczywiście można w inny sposób podchodzić do modelowania i z różnymi też podejściami spotykamy się w piśmiennictwie technicznym. Różne mogą być interpretacje rzeczywistości, co wiąże się, w sposób uświadomiony lub nie, z akceptacją takiej lub innej koncepcji filozoficznej. Z tego dalej wynikają różne podejścia do procesu formułowania modelu. Potrzeby modelowania, w takim lub innym ujęciu, obecnie jednak nie neguje się.



Rys. 9

Zastanówmy się na koniec czy zawsze w twórczej działalności inżynierskiej problematyka modelowania występuje *explicitie*. Chyba nie. Przecież dawno temu, na długo przed pojawieniem się odpowiednich dziedzin nauki, przed stworzeniem podstaw modelowania, pojawiły się konstrukcje tak złożone, że do tej pory są one trudne do zrozumienia dla przeciętnego inżyniera. Wielkie odkrycia powstają w podświadomości, w wyniku genialnego skojarzenia faktów i obserwacji, w wyniku działania intuicji i fantazji, bez całej formalnej procedury, do której należy również modelowanie (rys. 9). Czy wtedy to wszystko, o czym pisałem jest niepotrzebne? Przeciwnie, jest niezbędne w procesie weryfikacji, adaptacji i realizacji takiej genialnej idei.

Praca została złożona w Redakcji dnia 20 lutego 1983 roku.

MECHANIKA TEORETYCZNA — AKTUALNE KIERUNKI ROZWOJU¹⁾

B. RADZISZEWSKI

*Institut Podstawowych
Problemów Techniki PAN,
Warszawa*

Podstawowymi obiektami rozważanymi w mechanice teoretycznej są punkty materialne ciała sztywne i więzy. Stanowią one „cegiełki”, z których buduje się bardziej złożone obiekty w tej dyscyplinie nauki.

Większość treści zawartych we współczesnych podręcznikach akademickich, traktujących o mechanice teoretycznej, była znana jeszcze w ubiegłym stuleciu. Dotyczy to w szczególności statyki i kinematyki, a bardzo często i dynamiki układów z więzami holonomicznymi. Nie oznacza to jednak stagnacji w mechanice teoretycznej, gdyż wiele podstawowych zagadnień zostało rozwiązanych w ostatnich dziesięciokach lat. Dotyczy to w szczególności dynamiki układów z więzami nieholonomicznymi.

Podstawowe problemy związane z wyprowadzeniem równań ruchu układów z więzami nieholonomicznymi, nawet z liniowymi względem prędkości uogólnionych równaniami więzów, zostały ostatecznie rozstrzygnięte w końcu lat pięćdziesiątych naszego wieku. Kilkanaście lat temu zostały rozstrzygnięte tak podstawowe problemy w badaniach układów nieholonomicznych jak możliwość linearyzacji równań ruchu i badania stateczności na podstawie równań zlinearyzowanych.

Nie wiele wcześniej wyprowadzono na przykład równania Lagrange'a drugiego rodzaju dla układów elektromechanicznych ze stykami ślizgowymi.

W ostatnich latach powstaje wielce obiecujące ujęcie mechaniki teoretycznej na gruncie pojęć analizy globalnej, a w szczególności różniczkowych. Są to nowe geometryczne metody mechaniki teoretycznej. Kierunek ten posługuje się współczesnymi metodami globalnej geometrii różniczkowej, topologii algebraicznej i jakościowej teorii układów dynamicznych. Metody te, używając globalnego języka obiektów geometrycznych, a zwłaszcza struktur symplektycznych, uwypuklają obiektywną treść wszystkich rezultatów, niezależną od wyboru lokalnych współrzędnych.

Użycie nowoczesnych metod matematycznych pozwoliło zarówno lepiej zrozumieć strukturę mechaniki analitycznej i jej związków z innymi dyscyplinami (klasyczna teoria

¹⁾ Niniejsze opracowanie jest rozwinięciem jednego z fragmentów raportu opracowanego przez zespół: B. Radziszewski, P. Rafalski, K. Sobczyk, J. Stupnicki, K. Wilmański przy współudziale J. Sławianowskiego. Raport ten był podstawą do dyskusji nad kierunkami rozwoju mechaniki w Polsce na plenarnym zebraniu Komitetu Mechaniki PAN w 1981 r. Fragment dotyczący mechaniki teoretycznej może stanowić uzupełnienie pracy R. Gutowskiego (Mechanika Teoretyczna — zarys stanu i perspektywy rozwoju w Polsce, Nauka Polska, 10, 1979, str. 3 - 17), przedstawionej również na plenarnym zebraniu Komitetu Mechaniki PAN w 1978 r.

poła, mechanika kwantowa, mechanika ośrodków ciągłych) jak i uzyskać istotnie nowe wyniki dotyczące jakościowej teorii układów dynamicznych, teorii stabilności i teorii drgań nieliniowych. Większość zastosowań tej teorii dotyczy bardzo wyspecyfikowanych zagadnień, a niektóre z nich są stymulowane potrzebami kosmonautyki.

Rozwijany jest również intensywnie nurt zastosowań metod mechaniki analitycznej w teorii ośrodków ciągłych.

Wielce obiecujące są próby z ostatnich lat stworzenia podstaw mechaniki chaotycznej, teorii katastrof i wykorzystania analizy niestandardowej.

Poza omówionymi wyżej koncepcjami o charakterze podstawowym, potrzeby praktyczne doprowadziły do rozwoju autonomicznych działów mechaniki teoretycznej takich jak m.in.: teorii drgań, teorii stateczności i stabilizacji ruchu oraz sterowania ruchem, teorii giroskopów, teorii uderzenia czy też mechaniki nieba. W zakresie każdego z wyżej wymienionych działów ukazało się wiele monografii, a liczba publikacji jest niemalejąca.

We wszystkich tych działach można zauważyć tendencje do doskonalenia sposobu modelowania obiektów rzeczywistych przez odchodzenie od założeń upraszczających, idealizujących zarówno rozważane obiekty jak i przebiegi zjawisk. Tego rodzaju postępowanie ma na celu nie tylko próbę dokładniejszego opisu ruchu obiektów rzeczywistych, ale może być również wykorzystane do uzasadnienia posługiwania się modelami wyidealizowanymi, np. stykiem punktowym toczącej się kuli po płaszczyźnie, gdy pole powierzchni styku jest dostatecznie małe; ciałem sztywnym lub punktem materialnym, gdy odkształcenia tego ciała są dostatecznie małe w porównaniu z odkształceniami innych ciał, wchodzących w skład rozważanego obiektu; pomijaniu w obiekcie rzeczywistym ciał, których bezwładność jest dostatecznie mała w porównaniu z bezwładnością pozostałych ciał; zastępowanie rzeczywistej siły tarcia tarciem coulombowskim itp.

Rozwijane są podstawy umożliwiające badanie własności jakościowych ruchu ustalonego takich jak np. stateczność lub niestateczność na podstawie własności energii potencjalnej, funkcji Lagrange'a czy też Hamiltona.

W przypadku zachowawczych układów mechanicznych z więzami holonomicznymi kwestię stateczności izolowanego położenia równowagi rozstrzyga już dawno znane kryterium Lagrange'a-Dirichletta tylko wtedy, gdy energia potencjalna osiąga w tym położeniu ekstremum właściwe.

Kryteria stateczności wybranych położenia równowagi, czy też ruchu ustalonego w bardziej skomplikowanych przypadkach można znaleźć również w pracach aktualnie publikowanych.

Rozwijane są w dalszym ciągu metody znajdowania całek pierwszych w związku między innymi z możliwością ich wykorzystania przy konstruowaniu funkcji Lapunowa.

Problematyką tymi zajmuje się wiele ośrodków naukowych na świecie. Wyniki badań znajdują zastosowanie przy budowie różnego rodzaju maszyn i obiektów poruszających się po ziemi, wodzie i w powietrzu oraz przestrzeni kosmicznej. Dążenie do ciągłego doskonalenia tych obiektów jest i najprawdopodobniej będzie jednym z głównych czynników powodujących rozwój nie tylko wyżej wymienionych działów mechaniki teoretycznej, ale i jej koncepcji o charakterze podstawowym.

Praca została złożona w Redakcji dnia 18 marca 1983 roku.

METODY STOCHASTYCZNE W MECHANICE: STAN I TENDENCJE ROZWOJOWE

KAZIMIERZ SOB CZYK

IPPT PAN

I. Wstęp

W ostatnim ćwierćwieczu teoretyczne metody mechaniki zostały istotnie wzbogacone przez podejście oparte na opisywaniu i analizowaniu zjawisk mechaniki przy pomocy pojęć i metod teorii prawdopodobieństwa, w szczególności — teorii procesów stochastycznych. Jak wiadomo, metodologia ta okazała się wcześniej bardzo użyteczna w wyjaśnianiu szeregu zjawisk fizyki (por. [5]). Fizyka wskazała też drogę tym metodom do mechaniki, głównie poprzez rozwój fizyki lub mechaniki statystycznej — dziedziny badającej prawidłowości w zakresie zjawisk molekularnych w oparciu o pojęcia rachunku prawdopodobieństwa.

Teoria turbulentnych przepływów cieczy była pierwszą gałęzią mechaniki zjawisk makroskopowych, w której podejście stochastyczne nie tylko odniosło sukcesy, ale także (ze względu na charakter zjawisk) niemal całkowicie ukierunkowało jej rozwój (por. [30]). W mechanice konstrukcji metody stochastyczne są najbardziej niezbędne w takich dziedzinach jak: astronautyka i aerotechnika ale zyskały one też akceptację i rozwój niemal we wszystkich tradycyjnych jej działach, takich jak: mechanika maszyn, geotechnika, mechanika budowli i w innych.

Obecnie, podejście stochastyczne — ujmujące nieregularność i przypadkowość zjawisk w terminach zdarzeń, prawdopodobieństw i wartości średnich — stanowi jeden z istotnych nurtów współczesnej mechaniki.

Rozwój metod stochastycznych w różnych dziedzinach mechaniki nastąpił głównie w ostatnim dwudziestopięcioleciu. W okresie tym zostało opublikowanych setki prac, wiele monografii, odbyło się szereg międzynarodowych konferencji naukowych, a w wielu czołowych ośrodkach naukowych świata istnieją zespoły badaczy pracujących nad różnymi stochastycznymi problemami mechaniki i innych nauk praktycznych. Prace dotyczące metod stochastycznych w mechanice ukazują się we wszystkich periodykach naukowych poświęconych mechanice i matematyce stosowanej. Są to w szczególności: *International Journal of Solids and Structures*, *International Journal of Engineering Sciences*, *International Journal of Non-linear Mechanics*, *Journal of Applied Mechanics*, *Journal of Sound and Vibration*, *Journal of Fluid Mechanics*, *Przykładnaja Matematika i Mieczanika*, *Przykładnaja Mieczanika*, *Mieczanika Twierdowo Tiała* i inne. W ostatnich latach

powstały jednak nowe periodyki w całości poświęcone zastosowaniom metod probabilistycznych. Oto one: *Journal of Applied Probability* (Anglia, Vol. I-1963), *Advances in Applied Probability* (Anglia, Vol. I-1968), *Stochastic Processes and Their Applications* (USA, Vol. I-1970), *Stochastica* (USA, Vol. I-1976), *Stochastica* (Hiszpania, w języku angielskim, Vol. I-1976) oraz nowy: *Probability and Statistics in Engineering* (USA, w przygotowaniu).

W celu bardziej szczegółowego przedstawienia tendencji rozwojowych metod stochastycznych w mechanice podzielimy tutaj mechanikę umownie na mechanikę konstrukcji i mechanikę ośrodków.

2. Metody stochastyczne w mechanice konstrukcji

2.1. Obliczenia normowe i teoria niezawodności. Różne działy mechaniki konstrukcji (np. mechanika budowli) umożliwiają inżynierowi wyznaczenie naprężeń i odkształceń powstających w konstrukcjach znajdujących się pod działaniem sił. Na tym jednak nie kończy się inżynierska analiza projektowanej konstrukcji. Podstawowym jej celem jest bowiem odpowiedź na pytanie: czy konstrukcja może służyć wystarczająco niezawodnie w czasie ustalonego okresu eksploatacji? Znajomość naprężeń i odkształceń jest konieczna po to aby wydać sąd o niezawodności i trwałości konstrukcji. W ten sposób mechanika konstrukcji łączy się, na końcowym etapie analizy inżynierskiej z teorią niezawodności. Przez niezawodność rozumie się zdolność układu technicznego (w szczególności — konstrukcji) do wypełniania jego (przewidzianych projektem) funkcji w danych warunkach eksploatacji. Zaprzestanie wypełniania chociażby jednej z tych funkcji nazywa się w teorii niezawodności awarią.

Tradycyjne metody obliczeń konstrukcji „uwzględniają” ten niezawodnościowy etap analizy poprzez wprowadzanie różnych warunków bezpieczeństwa mających na celu zapewnienie, że w czasie eksploatacji konstrukcji nie wystąpi żaden z niedopuszczalnych stanów granicznych. Jeśli stany graniczne odnosić do wytrzymałości to jak wiadomo, warunek wytrzymałości ma postać: $S \leq R$, gdzie w zależności od metodyki obliczeń, S jest obciążeniem działającym na konstrukcję lub naprężeniem w elemencie konstrukcji, zaś R jest nośnością graniczną. Częściej zastępuje się powyższy warunek przez żądanie następujące: $S_N \leq kR_N$, gdzie S_N jest obciążeniem obliczeniowym (normowym), R_N — obliczeniową nośnością graniczną, zaś k — tzw. współczynnikiem bezpieczeństwa. Obliczeniowe wartości naprężeń i nośności granicznej w tym warunku są wielkościami w pełni określonymi, zdeterminowanymi.

Jest jednak oczywiste, że zarówno warunki zewnętrzne eksploatacji jak i parametry konstrukcji mają — ogólnie mówiąc — charakter przypadkowy. Dlatego też awaria jest zdarzeniem losowym a niezawodność (lub, w tradycyjnej terminologii budowlanej — bezpieczeństwo) — charakterystyką probabilistyczną konstrukcji. Pierwsze prace poświęcone krytyce klasycznej koncepcji warunku wytrzymałości i zastosowania metod teorii prawdopodobieństwa do obliczeń konstrukcji budowlanych pochodzą z lat dwudziestych i trzydziestych naszego wieku (z polskich prac z tego zakresu należy wymienić pracę [21]). W latach powojennych prace te były szeroko rozwijane i dzisiaj istnieje w tej dziedzinie

bogata literatura (por. np. [4], [8], [11], [28]). Idea statystycznego uzasadnienia obliczeń normowych zrodzona w analizie konstrukcji budowlanych zaczęła szybko przenikać do budowy maszyn i konstrukcji lotniczych aby tam zyskać właściwe metodyczne rozwinięcie. Problematyka ta jest jednak ciągle ważna i aktualna.

Należy podkreślić, że problemy mechanicznej niezawodności konstrukcji są bardziej złożone niż problemy rozpatrywane w ogólnej lub formalnej teorii niezawodności rozwiniętej w związku z potrzebami radioelektroniki. W ogólnej teorii niezawodności rozważa się bowiem układy składające się z dużej liczby jednorodnych elementów pracujących w jednorodnych warunkach a zmianę niezawodności elementów w czasie postulują się zwykle w postaci pewnych hipotez, które następnie powinny podlegać weryfikacji doświadczalnej. W problemach niezawodności układów mechanicznych najczęściej mamy do czynienia z układami ciągłymi dla których zmiana warunków zewnętrznych (np. obciążeń i temperatury) odgrywa rolę pierwszoplanową i wobec czego istotne jest badanie wszystkich tych zjawisk (natury mechanicznej, chemicznej, fizycznej) które są przyczyną awarii. Ten kierunek badań — w chwili obecnej niewystarczająco jeszcze rozwinięty — wiąże się z klasyfikacją i probabilistycznym modelowaniem awarii mających pochodzenie mechaniczne, a w szczególności z poszukiwaniem właściwych probabilistycznych modeli zniszczenia kruchej, zniszczenia zmęczeniowego itp.

2.2. Drgania stochastyczne i zagadnienia pokrewne. Potrzeba użycia metod stochastycznych w mechanice konstrukcji staje się szczególnie ważna w analizie problemów dynamicznych; wynika ona bowiem w sposób naturalny i konieczny z faktu, iż wymuszenia zewnętrzne działające na realne maszyny, budowle czy statki (powietrzne czy morskie) mają często na tyle nieregularny i przypadkowy przebieg w czasie, że modele i teorie deterministyczne stają się bezradne. Przykładem takich wymuszeń są: działanie porywistego wiatru i silnego promieniowania akustycznego (generowanego przez silniki odrzutowe) na budowle, obciążenie konstrukcji statków morskich przez fale morskie, wymuszenie powłok samolotowych przez strumień turbulentny, działanie nieregularnych nierówności nawierzchni drogowych na konstrukcje pojazdów samochodowych itd.

Jedyne właściwe podejście do opisu i analizy drgań konstrukcji przy tego rodzaju wymuszeniach to podejście oparte na zastosowaniu teorii procesów stochastycznych. Prowadzi to do teorii drgań stochastycznych.

Drgania stochastyczne układów o dyskretnym jak o i ciągłym rozkładzie masy były badane bardzo intensywnie w latach sześćdziesiątych. Badania te znalazły odzwierciedlenie w dziesiątkach artykułów a także w monografiach (por. [6], [10], [13], [19]). Zbadane zostały problemy charakteryzacji drgań wymuszanych stochastycznie, drgań parametrycznych i rezonansów stochastycznych oraz problemy stochastycznej stabilności ruchu (por. [14], [15]). Przedmiotem analizy były zarówno układy sprężyste liniowe i nieliniowe, a także — w mniejszym zakresie, konstrukcje o cechach plastycznych (por. [7], [31]). W chwili obecnej istniejące metody i rezultaty dynamiki statystycznej dają możliwość wyznaczania podstawowych charakterystyk probabilistycznych reakcji dla szerokiej klasy układów i obciążeń stochastycznych.

Problemy dotyczące niezawodności stochastycznie drgających konstrukcji nie są jeszcze wystarczająco zbadane i wydają się być na obecnym etapie szczególnie aktualne.

Ogólną ideę niezawodnościowej analizy konstrukcji opartą na przedstawieniu za-

chowania się konstrukcji w postaci procesu stochastycznego a' stanu granicznego — w postaci wyjścia tego procesu z obszarów stanów dopuszczalnych podał W. W. BOŁOTIN w pracy [24]; idea ta rozwinięta następnie szerzej w monografii [26] — może być ciągle osnową dla interesujących rezultatów. Analiza niezawodnościowa powinna też (a także przede wszystkim) obejmować badanie skutków wywoływanych przez drgania stochastyczne. Prowadzi to do problemów probabilistycznego modelowania zniszczenia zmęczeniowego elementów poddanych drganiom stochastycznym (por. [16]). Badania takie są w ostatnich latach podejmowane coraz częściej w różnych krajach (por. np. prace [25], [3], [9], [17]). Pozwalają one uzyskać informację o trwałości konstrukcji i w ten sposób rezultaty analizy stochastycznej doprowadzić do użytku inżynierów. Badania w tym kierunku są godne rozwijania, przy czym byłoby ważne aby probabilistyczne modele teoretyczne mogły być uzupełniane i weryfikowane doświadczalnie.

2.3. Optymalizacja i identyfikacja. Inna grupa zagadnień, którą w stochastycznej analizie konstrukcji zasługuje na podkreślenie to problemy optymalizacji i identyfikacji parametrów konstrukcji na które działają wymuszenia losowe. Problemy te wiążą się w sposób istotny z matematyczną i numeryczną analizą stochastycznych równań różniczkowych opisujących zachowanie się konstrukcji. Zagadnienia identyfikacji lub estymacji parametrów układów poddanych losowym wymuszeniom mogą być formułowane jako zagadnienia odwrotne dla odpowiednich równań stochastycznych a przy tym prowadzą do interesujących problemów statystyki matematycznej. Zagadnienia stochastycznej optymalizacji konstrukcji oraz identyfikacja parametrów układów drgających stochastycznie są nowe a w ich badaniu stawiane są zaledwie pierwsze kroki. Ze względu na ich znaczenie ogólnopoznawcze i praktyczne będą one bez wątpienia przedmiotem badań w najbliższej przyszłości.

3. Metody stochastyczne w mechanice ośrodków (i materiałów)

Potrzeba podejścia stochastycznego do analizy ośrodków materialnych stała się oczywista już stosunkowo dawno. Obserwacja struktury i własności różnych ośrodków materialnych i materiałów konstrukcyjnych doprowadziła do przekonania, że modele i rozwiązania teorii klasycznych stanowią zbyt dużą idealizację i nie odzwierciedlają skomplikowanej i niejednorodnej struktury oraz złożoności procesu deformacji szeregu ośrodków rzeczywistych. Należy przede wszystkim wymienić przypadek cieczy znajdującej się w ruchu turbulentnym; ale również przy laminarnym ruchu cieczy obserwuje się zmienność jej własności spowodowaną, na przykład, fluktuacjami termicznymi. Ciała stałe są często mieszaniną różnych substancji czy ziaren o nieznannej i skomplikowanej geometrii. Przykładem mogą być ważne w praktyce materiały kompozytowe, a także grunty, skały, ośrodki biologiczne, ceramiki, betony itp. Adekwatne podejście do analizy deformacji i zniszczenia tego rodzaju ośrodków wymaga podejścia, które pozwoliłoby uwzględnić tę skomplikowaną i przypadkową strukturę. Podejście takie to modele i metody stochastyczne.

3.1. Modele stochastyczne w mechanice płynów. Jeśli chodzi o hydromechanikę to podejście stochastyczne zostało ugruntowane i rozwinięte w teorii turbulencji. Począwszy od funda-

mentalnych prac Kołmogorowa teoria turbulencji stała się, przynajmniej w jej zasadniczym nurcie, teorią losowych pól hydrodynamicznych, a jej rozwój wpłynął w istotny sposób na dzisiejszy kształt matematycznej teorii pól losowych (por. prace Kołmogorowa, Kampé de Fériét, G. Birkhoffa, Jagłoma i innych). Teoria turbulencji miała też inspirujący wpływ na prace dotyczące zjawisk w stochastycznych ośrodkach stałych. Jest to w chwili obecnej dziedzina zaawansowana o bardzo istotnych implikacjach poznawczych i praktycznych; świadczą o tym istniejące monografie, a przede wszystkim dwutomowe dzieło MONINA i JAGŁOMA [30]. Mimo swego zaawansowania teoria turbulencji jest i bez wątpienia nadal pozostanie ważną i aktualną dziedziną dla badań opartych na modelach i metodach stochastycznych. Aktualny kierunek rozwoju statystycznej teorii turbulencji dotyczy równań stochastycznych i miar w przestrzeniach nieskończenie wiele wymiarowych i w związku z tym bardziej należy do współczesnej matematyki niż do mechaniki w jej tradycyjnym rozumieniu (por. [27]).

Poza teorią turbulencji istnieje w obrębie mechaniki płynów szereg innych problemów, których badanie wymaga użycia metod stochastycznych; np. wpływów losowych fluktuacji termicznych, uwzględnienie losowej chropowatości ścian kanałów w których odbywa się przepływ laminarny, dyfuzja w strumieniu cieczy itp. Osobne miejsce stanowi probabilistyczne podejście do teorii zawieszin rozwijane w różnych ośrodkach naukowych (por. [1]).

3.2. Metody stochastyczne w mechanice ciała stałego. Przechodząc do mechaniki ośrodków stałych należy przede wszystkim wymienić problem który stanowi podstawowe zagadnienie nauki o materiałach. Jest to mianowicie problem stworzenia ogólnej statystycznej teorii deformacji i zniszczenia ciał stałych, która pozwoliłaby z jednego punktu widzenia opisać procesy deformacji, zniszczenia, plastyczności, pełzania itp. Taka teoria statystyczna odgrywałaby dla nauki o materiałach podobną rolę jak fizyka statystyczna dla nauki o zjawiskach molekularnych i cieplnych. Z wielu podstawowych przyczyn stworzenie takiej konsystentnej teorii jest trudne i zależy od postępów w innych dziedzinach nauki. Czynione są jednak próby tworzenia modeli i teorii częściowych. Na przykład znane są najprostsze modele statystyczne opisujące deformację plastyczną w warunkach jednoosiowego stanu naprężenia. Duże postępy osiągnięto w modelowaniu zniszczenia krucho w oparciu o założenie, że współdziałanie elementów pierwotnych w ciele stałym można pominąć w związku z czym wytrzymałość ciała jako całości jest określona przez wytrzymałość najsłabszego elementu; takie podejście zostało na początku lat czterdziestych zaproponowane przez Weibulla oraz Frankiela i Kontorową. Ważne rezultaty otrzymano też w probabilistycznym modelowaniu zniszczenia zmęczeniowego (por. np. [9], [16], [17]) oraz w analizie wpływu losowego rozkładu defektów na proces deformacji i zniszczenia.

Problematyka o której tutaj mówimy obejmuje także wszystkie te wysiłki badawcze, których celem jest rozszerzenie metod fizyki statystycznej na mikroskopowe zjawiska w ciałach stałych (por. [23]). Z literatury w zakresie teorii dyslokacji i z obecnego stanu tej dziedziny wynika, że bardzo istotne są i będą w najbliższej przyszłości wszystkie prace stawiające sobie za cel oparcie kinetycznej teorii ruchu dyslokacji o dobre podstawy geometrii i analizy stochastycznej (por. [12]). Metody fizyki statystycznej mogą być też użyteczne dla opisanie i wyjaśnienia procesów polimeryzacji, pamięci kształtu itp.

Inna obszerna grupa zagadnień mechaniki ośrodka stałego i nauki o materiałach których badanie wymaga podejścia stochastycznego to modelowanie i analiza deformacji ośrodków o skomplikowanej i niejednorodnej strukturze, a więc takich jak różnego rodzaju kompozyty, grunty, ośrodki biologiczne itp. Jest to problematyka ważna zarówno jeśli mieć na uwadze podstawy mechaniki jak i potrzeby praktyki inżynierskiej; świadczy o tym między innymi stale wzrastająca liczba prac, monografii i konferencji naukowych (por. [2], [20], [29]).

Problemy mechaniki nieregularnych lub stochastycznych kompozytów były w ostatnich 15 - 20 latach badane bardzo intensywnie i dzisiaj istnieje bogata literatura dotycząca głównie wyznaczania tzw. stałych efektywnych (por. np. [2], [20]). Analiza stochastyczna kompozytów nie ma jednak jeszcze właściwych podstaw matematycznych. Wydaje się, że tworzenie takich podstaw oparte na pojęciach i rezultatach teorii pól losowych i geometrii stochastycznej będzie przedmiotem badań w najbliższej przyszłości. Oprócz metod teoretycznych właściwy rozwój mechaniki kompozytów stochastycznych wymaga odpowiednich badań doświadczalnych. Te zaś łączą się ściśle ze statystyką pól losowych i ze stereologią (por. [22]).

3.3. Stochastyczna analiza fal (akustycznych). W mechanice ośrodków (zarówno płynnych jak i stałych) ważne miejsce zajmują zagadnienia propagacji fal. Zjawisko ruchu falowego łączy też mechanikę z akustyką — dziedziną której podstawowym celem jest badanie praw rozchodzenia się zaburzeń (deformacji) w ośrodkach materialnych. Wskutek istnienia wielu różnorodnych i przypadkowych czynników determinujących realne ruchy falowe (np. turbulencja atmosfery, niejednorodność szeregu ośrodków stałych) bardziej adekwatny jest często opis fal w języku procesów stochastycznych. Prowadzi to do analizy fal stochastycznych. Szczególne miejsce zajmuje analiza fal rozprzestrzeniających się w ośrodkach stochastycznych (stochastycznie niejednorodnych).

Zjawiska związane z rozprzestrzenianiem się fal w ośrodkach stochastycznych i metody ich badania są bardzo różnorodne. Zależą one od charakteru i sposobu opisu losowych niejednorodności od informacji jaką posiadamy o strukturze ośrodka przenoszącego ruch falowy itp. Należy jednak podkreślić, że niezależnie od różnic powodowanych specyfiką rozważanego problemu, propagacja fal w ośrodku stochastycznym związana jest zawsze ze zjawiskiem rozpraszania. Rozpraszanie staje się z kolei przyczyną szeregu zjawisk i efektów interesujących z fizycznego punktu widzenia i ważnych w zastosowaniach. Przede wszystkim fale rozproszone nakładają się na falę pierwotną (padającą) i powodują przestrzenne i czasowe fluktuacje pola sumarycznego. W rezultacie obserwuje się tłumienie (zanikanie amplitudy) fali oraz jej opóźnienie (zmianę prędkości propagacji) a także szereg innych zjawisk. Dostarczenie ilościowych i jakościowych informacji o tych zjawiskach jest celem analizy fal w ośrodkach stochastycznych (por. [18], [20], [32]).

Ze względu na potrzeby praktyki (propagacja dźwięku w morzu i w turbulentnej atmosferze, rozprzestrzenianie się deformacji sprężystych (np. sejsmicznych) w skorupie ziemskiej oraz propagacja fal elektromagnetycznych (np. radiowych) w atmosferze) w ostatnim trzydziestoleciu nastąpił bardzo intensywny rozwój badań nad propagacją fal stochastycznych. W chwili obecnej istnieje bardzo bogata literatura dotycząca tego przedmiotu (por. spis literatury w monografii [20]).

Mimo zaawansowania badań brak jest jednak ciągle ogólnej i jednolitej teorii fal

stochastycznych. Istniejące metody korzystają z metod przybliżonych i oparte są na pewnych założeniach upraszczających i hipotezach fizycznych. Poza tym stochastyczne równania różniczkowe cząstkowe będące najczęściej matematycznym modelem fal stochastycznych nie mają jeszcze zadowalającej teorii. Opracowywanie ścisłych matematycznych metod analizy stochastycznych równań falowych jest i będzie w najbliższej przyszłości jednym z ważnych kierunków w tej dziedzinie. Zadanie to wiąże się, podobnie jak w przypadku teorii turbulencji, z rozwijaniem i stosowaniem zaawansowanego aparatu współczesnej analizy funkcjonalnej i teorii miary. Inna klasa zagadnień związana z propagacją fal stochastycznych to identyfikacja parametrów ośrodków stochastycznych na podstawie obserwacji pola falowego rozproszonego (przez ośrodek). Szereg takich zagadnień można matematycznie formułować jako problemy odwrotne dla odpowiednich stochastycznych równań różniczkowych falowych. Na tej drodze stawiane są zaledwie pierwsze kroki. Oczywiście, oprócz przytoczonych tutaj problemów natury matematycznej istnieje stała potrzeba uzupełniania i weryfikowania rezultatów teoretycznych na drodze doświadczalnej.

Literatura cytowana w tekście

1. G. K. BATCHELOR, *Sedimentation in a dilute dispersion of spheres*, J. Fluid Mech., 52, 245 - 268, 1972; Transport properties of two-phase materials with random structure; Ann. Rev. Fluid Mech., 6, 227 - 255, 1974.
2. M. J., BERAN, *Statistical continuum theories*, Interscience Publ., New York, 1968.
3. L. J. BOGDANOFF, *A new cumulative damage model*, J. Appl. Mech., 45, 246, 1978.
4. W. W. BOLOTIN, *Metody statystyczne w mechanice budowli*, Warszawa, Arkady, 1968.
5. S. CHANDRASEKHAR, *Stochastic problems in physics and astronomy*, Rev. Mod. Phys., 15, nr 1, 1 - 89, 1943.
6. S. H. CRANDALL, W. D. MARK, *Random vibration in mechanical systems*, Academic Press, N. York, 1963.
7. K. DOLIŃSKI, *Stochastyczna analiza konstrukcji sztywnoplastycznych*, Praca doktorska, IPPT PAN, Warszawa, 1977.
8. A. M. FREUDENTHAL, M. SHINOZUKA, I. KONISHI, T. KONAZAWA (Editors), *Reliability approach in structural engineering*, Proc. of Japan-USA Joint Seminar, Maruzen CO. Ltd. Tokyo, 1975.
9. F. KOZIN, J. L. BOGDANOFF, *A critical analysis of some probabilistic models of fatigue crack growth*, Eng. Fracture Mechanics, 14, nr 1, 1981.
10. Y. K. LIN, *Probabilistic theory of structural dynamics*, McGraw Hill Comp., 1967.
11. J. MURZEWSKI, *Bezpieczeństwo konstrukcji budowlanych*, Arkady, Warszawa, 1970.
12. W. L. NICHOLSON (Editor), *Proceedings of the Symposium on Statistical and Probabilistic Problems in Metalurgy*, Seattle, Washington, 1971, Special Suppl. to Adv. in Appl. Probability. Dec. 1972.
13. K. PISZCZEK, *Metody stochastyczne w teorii drgań nieliniowych układów mechanicznych*, PWN, Warszawa, 1981.
14. B. SKALMIERSKI, A. TYLIKOWSKI, *Stabilność układów dynamicznych*, Warszawa, PWN, 1973.
15. K. SOB CZYK, *Stochastyczna stabilność ruchu*, Mech. Teor. i Stos., tom. 8, z. 4, 1970.
16. K. SOB CZYK, *Drgania konstrukcji i stochastyczne modele uszkodzeń*, Mech. Teor. i Stos., tom 18, z. 2, 1980.
17. K. SOB CZYK, *On the Markovian models for fatigue accumulation*, J. Mech. Theor. Appl., Numéro Special, 1982, str. 147 - 160.
18. K. SOB CZYK, *Elastic wave propagation in a discrete random medium*, Acta Mechanica, 25, 13 - 28, 1976.

19. K. SOBZYK, *Metody dynamiki statystycznej*, Warszawa, PWN, 1973.
20. K. SOBZYK, *Fale stochastyczne*, Warszawa, PWN, 1982.
21. W. WIERZBIŃSKI, *Bezpieczeństwo budowy jako zagadnienie prawdopodobieństwa*, Przegląd Techniczny, 1936.
22. E. E. UNDERWOOD, *Stereology or the quantitative evaluation of microstructures*, Journal of Microscopy, 89, 161 - 180, 1969.
23. H. ZORSKI, *Statistical theory of dislocations*, Intern. J. Solids Struct., tom. 4, nr 10, 1968.
24. В. В. Болотин, *Теория надежности механических систем с конечным числом степеней свободы*, Мех. Тв. Тела, В. 5, 1969,
25. В. В. Болотин, *Некоторые математические и экспериментальные модели процессов разрушения*, Проблемы прочности, № 2, 1971.
26. В. В. Болотин, *Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений*, Москва, Изд. Литер. по Строительству, 1971.
27. М. И. Вишик, А. В. Фурсиков, *Математические задачи статистической гидромеханики*, Наука, Москва, 1980.
28. С. Д. Волков, *Статистическая теория прочности*, Машгиз, Москва 1960.
29. В. А. Ломакин, *Статистические задачи твердых деформируемых тел*, Изд. Наука, Москва, 1970.
30. А. С. Монин, А. М. Яглом, *Статистическая гидромеханика*, Изд. Наука, Москва; часть I—1965, часть II—1967.
31. В. А. Пальмов, *Колебания упруго-пластических тел*, Изд. Наука, Москва, 1976.
32. K. Sobczyk, *Распространение волн в стохастических средах*, Сб. переводов Механика, 6(148), 1974.

Praca została złożona w Redakcji dnia 26 kwietnia 1983 roku.

MECHANIKA DOŚWIADCZALNA — PROBLEMY I KIERUNKI ROZWOJU¹⁾

JACEK STUPNICKI

Politechnika Warszawska

Rozwój mechaniki jest nierozzerwalnie związany z rozwojem doświadczalnych metod badań. Bez obserwacji zjawisk i procesów mechanika w obecnej swojej formie nie mogłaby istnieć, byłaby nauką abstrakcyjną poruszającą się w hipotetycznej przestrzeni. Badania doświadczalne w przeszłości stymulowały rozwój mechaniki, a coraz dokładniejsze obserwacje i pomiary zmuszały do doskonalenia teorii i związanych z nimi modeli matematycznych.

Współczesna nauka i technika stawia przed mechaniką nowe problemy, które mogą być efektywnie rozwiązywane jedynie w ścisłej koordynacji badań doświadczalnych i teoretycznych. Jednakże obserwując życie naukowe w kraju i zagranicą zauważamy brak koordynacji takich badań. Badania doświadczalne i teoretyczne są prowadzone niezależnie przez różne zespoły badawcze. Z uwagi na wymagane różne predyspozycje psychiczne, różne zdolności i różne przygotowanie do prowadzenia badań, naukowcy na ogół nie zajmują się jednocześnie badaniami teoretycznymi i doświadczalnymi. Niestety zespoły teoretyczne i doświadczalne tworzą hermetyczne grupy, których wyniki prac są wzajemnie niedostępne i nieprzydatne.

Na wielu spotkaniach Sekcji Mechaniki Doświadczalnej Komitetu Mechaniki PAN postulowana jest pilna potrzeba współdziałania zespołów teoretycznych i eksperymentalnych. Winna być wypracowana platforma współpracy, sposób kontaktów oraz wspólny język dla opisu wyników badań teoretycznych i doświadczalnych.

Należy postulować wypracowanie takich metod współpracy by wyniki prac doświadczalnych inspirowały teoretyków i aby stawały się podstawą do powstawania teorii i uogólnień. Podobnie wyniki prac teoretycznych winny wskazywać cele badań doświadczalnych, winny opisywać przypadki, których przebadanie może potwierdzić lub obalić teorię. Dopiero ściśle powiązanie eksperymentu i teorii może prowadzić do harmonijnego rozwoju mechaniki [12].

Współczesne cele badań doświadczalnych w mechanice pokrywają się ze strategicznymi kierunkami w zakresie mechaniki ośrodków ciągłych i mechaniki konstrukcji. Wzrasta zapotrzebowanie na nowe związki konstytutywne coraz bardziej precyzyjnie opisujące własności materiałów i uwzględniające wpływ na materiały różnych czynników,

¹⁾ Niniejsze opracowanie jest rozwinięciem fragmentu raportu opracowanego przez zespół: B. Radziszewski, P. Rafalski, K. Sobczyk, J. Stupnicki, K. Wilmański, dla Komitetu Mechaniki PAN.

między innymi czasu, temperatury, promieniowania, historii deformacji, struktury krystalicznej.

Aby te związki ustalić prowadzone są badania w zakresie dużych odkształceń, obciążeń cyklicznych, obciążeń udarowych. Badana jest propagacja fal naprężeń, propagacja czoła szczeliny, badane są własności lepkosprężyste i lepkoplastyczne, ośrodki o niejednoznacznych zależnościach naprężeń od odkształceń. Ponadto badania doświadczalne są niezbędne w złożonych zagadnieniach technicznych, w których brak jeszcze obecnie możliwości analiz teoretycznych i numerycznych. Wyniki badań doświadczalnych są uznawanym dowodem prawidłowości decyzji podjętych przez konstruktorów i poprawności wyników uproszczonych obliczeń sprawdzających. W wielu dziedzinach postęp techniki nie może czekać na rozwiązania teoretyczne. Jeszcze obecnie, wskutek braku rozwiązań teoretycznych jedynie w oparciu o badania doświadczalne konstruktorzy uwzględniają procesy zmęczenia, mechaniki pękania, płynięcie materiału, zagadnienia kontaktu z udziałem tarcia i wiele innych.

Badania doświadczalne stanowią nierozłączne ogniwo systemu automatycznego sterowania, ciągłej analizy stanu. Znajduje to potwierdzenie w układach sterowania lotów samolotów i pojazdów kosmicznych, pływania statków, stanów urządzeń technicznych, reaktorów atomowych, zapór, mostów, sterowania ruchem robotów przemysłowych. Metody badań doświadczalnych są włączone w linie montażowe fabryk stanowiąc podstawę kontroli produkcji, procesów, kontroli jakości.

Nowe generacje komputerów zdają się mieć nieograniczone możliwości jednak obecny okres cechuje utrata zaufania do efektywności metod numerycznych, okazały się one bardzo kosztowne i żmudne w zakresie badań złożonych konstrukcji z materiałów o skomplikowanych własnościach reologicznych, procesów przebiegającego w czasie procesów pełzania, zjawisk falowych, procesów ze zmianą fazy lub obszaru.

Jednakże rozwój komputerów i rozwój systemów automatycznej regulacji stymuluje rozwój metod doświadczalnych. Metody badań, które dawniej nie mogły być stosowane z uwagi na zbyt pracochłonny proces analizy wyników obecnie są akceptowane. Powstało szereg układów sprzężonych z komputerem, gdzie wyniki pomiarów są zbierane i systematyzowane i analizowane przez komputer a efekt końcowy podawany jest w postaci wykresów lub wartości liczbowych. Powstały układy, w których stanowisko doświadczalne połączone jest bezpośrednio z komputerem, a wyniki analizowane na bieżąco w trakcie badań służą do sterowania dalszym przebiegiem pomiarów.

Rzeczony rozwój tej techniki badań jest efektem wielkich nakładów finansowych na badania kosmiczne gdzie tysiące różnych pomiarów wykonywane i analizowane stanowią podstawę do korekty trajektorii lotu, naprowadzenia na właściwą orbitę.

Zupełnie nowe możliwości stworzyły automatyczne układy przetwarzania obrazów stosowane do analizy danych polowych np. elastooptyki czy interferometrii holograficznej, oparte o zasady techniki telewizyjnej. Numeryczny zapis obrazu wymagający zapamiętania miliona danych w ciągu ułamka sekundy wymaga zupełnie nowych systemów pamięci komputerów oraz ogromnych komputerów dla późniejszego czy równoległego przetworzenia takiej liczby danych — eliminowania szumów i błędów przypadkowych.

Efektywne okazały się metody hybrydowe wykorzystujące zalety metod numerycznych i metod doświadczalnych. Filozofia tego typu badań polega na eliminacji z algorytmu

obliczeń numerycznych tych etapów, które są bądź bardzo czasochłonne lub niemożliwe do przeprowadzenia i w to miejsce wprowadzania stanowiska doświadczalnego, gdzie dane zjawisko przebiega w rzeczywistości, nie podlega więc uproszczeniom związanym z tworzeniem modelu matematycznego.

Jeśli dla przykładu analizie podlega układ sprężysty w całym obszarze z wyjątkiem jednego podobszaru, w którym materiał ma własności lepkosprężyste trudne do opisu matematycznego lub niejednoznacznie zdefiniowane, wówczas tworzymy model matematyczny całego układu włączając do niego dane zbierane w trakcie przeprowadzenia doświadczenia nad modelem fizycznym podobszaru lepkosprężystego [6]. Ostatnią dekadę cechuje żywiołowy rozwój metod doświadczalnych. Metody i techniki tu stosowane stają się bliższe badaniom fizyków w zakresie badania materii, korzystają z metod automatycznego sterowania, opierają się na ściśle określonych modelach fizycznych [11].

Badania doświadczalne daleko odeszły od pomiarów rutynowych, przeprowadzonych zgodnie z normami kontroli jakości.

Ze zbioru kilkuset opisanych zjawisk fizycznych mających związek z procesami mechanicznymi tj. ruchem, przemieszczeniem i odkształceniem ciał do niedawna wykorzystano jedynie kilka (najczęściej zmianę oporności właściwej, efekt elastoptyczny, zjawisko piezoelektryczne i termoelektryczne). W ostatnim okresie do badań mechanicznych wciągnięto — emisję akustyczną [13], magnetostrykcję [5] i emisję promieniowania podczerwonego [14], zmianę polaryzacji w ciekłych kryształach, dwójłomność strumienia cieczy [9], [10].

W coraz szerszym zakresie do ilościowych badań własności mechanicznych, naprężeń własnych stosuje się metody akustyczne pomiaru prędkości propagacji fal akustycznych [15].

Istnieją próby włączenia do badań procesów mechanicznych zjawiska absorpcji światła, dichroizmu [8], wykorzystania dodatkowych pól fizycznych w elastoptyce np. efektu Kerr'a, Faradaya, Cotton-Moutona, efektu Pockelsa i innych [1] [8]. Proponowane jest zastosowanie czujników atomowych do badania efektów lokalnych naprężeń w kryształach [4].

Dzięki szerokiemu rozwojowi laserowych źródeł światła powstały zupełnie nowe możliwości badań przemieszczeń, badań kształtu, odkształceń, metodami interferometrii holograficznej i interferometrii płamkowej. Został rozszerzony zakres badań elastoptycznych na badania brył trójwymiarowych metodami światła rozpraszanego. Sprzężenie badań elastoptycznych z holograficznymi dostarcza dodatkowych informacji a badania elastoptyczne w zakresie promieniowania podczerwonego rozszerzają zakres możliwości spełnienia warunków podobieństwa modelowego [2]. W tym też kierunku idą stałe poszukiwania nowych polimerów optycznie czynnych i optycznie nieczynnych o specyficznych własnościach mechanicznych w szerokim zakresie temperatur.

Literatura cytowana w tekście

1. H. ABEN, *Additional Physical Fields in Photoelasticity*, IUTAM Symposium The Photoelastic Effect and Its Applications OTTIGNES 1973, Springer Verlag 1975, str. 294 - 316.
2. G. L., CLOUD, J. T. PINDER, *Techniques in Infrared Photoelasticity*, Experimental Mechanics 8, 193-201, 1968.

3. J. W. DALLY, *Classical and Advanced Methods of Photoelasticity*, IUTAM Symposium The Photoelastic Effect and Its Applications OTTIGNES 1973, Springer Verlag 1975, 17 - 102.
4. J. DURAN, *The Use of Atomic Gages for Studying Local Stress Effects in Crystals*, IUTAM Symposium The Photoelastic Effect and Its Applications OTTIGNES 1975 Springer Verlag 1975, 257 - 271.
5. L. JILKEN, *Electromagnetic Detection of Mechanical Phenomena*, Linköping Studies in Sciences and Technology, Dissertation Linköping 1978.
6. K. H. LAERMAN, *Hybrids Analysis of Plate Problems*, Experimental Mechanics 21, N. 10, 1981.
7. W. P. MASON, *Physical Acoustics and Properties of Solids*, D van Nostrand Co Inc. New York 1958.
8. S. PAUTHIER—CAMIER, *The Available Experimental Methods for Measure the Optical Properties of Matter*, IUTAM Symposium The Photoelastic Effect and Its Applications OTTIGNES 1973 Springer Verlag 1975, 231 - 257.
9. W. PHILIPPOFF, *Flow Birefringence and Stress*, J Appl. Physics 27, 984 - 989, 1956.
10. J. T. PINDER, A. R. KRISHNAMURTHY, *Characteristic Relations of Flow Birefringence*, Part 1. Relation in Transmitted Radiation, Exp. Mech. 18. 1 - 10, 1978, Part 2. Relations in Scattered Radiation, Exp. Mech. 18, 41 - 48, 1978.
11. J. T. PINDER, *New Physical Trends in Experimental Mechanics*, CISM Courses and Lectures no. 264 Springer Verlag 1981.
12. J. STUPNICKI, *Raport o stanie mechaniki eksperymentalnej w Polsce*, przygotowany przez Sekcję Mechaniki Doświadczalnej Komitetu Mechaniki PAN.
13. A. S. TETELMAN, R. GHOW: *Acoustic Emission*, ASTM STP-505, p. 30 - 40, Philadelphia ASTM, 1972.
14. V. TURCHINA, D. M. SANBORU, W. O. WINER, *Temperature Measurement in Sliding Elastohydrodynamic Point Contacts*, Transaction of the ASME, July 1974.
15. A. VARY, *Quantitative Ultrasonic Evaluation of Mechanical Properties of Engineering Material.*, 1981, Ultrasonic Symposium.

Praca została złożona w Redakcji dnia 20 kwietnia 1983 roku

KOMPUTERYZACJA MECHANIKI KONSTRUKCJI W POLSCE W OSTATNIEJ DEKADZIE DZIAŁALNOŚCI PTMTiS

GUSTAW RAKOWSKI

Politechnika Warszawska

1. Uwagi wstępne

Mając określony czasokres naszych rozważań określimy bliżej ich przedmiot.

Pod pojęciem komputeryzacji będziemy rozumieli wprowadzanie metod dogodnych do stosowania automatycznych środków liczenia, głównie elektronicznych maszyn cyfrowych (EMC) — komputerów — a także towarzyszącego sprzętu informatycznego, służącego rozwiązywaniu problemów mechaniki.

Wspomniane metody dogodne do stosowania EMC, zwane metodami komputerowymi mają trzy zasadnicze cechy charakterystyczne

- dotyczą dyskretnych modeli matematycznych,
- dają się w pełni zalgorytmizować,
- przedstawione są w zapisie umożliwiającym łatwe przenoszenie i przetwarzanie informacji.

Wyjaśnijmy także powód zajmowania się komputeryzacją mechaniki konstrukcji a nie wprost jej problemami badawczymi i zastosowaniami. Otóż tak jest, że prawie wszystko ważniejsze i liczące się w nauce i technice ostatniego ćwierćwiecza powstało przy zastosowaniu bądź wręcz dzięki komputerom. Dotyczy to także mechaniki konstrukcji. Tak więc analizując proces komputeryzacji, prześledzimy główne problemy tej dziedziny wiedzy technicznej.

2. Stan zagadnienia na początku lat siedemdziesiątych

Rozwój mechaniki konstrukcji w interesującym nas aspekcie, do lat siedemdziesiątych był przedmiotem dwóch prac przeglądowych [1, 2]. Przypomnijmy, że na przełomie lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych, kraje technicznie rozwinięte wkraczały w początki tzw. trzeciej rewolucji komputerowej.

Trzecią rewolucję znamionuje istnienie szybkich sieci komunikacyjnych między maszynami różnych typów, tworzącymi systemy komputerowe, rozwój techniki powiązań pomiędzy różnymi programami, zapewniającymi swobodny przepływ danych od różnych źródeł do użytkownika, istnienie zintegrowanych systemów komputerowych zawierających

banki danych i algorytmów, wyposażonych w techniki i urządzenia umożliwiające dostęp i optymalny wybór programu.

Okres ten dobrze przedstawia referat [3], a także inne prace zgłoszone na piątą konferencję zorganizowaną w roku 1970 w Lafayette (USA) przez „The Committee of Electronic Computation of the ASCE Structural Division”, w ramach „Conferences on Electronic Computation”.

Sytuację w dziedzinie zastosowania komputerów w mechanice konstrukcji na początku lat siedemdziesiątych np. w USA charakteryzuje m.in. powszechność używania komputerów we wszystkich jednostkach badawczych i projektowych. Uruchomiono tam wówczas i wdrożono do codziennej praktyki ponad 400 poważnych programów. Dotyczą one analizy wszelkich typów konstrukcji. Od ustrojów prętowych, przez dźwigary powierzchniowe, aż do układów trójwymiarowych. Ujnują te programy wszelkie rodzaje obciążeń, statyczne, dynamiczne, termiczne, akustyczne itp. Pozwalają analizować stany sprężyste, plastyczne, nieliniowe (geometrycznie i fizycznie). Uwzględniać efekty reologiczne, zmęczenie itp. Zdecydowana większość programów jest oparta na metodzie elementów skończonych (MES). Część dotycząca zagadnień nieliniowych oraz powłok, uwzględnia metodę różnic skończonych. Prawie wszystkie programy są napisane w języku FORTRAN. We wszystkich szkołach wyższych USA, a szczególnie technicznych, studenci przechodzą przez obowiązkowe, szeroko pomyślane szkolenie w dziedzinie „computer science”.

W zagranicznych badaniach w dziedzinie analizy konstrukcji można wyróżnić dodatkowo następujące kierunki rozwojowe:

- traktowanie kompleksowe układów liniowo-sprężystych bez wyróżniania typu (prętowe, powierzchniowe, trójwymiarowe),
- opracowanie efektywnych metod modyfikacji macierzy sztywności przy zmianie niektórych elementów badanego ustroju,
- przechodzenie na statystyczny opis parametrów konstrukcji,
- uwzględnienie właściwości plastycznych stanów sprężysto-plastycznych, lepkosprężystych oraz efektów reologicznych,
- badanie problemów nieliniowych.

Należy jednak podkreślić, że znaczenie badawcze analizy konstrukcji maleje. Zaczyna ona ustępować rozwijającej się innej „filozofii obliczeniowej” jaką jest projektowanie automatyczne (CAD — computer — aided design).

Więcej niż połowa prac zgłoszonych w Lafayette dotyczyła zagadnień automatycznego projektowania, przy czym komputer był pokazany jako aktywny uczestnik w procesie projektowania, a nie tylko bierne narzędzie. W analizie konstrukcji zdecydowanie zapanowała MES. Część prac poświęcona była problemom optymalizacji.

Tymczasem ówczesny stan komputeryzacji mechaniki w kraju, odpowiadał w przybliżeniu sytuacji istniejącej w krajach przodujących dziesięć lat wcześniej, w okresie trzeciej konferencji ASCE (Boulder 1963), charakteryzującej się następującymi faktami:

- pojawienie się komputerów pracujących w systemie „timesharing” (wielodostępność),
- przechodzenie z języków wewnętrznych na proceduralne (ALGOL, FORTRAN, COBOL), i początki języków problemowo-zorientowanych (STRESS, COGO),
- początki grafiki komputerowej,
- odchodzenie od klasycznych, prostych metod i problemów mechaniki w zapisie ma-

- cierzowym na rzecz typowych metod komputerowych (MES, metoda różnic skończonych — MRS, metoda macierzy przeniesienia — MMP),
- początki nauczania w zakresie elektronicznej techniki obliczeniowej (ETO), i używania komputerów do ćwiczeń studenckich,
- coraz częstsze wykorzystywanie komputerów do prac inżynierskich głównie projektowych.

Wskazując na krajowe odpowiedniki wymienionych faktów należy w pierwszym rzędzie wspomnieć o pracach grupy J. Szmeltera dotyczących zastosowania MES w analizie statycznej układów prętowych, powierzchniowych i mieszanych np. [4, 5], oraz opracowaniu ponad pięćdziesięciu programów na maszynę ZAM-41 [6]. Interesującą odmianę MES tzw. metodę sztywnych elementów skończonych (SES) opracował w tym czasie J. KRUSZEWSKI [7], a kierowany przez niego zespół przystąpił do prac nad systemem programów SFEM-72 na komputer ICL 1900. Ukazały się opracowania monograficzne dotyczące MMP [8, 9] w zastosowaniu do konstrukcji prętowych i powierzchniowych oraz książki autorów krajowych i tłumaczenia [10, 11, 12]. Opracowano język problemowozorientowany STRAINS-71 [13] analogiczny do wspomnianego systemu STRESS.

Na większą skalę stosowały komputery takie jednostki projektowe jak ETOPROJEKT i PROZAMET (Warszawa), Biuro Projektów Przemysłu Węglowego (Katowice), CBKO (Gdańsk).

Miarą rosnącego zainteresowania mechaniką komputerową były organizowane konferencje: zastosowań ETO w budownictwie (Gdynia, 1970, Krynica 1971, 1972) maszyn cyfrowych w pracach inżynierskich (Katowice 1971), sympozjum na temat metod numerycznych zorganizowane przez gdański oddział PTMTS (1972).

Na uwagę zasługuje pierwsze krajowe sympozjum nt. „Metody komputerowe w mechanice konstrukcji” w Poznaniu 1973. Dało ono początek serii konferencji pod tym samym tytułem i określiło warunki oraz główne kierunki rozwoju mechaniki komputerowej w Polsce.

Uwzględniając światowe tendencje postulowano wówczas:

- upowszechnienie MES oraz rozwinięcie MRS z dostosowaniem jej do komputeryzacji,
- w mechanice ustrojów prętowych uwzględnienie przestrzenności i efektów drugiego rzędu, w powierzchniowych grubość płyt i powłok,
- w całej mechanice konstrukcji uwzględnienie nieliniowości,
- w dynamice badanie procesów nieustalonych,
- rozwój optymalizacji, a szczególnie budowanie modeli służących optymalizacji rzeczywistych konstrukcji,
- wykorzystanie komputerów w badaniach doświadczalnych,
- ujednoczenie języków programowania z preferencją FORTRAN-u,
- opracowanie efektywnych programów na EMC dla celów dydaktycznych i zastosowań praktycznych,
- wprowadzenie kształcenia studentów w zakresie podstaw ETO i rozwinięcie jej zastosowań szczególnie w przedmiotach mechaniki i pokrewnych,
- organizowanie kursów i konferencji szkoleniowych w dziedzinie komputerowych metod mechaniki i utworzenie czasopisma poświęconego tej tematyce.

Jak zobaczymy, dalszy rozwój komputeryzacji mechaniki w kraju uwzględnił w znacznym stopniu powyższe postulaty.

3. Rozwój komputeryzacji mechaniki konstrukcji od początku lat siedemdziesiątych

Przedstawmy pokrótce sytuację panującą w krajach zaawansowanych w rozwijaniu i zastosowaniach komputerowych metod mechaniki (Wielka Brytania, RFN, Kanada, Japonia a głównie USA).

Zaznaczone na początku lat siedemdziesiątych trendy rozwojowe (konferencja ASCE, Lafayette 1970), wyraźnie się rozwinęły i utrwaliły. Nie wnikając w szczegóły przytoczymy tylko niektóre fakty:

Powstały cztery międzynarodowe czasopisma związane ściśle z mechaniką komputerową:

- Computer and Structures, red. Liebowitz (1971),
 - Computer methods in applied mechanics and engineering, red. Argyris, Hughes, Oden (1972),
 - International Journal of numerical methods in engineering, red. Zienkiewicz (1972),
 - Engineering optimization, red. Templeman (1974),
- oraz kilka czasopism pokrewnych.

Każdego roku organizowana jest co najmniej jedna międzynarodowa konferencja na temat komputerowych metod w mechanice. Obok ogólnotematycznych organizuje się konferencje poświęcone wybranym ważnym zagadnieniom np. analizie nieliniowej (1977 Geilo—Norwegia, 1978 Stuttgart—RFN, 1980 Swensea—Wielka Brytania, 1981 Stuttgart i planowana na rok 1983 MIT-USA), czy grafice komputerowej („Eurographics”, 1980 Genewa, 1981 Darmstadt). Ważną rolę odgrywają konferencje sumujące poszczególne etapy i programujące dalszy rozwój komputeryzacji np. [14, 15].

Z lektury publikacji zagranicznych, a szczególnie prac przeglądowych [14, 15], wyłania się następujący obraz.

Problemy liniowej mechaniki konstrukcji statyki i dynamiki, zostały zbadane i przygotowane do praktycznego wykorzystania. Sporządzono katalog ponad 450 opracowanych w świecie optymalnych programów na EMC służących rozwiązywaniu praktycznie wszystkich zagadnień mechaniki [16].

Aktualna problematyka badawcza dotyczy głównie:

- analizy i syntezy problemów nieliniowych geometrycznie i fizycznie,
- optymalizacji i automatycznego projektowania (CAD),
- grafiki komputerowej jako środka kontaktu człowiek-maszyna, przygotowania danych i prezentowania wyników,
- oddziaływań, głównie dynamicznych w relacji konstrukcja — ośrodek (ciecz, gaz, grunt) i szerzej problemy pól sprzężonych,
- konstrukcje z materiałów o specjalnych własnościach (laminaty kompozyty),
- mechaniki wielkich systemów oraz realistycznych modeli konstrukcji i materiałów.

Wysoki stopień rozwoju komputerowych metod mechaniki i rozległość ich zastosowań, stymulowane były potrzebami w zakresie nowych materiałów i konstrukcji związanych

z badaniami kosmosu, skorupy ziemskiej, dna morskiego, nowych źródeł energii i problemami ochrony środowiska. Bezpośredni wpływ miały tutaj osiągnięcia matematyki stosowanej oraz programowania i technologii maszyn cyfrowych. Powszechność zastosowań metod komputerowych w obliczeniach naukowych, pracach inżynierskich oraz w dydaktyce wynika z dużego nasycenia różnorodnym, niezawodnym i łatwo dostępnym sprzętem informatycznym większości placówek badawczych, projektowych i szkół wyższych.

Postępy komputeryzacji mechaniki w kraju prześledzimy na przykładzie prac zgłaszanych na kolejne, wspomniane już krajowe konferencje pt. „Metody komputerowe w mechanice konstrukcji”. Rozpatrzmy to zagadnienie w trzech obszarach działalności: naukowej, dydaktycznej, zastosowań inżynierskich. Ograniczymy się do ogólnej charakterystyki całości prac, akcentując prace inicjujące określone zagadnienia bądź podsumowujące poszczególne etapy ich rozwoju.

3.1. Komputeryzacja mechaniki w badaniach naukowych. Pierwsza konferencja (Poznań 1973) została już częściowo omówiona w punkcie 2. Na drugą konferencję (Gdańsk 1975) zgłoszono 86 prac. Duża ich część (33) dotyczyła klasycznych zagadnień i metod mechaniki rozwiązywanych przy użyciu komputera jako liczydła. Metodami komputerowymi (MES, MRS, SES) zajęto się w 21 pracach, przy czym 8 prac poświęconych było różnym aspektom matematycznym tych metod. Reszta rozproszona była na różne tematy. Tylko 4 prace dotyczyły zagadnień nieliniowych a 2 optymalizacji. Jak widać dość dużo prac nie przylegało ściśle do tematyki konferencji.

Omawiając konferencję w Gdańsku warto wspomnieć o dwóch faktach.

W referacie problemowym „Metoda czasoprzestrzennych elementów skończonych”, Z. KĄCZKOWSKI przedstawił oryginalną metodę komputerową [17], która została zastosowana do rozwiązania różnych zadań dynamiki konstrukcji.

W czasie konferencji ukazało się monograficzne opracowanie polskiej metody komputerowej SES [18] szczególnie przydatnej do analizy dynamicznej konstrukcji maszynowych. Poza rozważaniami teoretycznymi w książce podano system obliczeniowy złożony z pięciu grup podprogramów służących do obliczania drgań swobodnych i wymuszonych dowolnych konstrukcji modelowanych elementami sztywnymi. Programy w języku FORTRAN są realizacją zapowiadanego wcześniej systemu SFEM-72.

Trzecia konferencja odbyła się w Opolu (1977). Przyjęto 80 prac z czego 15 dotyczyło zagadnień i metod klasycznych, ale o dużym stopniu złożoności. Pozostałe poświęcone były metodom komputerowym. W grupie prac dotyczących MES należy wymienić pozycję [19] rozwijającą koncepcję i technikę superelementów. Wymieniona już metoda SES uzupełniona została elementem hybrydowym sztywno-odkształcalnym [20], natomiast MRS przystosowano do komputeryzacji przez zautomatyzowanie generowania siatki węzłów i wzorów różnicowych [21, 22]. Dzięki temu MRS stała się konkurencyjna w stosunku do MES, szczególnie w analizie zagadnień nieliniowych. Te ostatnie były przedmiotem 9 prac, z czego dwie [23, 24] miały charakter wiodący. W zakresie optymalizacji praca [25] miała znaczenie szkoleniowe, natomiast [26, 27] prezentowały efektywne metody optymalizacji układów konstrukcyjnych. Warto wymienić także pracę [28] omawiającą podstawy projektowanego uniwersalnego systemu analizy i syntezy konstrukcji prętowych. Ogólnie można powiedzieć, że konferencja w Opolu miała już zarysowany charakter komputerowy i obejmowała większość aktualnych problemów mechaniki konstrukcji.

Podobnie można określić czwartą konferencję (Koszalin 1979), na której wygłoszono 107 referatów. Ograniczając się do referatów problemowych nadmienimy, że dotyczą one następujących zagadnień.

Praca [29] omawia dwie podstawowe metody matematyczne stosowane w obliczeniach numerycznych metodę dyskretyzacji i metodę iteracji. Referat [30] podsumowywał badania nad komputeryzacją MRS. W pracy [31] przedstawiono możliwości metod numerycznych w rozwiązywaniu problemów geotechnicznych; natomiast w [32] przedstawiono wykorzystanie EMC w realizacji eksperymentów. Praca [33] przedstawiała zastosowania MES w analizie stateczności dynamicznej prętów i płyt. Zagadnieniom automatyzacji projektowania poświęcony był referat [34]. Na uwagę zasługuje praca [35], w której przedstawiono system programów WAT-KM przeznaczony do rozwiązywania liniowych problemów statyki i dynamiki oraz zadań termosprężystości. Referat przedstawiony był już niestety po śmierci głównego twórcy systemu profesora Jana Szmeltera, wielce zasłużonego dla komputeryzacji mechaniki w Polsce.

Przed dwoma laty odbyła się piąta konferencja (Wrocław—Karpacz 1981). Zgłoszono 79 prac. Referaty problemowe skoncentrowały się na problemach optymalizacji [36], komputerowego wspomaganie badań doświadczalnych [37], błędach w obliczeniach komputerowych [38], zasadach wariacyjnych mechaniki [39], zastosowaniach MES w analizie stateczności [40]. W konferencji uczestniczył profesor O. C. Zienkiewicz prezentując podczas dyskusji okrągłego stołu wyniki swoich ostatnich badań. Wśród referatów szczegółowych na uwagę zasługuje [41], w którym zaprezentowano system obliczeń WDKM do analizy statycznej i dynamicznej dowolnych układów prętowych, wymiarowania prętowych konstrukcji metalowych oraz obliczeń statycznych układów mieszanych prętowych w połączeniu z elementami dwu i trójwymiarowymi. Z uwagi na swoje możliwości (50 tys. niewiadomych) system może być porównywalny ze współczesnymi dużymi programami zagranicznymi.

Kolejna szósta konferencja odbędzie się w czerwcu 1983 r. w Białymstoku.

Poza pracami zgłaszanymi na omówione wyżej konferencje, problematyka komputeryzacji mechaniki konstrukcji była także prezentowana na innych konferencjach krajowych (np. „Konstrukcje powłokowe” — Kraków 1974 r., Gołuń 1978 r., Opole 1982 r.), i na łamach czasopism oraz periodyków poświęconych mechanice. Od roku 1977 wychodzi specjalistyczne wydawnictwo o charakterze ciągłym „Mechanika i komputer”, redagowane w IPPT PAN. Dotychczas (1983) ukazały się cztery jego tomy. Omówienie wszystkich interesujących nas prac w liczbie kilkuset przekracza możliwości tego opracowania. Dokonując jednak oceny syntetycznej należy stwierdzić, że w badaniach dotyczących komputeryzacji konstrukcji osiągnięty został w kraju w ostatnim dziesięcioleciu znaczny postęp.

Duża liczba publikacji i prac krajowych zarówno zakresem tematycznym jak i poziomem dorównuje zagranicznym. Dowodem zbliżenia nauki krajowej do światowej w omawianym zakresie są publikacje polskich autorów w renomowanych czasopismach międzynarodowych np. w „Computer and Structures” oraz w „Computer Methods in applied mechanics and engineering”, było ich w ostatnich latach kilkanaście.

Na międzynarodowej konferencji FENOMECH'81 (Stuttgart 1981), grupa polskich autorów przedstawiła jeden z referatów wiodących [42]. Poza wspomnianymi już dużymi

krajowymi systemami obliczeniowymi, świadectwem postępu są także opracowania książkowe [43, 44, 45, 46, 47].

Stymulatorami postępów w komputeryzacji mechaniki były niewątpliwie omówione krajowe konferencje poświęcone metodom komputerowym. Organizowane są one przez Sekcję Mechaniki Konstrukcji KILiW PAN przy współdziałaniu z uczelniami, oddziałami PTMTS i NOT. Pozytywny wpływ miały także odpowiednio ukierunkowane konferencje szkoleniowe z udziałem zagranicznych wykładowców np. „Metody obliczeniowe w mechanice nieliniowej” — Jabłonna 1976 r., „Współczesne problemy mechaniki wielkich systemów” — Jabłonna 1977 r., „Pre i post-procesory” — Jabłonna 1979 r., „Stateczność konstrukcji” — Janowice 1980 r.

Znaczną rolę odegrały staże naukowe odbywane przez Polaków w przodujących ośrodkach zagranicznych (Stuttgart, Swensea, Trondheim).

Do osiągniętego postępu przyczynił się względnie duży wzrost ilościowy i częściowo jakościowy sprzętu komputerowego. O ile w roku 1971 było w kraju 100 ośrodków obliczeniowych i 180 bardzo różnorodnych komputerów, o tyle w roku 1981 było 1850 ośrodków wyposażonych w 2633 maszyny w tym 874 komputerów średnich i dużych oraz 1759 minikomputerów. Wśród maszyn średnich dominowały ODRY-y 1300 oraz RIAD 30, 32. Z dużych warto wymienić dwa systemy CYFRONET zainstalowane w Warszawie i Krakowie oparte na komputerach CDC-CYBER. Mimo znacznych liczb wzrostu jest to przyrost tylko względny. Według opinii specjalistów opóźnienie krajowe w ilości i jakości sprzętu komputerowego szacowana jest na około 10 lat. Sytuacja w niedalekiej przyszłości może się znacznie pogorszyć gdyż od roku 1980 nie przybyło nowych maszyn a nakłady na sprzęt zmalały o połowę.

Stwierdzając osiągnięty postęp, należy jednocześnie podkreślić, że w niektórych obszarach tematycznych badania krajowe pozostają wyraźnie w tyle za zagranicznymi. Dotyczy to szczególnie tych, które zależą od sprzętu a więc np. grafiki komputerowej, projektowania wspomaganego komputerami, mechaniki wielkich systemów, matematycznego modelowania obiektów rzeczywistych, programowania symbolicznego, stosowania nowych algorytmów np. równoległych a także matematycznych podstaw metod numerycznych, co należy odnieść do matematyki stosowanej. Można wprawdzie wymienić prace z mechaniki wielkich systemów np. [48] czy grafiki wykonane w zespole Z. Brzymka z Politechniki Warszawskiej, M. Bossaka z PIMB czy J. Szymczyka i BISTYP-u, który rozwija także koncepcje automatycznego projektowania, ale są to niestety przypadki jednostkowe.

3.2. Metody komputerowe w dydaktyce. Problem wprowadzania metod komputerowych do nauczania mechaniki konstrukcji nabrał aktualności w kraju w połowie lat siedemdziesiątych. Był on przedmiotem między innymi trzech kolejnych konferencji metodycznych (Polańczyk 1975 r., Jadwisin 1976 r., Janowice 1977 r.) oraz spotkania panelowego w czasie trzeciej konferencji komputerowej (Opole 1977 r.). Ważniejsze zagadnienia i ówczesne propozycje rozwiązań zawiera publikacja [49].

Komputerowe ujęcie problemów mechaniki konstrukcji wchodzących do obecnych programów nauczania polegałoby głównie na:

- wprowadzeniu macierzowego zapisu praw, związków i zależności,
- automatyzacji budowania i rozwiązywania podstawowych równań metody sił,
- przedstawieniu metody przemieszczeń w ujęciu metody elementów skończonych,

- macierzowym zapisie i przedstawieniu numerycznych algorytmów wyznaczania wielkości w analizie dynamicznej i stateczności,
- wprowadzeniu metody elementów i różnic skończonych do analizy układów powierzchniowych,
- wykorzystaniu komputerów do generowania zależności, wykonywania obliczeń, selekcji i automatycznego przedstawiania wyników.

Wspomniane ujęcie charakteryzuje się ogólnym i kompleksowym traktowaniem problemów. Wprowadza daleko posunięty formalizm a także dość wysoki stopień abstrakcji. Z tych powodów może ono okazać się dydaktycznie trudniejsze od ujęcia klasycznego odznaczającego się większą pogładowością. Szczególnie wyraźnie występuje ten problem przy porównaniu klasycznego i komputerowego przedstawienia metody sił.

Na tym tle formułowane są wątpliwości odnośnie do wprowadzania ujęcia komputerowego do dydaktyki w ogóle. Wyraża się obawę, że w ujęciu tym zatraci się główny cel jakim jest nauczanie studenta zrozumienia pracy konstrukcji, zaciemnia się sens fizyczny rozpatrywanych problemów, pozbawia się umiejętności i możliwości wykonania analizy, w przypadku braku dostępu do komputera. Można te obawy rozumieć, ale nie należy ich przeceniać. Doświadczenia zagraniczne a także krajowe ich nie potwierdzają.

Warto przypomnieć, że podobnego rodzaju wątpliwości występowały np. przy przechodzeniu od ujęcia mechaniki budowli bazującego na analizie geometrycznej odkształconego stanu konstrukcji (szkoła W. Wierzbickiego) do ujęcia bardziej abstrakcyjnego opartego na zasadzie prac wirtualnych (szkoła W. Nowackiego). Dziś tych wątpliwości już nie ma.

Przewidywane niedoskonałości i trudności dydaktyczne w komputerowym ujęciu mechaniki można wyeliminować drogą odpowiedniego postępowania organizacyjnego i metodologicznego.

Przede wszystkim komputerowe nauczanie należy wprowadzać selektywnie, mając na względzie wcześniejsze przygotowanie kadry nauczającej, pomocy dydaktycznych oraz zapewnienie dostępności do sprzętu informatycznego. W samym procesie dydaktycznym stosować metodę etapowania. Poprzedzać ujęcie komputerowe, tam gdzie może to być potrzebne, ujęciem klasycznym. Nie szczędzić komentarzy i wyjaśnień eksponujących fizyczną stronę rozważanych problemów. Pogładowość można dodatkowo zapewnić wprowadzając ćwiczenia doświadczalne na modelach, operując bogatym materiałem ilustracyjnym w postaci przeźroczy, wstawek filmowych itp. nie mówiąc o interaktywnej pracy z komputerem. Należy ciągle zwracać uwagę na relacje schemat obliczeniowy — realny obiekt, podkreślając niezbędność wiernego modelowania rozpatrywanej konstrukcji schematem zastępczym i podając sposoby takiego modelowania. Nota bene ujęcie komputerowe stwarza duże możliwości w tym zakresie.

Szczególnego znaczenia nabiera dostarczenie studentowi metod i środków sprawdzania i weryfikowania wyników. Chodzi tu zarówno o możliwość eliminowania oczywistych nonsensów, jak i błędów bardziej „zakonspirowanych”.

Zawsze trzeba mieć na względzie fakt, że mechanika konstrukcji jest przedmiotem użytkowym, nastawionym na zastosowanie praktyczne, ale jednocześnie istotnym elementem podstawowego kształcenia inżyniera.

Stan w zakresie wprowadzania metod komputerowych do nauczania mechaniki przed-

stawimy na podstawie analizy ankiet uzyskanych w roku 1978 z 18-tu placówek dydaktycznych nauczających mechaniki na kierunku „budownictwo”. Ponowne wrywkowe sprawdzenie wskazuje, że od tego czasu do dziś nie wiele się zmieniło a fragmentaryczne porównania mówią, że sytuacja na innych kierunkach kształcenia w szkołach technicznych jest gorsza niż na budownictwie.

Wykłady z przedmiotów poświęconych mechanice konstrukcji prowadzone są w większości przypadków w ujęciu klasycznym. W trzech placówkach (Poznań, Łódź, Rzeszów) obok zapisu klasycznego wprowadza się fragmentarycznie zapis macierzowy oraz elementy ujęcia komputerowego. W czterech ośrodkach (Gdańsk, Kraków, Warszawa, Wrocław) obok fragmentarycznego zapisu macierzowego w odniesieniu do klasycznych metod mechaniki, wprowadza się także metody komputerowe w ramach studiów indywidualnych, dla specjalizacji „Teoria Konstrukcji” oraz w nielicznych przypadkach dla innych specjalności.

Ćwiczenia audytoryjne obejmują prawie wyłącznie obliczenia wykonywane ręcznie. Jedynie w trzech przypadkach (Gdańsk, Kraków, Rzeszów) część tych ćwiczeń przeprowadza się przy wykorzystaniu komputera. Wynika to głównie z faktu, że wykładowcy mechaniki prowadzą tam jednocześnie przedmiot ETO.

Ćwiczenia projektowe wykonywane są w dość znacznym stopniu przy wykorzystaniu techniki komputerowej. Proces ten przebiega dobrze w tych ośrodkach, które dysponują programami dydaktycznymi na EMC oraz mają możliwości dostępu do maszyn (Gdańsk, Kraków, Wrocław).

Prawie wszystkie prace dyplomowe związane z mechaniką konstrukcji wykonywane są przy wykorzystaniu komputerów. Część prac dotyczy zastosowań metod komputerowych, część opracowania programów. Tej tematyce poświęca się także niektóre seminaria przed-dyplomowe.

Większość ośrodków wskazuje na braki w sprzęcie informatycznym, szczególnie w zakresie urządzeń do przygotowania danych oraz na trudności w swobodnym dostępie do komputera. W stosunkowo nieźłej sytuacji pod tym względem są: Białystok, Gdańsk, Opole, Rzeszów, Warszawa, Wrocław.

Prawie wszystkie ośrodki sygnalizują braki w zakresie pomocy dydaktycznych prezentujących problemy mechaniki konstrukcji w ujęciu komputerowym. W siedmiu ośrodkach (Gdańsk, Gliwice, Kraków, Poznań, Rzeszów, Warszawa, Wrocław), prowadzone są prace nad skryptami i zbiorami zadań a także nad programami dydaktycznymi na EMC.

Niektóre z tych prac zostały już zakończone. W grupie programów dogodnych do zastosowania w dydaktyce można wymienić przykładowo:

- system STRANS-71 [13],
- programy dydaktyczne Politechniki Krakowskiej przedstawione na drugiej konferencji komputerowej (Gdańsk 1979), [50, 51, 52],
- opracowanie J. Weselego z Politechniki Śląskiej [53, 54],
- program S. J. Fenvesa do analizy układów prętowych metodą sił zaadoptowany w Politechnice Warszawskiej, na ODRE 1300, [55],
- opracowany w Politechnice Gdańskiej program KRET [56] do analizy układów prętowych metodą przemieszczeń,

— program MINIFEM opracowany przez R. Taylora zaadoptowany w Politechnice Warszawskiej na RIAD-a 32.

Nieco inny charakter niż dotąd wymienione mają opracowania [57, 58, 59]. Angażują one aktywnie studenta w proces obliczenia czy budowania własnego programu, nie ograniczając jego roli do przygotowania danych i interpretacji wyników. Tak więc program [57] składa się z podprogramów realizujących szeroką klasę operacji macierzowych. Student może zbudować z nich własny program umożliwiający realizację typowych macierzowych algorytmów analizy konstrukcji. Wykorzystując program [58] student może w systemie konwersacyjnym rozwiązać szereg podstawowych zadań z analizy konstrukcji prętowych. Podobny charakter ma opracowanie [59].

Z podręczników i skryptów, poza już wspomnianymi [43, 44, 45] można wymienić dodatkowo [60, 61, 62]. Skrypt [60] podaje metodę sił i przemieszczeń w zapisie macierzowym oraz dwie metody komputerowe MMP, MES. Pozycja [61] poświęcona jest macierzowym metodom sił i przemieszczeń, natomiast [62] traktuje wyłącznie o MES w zakresie potrzebnym dla wyższych szkół technicznych. Pod koniec 1983 r. ukaże się obszernie wieloautorskie opracowanie książkowe pt. „Mechanika budowli — ujęcie komputerowe”.

Mimo to postęp w unowocześnieniu nauczania mechaniki konstrukcji należy uznać jako bardzo ograniczony i fregmentaryczny. Nie odpowiada on ani potrzebom ani w wielu przypadkach stającym do dyspozycji środkom i możliwościom. Tymczasem klasyczne metody mechaniki tracą coraz wyraźniej skuteczność w rozwiązywaniu współczesnych problemów technicznych. Sprawa daleko idących zmian w nauczaniu mechaniki, w kierunku szerokiego uwzględnienia metod komputerowych nabiera podstawowego znaczenia.

3.1. Metody komputerowe w zastosowaniach inżynierskich. Projektowanie konstrukcji, przygotowanie technologii i produkcji są w dużej mierze procesami przetwarzania informacji i podejmowania decyzji. Stwarzając przez to szczególnie dogodne warunki komputeryzacji. Mimo to około 33% pracy komputerów przeznacza się na obliczenia naukowe i inżynierskie z czego mniej niż połowa przypada na prace projektowe.

Wprowadzenie metod komputerowych do praktyki inżynierskiej uwarunkowane jest w decydujący sposób od zespołu czynników zwanych syntetycznie „zapotrzebowaniem”. Związana ona jest zwykle z istnieniem problemów nie dających się rozwiązać metodami tradycyjnymi, z potrzebą uzyskiwania rozwiązań doskonalszych, z koniecznością oszczędzania czasu, środków i materiałów. Powyższe wynika z ogólniejszej sytuacji powiązanej z istnieniem nowoczesnej stojącej na wysokim poziomie, dobrze zorganizowanej działalności gospodarczej i technicznej.

Spośród szerokiego obszaru zastosowań, przedmiotem naszego zainteresowania są te, w których występuje mechanika konstrukcji czyli projektowanie. Metody komputerowe stwarzają tu nowe możliwości nie osiągalne przy stosowaniu metod i technik tradycyjnych.

Polegają one na stosowaniu doskonalszych, bardziej realistycznych modeli obliczeniowych dla projektowych obiektów, odnośnie do wszystkich parametrów geometrii, fizyki, obciążenia i warunków podparcia.

Przyjęty model obliczeniowy jest przedmiotem analizy określającej stan obiektu przy ustalonych parametrach modelu, bądź przedmiotem syntezy, w procesie której następuje podstawianie wartości dla parametrów charakteryzujących model. Jeżeli określone jest

przy tym jakieś kryterium i dąży się do znalezienia wartości tych parametrów w sposób zapewniający ekstremalne osiągnięcie kryterium, wtedy synteza staje się optymalizacją. Mówimy wówczas o projektowaniu optymalnym. Obecnie jedynymi efektywnymi metodami analizy i syntezy konstrukcji są metody i techniki komputerowe.

Dotychczasowe dość liczne zastosowania praktyczne metod komputerowych w kraju dotyczą analizy. W pierwszym etapie opierały się one na stosunkowo prostych programach obliczeniowych np. w przypadku konstrukcji budowlanych, programu WD-21 (Wrocław), PROBUS (Gliwice), BRDA (Bydgoszcz). Następnie weszły do użycia systemy bardziej rozbudowane: KOS (ETOB-Warszawa), STRAINS (PW-Warszawa), TAPP (BISTYP-Warszawa) [34].

W latach siedemdziesiątych zainstalowano w kraju kilka dużych systemów zagranicznych: STRUDL (ZOWAR-Warszawa), SESAM69 (CTO-Gdańsk), ASKA, SAPIV, TOPAS (PIMAB, BUMAR-Warszawa), NOSTRAN (Inst. Lot.-Warszawa). Wszystkie wymienione systemy służą do analizy dowolnych konstrukcji w zakresie statyki liniowej za pomocą MES i częściowo dynamiki. Wykorzystywane są głównie w biurach konstrukcyjnych przemysłu maszynowego. Bliższą charakterystykę i analizę porównawczą systemów podaje opracowanie [63]. Tutaj ograniczymy się do stwierdzenia, że można za ich pomocą uzyskiwać stosunkowo dobre wyniki dla dużych układów konstrukcyjnych np. SESAM: 800 superelementów, 300 stanów obciążeń, przemieszczenia i naprężenia w dowolnej liczbie przekrojów w postaci graficznej lub liczbowej.

Przykłady krajowych zastosowań w zakresie syntezy są nieliczne. Świadczy o tym także liczba programów przeznaczonych do tych celów. Można tu wymienić konwersacyjny system ŻELBET (BISTYP-Warszawa), służący do wymiarowania przekrojów sposobem prób i błędów przy wykorzystaniu monitora ekranowego. O wiele bardziej zaawansowany jest system analizy ram żelbetowych (PROCHEM-Warszawa) [64], który umożliwia automatyczne projektowanie konstrukcji o ustalonym schemacie i długościach prętów, z warunkiem minimum ciężaru lub kosztów. Podobną rolę, ale w odniesieniu do konstrukcji metalowych spełnia wspomniany wcześniej system WDKM [41].

Rozwinięciem syntezy, jest automatyczne projektowanie, w którym wymiary konstrukcji uzyskane przy wykorzystaniu metod optymalizacji czy też konwersacji z komputerem, są wynikami pośrednimi dla ostatecznych rezultatów w postaci rysunków roboczych, zestawień materiałowych, kosztorysów itp. dokumentów technicznych. Ten kierunek rozwijany jest w BISTYP-ie pod kierunkiem J. Szymczyka. Opracowano tam i wdrożono dwa systemy automatycznego projektowania ASTROF i PASTOR. Pierwszy służy do projektowania hal żelbetowych, drugi natomiast hal stalowych. Oba systemy były kilkusetkrotnie stosowane, dają w efekcie każdorazowo gotowy projekt budowlany obiektu.

Zbliżony do wyżej wymienionych jest system OPT(MOSTOSTAL-Warszawa). Przeznaczony jest do katalogowego projektowania stalowych hal przemysłowych. W wyniku działania systemu otrzymuje się optymalne zestawienie skatalogowanych elementów typowych całej konstrukcji wraz z rysunkami.

Jak wynika z tego dość fragmentarycznego opisu, zastosowanie metod komputerowych w projektowaniu inżynierskim jest w kraju wyraźnie zauważalne. Przyczyniło się do tego w znacznym stopniu wyposażenie większości biur projektowych w importowane minikomputery typu PDP, NOVA, WANG, VARIAN i krajowe MERA 400. W pojedyn-

czych przypadkach sprowadzono informatyczne urządzenia graficznego wprowadzania i wyprowadzania informacji. Tego rodzaju sprzęt okazał się w praktyce projektowej szczególnie przydatny. Istotną rolę integrującą, programującą i szkoleniową, odegrały także przodujące ośrodki jak BISTYP w resorcie budownictwa, BOPZI w Przemysłowym Instytucie Maszyn Budowlanych resortu maszynowego, czy CTO w przemyśle okrętowym.

Obecna sytuacja gospodarcza kraju oraz uwarunkowania zewnętrzne utrudniają dalszy rozwój a nawet utrzymanie obecnego stanu komputeryzacji prac inżynierskich. Zagrożony jest importowany sprzęt z powodu braku części zamiennych i serwisu. Niekorzystny wpływ ma także zmniejszenie tempa i rozmiaru produkcji. Niektóre biura projektów resortu budownictwa zmniejszyły w okresie ostatnich dwóch lat intensywność używania komputerów nawet trzykrotnie. Należy mieć nadzieję, że jest to sytuacja przejściowa.

4. Uwagi końcowe i wnioski

Stan w zakresie komputeryzacji mechaniki konstrukcji w kraju jest zróżnicowany w poszczególnych działach jej uprawiania.

W badaniach uczyniono znaczny postęp, w dydaktyce jest on niedostateczny, natomiast w zastosowaniach inżynierskich zauważalny, mimo że ograniczony do niektórych przemysłów i jednostek organizacyjnych.

Z powyższej oceny zapewne subiektywnej ale nie odbiegającej zbyt od rzeczywistej, wynikają następujące wnioski. W odniesieniu do działalności naukowej:

- utrzymać dotychczasowe przedsięwzięcia służące rozwojowi metod komputerowych (konferencje, wydawnictwa, kursy, staże),
- nasilić badania w aktualnych obszarach tematycznych (nieliniowość, optymalizacja, dynamika, stateczność, matematyczne podstawy numeryki),
- podjąć tematy słabo rozwijane (grafika komputerowa, wielkie systemy i modelowanie matematyczne, kompozyty, pola sprzężone, współdziałanie konstrukcja-otoczenie, metody komputerowe w doświadczalnictwie),
- zwiększyć prace służące przenoszeniu osiągnięć badawczych do zastosowań (poradniki, instrukcje, programy, podręczniki).

W odniesieniu do dydaktyki:

- uświadomić gronu nauczającemu mechaniki konstrukcji istniejący stan zacofania we wprowadzaniu metod komputerowych i konsekwencje stąd wynikające dla nowoczesnego kształcenia inżyniera,
- powrócić do idei konferencji metodycznych organizowanych w połowie lat siedemdziesiątych,
- zadbać o pomoce dydaktyczne, prezentujące materiał w ujęciu komputerowym,

W odniesieniu do zastosowań inżynierskich:

- stosować bardziej realistyczne modele projektowanych obiektów,
- rozwijać systemy automatycznego projektowania.

17. Z. KAŁCZKOWSKI, *The method of finite space-time elements in dynamics of structures*, J. of Tech. Phys. 1, 16 (1975).
18. J. KRUSZEWSKI i inni, *Metoda sztywnych elementów skończonych*, Arkady, Warszawa 1975.
19. J. SZMELTER, K. DEMS i inni, *System wielostopniowej syntezy struktury*, III Konf. Metody Komputerowe w Mechanice Konstrukcji, Tom II, Opole 1977.
20. W. GAWROŃSKI, S. GRABOWSKI, J. KRUSZEWSKI, *Koncepcja sztywnoodkształcalnego elementu skończonego*, III Konf. Met. Komp. w Mech. Konstr., Tom I, Opole 1977.
21. T. LISZKA, J. ORKISZ, *Zmodyfikowana metoda różnic skończonych przy nieregularnej siatce węzłów w problemach mechaniki*, XVIII Konf. Mech. Ciała Stałego, Wisła—Jawornik 1976.
22. T. LISZKA, J. ORKISZ, *Nowe koncepcje i rozwiązania metody różnic skończonych*, III Konf. Met. Komp. w Mech. Konstr., Tom II, Opole 1977.
23. Cz. WOŹNIAK, *Dyskretyzacja fizyczna a dyskretyzacja numeryczna w mechanice*, III Konf. Met. Komp. w Mech. Konstr., Tom III, Opole 1977.
24. M. KLEIBER, *Numeryczne aspekty analizy ciał i konstrukcji sprężysto-plastycznych*, III Konf. Met. Komp. w Mech. Konstr., Opole 1977.
25. A. BORKOWSKI, *Programowanie matematyczne w analizie i optymalizacji konstrukcji*, III Konf. Met. Komp. w Mech. Konstr., Tom III, Opole 1977.
26. A. GAWĘCKI i inni, *Optymalizacja inżynierska ram sprężystych o zmiennych przekrojach*, III Konf. Met. Komp. w Mech. Konstr. Tom I, Opole 1977.
27. Z. LEŚNIAK, *Optymalizacja systemów metodą dekompozycji*, III Konf. Met. Komp. w Mech. Konstr., Tom II, Opole 1977.
28. J. OBRĘBSKI, *Uogólniony algorytm numeryczny do analizy konstrukcji prętowych*, III Konf. Met. Komp. w Mech. Konstr., Tom II, Opole 1977.
29. M. KWAPISZ, *Metody dyskretyzacji i iteracji jako podstawowe metody obliczeń numerycznych*, IV Konf. Met. Komp. w Mech. Konstr., Koszalin 1979.
30. J. ORKISZ, *Komputeryzacja metody różnic skończonych*, IV Konf. Met. Komp. w Mech. Konstr., Koszalin 1979.
31. P. WILDE, *Metody numeryczne w problemach geotechnicznych*, IV Konf. Met. Komp. w Mech. Konstr., Koszalin 1979.
32. W. KAŚPRZAK, B. LYSIK, *Projektowanie eksperymentu i przetwarzanie jego wyników*, IV Konf. Met. Komp. w Mech. Konstr., Koszalin 1979.
33. W. OSTACHOWICZ, *Zastosowanie metody elementów skończonych do analizy stateczności dynamicznej prętów i płyt cienkich*, IV Konf. Met. Komp. w Mech. Konstr. Koszalin 1979.
34. M. ROBAKIEWICZ, J. SZYMCZYK, *Zasady i organizacja systemów automatyzacji projektowania*, IV Konf. Met. Komp. w Mech. Konstr., Koszalin 1979.
35. J. SZMELTER i inni, *System WAT-KM programu analizy konstrukcji*, IV Konf. Met. Komp. w Mech. Konstr., Koszalin 1979.
36. K. DEMS, Z. MRÓZ, *Metody wariacyjne w problemach optymalizacji syntezy i identyfikacji konstrukcji*, V Konf. Met. Komp. w Mech. Konstr., Wrocław 1981.
37. K. DRZEWIŃSKI, i inni, *Minikomputerowe wspomaganie badań doświadczalnych z mechaniki*, V Konf. Met. Komp. w Mech. Konstr., Wrocław 1981.
38. G. RAKOWSKI, *Błędy i kontrola wyników w obliczeniach komputerowych*, V Konf. Met. Komp. w Mech. Konstr., Wrocław 1981.
39. G. SZEFER, *Zasady wariacyjne w metodach komputerowych mechaniki*, V Konf. Met. Komp. w Mech. Konstr., Wrocław 1981.
40. Z. WASZCZYSZYN, *Stosowanie MES w analizie stateczności konstrukcji*, V Konf. Met. Komp. w Mech. Konstr., Wrocław 1981.
41. J. OBRĘBSKI, J. RĄCZKA, *System WDKM i jego aktualne możliwości obliczeniowe*, V Konf. Met. Komp. w Mech. Konstr., Wrocław 1981.
42. M. KLEIBER, A. KÖNIG, A. SAWCZUK, *Studies on plastic structures: stability anisotropie, hardening, cyclic loads.*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 1/3, 33 (1982).
43. J. SZMELTER i inni, *Metoda elementów skończonych w statyce konstrukcji*, Arkady, Warszawa 1979.

44. J. PIETRZAK, G. RAKOWSKI, K. WRZEŚNIEWSKI, *Macierzowa analiza konstrukcji*, PWN, Warszawa—Poznań 1979.
45. J. SZMELTER, *Metody komputerowe w mechanice*, PWN, Warszawa 1980.
46. W. GUTKOWSKI i inni, *Obliczenia statyczne przekryć strukturalnych*, Arkady, Warszawa 1980.
47. Cz. WOŹNIAK, M. KLEIBER, *Nieliniowa mechanika konstrukcji*, PWN, Warszawa—Poznań 1982.
48. D. ROGULA, *Obliczanie dużych układów konstrukcyjnych na EMC*, AIL 3, XX (1974).
49. G. RAKOWSKI, *Metody komputerowe w nauczaniu*, Dydaktyka Szkoły Wyższej, 3, 31, (1975).
50. B. OLSZOWSKI, *Obliczanie ram metodą sił—program dydaktyczny*, II Konf. Met. Komp. w Mech. Konstr., Gdańsk 1975.
51. M. RADWAŃSKA, A. DUBOWICKA, *Obliczanie sprężystych płyt kołowych i pierścieniowych—program dydaktyczny*, II Konf. Met. Komp. w Mech. Konstr., Gdańsk 1975.
52. J. ORKISZ, St. ŚWISZCZOWSKI, *Programy dydaktyczne zastosowania ETO w nauczaniu mechaniki budowli i przedmiotów pokrewnych*, II Konf. Met. Komp. w Mech. Konstr., Gdańsk, 1975.
53. J. WESELI, *Metody i programy do obliczeń konstrukcji inżynierskich*, cz. I. Gliwice 1975.
54. J. WESELI, *MES, Programy do obliczania konstrukcji inżynierskich*, cz. II, Gliwice 1978
55. S. J. FENVES, *Program do analizy statycznej płaskich konstrukcji prętowych metodą sił*, przekład. IMKI, Warszawa, 1975.
56. Cz. BRANICKI, I. KREJA, *Analiza statyczna dowolnych płaskich układów prętowych*, Wyd. P. Gd. Nr 7, Gdańsk 1980.
57. Cz. BRANICKI, *Program interpretujący symbolikę macierzową PRISM*, IKB, Gdańsk 1979.
58. J. GŁABISZ, M. HERMANOWICZ, S. ŻUKOWSKI, *Diana system dialogowej analizy konstrukcji prętowych*, V Konf. Met. Komp. w Mech. Konstr., Wrocław 1981.
59. Zb. REPERT, *Ćwiczenia projektowe z mechaniki budowli z zastosowaniem minikomputera MERA 400*, WPW, Warszawa 1982.
60. G. RAKOWSKI, *Komputerowa mechanika konstrukcji*, WPW, Warszawa 1977.
61. Cz. BRANICKI, M. WIZMUR, *Metody macierzowe w mechanice budowli i dynamika budowli*, P. Gd. Gdańsk 1980.
62. A. JAWORSKI, *Metoda elementów skończonych w wytrzymałości konstrukcji*, WPW, Warszawa 1981.
63. *Porównanie uruchomionych w PIMB zagranicznych systemów MES*, PIMAB-BOP21, Raport 10/80, Warszawa 1980.
64. R. BITNER, A. GOLKA, Z. JASZCZOFT, *Projektowanie konstrukcji budynków halowych i wielokondygnacyjnych z zastosowaniem maszyn cyfrowych*, BIB29, Arkady, Warszawa 1973.
65. E. KOZDROWICKI, D. THEIS, *Second generation of vector supercomputers*, Computer 12, 13, (1980).

Praca została złożona w Redakcji dnia 10 lutego 1983 roku.

METODA ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH W MECHANICE KONTINUUM AKTUALNE KIERUNKI BADAŃ

MICHAŁ KLEIBER

IPPT PAN

1. Wprowadzenie

W pracy dokonujemy przeglądu aktualnych kierunków badań związanych z zastosowaniami metody elementów skończonych (MES) w mechanice kontinuum. Nacisk położony jest na problematykę nieliniową.

Przegląd niniejszy ma charakter wybitnie subiektywny i nie pretenduje do miana kompletnego opracowania tematu — ze względu na obserwowany aktualnie burzliwy rozwój MES i dziedzin pokrewnych, dokonanie pełnego przeglądu odnośnej problematyki nie wydaje się obecnie w ogóle możliwe.

Gwałtowny rozwój MES zilustrować można przytaczając liczby prac z tego zakresu uwzględnionych w publikowanych kilkakrotnie wykazach zbiorczych:

- rok 1969 — liczba cytowań 775, [1],
- rok 1972 — liczba cytowań 1096, [2],
- rok 1974 — liczba cytowań 2800, [3],
- rok 1975 — liczba cytowań 3800, [4],
- rok 1976 — liczba cytowań 7115, [5].

Trend ten ilustrowany jest także liczbą monografii i podręczników z zakresu MES, wydanych w ostatnich latach na świecie, [6 - 46], oraz dostępnych w języku polskim, [47 - 54].

Można bezpiecznie założyć, że obecnie bibliografia MES liczy kilkadziesiąt tysięcy pozycji — przy zachowaniu obecnego tempa rozwoju liczba ta zwielokrotni się w ciągu najbliższych lat. Zrozumiałe jest więc, że w niniejszej pracy nie podejmujemy beznadziejnego zadania dokonania jakiegokolwiek zbiorczego przeglądu opublikowanych artykułów. Zamiast tego ograniczymy się do wskazania zasadniczych, w odczuciu autora, kierunków rozwoju MES, przytaczając jedynie te pozycje bibliograficzne (monografie i prace szczegółowe o większym znaczeniu), które posłużyć mogą za drogowskazy w ewentualnej samodzielnej pracy.

Aktualną tematykę badań w zakresie podstaw teoretycznych i zastosowań MES w mechanice kontinuum podzielić można na następujące grupy:

- a) Wariacyjne podstawy metody,
- b) Konstruowanie nowych elementów skończonych,

- c) Formułowanie zagadnień brzegowo — początkowych mechaniki w aspekcie stosowania MES,
- d) Algorytmy numeryczne,
- e) Przetwarzanie danych i tworzenie oprogramowania.

Poniżej wyjaśniamy szerzej co rozumiemy pod tymi pojęciami. Zauważmy na razie, że podział powyższy podyktowany został jedynie wygodą prezentacji omawianej tematyki i nie ma w najmniejszym stopniu charakteru zasadniczego. Innymi słowy, wiele istniejących prac nie udałooby się zakwalifikować ściśle do jednej tylko z wymienionych grup, prace te dotyczą bowiem zazwyczaj zagadnień obszerniejszych.

2. Wariacyjne podstawy metody

Rozpatrzmy zagadnienie nieliniowej statyki dla ciała zajmującego w konfiguracji odniesienia obszar Ω o brzegu $\partial\Omega = \partial\Omega_\sigma \cup \partial\Omega_u$, na którego wyróżnionych częściach zadane są odpowiednio naprężeniowe i przemieszczeniowe warunki brzegowe. Przyjmijmy, że wszystkie występujące w rozpatrywanym problemie funkcje parametryzowane są za pomocą monotonicznie rosnącego w procesie deformacji parametru τ , zwanego dalej dla prostoty czasem. Załóżmy dalej, że znamy w pełni przebieg procesu deformacji (tj. rozwiązanie odpowiedniego problemu brzegowego) od chwili początkowej $\tau = t_0$ do chwili „aktualnej” $\tau = t$, poszukujemy zaś rozwiązania dla chwili następnej $t + \Delta t$, niezbyt odległej od chwili t . Takie sformułowanie, zwane przyrostowym, jest bardzo wygodne i powszechnie stosowane w numerycznej analizie problemów nieliniowej mechaniki. Ponieważ chwila t jest chwilą typową (tj. niczym nie wyróżnioną wśród innych wartości parametru τ), sformułowanie przyrostowe umożliwia śledzenie rozwiązania metodą krok — po — kroku w całym interesującym nas przedziale zmienności parametru τ , $\tau \in [t_0, t^*]$.

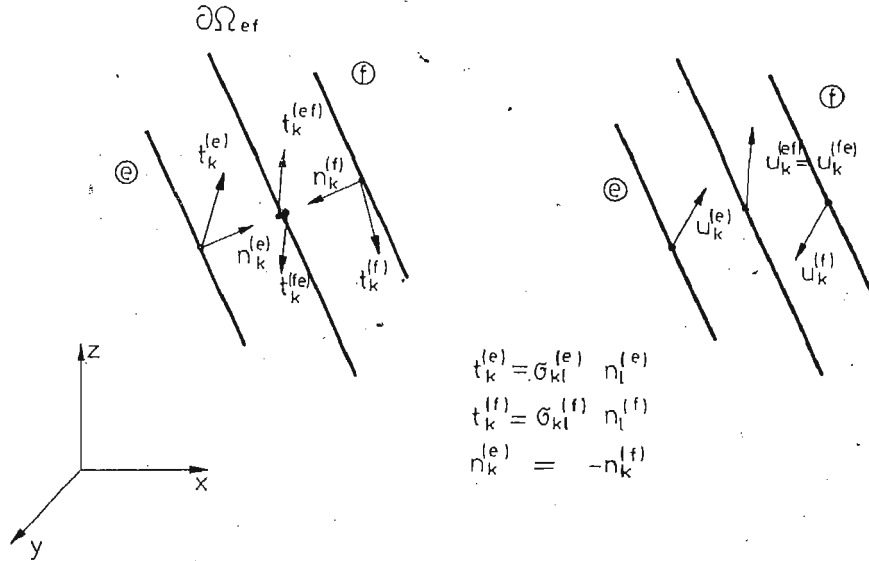
W odniesieniu do stałego w czasie (przynajmniej na rozpatrywanym kroku $t \rightarrow t + \Delta t$) kartezjańskiego układu współrzędnych prostokątnych podstawowy układ równań zlinearyzowanego na kroku problemu przyrostowego ma postać, [47]

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{kl,l} + \rho\Delta f_k &= 0, & x \in \Omega \\ \Delta\tilde{\sigma}_{kl} &= \frac{\partial W}{\partial \Delta\varepsilon_{kl}} = C_{klmn}\Delta\varepsilon_{mn}, & x \in \Omega, \\ \Delta\varepsilon_{kl} &= \frac{1}{2}(\Delta u_{k,l} + \Delta u_{l,k} + u_{l,k}\Delta u_{l,l} + \Delta u_{l,k}u_{l,l}), & x \in \Omega, \\ \Delta\sigma_{kl}n_l &= \Delta\hat{t}_k, & x \in \partial\Omega_\sigma, \\ \Delta u_k &= \Delta\hat{u}_k, & x \in \partial\Omega_u, \end{aligned}$$

gdzie symbol „ Δ ” oznacza przyrost danej funkcji od chwili t do chwili $t + \Delta t$, σ_{kl} , $\tilde{\sigma}_{kl}$ są składowymi odpowiednio pierwszego (niesymetrycznego) i drugiego (symetrycznego) tensora naprężenia Pioli-Kirchhoffa na konfiguracji odniesienia w chwili $\tau = t_0$, $\rho\Delta f_k$ i $\Delta\hat{t}_k$ są wektorami obciążeń typu masowego i powierzchniowego, W jest przyrostowym potencjałem definiującym rozpatrywany materiał (sprężysty lub niesprężysty), ε_{kl} są składowymi tensora odkształcenia Greena, u_k i Δu_k są składowymi wektorów przemieszczeń

odpowiednio od t_0 do t oraz od t do $t + \Delta t$ zaś n_k oznacza składowe wektora normalnego od brzegu ciała.

• Dzieląc myślowo obszar Ω na E rozłącznych elementów skończonych przyjmujemy dla zapewnienia sobie odpowiedniej ogólności, że na brzegach międzyelementarnych nie są spełnione żadne warunki zgodności dla wektorów przyrostu przemieszczenia Δu_k oraz przyrostu naprężenia $\Delta t_k = \Delta \sigma_{kl} n_l$, gdzie n_k jest teraz wektorem normalnym do rozpatrywanego brzegu międzyelementowego. Zgodnie z rys. 1, na typowym odcinku brzegu



Rys. 1

rozgraniczającego elementy „e” i „f”, $e, f = 1, \dots, E$ rozpatrywać będziemy jako niezależne od siebie funkcje $\Delta u_k^{(e)}, \Delta u_k^{(ef)} = \Delta u_k^{(fe)}, \Delta u_k^{(f)}$ oraz funkcje $\Delta t_k^{(e)}, \Delta t_k^{(ef)}, \Delta t_k^{(fe)}, \Delta t_k^{(f)}$. Oznaczając dodatkowo symbolem Δt_k przyrost reakcji na brzegu $\partial\Omega_u$ zaś symbolami $\Delta \check{t}_k, \Delta \check{u}_k$ zdefiniowane na wszystkich brzegach międzyelementowych wektory przyrostów wzajemnych oddziaływań oraz przemieszczeń (którymi na brzegu między elementami „e” i „f” są $\Delta t_k^{(ef)}$ i $\Delta u_k^{(ef)}$) zapiszmy ogólną postać pewnego funkcjonału wariacyjnego jako

$$(2.2) \quad J[\Delta u_k, \Delta \varepsilon_{kl}, \Delta t_k, \Delta \check{t}_k, \Delta \check{u}_k] = \sum_{e=1}^E \left\{ \int_{\Omega_e} \left\{ \frac{1}{2} C_{klmn} \Delta \varepsilon_{kl} \Delta \varepsilon_{mn} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{2} \tilde{\sigma}_{ij} \Delta u_{k,i} \Delta u_{k,j} - \rho \Delta f_k \Delta u_k - \Delta \check{\sigma}_{kl} \left[\Delta \varepsilon_{kl} - \frac{1}{2} (\Delta u_{k,i} + \Delta u_{i,k} + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + u_{i,k} \Delta u_{i,l} + \Delta u_{l,k} u_{i,l}) \right] \right\} d\Omega - \int_{\partial\Omega_{\varepsilon,\sigma}} \Delta \check{t}_k \Delta u_k d(\partial\Omega) - \int_{\partial\Omega_{e,u}} \Delta t_k (\Delta u_k - \hat{u} \Delta_k) d(\partial\Omega) + \right. \\ \left. - \sum_{f=1}^{E(e)} \int_{\partial\Omega_{ef}} \Delta \check{t}_k (\Delta u_k^{(e)} - \Delta \check{u}_k) d(\partial\Omega) \right\},$$

gdzie Ω_e , $\partial\Omega_{ef}$, $\partial\Omega_{e,\sigma}$, $\partial\Omega_{e,u}$ są danymi w konfiguracji odniesienia odpowiednio obszarem zajmowanym przez element e -ty, brzegiem między elementami „ e ” i „ f ” oraz tymi częściami brzegu $\partial\Omega_e$ elementu e -tego, które są jednocześnie brzegami całego układu $\partial\Omega_\sigma$, $\partial\Omega_u$, zaś $E_{(e)}$ jest liczbą elementów sąsiadujących z elementem e -tym.

Można bez trudu wykazać, że warunki stacjonarności funkcjonału (2.2) (tj. jego równania Eulera) mają postać równań (2.1) oraz, dodatkowo, równań

$$(2.3) \quad \begin{aligned} \Delta t_k &= \Delta \sigma_{ki} n_i, & x \in \partial\Omega_u, \\ \Delta t_k^{(e)} &= \Delta t_k^{(ef)}, & x \in \partial\Omega_{ef}, \\ \Delta t_k^{(ef)} &= -\Delta t_k^{(fe)}, & x \in \partial\Omega_{ef}, \\ \Delta u_k^{(e)} &= \Delta u_k^{(ef)}, & x \in \partial\Omega_{ef}. \end{aligned}$$

Funkcjonał (2.2) stanowi podstawę najogólniejszej zasady wariacyjnej stosowanej do otrzymania dyskretyzowanych modeli mechaniki. Na podstawie różnych przypadków szczególnych tego funkcjonału, otrzymywanych poprzez postulowanie a priori pewnych z równań (2.1), (2.3), otrzymać można wszystkie znane modele MES dla zagadnień nieliniowej statyki. W szczególności, tzw. zgodny model przemieszczeniowy otrzymywany jest na bazie funkcjonału o postaci

$$(2.4) \quad J_P[\Delta u_k] = \sum_{e=1}^E \left[\int_{\Omega} \left(\frac{1}{2} C_{ijkl} \Delta \varepsilon_{ij} \Delta \varepsilon_{kl} + \frac{1}{2} \tilde{\sigma}_{ij} \Delta u_{k,i} \Delta u_{k,j} - \rho \Delta f_k \Delta u_k \right) d\Omega - \int_{\partial\Omega_{e,\sigma}} \Delta t_k \Delta u_k d(\partial\Omega) \right],$$

którego stacjonarność, po wykorzystaniu odpowiednich założeń dyskretyzacyjnych, prowadzi do podstawowego układu równań algebraicznych modelu MES o postaci

$$(2.5) \quad K_{\alpha\beta} \Delta r_\beta = \Delta R_\alpha, \quad \alpha = 1, 2, \dots, N,$$

w którym

$$(2.6) \quad K_{\alpha\beta} = K_{\alpha\beta}^{(\text{kon.})} + K_{\alpha\beta}^{(e)} + K_{\alpha\beta}^{(u)}$$

jest macierzą sztywności układu dyskretyzowanego, $K_{\alpha\beta}^{(\text{kon.})}$, $K_{\alpha\beta}^{(e)}$, $K_{\alpha\beta}^{(u)}$ są odpowiednio macierzami sztywności konstytutywnej, początkowych naprężeń oraz początkowych przemieszczeń, zaś Δr_α , ΔR_α są wektorami uogólnionych przemieszczeń węzłów układu i uogólnionych sił zewnętrznych działających na te węzły.

Omówienie innych modeli MES (takich jak modele: mieszany, hybrydowy, przemieszczeniowy I, hybrydowy przemieszczeniowy II, hybrydowy przemieszczeniowy III, równowagi I, równowagi II, hybrydowy naprężeniowy, zmodyfikowany hybrydowy naprężeniowy) zamieszczono np. w monografii [47] oraz w artykułach [56, 57], w których podano obszerne bibliografie zawierające oryginalne prace z zakresu uogólnionych modeli MES.

Dotychczas omawialiśmy wariacyjne aspekty tworzenia modeli MES dla nieliniowych zagadnień statyki kontinuum. W zagadnieniach nieliniowej dynamiki wariacyjne podstawy metod przybliżonego rozwiązywania problemów brzegowo-początkowych są opracowane

równie dobrze, [58, 47, 48]. W szczególności, odpowiednikiem podejścia opartego na funkcjonale J_p jest tzw. zasada Hamiltona o postaci

$$(2.7) \quad \delta \int_{t_0}^{t_1} (T - J_p) d\tau = 0$$

gdzie T jest kinematyczną energią ciała, zaś τ jest czasem rzeczywistym. Wykorzystanie zasady (2.7) oraz standardowych założeń aproksymacyjnych zgodnego, przemieszczeniowego modelu MES prowadzi w ujęciu przyrostowym do przestrzenie dyskretyzowanych równań ruchu o postaci

$$(2.8) \quad M\Delta\ddot{r} + K_t\Delta r = \Delta R,$$

lub, po dodatkowym uwzględnieniu sił tłumienia, do równań ruchu o postaci, [94, 70, 47]

$$(2.9) \quad M\Delta\ddot{r} + C\Delta\dot{r} + K_t\Delta r = \Delta R,$$

gdzie M i C są odpowiednio macierzami masy i tłumienia układu dyskretyzowanego zaś, zgodnie ze stosowaną tu koncepcją opisu

$$(2.10) \quad \begin{aligned} \Delta\ddot{r} &= \ddot{r}_{t+\Delta t} - \ddot{r}_t, \\ \Delta\dot{r} &= \dot{r}_{t+\Delta t} - \dot{r}_t, \\ \Delta r &= r_{t+\Delta t} - r_t, \end{aligned}$$

przy czym przyjęliśmy tu uproszczoną notację $r_t = r(t)$, itp. Równanie ruchu (2.9) zapisujemy zazwyczaj jako

$$(2.11) \quad M\ddot{r}_{t+\Delta t} + C\dot{r}_{t+\Delta t} + K_t\Delta r = \Delta R + M\ddot{r}_t + C\dot{r}_t,$$

lub jako

$$(2.12) \quad M\ddot{r}_{t+\Delta t} + C\dot{r}_{t+\Delta t} + K_t\Delta r = R_{t+\Delta t} - F_t,$$

gdzie F_t jest wektorem tzw. węzłowych sił wewnętrznych w chwili t tj. na początku rozpatrywanego kroku po czasie.

Zauważmy, że otrzymany tu ostateczny układ liniowych równań różniczkowych zwyczajnych (2.12) odpowiada zastosowaniu tzw. przestrzenie dyskretyzowanego modelu MES. Istnieje jednakże alternatywna możliwość zastosowania aproksymacji czaso-przestrzennej, w wyniku której otrzymuje się zamiast (2.12) od razu odpowiednio większy układ równań algebraicznych. Metoda ta, zwana metodą elementów czaso-przestrzennych, opisana została w pracach [60 - 62].

3. Konstruowanie nowych elementów skończonych

Tematyka ta, zasadnicza dla MES z punktu widzenia dokładności uzyskiwanych rozwiązań, jest przedmiotem obszernych rozważań każdego z wymienionych wyżej opracowań książkowych, w szczególności polecić tu można monografie [7, 16, 20, 28, 46]. Jawne postaci macierzy charakteryzujących mechaniczne własności elementów skończonych zależą w ogólności od:

— rodzaju zastosowanego sformułowania wariacyjnego,

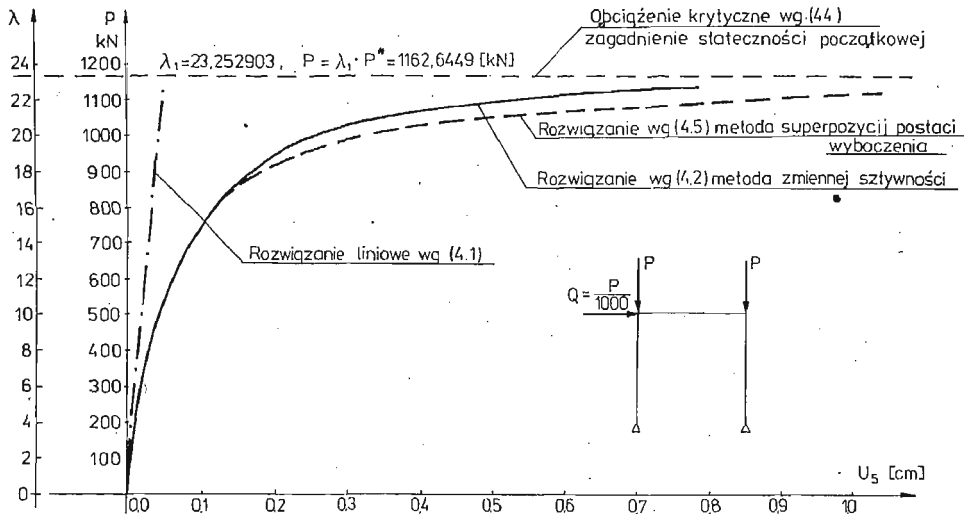
- rodzaju zagadnienia (problemy trójwymiarowe, płyty, belki itp),
- stopnia zastosowanej aproksymacji wielomianowej.

Bardzo istotną rolę odgrywają obecnie elementy skończone o brzegach krzywoliniowych (w szczególności: elementy izoparametryczne), [63]. Wymagają one z zasady stosowania procedur całkowania numerycznego przy obliczaniu macierzy elementowych, są jednak bardzo efektywne i nadają się znakomicie do włączania w całkowicie zautomatyzowany proces obliczeniowy właściwy MES.

Obszerny przegląd opracowanych dotychczas elementów skończonych zawarty jest w pracy [64].

4. Formułowanie zagadnień brzegowo-początkowych mechaniki w aspekcie stosowania MES

Umiejętność konstruowania różnych ogólnych modeli oraz istnienie efektywnych algorytmów numerycznych nie przesądza oczywiście o efektywności odpowiedniego podejścia i istniejących programów w konkretnym problemie praktycznym. Doświadczenia obliczeniowe uzyskane na gruncie rozwiązywania różnorodnych zagadnień mechaniki pozwalają bowiem często na wprowadzenie tak istotnych uproszczeń do ogólnie sformułowanego zadania mechaniki, że może to zasadniczo zmienić rozmiar zadania i koszt dokonania obliczeń. Tę rozległą problematykę zilustrujemy na przykładzie ramy pokazanej na rys. 2, dla której chcemy określić wielkość deformacji (oraz towarzyszące im napręże-



Rys. 2

nia) przy proporcjonalnie narastających obciążeniach statycznych. Przed przystąpieniem do budowy modelu MES zdecydować musimy, czy będzie to model liniowy czy też model nieliniowy. Model liniowy sprowadza problem do rozwiązania układu równań

$$(4.1) \quad K_{\alpha\beta}^{(s)} r_{\beta} = R_{\alpha},$$

przy czym $K_{\alpha\beta}^{(s)}$ jest macierzą sztywności sprężystej ramy, podczas gdy w ramach modelu nieliniowego rozwiązań należy wielokrotnie układać równania

$$(4.2) \quad [K_{\alpha\beta}^{(kon.)} + K_{\alpha\beta}^{(s)} + K_{\alpha\beta}^{(u)}] \Delta r_{\beta} = \Delta R_{\alpha},$$

odpowiadający linearyzacji problemu na kolejnym kroku przyrostowym.

Istnieją jednakże jeszcze inne możliwości otrzymania wyników mogących interesować inżyniera. W ramach podejścia zwanego analizą stateczności zlinearyzowanej rozwiązujemy mianowicie uogólniony problem własny postaci

$$(4.3) \quad \{K_{\alpha\beta}^{(s)} + \lambda[K_{\alpha\beta}^{(s)}(\sigma_y^*) + \bar{K}_{\alpha\beta}^{(u)}(r_{\gamma}^*)]\} v_{\beta} = 0,$$

zaś zagadnienie tzw. stateczności początkowej prowadzi do problemu własnego postaci

$$(4.4) \quad [K_{\alpha\beta}^{(s)} + \lambda K_{\alpha\beta}^{(s)}(\sigma_y^*)] v_{\beta} = 0,$$

gdzie przez σ_y^* , r_{α}^* oznaczyliśmy stan naprężenia i przemieszczenia w ramie odpowiadające „liniowo” pewnemu dowolnemu testowemu obciążeniu R_{α}^* , λ jest parametrem proporcjonalnego obciążenia zewnętrznego, tj. $R_{\alpha} = \lambda R_{\alpha}^*$, $\bar{K}_{\alpha\beta}^{(u)}$ oznacza liniową (względem r_{α}) część macierzy początkowych przemieszczeń $K_{\alpha\beta}^{(u)}$ zaś v_{α} jest wektorem postaci wybojenowej odpowiadającym krytycznej wartości parametru $\lambda = \lambda_{kr}$.

Inną od wszystkich wymienionych wyżej możliwością analizy rozpatrywanej ramy jest podejście, w którym nieliniową zależność przemieszczenia r od parametru obciążenia λ dana jest wzorem [65, 66]

$$(4.5) \quad r_{\alpha}(\lambda) = \sum_{\alpha=1}^K \lambda(\lambda_{\alpha} - \lambda)^{-1} v_{\beta(\alpha)} v_{\alpha(\alpha)}^t R_{\beta}^*,$$

w którym $(\lambda_1, v_{\alpha(1)})$, $(\lambda_2, v_{\alpha(2)})$, ..., $(\lambda_k, v_{\alpha(k)})$ są paroma pierwszymi rozwiązaniami problemu własnego (4.4), zaś wzór (4.5) obowiązuje dla $\lambda < \lambda_1$. Istnieją oczywiście jeszcze inne sposoby analizy rozpatrywanej ramy. Wyniki otrzymane za pomocą niektórych z wymienionych wyżej metod zamieściliśmy na rys. 2.

Widzimy, że sposób sformułowania zagadnienia mechaniki bardzo istotnie wpływa na dobór odpowiedniego modelu MES i właściwej mu techniki numerycznej. Przystępując do przybliżonego rozwiązywania jakiegokolwiek zagadnienia brzegowo-początkowego mechaniki kierujemy się zawsze dwojakim celem: osiągnięciem możliwie wysokiej dokładności uzyskiwanych aproksymacji oraz otrzymaniem rozwiązania we względnie prosty sposób. Wymagania te są jednak przeciwstawne — zadawałamy się więc zazwyczaj rozważaniami umożliwiającymi przynajmniej rozsądne sterowanie prostotą procedur i dokładnością wyników, zależnie od naszych konkretnych potrzeb i możliwości obliczeniowych. Ten wybór modelu dyskretyzowanego stanowi bardzo istotny aspekt zastosowań MES — bardzo wiele prac badawczych skoncentrowanych jest obecnie na analizie modeli MES z uwzględnieniem uproszczeń możliwych do wprowadzenia w wyjściowym modelu układu kontynualnego. Umożliwia to bowiem łączenie posiadanych doświadczeń i wiadomości dotyczących poszukiwanego rozwiązania z automatyczną procedurą dokonującą reszty, tj. wykonującą obliczenia numeryczne. Zapewnia to wysoką efektywność podejścia pozostawiając do zrobienia odpowiednio człowiekowi i maszynie cyfrowej to, co jest im obecnie najbardziej właściwe: niezależne, krytyczne myślenie oraz szybkość wykonywania powtarzalnych, zalgorytmizowanych operacji algebraicznych.

Sposób formułowania problemów brzegowo-początkowych mechaniki wywiera, jak widzimy na powyższym przykładzie, istotny wpływ na wybór odpowiedniej techniki numerycznej. Jednocześnie złożoność (czy prostota) odpowiednich istniejących algorytmów wpływać powinna również na sposób sformułowania problemu mechaniki — niezwykle waga tego wzajemnego sprzężenia zadecydowała o wyróżnieniu tej problematyki w osobnym podrozdziale niniejszego przeglądu.

5. Algorytmy numeryczne

Istotnym czynnikiem oceny przydatności danego modelu MES jest efektywność zastosowanego w zrealizowanym programie algorytmu numerycznego służącego rozwiązywaniu układów równań algebraicznych (2.5) (w przypadku zagadnień statycznych) lub układów równań różniczkowych (2.12) (w przypadku zagadnień dynamicznych).

Wśród metod rozwiązywania problemów dynamiki zasadniczą rolę odgrywają: metoda superpozycji modalnej oraz metody bezpośredniego całkowania.

Metoda superpozycji modalnej w zastosowaniu do zagadnień liniowych ma charakter standardowy, [67] i nie wymaga komentarza. Wbrew pozorom (superpozycja!), metoda ta okazała się przydatna również w zagadnieniach nieliniowych, [68, 69].

Stosując metody bezpośredniego całkowania, polegające na wykorzystaniu w równaniu (2.12) różnicowych aproksymacji wektorów prędkości \dot{r} i przyspieszenia \ddot{r} , otrzymujemy odpowiednie układy równań algebraicznych względem poszukiwanego wektora Δr .

Rozróżniamy dwie zasadnicze grupy metod bezpośredniego całkowania:

— metody jawne, bazujące na wykorzystaniu do obliczenia wektora warunków dynamicznej równowagi układu w chwili t i opisywane w ogólności związkiem

$$(5.1) \quad (\alpha M + \beta C) \Delta r = \Delta R^{(\text{eff.})},$$

oraz

— metody niejawne, bazujące na warunkach dynamicznej równowagi układu w chwilach $\tau = \bar{t}$, „późniejszych” niż t (np. $\bar{t} = t + \Delta t$) i opisywane w ogólności związkiem

$$(5.2) \quad (\gamma M + \delta C + \eta K_{\bar{t}}) \Delta r = \Delta \bar{R}^{(\text{eff.})}.$$

Współczynniki α , β , γ , δ , η jak również wektory obciążenia efektywnego $\Delta R^{(\text{eff.})}$, $\Delta \bar{R}^{(\text{eff.})}$ zależą od zastosowanej różnicowej aproksymacji pochodnych względem czasu. Zauważmy, że metody niejawne, wymagające spełnienia równań równowagi dynamicznej w chwili, dla której nie znamy rozwiązania (a tym samym konfiguracji układu), pociągają za sobą konieczność stosowania procesu iteracyjnego. Zauważmy także, że w przypadku zastosowania diagonalnych macierzy masy i tłumienia algorytmy typu jawnego prowadzą do niezwykle prostej postaci układu równań — poszczególne równania są bowiem od siebie niezależne. Jest to oczywiście olbrzymią zaletą tych metod. Wadą ich jest jednak ich tylko warunkowa stabilność, co powoduje silne ograniczenie długości kroku po czasie i zwiększa koszt rozwiązania.

Obszerna analiza metod rozwiązywania zagadnień nieliniowej dynamiki wraz z analizą stabilności i dokładności odpowiednich algorytmów zawarta jest w pracach [8, 9, 48].

Zauważmy dalej, że dla $M = 0$, $C = 0$ algorytm całkowania niejawnego nadaje się do analizy zagadnień statyki.

Podstawową czynnością, jaką wykonać należy w ramach algorytmu całkowania niejawnego jest rozwiązywanie układu liniowych równań algebraicznych (5.2). Metody te, w kontekście zastosowań MES, opisane są szeroko we wszystkich opracowaniach książkowych wymienionych w Bibliografii. Jak już wspominaliśmy, po rozwiązaniu układu (5.2) należy zastosować odpowiedni proces iteracyjny pozwalający na spełnienie z żadaną dokładnością równań ruchu (5.2) w założonej chwili \bar{t} . Zazwyczaj stosowane są w tym celu różne wersje klasycznej metody iteracji Newtona-Raphsona, które w odniesieniu do równania (2.12), spełnianego przykładowo w chwili $\bar{t} = t + \Delta t$, opisać można związkami

$$(5.3) \quad M\dot{r}_{t+\Delta t}^{(i)} + C r_{t+\Delta t}^{(i)} + K_{t+\Delta t}^{(i)} \delta r^{(i+1)} = R_{t+\Delta t} - F_{t+\Delta t}^{(i)},$$

gdzie (i) oznacza kolejną, typową pętlę iteracyjną zaś „poprawka” rozwiązania $\delta r^{(i+1)}$ służy do akumulacji „prawdziwej” wartości wektora Δr wg wzoru

$$(5.4) \quad \Delta r^{(i+1)} = \Delta r^{(i)} + \delta r^{(i+1)}, \quad i = 0, 1, \dots,$$

przy czym przyjmujemy

$$(5.5) \quad \begin{aligned} \Delta r^{(0)} &= \Delta r \text{ (rozwiązanie układu równań liniowych),} \\ K_{t+\Delta t}^{(0)} &= K_t, \\ F_{t+\Delta t}^{(0)} &= F_t, \end{aligned}$$

Macierz K może być uaktualniana na każdym kroku iteracyjnym (tzw. pełna metoda Newtona-Raphsona) lub rzadziej — jedynie na pierwszej iteracji (tzw. zmodyfikowana metoda Newtona-Raphsona) lub co pewną wybraną liczbę kroków. Inną, bardzo efektywną i często ostatnio wykorzystywaną metodą iteracyjną typu Newtona-Raphsona jest tzw. metoda BFGS, [70, 47].

Wszystkie powyższe metody zawodzą w sytuacjach, gdy macierz rozwiązywanego układu równań staje się osobliwa. Odpowiada to napotkaniu na analizowanej drodze stanów równowagi pewnych punktów osobliwych, wśród których rozróżniamy punkty graniczne (maksimum obciążenia) oraz punkty bifurkacji (rozdwojenia). Zagadnienia związane z rozwiązywaniem zagadnień mechaniki w otoczeniu punktów osobliwych omawiane są szeroko w pracach [47, 71 - 73].

Bardzo efektywnym sposobem analizy złożonych problemów nieliniowej statyki są tzw. metody redukcji bazy, [74]. Aby je krótko omówić przedstawimy układ równań opisujący nieliniowe zagadnienie statyki w postaci

$$(5.6) \quad Kr + G(r) = R$$

przy czym zrezygnowaliśmy tu dla większej przejrzystości z formalizmu przyrostowego zaś wektor $G(r)$ ujmuje symbolicznie wszystkie efekty nieliniowego zachowania się układu. Główną zaletą zastosowanej tu do otrzymania równania (5.6) procedury MES jest łatwość modelowania nawet złożonych kształtów analizowanej konstrukcji, wadą natomiast konieczność rozwiązywania względnie dużego układu N nieliniowych równań algebraicznych. Aby nieco poprawić sytuację założymy, że znamy pewne „globalne” funkcje kształtu opisujące stan przemieszczenia układu tak, że założyć można

$$(5.7) \quad r_{N \times 1} = \Gamma_{N \times K} x_{K \times 1},$$

gdzie $x_{k \times 1}$ jest pewnym „zredukowanym” ($K \ll N$) wektorem uogólnionych współrzędnych zaś

$$(5.8) \quad \Gamma_{N \times K} = [\gamma_{1N \times 1} \gamma_{2N \times 1} \cdots \gamma_{KN \times 1}],$$

pewną zredukowaną bazą w przestrzeni rozwiązań dyskretyzowanych. Wykorzystanie równania (5.7) w związku (5.6) prowadzi do zależności

$$(5.9) \quad \tilde{K}_{K \times K} x_{K \times 1} + \tilde{G}_{K \times 1}(x) = \Gamma_{K \times N}^t R_{N \times 1},$$

gdzie

$$(5.10) \quad \tilde{K}_{K \times K} = \Gamma_{K \times N}^t K_{N \times N} \Gamma_{N \times K}$$

Równanie (5.9) jest wynikiem łącznego zastosowania MES oraz klasycznej metody Raileigha-Ritza, [75]. Korzyść z wykorzystania tego drugiego podejścia wynika ze znacznej redukcji liczby niewiadomych w rozpatrywanym problemie, wadą natomiast jest tu niewątpliwie trudność wyboru wektorów bazy zredukowanej (5.8).

Trudność tę pokonać można poprzez odwołanie się do jeszcze innej metody przybliżonego rozwiązywania nieliniowych układów równań, zwanej metodą statycznej perturbacji [47, 76]. Metoda ta bazuje na koncepcji rozwinięcia funkcji $r(\tau)$ i $R(\tau)$ w szereg Taylora o postaci

$$(5.11) \quad r(\tau) = r(0) + \dot{r}(0)\tau + \ddot{r}(0)\frac{\tau^2}{2!} + \ddot{\ddot{r}}(0)\frac{\tau^3}{3!} + \dots,$$

$$(5.12) \quad R(\tau) = R(0) + \dot{R}(0)\tau + \ddot{R}(0)\frac{\tau^2}{2!} + \ddot{\ddot{R}}(0)\frac{\tau^3}{3!} + \dots,$$

oraz wstawieniu tych rozwinięć do równania (5.6). Przyrównując występujące po obu stronach równania współczynniki przy kolejnych potęgach parametru τ i traktując funkcję $R(\tau)$ jako znaną otrzymujemy w sposób rekurencyjny kolejne wartości $r(0)$, $\dot{r}(0)$, $\ddot{r}(0)$, Ostateczną wartość „nieliniowego” przemieszczenia $r(\tau)$ otrzymujemy na podstawie wzoru (5.11) przy czym długość kroku (tj. maksymalna wartość parametru τ) ograniczona jest warunkiem zbieżności szeregu (5.11). Jest to niewątpliwą wadą metody statycznej perturbacji, jej poważną zaletą natomiast jest możliwość dokonywania za jej pomocą efektywnych obliczeń nawet w otoczeniu punktów osobliwych, [54].

Powróćmy teraz do omawiania metody redukcji bazy przyjmując

$$\Gamma_{N \times K} = \left[\begin{array}{cccc} r(0) & \dot{r}(0) & \ddot{r}(0) & \frac{r^{(k-1)}(0)}{|r(0)|} \\ |r(0)| & |\dot{r}(0)| & \dots & \frac{r^{(k-1)}(0)}{|r(0)|} \end{array} \right]_{N \times K},$$

tj. utożsamiając wektory bazy zredukowanej z kolejnymi, unormowanymi wektorami pochodnych przemieszczenia względem parametru drogi τ , (5.11). Jak okazuje się na podstawie rozważań teoretycznych oraz obliczeń testowych [74], tak rozumiane metody redukcji bazy mają wszystkie zalety MES, klasycznej metody Raileigha-Ritza oraz metody statycznej perturbacji tj. odpowiednio:

- łatwość modelowania złożonych kształtów analizowanych ciał,
- względnie niedużą liczbę niawiadomych,
- możliwość prowadzenia efektywnych obliczeń w otoczeniu punktów osobliwych,

nie posiadają natomiast wad właściwych tym metodom takich jak odpowiednio:

- duża liczba niewiadomych,
- trudność doboru globalnych funkcji kształtu,
- kłopoty ze zbieżnością szeregu (5.11).

Inną grupą metod zasługujących z pewnością na wzmiankę w tym przeglądzie są tzw. podejścia analityczno-numeryczne, których przykładem może być nieliniowa analiza układów osiowosymetrycznych poddanych dowolnemu obciążeniu, [77].

6. Przetwarzanie danych i produkcja oprogramowania

Oczywistą przyczyną sukcesu MES w naukach inżynierskich jest powstawanie, równoległe z rozwojem podstaw teoretycznych, olbrzymiej liczby coraz doskonalszych programów komputerowych. Szerokie omawianie prac dotyczących informatycznych podstaw programów MES, ze względu na obszerność i specyfikę tej tematyki, przekraczałoby ramy niniejszego opracowania. Ograniczymy się więc jedynie do przytoczenia paru bardzo reprezentatywnych pozycji literatury w tym zakresie, [78 - 87]. Dalszą ilustracją tej problematyki mogą być także szczegółowe opisy różnych opracowanych na świecie dużych programów z zakresu zastosowań MES w mechanice, takich jak

- ASKA, [88, 89],
- MARC, [90],
- NASTRAN, [91],
- LARSTRAN, [92],
- ANSR, [93],
- ADINA, [94],
- ADINAT, [95].

Literatura cytowana w tekście

1. A. C. SINGHAL, *775 selected references on the finite element method*, Report S-12, Civil Eng. Dept. Laval Univ., Quebec, Jan. 1969, Canada.
2. J. E. AKIN, D. L. FENTON, W. C. T. STODDART, *The finite element method — a bibliography of its theory and application*. Report EM 72 - 1, Dept. Eng. Sciences, Univ. of Tennessee, Knoxville, Febr. 1972, USA.
3. D. H. NORRIE, G. DEVRIES, *A finite element bibliography*, Reports 57, 58, 59, Dept. Mech. Eng., Univ. of Calgary, Alberta, June 1974, Canada.
4. D. H. NORRIE, G. DEVRIES, *A finite element bibliography*, Reports 57, 58, 59, Dept. Mech. Eng., Univ. of Calgary, Alberta, 1975, Canada.
5. D. H. NORRIE, G. DEVRIES, *A finite element bibliography*, Plenum Press, 1976.
6. J. H. ARGYRIS, *Energy theorems and structural analysis*, Butterworth 1960.
7. J. H. ARGYRIS, H. P. MLEJNEK, *Einführung in die Methoden der finiten Elemente*, Vieweg 1982.
8. K. J. BATHE, E. WILSON, *Numerical methods in finite element analysis*, Prentice—Hall 1976.
9. K. J. BATHE, *Finite element procedures in engineering analysis*, Prentice—Hall 1981.
10. C. A. BREBBIA, J. C. CONNOR, *Fundamentals of finite element techniques for structural engineers*, Butterworth 1975.
11. P. G. CIARLET, *The finite element method for elliptic problems*, North—Holland 1978.

12. Y. K. CHEUNG, M. F. YEO, *A practical introduction to finite element analysis*, Pitman 1979.
13. R. D. COOK, *Concepts and applications of finite element analysis*, Wiley 1974.
14. J. DANKERT, *Numerische Methoden der Mechanik*, Springer 1977.
15. A. J. DAVIES, *The finite element method*, Clarendon 1980.
16. C. S. DESAI, J. P. ABEL, *Introduction to the finite element method*, Van Nostrand Reinhold 1972.
17. C. S. DESAI, *Elementary finite element method*, Prentice—Hall 1979.
18. R. T. FENNER, *Finite element methods for engineers*, Macmillan 1975.
19. I. FRIED, *Numerical solution of differential equations*, Acad. Press 1979.
20. R. H. GALLAGHER, *Finite element analysis: Fundamentals*, Prentice—Hall 1975.
21. H. G. HAHN, *Methode der finiten Elemente in der Festigkeitlehre*, Akad. Verlagsgesellschaft 1975.
22. E. HINTON, D. R. J. OWEN, *Finite element programming*, Academic Press 1977.
23. E. HINTON, D. R. J. OWEN, *An introduction to finite element computations*, Pineridge 1979.
24. K. H. HÜBNER, *Finite element method for engineers*, Wiley 1975.
25. B. M. IRONS, S. AHMAD, *Techniques of finite elements*, Ellis Horwood, 1979.
26. H. C. MARTIN, G. CAREY, *Introduction to finite element analysis*, McGraw—Hill 1973.
27. B. NATH, *Fundamentals of finite elements for engineers*, Athlone Press 1974.
28. D. H. NORRIE, G. DEVRIES, *Finite element method: Fundamentals and applications*, Academic Press 1973.
29. D. H. NORRIE, G. DEVRIES, *An introduction to finite element analysis*, Academic Press 1978.
30. J. T. ODEN, *Finite elements of nonlinear continuum*, McGraw—Hill 1972.
31. J. T. ODEN, J. N. REDDY, *Variational methods in theoretical mechanics*, Springer 1976.
32. J. T. ODEN, J. N. REDDY, *An introduction to the mathematical theory of finite elements*, Wiley 1978.
33. D. R. J. OWEN, E. HINTON, *Finite elements in plasticity: Theory and practice*, Pineridge 1980.
34. P. M. PRENTER, *Splines and variational methods*, Wiley 1975.
35. J. PRZEMIENTECKI, *Theory of matrix structural analysis*, McGraw—Hill 1968.
36. T. H. RICHARDS, *Energy methods in stress analysis*, Wiley 1977.
37. J. ROBINSON, *Integrated theory of finite element methods*, Wiley 1973.
38. K. C. ROCKEY, H. R. EVANS, D. W. GRIFFITHS, D. A. NETHERCOT, *Finite element method — A basic introduction*, Crosby Lockwood 1975.
39. M. F. RUBINSTEIN, *Structural systems: statics, dynamics, stability*, Prentice—Hall 1970.
40. H. R. SCHWARZ, *Methode der finiten Elemente*, Teubner 1980.
41. L. J. SEGERLIND, *Applied finite element analysis*, Wiley 1976.
42. G. STRANG, G. J. FIX, *An analysis of the finite element method*, Prentice—Hall 1973.
43. P. TONG, J. N. ROSSETOS, *Finite element method: Basic technique and implementation*, MIT Press 1977.
44. R. VALID, *Mechanics of continuous media and analysis of structures*, North—Holland 1981.
45. E. L. WACHSPRESS, *A rational finite element basis*, Academic Press 1975.
46. O. C. ZIENKIEWICZ, *The finite element method*, McGraw—Hill 1977.
47. M. KLEIBER, *Metoda elementów skończonych w nieliniowej mechanice kontinuum*, PWN 1983.
48. M. KLEIBER, *Wprowadzenie do metody elementów skończonych*, skrypt, Wyd. Polit. Poznańskiej, 1983.
49. J. KRUSZEWSKI, W. GAWROŃSKI, E. WITTBRODT, F. NAJBAR, S. GRABOWSKI, *Metoda sztywnych elementów skończonych*, Arkady, 1975.
50. J. PIETRZAK, G. RAKOWSKI, K. WRZEŚNIEWSKI, *Macierzowa analiza konstrukcji*, skrypt, PWN 1979.
51. J. SZMELTER, M. DACKO, S. DOBROCIŃSKI, M. WIECZOREK, *Programy metody elementów skończonych*, Arkady 1973.
52. J. SZMELTER, M. DACKO, S. DOBROCIŃSKI, M. WIECZOREK, *Metoda elementów skończonych w statyce konstrukcji*, Arkady 1979.
53. J. SZMELTER, *Metody komputerowe w mechanice*, PWN 1980.
54. CZ. WOŹNIAK, M. KLEIBER, *Nieliniowa mechanika konstrukcji*, PWN 1982.
55. O. C. ZIENKIEWICZ, *Metoda elementów skończonych*, Arkady 1972.
56. T. H. H. PIAN, *Finite element methods by variational principles with relaxed continuity requirements*, w: *Variational methods in engineering*, Univ. of Southampton, 1972, England.
57. G. HERRIGMUE, P. G. BERGAN, *Incremental variational principles and finite element models for nonlinear problems*, *Comp. Meths. Appl. Mech. Eng.* 7, 201 - 217, 1978.

58. M. GERADIN, *Variational methods of structural dynamics and their finite element implementation*, w: Advanced Structural Dynamics, Appl. Science Publishers Ltd, 1980, s. 1 - 141.
59. K. J. BATHE, *Finite element formulation, modeling and solution of nonlinear dynamic problems*, w: Numerical methods for partial differential equations, Acad. Press 1979, s. 1 - 40.
60. I. FRIED, *Finite element analysis of time dependent phenomena*, AIAA J. **7**, 1170 - 1172, 1969.
61. S. N. ATLURI, *An assumed stress hybrid finite element model for linear elastodynamic analysis*, AIAA J. **11**, 1028 - 1031, 1972.
62. Z. KĄCZKOWSKI, *Metoda czasoprzestrzemych elementów skończonych*, Arch. Inż. Łąd. **22**, 365 - 378, 1978.
63. O. C. ZIENKIEWICZ, *Isoparametric and allied numerically integrated elements — a review*, w: Numerical and computer methods in structural mechanics, Academic Press 1973, s. 13 - 42.
64. B. FREDRIKSON, J. MACKERLE, *Finite element review*, Publication No. AEC-L-003, AEC, Box 3944, Univ. of Linköping, Sweden.
65. D. A. NAGY, *Modal representation of geometrically nonlinear behaviour*, Comp. Struct. **10**, 683 - 688, 1979.
66. M. KLEIBER, M. WIECZOREK, *Przybliżona metoda nieliniowej analizy ram sprężystych*, Rozpr. Inż. **30**, 269 - 281, 1982.
67. R. W. CLOUGH, J. PENZIEN, *Dynamics of structures*, McGraw—Hill 1975.
68. R. E. NICKELL, *Nonlinear dynamics by mode superposition*, Comp. Meths. Appl. Mech. Eng. **7**, 107 - 129, 1976.
69. N. F. MORRIS, *The use of modal superposition in nonlinear dynamics*, Comp. Struct. **7**, 65 - 72, 1977.
70. K. J. BATHE, A. P. CIMENTO, *Some practical procedures for the solution of nonlinear finite element equations*, Comp. Meths. Appl. Mech. Eng. **22**, 59 - 85, 1980.
71. Z. WASZCZYŻYN, *Problemy numeryczne nieliniowej analizy stateczności konstrukcji sprężystych*, w: Współczesne metody analizy stateczności konstrukcji, Ossolineum 1981, s. 341 - 380.
72. E. RIKS, *An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems*, Int. J. Sol. Struct. **15**, 529 - 551, 1979.
73. P. G. BERGAN i inni, *Solution techniques for nonlinear finite element problems*, Int. J. Num. Meths. Eng. **12**, 1677 - 1696, 1978.
74. A. K. NOOR, J. M. PETERS, *Reduced basis technique for nonlinear analysis of structures*, AIAA J. **18**, 455 - 461, 1980.
75. B. O. ALMROTH, F. A. BROGAN, P. STERN, *Automatic choice of global shape functions in structural analysis*, AIAA J. **16**, 683 - 688, 1979.
76. M. KLEIBER, *Perturbation approach to the incremental equations of large deformation elasto-plasticity*, Bull. Acad. Polon. Sci. Sér. Sci. Techn. XXVIII, 75 - 80, 1980.
77. M. KLEIBER, TRAN DUONG HIEN, *Nonlinear dynamics of complex axisymmetric structures under arbitrary loadings*, Comp. Meths. Appl. Mech. Eng., 1983, (w druku).
78. B. FREDRIKSSON, J. MACKERLE, *Structural mechanics finite element computer programs, surveys and availability*, Publication No. AEC-L-001, AEC, Box 3044, S-58903, Linköping, Sweden.
79. B. FREDRIKSSON, J. MACKERLE, *Structural mechanics pre-and postprocessor programs*, Publication No. AEC-L-003, AEC, Box 3044, S-58903, Linköping, Sweden.
80. *Structural Mechanics Computer Programs: Surveys, Assessments, and Availability*, Univ. Press of Virginia, Charlottesville 1974, USA.
81. E. SCHREM, *Computer implementation of the finite-element procedure*, w: Numerical and computer methods in structural mechanics, Academic Press 1973, s. 79 - 121.
82. N. SARIGUL, J. MAITAN, H. A. KAMEL, *Solution of nonlinear structural problems using array processors*, Comp. Meths. Appl. Mech. Eng. **34**, 939 - 954, 1982.
83. A. K. NOOR, J. J. LAMBIOTTE, *Finite element dynamic analysis on CDC STAR-100 computer*, Comp. Struct. **10**, 7 - 19, 1979.
84. H. F. JORDAN, P. L. SAWYER, *A multi-microprocessor system for finite element structural analysis*, Comp. Struct. **10**, 21 - 32, 1979.
85. C. A. FELIPPA, *Database management in scientific computing — I. General description*, Comp. Struct. **10**, 53 - 61, 1979.

86. H. A. KAMEL, M. W. MCCABE, P. G. DESHAZO, *Optimum design of finite element software subject of core restrictions*, Comp. Struct. **10**, 63 - 80, 1979.
87. A. K. NOOR, C. M. ANDERSEN, *Computerized symbolic manipulation in structural mechanics — Progress and potential*, Comp. Struct. 95 - 118, 1979.
88. E. SCHREM, *Development and maintenance of large finite element systems*, w: Structural mechanics computer programs, Univ. Press of Virginia, USA, 1974, s. 669 - 686.
89. E. SCHREM, *A short description of ASKA*, w: Finite element linear and nonlinear analysis, University Extension Program, Univ. of Milano, Italy, 1975.
90. MARC-CDC, *Non-linear finite element analysis program, User information manual*, Publ. No. 17309500, Control Data Corp., Minneapolis, Minn., USA.
91. R. H. MACNEAL, *The NASTRAN theoretical manual*, NASA SP-221(01), National Aer. and Space Administration, April 1972.
92. *LARSTRAN user's manual*, ISD-Report No. 231, Univ. of Stuttgart, West Germany, 1978.
93. D. P. MONDKAR, G. H. POWELL, *ANSR-II, Analysis of nonlinear structural response, User's manual*, Report No. UCB/EERC-79/17, Univ. of California, Berkeley, July 1979, USA.
94. K. J. BATHE, *ADINA — a finite element program for automatic dynamic incremental nonlinear analysis*, Report No. 82448-1, MIT, Mass., Sept. 1977, USA.
95. K. J. BATHE, *ADINAT — a finite element program for automatic dynamic incremental nonlinear analysis of temperatures*, Report No. 82448-5, MIT, Mass., May 1977, USA.

Praca została złożona w Redakcji 30 marca 1983 roku.

PRZEGLĄD OSIĄGNIĘĆ KRAJOWYCH BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH TURBULENCJI W OKRESIE MINIONEGO DZIESIĘCIOLECIA

S. DROBNIAK

Instytut Maszyn Ciepłych Politechniki Częstochowskiej

Wstęp

Turbulencja jest jednym z najczęściej spotykanych w przyrodzie zjawisk fizycznych, występuje bowiem w atmosferze, rzekach i jeziorach, istnienie jej stwierdza się w materii tworzącej gwiazdy, nie wspominając już o roli jaką odgrywa w lotnictwie czy budowie maszyn energetycznych. Niewątpliwym paradoksem jest równocześnie fakt, że mimo wielu lat badań zarówno teoretycznych jak i eksperymentalnych ten najpowszechniejszy rodzaj ruchu pozostaje do tej pory najmniej poznanym. Przyczyn tego stanu wiedzy jest bardzo wiele, a najistotniejszą wydaje się być niezwykła złożoność turbulencji, wymykająca się próbom ścisłego jej opisu i sprawiająca, że skazani jesteśmy na bardzo uproszczone formy matematycznego jej ujęcia.

Nie bez znaczenia jest również i sposób podejścia do zagadnień turbulencji prezentowany przez ludzi zajmujących się tą problematyką. Jak stwierdził P. Bradshaw „dla jednych turbulencja to dział matematyki, dla drugich wiąże się ona głównie z techniką i technologią, podczas gdy jedynie słusznym wydaje się być traktowanie turbulencji jako zagadnienia wchodzącego w skład fizyki stosowanej”. Oznacza to, że rola dociekań teoretycznych i eksperymentalnych jest tu jednakowo ważna, zaś doświadczenie jest najbardziej istotnym kryterium weryfikującym słuszność proponowanych teorii.

Charakterystyka współczesnych kierunków w dziedzinie badań turbulencji

Należy zdać sobie sprawę, że niniejsze opracowanie nie jest próbą podsumowania zamkniętego etapu badań, zaś miniony okres nie stanowi jakiegoś odrębnego rozdziału odróżniającego się od dokonań poprzednich. Prawidłowa działalność badawcza musi być uważana za proces ciągły, poznawanie prawd naukowych odbywa się najczęściej drogą nieprzerwanego gromadzenia faktów w celu dokonania ich syntezy. Rzecz jasna, także i w tej dziedzinie zdarzają się wyjątki, prace o charakterze wielkich odkryć stanowią cezurę czasową pozwalającą dzielić badania naukowe na te sprzed i po przełomowym wydarzeniu. Przykładem może tu być opublikowanie hipotezy Prandtla o drodze mieszania (1925 r.) czy też koncepcji lokalnej izotropii Kołmogorowa (1942 r.). Obydwie te teorie ukierunkowały na wiele lat tematykę prac tak doświadczalnych jak i teoretycznych. Spróbujmy odpo-

wiedzieć na pytanie, czy w eksperymentalnych badaniach turbulencji mieliśmy w omawianym okresie do czynienia z takim właśnie odkryciem? I tak i nie. Tak — gdy w pionierskich pracach BROWNA i ROSKO [1] przedstawiono po raz pierwszy absolutnie przekonujący dowód istnienia w typowym przepływie turbulentnym struktur koherentnych. Nie — odpowiadają drudzy, jako że o ich istnieniu wiadano już od dawna, a np. struktura turbulencji w ścieżce wirowej Kármána została już w latach czterdziestych zbadana przez Kovasznaya. Jak zwykle czas okazał się najlepszym sędzią, a dalsze prace prowadzone w tej dziedzinie wykazały doniosłość publikacji Browna i Rosko. Kiedy bowiem KLINE [45] oraz WILLMORTH i. LIU [93] potrafili wykazać, że struktury koherentne odpowiedzialne są za ok. 75% produkcji naprężeń stycznych, wówczas stało się jasne, że rewizji należało poddać zarówno dotychczasowe programy prac doświadczalnych jak i skorygować sposoby teoretycznego ujęcia zagadnienia. Powszechnie do tej pory „wyznawana” koncepcja turbulencji oparta była na mechanizmie kaskady wirów transportujących energię ruchu burzliwego, przy czym przepływ tej energii odbywał się w kierunku wirów o rosnących liczbach falowych. Odkrycie struktur koherentnych charakteryzujących się dużymi udziałami energii przy średnich zaledwie skalach długości wymagało pilnej korekty modelu kaskadowego. Odpowiedzią teorii stały się koncepcje strukturalnego modelowania turbulencji (Structural Modelling of Turbulence), którego oryginalność polega na odejściu od klasycznego operowania wielkościami uśrednionymi w czasie. Uśrednienie występuje w nich bowiem dopiero w ostatniej fazie analizy, polegającej na otrzymaniu rozwiązania w dziedzinie czasu z uwzględnieniem odpowiednich warunków brzegowych. Szczególnie obiecującym przykładem rozwiązań tego typu jest modelowanie dużych struktur wirowych (Large Eddy Simulation), których obszerną bibliografię podaje m.in. HIRATA [37].

Również i w dziedzinie eksperymentu zrobiono do tej pory bardzo wiele, sytuacja jest tu jednak znacznie mniej klarowna i pod wieloma względami przypomina typowe „kłopoty bogactwa”. Początkowo wśród zajmujących się tym problemem specjalistów panowało przekonanie, że każdy rodzaj przepływu winien charakteryzować się występowaniem jednej typowej dla niego struktury koherentnej. I tak dla przepływu w rurze miała nią być bryła (slug), w warstwie przysciennej rozbłysk (burst), zaś w swobodnej strudze — pierścień wirowy (vortex ring). W krótkim jednak czasie w samej tylko warstwie przysciennej wykryto dodatkowo struktury kieszeniowe (turbulent spots), wstęgowe (streaks) i wiele, wiele innych. Jak stwierdził ostatnio jeden z pionierów tej dziedziny prof. Sato, istnieje pilna potrzeba prac unifikacyjnych dotyczących sposobów wykrywania obszarów burzliwości koherentnej, nie można bowiem wykluczyć, że w wielu przypadkach rodzaj odkrytej struktury może być pochodną zastosowanego kryterium detekcji. Najnowszym w tej dziedzinie osiągnięciem meteorologicznym jest metoda rozpoznawania struktur (pattern recognition), której sposób realizacji w odróżnieniu od zwykłego próbkowania warunkowego (conditional sampling) umożliwi znacznie ściślejsze określenie optymalnego progu detekcji (BLACKWELDER [2]). Obserwuje się również w ostatnich latach coraz powszechniejszy trend poszukiwania struktur pierwotnych czy też elementarnych, które byłyby wspólne dla kilku klas przepływów. Jako jedną z możliwości wymienia się przy tym wir agrafkowy (hairpin vortex) a gorącym zwolennikiem tego poglądu był zmarły niedawno M. D. HEAD [38]. Nie należy jednak sądzić, że struktury koherentne są jedynym problemem absorbującym uwagę w doświadczalnych badaniach turbulencji. Jest to niewątpli-

wie kierunek bardzo modny, rokujący nadzieje wielu sukcesów lecz nie oznacza to, że bezcelowe staje się kontynuowanie dotychczasowych kierunków badań. Odkrycie struktur koherentnych nie przybliżyło nas bowiem do poznania tajemnicy turbulencji, wręcz przeciwnie — do wielu już istniejących dodało nowe niewiadome.

Przegląd krajowych prac doświadczalnych z zakresu mechaniki turbulencji w minionym dziesięcioleciu

Odpowiadając na pytanie jak na tle aktualnych światowych kierunków rozwoju mechaniki turbulencji przedstawiają się badania krajowe, należy odnotować z zadowoleniem, że opóźnienie naszych prac doświadczalnych nie było zbyt duże. Już bowiem w roku 1978 na III KKM CiG przedstawiono prace wykonane w ośrodkach w Poznaniu [4], Wrocławiu [41] i Częstochowie [94] dotyczące zagadnień struktur koherentnych. Do zmniejszenia luki czasowej przyczynił się na pewno fakt, że niektóre z nich wykonane były w laboratoriach zagranicznych, co pozytywnie świadczy o korzyściach wynikających z międzynarodowej współpracy. Mimo iż prace te dotyczą różnych zagadnień (struga płaska, osiowo-symetryczna, strumień uderzający) łączy je jednak wspólna cecha — w każdej z nich zastosowano zabieg wzmocnienia współistniejących w przepływie struktur koherentnych. Inny sposób podejścia do tego zagadnienia prezentuje praca [5], w której poszukuje się optymalnych kryteriów detekcji bez konieczności dodatkowego oddziaływania na przepływ. Dalszy rozwój prac prowadzonych w tej dziedzinie winien umożliwić lepsze poznanie mechanizmu tworzenia się turbulencji otwierając nowe możliwości sterowania procesami wymiany masy i ciepła w przepływie [73], [36]. Dalsze badania uwarunkowane są jednak odpowiednim unowocześnieniem bazy laboratoryjnej, która dotyczyć winna zwłaszcza aparatury umożliwiającej cyfrową analizę sygnałów szybkozmiennych. Przy okazji należy tu podkreślić istnienie wyraźnego sprzężenia zwrotnego między współczesną tematyką badań a rozwojem nowoczesnych narzędzi pomiarowych. Najlepszy przykład stanowią właśnie struktury koherentne, których odkrycie byłoby niemożliwe bez użycia komputerowej techniki „obróbki” sygnału termooanemometrycznego.

Wszechobecność turbulencji w połączeniu z coraz większym znaczeniem problemów ochrony środowiska sprawia, że drugim do ważności „modnym” obecnie kierunkiem badań jest zagadnienie transportu zanieczyszczeń w atmosferze i sterowania procesami opływu budowli. Kierunek ten reprezentowany jest szczególnie wyraźnie w Instytucie Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej Politechniki Warszawskiej, a wykonywane tam prace obejmują szeroki zakres tematyczny, od zagadnień typowo aplikacyjnych [57] do podstawowych [67]. Należy przy tym podkreślić szerokie stosowanie technik wizualnych, w użyciu których ośrodek ten ma bezsprzecznie największe w kraju doświadczenie. Wizualizacja, zarówno tradycyjna jak i wykorzystująca bardziej nowoczesne sposoby (technika dyiącego drutu, pęcherzyków wodorowych itp.) jest w zasadzie metodą jakościową, pozwala jednak uzyskać wgląd w mechanizm zachodzących w przepływie przemian, ułatwiając tym samym dokonanie trafnej syntezy wyników ilościowych. W praktyce krajowej jest ona niestety w zbyt małym zakresie stosowana, co stanowi zresztą oznakę pewnej generalnej słabości polskich prac doświadczalnych. Zbyt wielu bowiem autorów

poprzestaje jedynie na prezentacji wyników ilościowych, nie dokonując próby ich syntezy tzn. wyjaśnienia mechanizmu zjawiska, w czym wizualizacja byłaby niejednokrotnie bardzo pomocna.

Z problemem turbulencji atmosferycznej wiąże się zagadnienie modyfikacji struktury ruchu burzliwego wywołanej obecnością dodatkowych sił masowych, takich jak siła wyporu termicznego w warstwie z gradientem temperatury, siły bezwładności wywołane skrzywieniem linii prądu w przepływach zawirowanych itp. Mamy wówczas do czynienia z ciekawą sytuacją, gdy oprócz produkcji turbulencji zachodzącej dzięki obecności naprężeń stycznych występuje dodatkowa generacja energii kinetycznej ruchu burzliwego wywołana działaniem fluktuacyjnych sił masowych. Istnieje pilna potrzeba prowadzenia prac badawczych w tej dalece jeszcze nierozpoznanej dziedzinie, do tej pory nie dysponujemy bowiem żadną zadawalającą teorią przepływu o niestabilnej stratyfikacji. Problemem tym zajmuje się w kraju aż pięć ośrodków, a mianowicie:

- Instytut Maszyn Ciepłych Politechniki Częstochowskiej,
 - Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej Politechniki Warszawskiej,
 - Politechnika Białostocka,
 - Instytut Lotnictwa w Warszawie,
 - Instytut Techniki Ciepłej i Siłników Spalinowych Politechniki Poznańskiej
- przy czym zagadnienia te nie wyczerpują rzecz jasna całości zainteresowań naukowych poszczególnych ośrodków.

Badania podstawowe turbulencji stanowią od kilku już lat główny przedmiot działalności badawczej Instytutu Maszyn Ciepłych. W omawianym okresie wykonano tam szereg interesujących prac doświadczalnych, z których wymienić można przykładowo analizę wpływu gradientu ciśnienia [22] oraz kontrolowanego odsysania i domieszania czynnika [28] na rozwój śladu za opływającym ciałem. Również w IMC zrealizowano cykl badań dotyczących modyfikacji struktury turbulencji zachodzącej dzięki obecności sił masowych wywołanych zakrzywieniem linii prądu [17] oraz dodatkowo jeszcze różnicą temperatur [46] wyjaśniając przy tym szczegółowo ewolucję poszczególnych składników bilansu energetycznego turbulencji [54]. Zagadnienia te wydają się być ważne zarówno ze względów poznawczych (możliwość uściślenia stosowanych obecnie modeli turbulencji) jak i aplikacyjnych — zwłaszcza w dziedzinie spalania.

Zespół pracujący w ITLiMS Politechniki Warszawskiej poświęca główną uwagę zagadnieniu neutralnej stabilnej stratyfikacji przyziemnej warstwy atmosferycznej [63] co wypływa z możliwości praktycznego wykorzystania tego typu przepływu. Należy również wymienić opracowaną w tym ośrodku ciekawą analizę przejścia laminarno-turbulentnego na powierzchni płata z wykorzystaniem funkcji korelacyjnych [47].

Prace prowadzone w Politechnice Białostockiej dotyczą głównie problemu magazynowania ciepłej wody, stąd też w centrum zainteresowania znajduje się tam wymiana ciepła w warstwie granicznej stratyfikowanej stabilnie [68].

We wszystkich omówionych powyżej pracach transportowana wielkość oddziałuje na strukturę ruchu burzliwego, mamy więc do czynienia z tzw. aktywnym transportem wielkości skalarnej. Prace Instytutu Lotnictwa [19, 20] i część prac prowadzonych w IMC [96, 98] dotyczą natomiast zagadnień zamykania równań transportu pędu i ciepła przy założeniu, że ciepło transportowane jest jak typowa wielkość pasywna.

Analizując tematykę prowadzonych w kraju prac badawczych nie sposób nie wspomnieć o jednym z najtrudniejszych problemów meteorologicznych turbulencji a mianowicie o pomiarach korelacji prędkościowo-ciśnieniowych. Zagadnienie to jest przedmiotem zainteresowania kilku prac wykonanych w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN [89, 90].

Cechą charakterystyczną prac doświadczalnych w dziedzinie turbulencji jest znaczny stopień skomplikowania zarówno samej aparatury jak i stosowania procedur pomiarowych. Bardzo szerokie pasmo częstotliwości turbulencji oraz konieczność uwzględniania zjawisk o skalach zmieniających się od dziesiątków kilometrów (turbulencja atmosferyczna) do ułamków milimetra (skala dyssypacji) narzucają bardzo wysokie wymagania czujnikom i metodom pomiaru. Nie jest więc przypadkiem stosunkowo znaczny udział prac czysto meteorologicznych będących wynikiem poszukiwań optymalnego dla danego zagadnienia sposobu prowadzenia eksperymentu. Znaczny udział w tej kategorii opracowań mają następujące ośrodki:

- Instytut Maszyn Ciepłych Politechniki Częstochowskiej,
- Instytut Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie,
- Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Śląskiej w Gliwicach.

Termoanometria stanowi już od wielu lat obiekt zainteresowania badawczego Instytutu Maszyn Ciepłych P.Cz., w omawianym okresie wykonano tam szereg prac dotyczących analizy odpodzi czujników w burzliwym polu przepływu [33, 34], opracowano również szereg specjalistycznych procedur pomiarowych [18, 52]. Wymienić również należy podjęte w tym ośrodku próby skonstruowania czujnika termoanometrycznego umożliwiającego pomiar dyssypacji energii turbulencji bez konieczności wprowadzania dodatkowych założeń upraszczających [26].

Podkreślić również należy prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, gdzie opracowano szereg specjalistycznych przyrządów, bez których niemożliwa byłaby realizacja wielu krajowych prac doświadczalnych z zakresu turbulencji. Wymienić tu można opracowania dotyczące anemometru impulsowego [77], korelatora analogowego [70] czy też bardzo przydatnego zwłaszcza w pomiarach przemysłowych anemometru stałoprądowego z detektorem zwrotu [43...]

Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska w Gliwicach specjalizujący się w problemach aerodynamiki wentylacji zajmuje się głównie metrologią przepływów silnie zaburzonych o małych wartościach prędkości średnich [74, 75]. Ośrodek ten prowadzi także prace dotyczące zastosowań anemometrii laserowej w aerodynamice wentylacji [35].

W literaturze krajowej pojawiło się kilka wzmianek dotyczących stosowania LDA, są to jednak w większości pomiary o charakterze rozpoznawczym [45, 14]. Oznacza to, że aparatura laserowa nie przekroczyła jeszcze progu praktycznego zastosowania w doświadczalnych badaniach turbulencji. Świadczy to niestety o pewnym opóźnieniu w stosunku do przodujących ośrodków zagranicznych, gdzie pomiary przy użyciu LDA wykonywane są już rutynowo. Wypada więc ubolewać, że aparatura, której wprowadzenie obiecywało przewrót w krajowej metrologii turbulencji nie przynosi do tej pory spodziewanych efektów. Przyczyn tego stanu rzeczy jest na pewno wiele, lecz najbardziej istotną wydaje się być niekompletność posiadanych zestawów LDA i rozproszenie ich w wielu ośrodkach. Inną jeszcze dziedziną metrologii, która nie jest reprezentowana w kraju

są pomiary pól wirowości chwilowej przy zastosowaniu specjalnych, konstruowanych wyłącznie do tego celu czujników. Prowadzenie tego typu badań wymaga jednak opowania specyficznej technologii produkcji miniaturowych sond wielowłóknowych jak również posiadanie dużej ilości kanałów aparatury termooanemometrycznej. Ponieważ tak w jednej jak i w drugiej dziedzinie krajowej stan posiadania jest raczej ubogi, stąd też i brak możliwości realizacji tego typu prac.

Najważniejsze cechy charakterystyczne krajowych prac doświadczalnych minionego dziesięciolecia

Jak już wspomniano wcześniej, niniejszy przegląd ma charakter czysto okolicznościowy i nie dotyczy żadnego zamkniętego etapu badań. Jest to więc jedynie próba oceny kierunków krajowych badań doświadczalnych turbulencji na tle analogicznych prac prowadzonych zagranicą. Pamiętając o tym autor nie rości sobie praw do ferowania ocen i wyrokowania, który z omówionych kierunków jest ważniejszy czy bardziej obiecujący od innych. Szczęśliwie się jednak składa, że przed dziesięć laty z okazji II Kongresu Nauki Polskiej bardzo wnikliwą i krytyczną ocenę polskich prac badawczych w zakresie turbulencji przedstawili prof. J. Mączyński i doc. J. Kołodko. Spróbujmy więc przypomnieć najważniejsze tezy ich referatów i zastanowić się, na ile zachowują one słuszość w odniesieniu do omawianego okresu. W największym skrócie można je ująć następująco:

- istnieje wyraźne zjawisko zacofania badawczego w porównaniu z nauką światową, wyrażające się zarówno w ubogim wyposażeniu laboratoriów jak i w braku oddźwięku na nowoczesne koncepcje turbulencji,
- krajowe prace doświadczalne dotyczą głównie wtórnych efektów turbulencji takich jak wymiana ciepła i masy, nie zaś podstaw turbulencji i jej mechanizmów,
- prace polskie nie są obecne na żadnym z międzynarodowych sympozjów naukowych w dziedzinie turbulencji, nie publikuje się prac badawczych nawiązujących do głównych nurtów badawczych na świecie.

Niektóre z tych zarzutów straciły przynajmniej w części swoją zasadność jako że prace krajowe były w minionym dziesięcioleciu publikowane w poważnych wydawnictwach [6, 28] oraz wielokrotnie prezentowane na międzynarodowych sympozjach poświęconych turbulencji [30, 3]. Ważną rolę w przełamaniu izolacji i zapóźnienia odegrały staże naukowe w przodujących ośrodkach zagranicznych i nawiązanie ścisłej współpracy z organizacjami naukowymi pracującymi w dziedzinie turbulencji. W rezultacie kierunki krajowych prac badawczych w większości zgadzają się z problematyką, nad którą pracuje się obecnie zagranicą przykładem — struktury koherentne.

Wypada jednak zgodzić się z aktualnym nadal zarzutem marginalności prac doświadczalnych, które w zbyt małym stopniu skierowane są na fizykalną interpretację zachodzących w przepływie zjawisk. Niewątpliwa użyteczność badanych efektów turbulencji nie może przesłaniać konieczności poznawania jej mechanizmów, bez znajomości których nie można wyciągać wniosków o takim stopniu uogólnienia, jaki wymagany jest od pracy naukowej. Uważne przejrzenie zamieszczonej w niniejszym artykule bibliografii prac doświadczalnych skłania do wniosku, że znakomita ich większość dotyczy zagadnień

mających bezpośredni związek z praktyką przemysłową co przeczy w sposób oczywisty obiegowym opiniom o oderwaniu nauki od przemysłu.

Prace doświadczalne w dziedzinie turbulencji są niestety bardzo kosztowne, a niski stopień rozwoju zaplecza produkcyjnego aparatury sprawia, że opierają się one w znacznej mierze na przyrządach pochodzących z importu. W rezultacie dziedzina ta jest bardzo wrażliwa na wszelkie wahania w ilości przeznaczonych na nie środków. Porównanie ilości prac doświadczalnych z zakresu turbulencji na poszczególnych konferencjach MCiG wykazuje, że maksimum przypada na rok 1978 i od tej pory liczba tego rodzaju prac systematycznie maleje.

Jedną z przyczyn, które na to zjawisko mają bezpośredni wpływ jest postępująca dekapitalizacja i moralne starzenie się posiadanej w kraju aparatury. Rozproszenie środków materialnych sprawia również, iż niejednokrotnie brak części zamiennych zestawu pomiarowego nie pozwala na należyte wykorzystanie pozostałych jego elementów.

Należy również przypomnieć wielokrotnie podnoszony zarzut, iż krajowe prace badawcze są bardzo rozproszone, brak bowiem w kraju ośrodka takiego jak np. francuski Institut de Mecanique Statistique de la Turbulence, który mógłby koordynować poszczególne tematy badań.

Przewidywane kierunki rozwoju badań doświadczalnych turbulencji

Niezwykła złożoność struktury przepływów burzliwych sprawia, że jakiegokolwiek przewidywania co do przyszłych i obiecujących z poznawczego punktu widzenia kierunków badań są zajęciem nader niewdzięcznym. Dotychczas zgromadzony zasób informacji i doświadczeń wskazywałby jednak na trzy najważniejsze, przyszłościowe dziedziny zainteresowań.

Pierwszą z nich jest klasyczny eksperyment prowadzony w ścisłym powiązaniu z potrzebami numerycznego modelowania przepływów turbulentnych. Nowe, obiecujące hipotezy zamykania układu równań ruchu takie jak chociażby koncepcja transportu naprężeń, wymagają niezbędnego „wsadu” eksperymentalnego. Nie chodzi tu jednak o proste porównanie sumarycznych wyników obliczeń z rezultatami doświadczenia, lecz raczej o eksperymentalną weryfikację słuszności przyjętych koncepcji modelowania poszczególnych członów równań transportu. W dziedzinie numerycznych modeli turbulencji liczące się w skali krajowej osiągnięcia ma Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej, w którym od wielu już lat pracuje się nad modelem K-E. Należy sądzić, że uzupełnienie dociekań teoretycznych odpowiednim programem eksperymentalnym mogłoby w efekcie znacznie rozszerzyć nasz zasób wiedzy o istocie ruchu burzliwego.

Druga dziedzina to niewątpliwie problem struktur koherentnych, których badania są mimo wielkich osiągnięć ciągle jeszcze w stadium wstępnym. Nasz zasób wiadomości o zorganizowanej wirowości jest dalece niewystarczający, zbyt wiele zagadnień o fundamentalnym nieraz znaczeniu jest tu nadal otwartych. Zważywszy obserwowany w ostatnich latach dynamiczny rozwój tej gałęzi wiedzy sądzić można, że również w przyszłości będzie ona stanowić nadal pole dla eksperymentu. Złożoność tych zjawisk wymagać

będzie jednak dość istotnych modyfikacji stosowanych obecnie narzędzi badawczych. Coraz powszechniejsza staje się opinia, iż jedynie pomiary ilościowe połączone integralnie z wizualizacją zachodzących w przepływie procesów mogą być tu właściwym rozwiązaniem. Wydaje się, że ten właśnie typ pomiarów pozwoli zawęzić bardzo szeroki obecnie zakres dowolności w interpretacji wyników.

Ostatnią wreszcie grupą badań wartych chyba dalszej kontynuacji jest eksperymentalna analiza skomplikowanych i trudnych do analitycznego ujęcia przepływów trójwymiarowych. Przykładem mogą tu być zjawiska zachodzące w rzeczywistych maszynach przepływowych jak również w tym przypadku rozwój badań warunkowany jest uzyskaniem specjalnej aparatury pomiarowej.

Przegląd bibliograficzny prac z zakresu badań doświadczalnych turbulencji

Ograniczone łamy niniejszego opracowania są przyczyną, dla której niemożliwe było przytoczenie wszystkich prac, jakie ukazały się w tej dziedzinie w minionym dziesięcioleciu. W szczególności pominięto opracowania dotyczące przepływów przez palisady, jako że przegląd taki zawarty jest w mającej się niebawem ukazać odrębnej monografii J. Elsnera [32]. W zestawieniu bibliograficznym oparto się głównie na streszczeniach referatów wygłoszonych na Krajowych Konferencjach Mechaniki Ciecży i Gazów, wychodząc z założenia, że formuła tych konferencji zapewnia lepszy przegląd prowadzonych w kraju prac. Inne publikacje zamieszczone są tylko w tych przypadkach, gdy nie znajdują swego odpowiednika w treści zgłoszonych referatów. Dlatego nie wszystkie prace na to zasługujące mogły być tu wymienione, celem przeglądu nie było jednak zestawienie wszystkich publikacji z tej dziedziny lecz taki ich wybór, który byłby reprezentatywny dla najważniejszych kierunków prowadzonych w kraju badań. Rzecz jasna, za wszelkie niedopatrzienia wyłączną winę ponosi autor, stąd wszelkie uwagi i uzupełnienia będą powitane z prawdziwą wdzięcznością.

Literatura cytowana w tekście

1. BROWN, A. ROSKO, *Journal of Fluid Mechanics*, 1974, vol. 64.
2. R. BLACKWELDER, *Pattern Recognition of Coherent Eddies*, Proc. Dynamics Flow Conf., Marseille, 1978.
3. W. BIAŁOSKÓRSKI, H. BOGIŃSKI, J. KOŁODKO, *Niektóre wyniki badań teoretycznych i doświadczalnych w dziedzinie hydrodynamiki jezior. II KKMCIg*, 1976.
4. L. BOGUSŁAWSKI, E. DUBANIEWICZ, Cz. POPIEL, *Badanie turbulentnego strumienia swobodnego w pobliżu wylotu z rury*.
5. L. BOGUSŁAWSKI, *Struktury koherentne turbulentnej warstwy przyściennej*, ZN Pol. Poznańskiej, 1982.
6. L. BOGUSŁAWSKI, Cz. POPIEL, *Flow Structure of the free round turbulent jet in the initial region*, J. F. M., 1979, vol. 90.
7. K. BRODOWICZ, T. DYAKOWSKI, M. SHAMLOUL, *Badanie stateczności laminarnego przepływu z odsysaniem*, IV KKMCIg — 1980.
8. J. BRYKALSKI, *Badania rozkładu ciśnienia na modelu kadłuba śmigłowca z nadmuchem wirnika*, IV KKMCIg, 1980.

9. W. CHUDZIK, S. GOMUŁA, W. RONCZYŃSKI, *Badanie kinematyki ruchu wirowego indukowanego w przestrzeni ograniczonej*, IV KKMCiG, 1980.
10. W. CHUDZIK, S. GOMUŁA, W. RONCZYŃSKI, *Badania dyssypacji energii w ruchu wirowym powietrza*, IV KKMCiG, 1980.
11. W. CZERNUSZENKO, P. LEBIECKI, *Pomiary podstawowych charakterystyk turbulencji przy przepływie wody w kanale otwartym*, III KKMCiG, 1978.
12. B. DEPTUŁA, B. DOMALANUS, W. GOŁAŚ, *Experimental investigations of the thermal boundary layer*, Mat. XIII Bien. Fluid Dyn. Symp.
13. B. DEPTUŁA, W. GOŁAŚ, B. DOMALANUS, *Termiczna warstwa przyścienna w przepływach laminarnych i turbulentnych*, IV KKMCiG, 1980.
14. T. DOBSKI, *Pomiar poziomu turbulencji w płomieniu za pomocą sondy mikrofonowej*, ZN Pol. Pozn. Nr 22, 1982.
15. P. DOMAGAŁA, *Analiza odpowiedzi czujników termooanemometrycznych w zmiennym polu prędkości i temperatur*, II KKMCiG, 1976.
16. P. DOMAGAŁA, *O pewnej metodzie pomiaru dyssypacji energii w przepływach turbulentnych*, ZN. Pol. Pozn. Nr 22, 1982.
17. S. DROBNIAK, *Ewolucja pól prędkości w osiowo-symetrycznej strudze ze zmiennym zawirowaniem wstępnym*, II KKMCiG, 1976.
18. S. DROBNIAK, *Lepkość wirowa w osiowo-symetrycznych strugach zawirowanych*, IV KKMCiG, 1980.
19. T. DROZD, *Metody doświadczalne wyznaczania zależności zamykających układ równań opisujących turbulentny przepływ nieizotermiczny*, III KKMCiG, 1978.
20. T. DROZD, *Wyznaczanie charakterystyk ciepło-przepływowych w oparciu o mechanizm turbulentnego transportu pędu i ciepła w różnych rodzajach przepływów*, IV KKMCiG, 1980.
21. J. ELSNER, S. DROBNIAK, *Turbulent energy distribution in a turbine cascade blade*, XIV Bien. Fluid. Dyn. Symp.
22. J. ELSNER, J. WILCZYŃSKI, *Evolution of Reynolds Stresses in Shear Flows with longitudinal pressure gradient*, XII Bien. Fluid Dyn. Symp.
23. J. ELSNER, J. WILCZYŃSKI, *Lepkość wirowa w strugach zapalisadowych z podłużnym gradientem ciśnienia*, II KKMCiG, 1976.
24. J. ELSNER, T. TARNOWSKI, *Odpowiedź sondy X na zmianę kierunku przepływu strugi*, III KKMCiG, 1978.
25. J. ELSNER, S. DROBNIAK, *Metoda wyznaczania tensora naprężeń burzliwych w przepływie przestrzennym*, III KKMCiG, 1978.
26. J. ELSNER, P. DOMAGAŁA, *Dwukanalowa metoda termooanemometryczna dla wyznaczania dyssypacji energii turbulencji*, IV KKMCiG, 1980.
27. J. ELSNER, J. KURZAK, *Ewolucja bnieizotermicznej zawirowanej strugi osiowo-symetrycznej*, V KKMCiG, 1982.
28. J. ELSNER, A. JARŻA, *The wake flow pattern behind a row of parallel plates with slot or surface suction of the flowing medium*, Mat. Konf. „Structure and Mechanism of Turbulence”, vol. I, wyd. Springer Verlag, 1978.
29. J. ELSNER, *Contemporary problems of hot-wire anemometry*, Tagung — Turbulenzmesstechnik, Berlin 1981, Akademie der Wissenschaften der DDR.
30. J. ELSNER, S. DROBNIAK, P. DOMAGAŁA, *A New Hot-Wire Method for experimental analysis of turbulence energy dissipation*, Proc. of 132 Euromech Colloquium, Lyon 1980.
31. J. ELSNER, S. DROBNIAK, *Turbulence Structure in swirling jet*, IUTAM Symp. „Structure of Complex Shear Flow”, 1982. wyd. Springer-Verlag (w druku).
32. J. ELSNER, *Aerodynamika palisad łopatkowych*, Wyd. PWN (w druku).
33. J. ELSNER, T. TARNOWSKI, *Odpowiedź sondy X na zmianę kierunku przepływu strugi*, III KKMCiG.
34. J. ELSNER, T. TARNOWSKI, *Charakterystyki katowe mostkowego układu termooanemometrycznego*, Mat. symp. TURBULENCJA 74, Częstochowa, 1974.
35. E. GRABEK, *Badania ruchu wirowego gazu w cyklonie*, IV KKMCiG, 1980.
36. E. GRABEK, Z. POPIOLEK, *Zastosowanie anemometru laserowego w badaniach modelowych z zakresu wentylacji i odpylenia*. III KKMCiG, 1978.

37. M. HIRATA, H. TANAKA, H. KOWAMURA, N. KASAGI, *Heat Transfer in Turbulent Flows*, The Seventh Int. Heat Transfer Conf. München, 1982.
38. M. R. HEAD, *New aspects of turbulent boundary layer structure*, J. F. M., 1981, vol. 107.
39. A. JARŻA, *Charakterystyka turbulentnej warstwy przyściennej przy jej odsysaniu przez ściankę porowatą*, I KKMCIg, 1974.
40. A. JARŻA, *Odsysanie czynnika z krawędzi splywu płytek a mikrostruktura ich śladów aerodynamicznych*, I KKMCIg, 1974.
41. A. JARŻA, *Oddziaływanie turbulencji wstępnej na przepływ za palisadą płytek przy szczelinowym odsysaniu gazu z krawędzi splywu*, III KKMCIg, 1978.
42. K. JEŻOWIECKA-KABSCH, *Ekspansja nieściśliwego strumienia turbulentnego*, III KKMCIg, 1978.
43. K. JEŻOWIECKA-KABSCH, *Badania struktury rozprzestrzeniania się płaskiej strugi oscylacyjnej*, IV KKMCIg, 1980.
44. J. KIEŁBASA, R. TYSOWSKI, *Anemometr stałotemperaturowy z linearyzатorem i detektorem zwrotu*, III KKMCIg, 1978.
45. S. J. KLINE et al J. F. M., 1967, vol. 30.
46. J. KONIECZKA, J. MIZERACZYK, S. KWAŚNIEWSKI, *Różnicowy anemometr laserowy do pomiaru przepływu cieczy i gazów*, III KKMCIg, 1978.
47. L. KURZAK, *Ewolucja pól temperatury w zawirowanej strudze osiowo-symetrycznej*, III KKMCIg, 1978.
48. M. LITWIŃCZYK, S. SKRZYŃSKI, *Badanie struktury przepływu w strefie przejścia drogą pomiaru funkcji korelacyjnych*, III KKMCIg, 1978.
49. E. MANEK, S. PIEŃKOWSKI, *Wpływ burzliwej warstwy wody na geometrię zbiorników akumulujących ciepłą wodę*, ZN Pol. Pozn. Nr 22, 1982.
50. J. MORDARSKI, S. TRĄBSKI, *Ścieżka wirawa za układem wielowalcowym w niejednoordnym polu prędkości*, II KKMCIg, 1976.
51. S. MIERZWIŃSKI, *Badania w zakresie aerodynamiki odpylania i wentylacji prowadzone w Zakładzie Ogrzewnictwa, Wentylacji i Ochrony Atmosfery Pol. Śląskiej*, III KKMCIg, 1978.
52. J. MICZKA, J. ZIELIŃSKI, *Badania rozwoju pola temperatur za palisadą podgrzewanych ciał*, I KKMCIg, 1974.
53. M. MUSIALIK, *Termoanemometryczna metoda pomiaru przepływów przestrzennych o znacznych gradientach prędkości*, III KKMCIg, 1978.
54. M. MUSIALIK, *Analiza przepływu osiowo-symetrycznego z zawirowaniem wstępnym*, III KKMCIg, 1978.
55. M. MUSIALIK, *Przemiany energii turbulencji w osiowo-symetrycznej strudze zawirowanej*, IV KKMCIg, 1980.
56. M. MUSIALIK, *Mikrostruktura i lokalna izotropia w turbulentnych strugach zawirowanych*, ZN Pol. Pozn. Nr 22, 1982.
57. J. OSTROWSKI, J. WOJCIECHOWSKI, L. TURKOWSKI, *The study of the flow control near the ground by the use of forest canopy*. XIV Bien. Fluid Dyn. Symp.
58. J. OSTROWSKI, M. LITWIŃCZYK, L. TURKOWSKI, *The results of the test of the secondary flow phenomena past the body and wing-body combination of the gliders*, XIV Bien. Fluid Dyn. Symp.
59. J. OSTROWSKI, J. WOJCIECHOWSKI, *Stadium oplywu hal huty*, I KKMCIg, 1974.
60. J. OSTROWSKI, W. PEŁKA, *Model tunelu pulsującego do badania zjawisk oplywu w przepływie nieustalonym*, I KKMCIg, 1974.
61. J. OSTROWSKI, M. LITWIŃCZYK, S. SKRZYŃSKI, *Badania oplywu kadłubów szybowców i przejścia skrzydło-kadłub*, I KKMCIg, 1974.
62. J. OSTROWSKI, *Zjawiska oplywu profilów laminarnych o wysokich współczynnikach siły nośnej*, I KKMCIg, 1974.
63. J. OSTROWSKI, *Wpływ przepływów wtórnych na ukształtowanie pola prędkości przepływu głównego*, II KKMCIg, 1976.
64. J. OSTROWSKI, P. SIERPUTOWSKI, *Zjawiska oplywu przeszkód terenowych*, II KKMCIg, 1976.
65. J. OSTROWSKI, J. WOJCIECHOWSKI, *Zasady kształtowania stref ochronnych i pasów zielonych dla zmniejszenia przyziemnego transportu zanieczyszczeń*, III KKMCIg, 1978.

66. J. OSTROWSKI, J. WOJCIECHOWSKI, *Zjawiska generacji warstwy przyściennej w przepływie przyspieszonym*, III KKMCIg, 1 1978.
67. J. OSTROWSKI, S. BRODOWICZ, *Badanie wpływu rozpraszaczy wiru końcowego na charakterystyki aerodynamiczne i obciążenie płata*, III KKMCIg, 1978.
68. J. OSTROWSKI, P. SIERPUTOWSKI, *Aerodynamika wiatru i jej problematyka*, IV KKMCIg, 1980.
69. K. PIĘKOWSKI, *Turbulencja termiczna w płynach statecznie stratyfikowanych*, IV KKMCIg, 1980.
70. J. PIOTROWSKI, Z. POPIOLEK, W. ŚLĘZAK, *Metody wzorowania termooanemometrów stosowane w Zakładzie Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Śląskiej*, III KKMCIg, 1978.
71. J. PIWOWARCZYK, *Elektroniczny korelator analogowy i jego zastosowanie w mechanice płynów*, III KKMCIg, 1978.
72. Cz. O. POPIEL, *Turbulentny osiowo-symetryczny strumień uderzający*, III KKMCIg, 1978.
73. Cz. O. POPIEL, E. DUBANIEWICZ, *Badanie struktury makrowirów w uderzającym strumieniu osiowo-symetrycznym*, IV KKMCIg, 1980.
74. Cz. O. POPIEL, *Zagadnienia uporządkowania struktur przepływu w osiowo-symetrycznych strumieniach swobodnych i uderzających*. ZN Pol. Pozn. Nr 22, 1982.
75. Z. POPIOLEK, W. ŚLĘZAK, *Interpretacja sygnału termooanemometru w silnie burzliwych przepływach o małych prędkościach*. III KKMCIg, 1978.
76. Z. POPIOLEK, *Statystyczne błędy pomiaru prędkości turbulencji przepływu*, IV KKMCIg, 1980.
77. G. RYGIEL, Z. WIERCIŃSKI, *Odkształcenie ścieżki von Kármána napływającej na cylinder*, IV KKMCIg, 1980.
78. J. RYSZ, B. STASICKI, *Anemometr do pomiaru powolnych przepływów*, III KKMCIg, 1978.
79. Z. ROMICKI, H. STIEWITT, *A. Dinkelacker of flow structures in liquids the help of ultrasound*, XII Bien. Fluid Dyn. Symp.
80. P. SIERPUTOWSKI, J. OSTROWSKI, *Wpływ fali generowanej przy podmuchu na obciążenia bryły nieopływowej umieszczonej wewnątrz warstwy przyściennej*, III KKMCIg, 1978.
81. P. SIERPUTOWSKI, *Charakterystyki turbulencji w modelowanej, atmosferycznej warstwie przyziemnej*, IV KKMCIg, 1980.
82. S. SKRZYŃSKI, *Badanie pola przepływu w otoczeniu laminarnych profili lotniczych z uwzględnieniem zjawiska przepływu w warstwie przyściennej*, I KKMCIg, 1974.
83. S. SKRZYŃSKI, M. LITWIŃCZYK, *Zjawiska przejścia warstwy laminarnej w turbulentną na profilach lotniczych*, II KKMCIg, 1976.
84. A. SMOLNY, *Weryfikacja wybranych metod pomiaru naprężeń stycznych na ścianie dla turbulentnej warstwy przyściennej*, ZN Pol. Pozn. Nr 22, 1982.
85. Z. SMÓLSKI, H. SOBKOWSKA, *Wpływ wilgotności względnej przepływającego powietrza na charakterystyki czujników termooanemometrycznych*, III KKMCIg, 1978.
86. Z. SMÓLSKI, H. SOBKOWSKA, *Eksperymentalna weryfikacja 3-ch znanych metod odwzorowywania charakterystyk czujników termooanemometrycznych*, III KKMCIg, 1978.
87. E. SOEHRICH, *Próby określenia warunków samomodelowania przepływu w modelach wentylacyjnych pomieszczeń*.
88. K. SZYMOCHA, *Przydatność anemometru laserowego w badaniach przepływu płynów*, III KKMCIg, 1978.
89. W. TRUTWIN, S. GOMUŁA, M. KRUSZYŃSKI, *O próbie określenia zależności współczynnika dyfuzji turbulentnej w powietrzu od prędkości ruchu powietrza*, III KKMCIg, 1978.
90. Z. WIERCIŃSKI, *Optymizacja cylindra jednorodnym strumieniem płynu i eksperymentalne określenie korelacji wzajemnej ciśnienia i prędkości w przepływie*, IV KKMCIg, 1980.
91. Z. WIERCIŃSKI, *Pomiar korelacji wzajemnej ciśnień na powierzchniach dwóch cylindrów dla podkrytycznych liczb Reynoldsa, gdy drugi cylinder umieszczony jest w śladzie sypłowym pierwszego*. ZN. Pol. Pozn. Nr 22, 1982.
92. J. WILCZYŃSKI, *Przepływ ze ścinaniem przy istnieniu podłużnego gradientu ciśnienia*, I KKMCIg, 1974.
93. W. W. WILLMORTH, S. S. LIU, *Structure of the Reynolds stress and the occurrence of bursts in the turbulent boundary layer*. Adv. in Geophysics, 1974, Academic Press.
94. R. WOLAŃSKI, M. JANIK, R. KŁAJNY, *Turbulentna struga swobodna w polu oddziaływań akustycznych*, III KKMCIg, 1978.

95. J. ZIELIŃSKI, *Uwagi do pomiarów temperatury w turbulentnym przepływie nieizotermicznym*, I KKMCiG, 1974.
96. J. ZIELIŃSKI, *Określenie współczynnika turbulencji dyfuzji termicznej w płaskim przepływie nieizotermicznym*, II KKMCiG, 1976.
97. J. ZIELIŃSKI, *Ewolucja przepływu nieizotermicznego za palisadą ciał symetrycznych*, IV KKMCiG, 1980.
98. J. ZIELIŃSKI, *Turbulentna liczba Prandtla w przepływie zapaliskowym*. ZN Pol. Pozn. Nr 22, 1982.

Praca została złożona w Redakcji dnia 10 lipca 1983 roku.

AERODYNAMIKA DOŚWIADCZALNA W ZAKRESIE DUŻYCH PRĘDKOŚCI

WOJCIECH KANIA

Instytut Lotnictwa

1. Wprowadzenie

Aerodynamiczne badania doświadczalne prowadzone są przede wszystkim w specjalnych urządzeniach laboratoryjnych — tunelach aerodynamicznych — bądź dla bardzo dużych prędkości przepływu także w rurach uderzeniowych.

Tunel aerodynamiczny stanowi urządzenie, w którym w sztuczny sposób można uzyskać jednorodny, ustalony strumień powietrza o danej prędkości przepływu, opływający badane ciało, a częściej jego model. Rozwój tuneli aerodynamicznych datuje się od końca XIX wieku, kiedy powstały pierwsze tunele, obejmując stopniowo coraz szerszy zakres prędkości i warunków przepływu. Pierwsze badania tunelowe podjęto w 70-tych latach XIX wieku przez Whenhema w Anglii i Wellesa w Stanach Zjednoczonych. Właściwy jednak rozwój tuneli należy datować od przełomu XIX i XX wieku, a zwłaszcza od badań braci Wright 1901 r. w Stanach Zjednoczonych, których wyniki wykorzystano w budowie pierwszego samolotu [11].

Obecnie istnieje na świecie bardzo duża ilość różnorodnych tuneli aerodynamicznych¹⁾, różniących się zasadami działania, zakresem prędkości — od kilku metrów na sekundę — do liczb Macha rzędu kilkudziesięciu — wymiarami od kilkunastocentymetrowych do kilkudziesięciometrowych komór pomiarowych, długością czasu pracy począwszy od mikrosekund, stosowanym medium oraz temperaturą i ciśnieniem spiętrzenia.

W wysoko rozwiniętych przemysłowo krajach świata znajdują się dziesiątki a nawet setki tuneli aerodynamicznych, w których badania wytyczają rozwój eksperymentalnej aerodynamiki jako dziedziny nauki, a także szerokie jej wykorzystanie w różnych dziedzinach techniki i przemysłu.

W zakresie dużych prędkości przepływu, którym to określeniem obejmujemy prędkości pod-, około- i naddźwiękowe, początek rozwoju tunelowych badań aerodynamicznych nastąpił jeszcze w okresie przed II wojną światową. Z tym jednak, że ówczesne badania dotyczyły zakresu prędkości poddźwiękowych względnie naddźwiękowych.²⁾ Spowodowane to było niemożnością uzyskania, w ówczesnych tunelach o stałych ścianach, prę-

¹⁾ W samych Stanach Zjednoczonych wartość aerodynamicznych tuneli i urządzeń w głównych ośrodkach badawczych szacowano w połowie lat 70-tych na 2,5 mld dolarów [12].

²⁾ Pierwszy tunel naddźwiękowy zbudowany został w ETH w Zurichu — Szwajcaria w 1935 r. [1].

kości okołodźwiękowych. Dopiero wprowadzenie komór pomiarowych tzw. „wentylowanych”³⁾ pozwoliło na budowę po II wojnie światowej w Stanach Zjednoczonych i w Szwecji pierwszych tuneli okołodźwiękowych. Szybki rozwój tych tuneli nastąpił w latach 50-tych. W tym też okresie powstał nowy typ tunelu, tzw. trisonicznego, w którym uzyskiwany jest cały zakres pod-, około- i naddźwiękowych prędkości przepływu (typowy zakres liczb Macha wynosi 0,2 - 0,5 jako dolny zakres do 2,5 - 4 jako górny) [19].

Na Zachodzie istniało w latach 70-tych ponad 30 dużych transsonicznych tuneli aerodynamicznych o przestrzeni pomiarowej rzędu kilku metrów, których ogólna wartość wynosi około 1 mld dolarów w cenach 1974 r. [14].

Eksperymentalne badania aerodynamiczne mają trzy główne obszary działania, w których stawiane są specyficzne cele:

- w badaniach podstawowych różnych zjawisk przepływowych uzyskanie wyników, które umożliwią stworzenie nowych teoretycznych modeli, stanowiących podstawę przyszłych prac teoretycznych,
- weryfikację poprawności stosowanych, a szczególnie rozwijanych nowych metod obliczeniowych,
- rozwiązywanie zagadnień aerodynamicznych w pracach rozwojowych nowokonstruowanych urządzeń w zakresie dużych prędkości, dotyczy to szczególnie różnorodnych obiektów latających: samolotów, śmigłowców i rakiet, a także maszyn przepływowych.

W zakresie badań podstawowych największe zainteresowanie badaczy zwrócone jest na: zagadnienia mechanizmu turbulencji; wzajemnej interferencji fali uderzeniowej i warstwy przyściennej w naddźwiękowym, a szczególnie okołodźwiękowym przepływie; oderwań przepływu zarówno stacjonarnych, jakie występują na krawędziach natarcia smukłych płatów nośnych lub ciał osiowosymetrycznych, a także spowodowanych falą uderzeniową; zagadnienia warstwy przyściennej; zagadnienia przepływów wielofazowych; zagadnienia wymiany ciepła w przepływie; zjawiska hałasu.

Szybki rozwój metod numerycznych aerodynamiki, szczególnie w zakresie okołodźwiękowym⁴⁾, związany z gwałtownym udoskonaleniem techniki komputerowej w dwu ostatnich dekadach, powoduje zwiększenie zapotrzebowania na wyniki badań eksperymentalnych, które mogłyby służyć do weryfikacji poprawności przyjmowanych modeli obliczeniowych. Badania te prowadzone są na modelach o prostej geometrii, takiej aby z jednej strony dokonywane porównania nie były obciążone nieprawidłowościami aproksymacji skomplikowanych kształtów geometrycznych modelu, z drugiej strony zaś winny na tych modelach występować wszystkie charakterystyczne własności rozpatrywanych rzeczywistych pól przepływu. Jak to podnosi Whitfield — możliwości prawidłowego wykorzystania aerodynamiki numerycznej w technice są określone możliwościami metod sprawdzenia ich w eksperymentalnych badaniach tunelowych [5].

Jednak zdecydowana większość eksperymentalnych badań aerodynamicznych poświęcona jest pracom rozwojowym techniki lotniczej. Należy tu przypomnieć, że już od po-

³⁾ Ściany komory ze szczelinami bądź otworami, przez które może być odsysane z komory powietrze.

⁴⁾ Obecnie można już obliczać opływy okołodźwiękowe profili oraz trójwymiarowe skrzydeł z występującymi falami uderzeniowymi uwzględniając warstwę przyścienną.

czątków rozwoju lotnictwa w 1903 r. — tunel aerodynamiczny i eksperymentalne badania stanowią główne narzędzie w pracach badawczych i konstrukcyjnych tej dziedziny techniki. Z drugiej strony rozwój tuneli i techniki badań aerodynamicznych jest ściśle związany z rozwojem lotnictwa i kosmonautyki. W szeregu opracowaniach [4 - 6] wskazuje się że według wszelkiego prawdopodobieństwa przez następne dwie (lub więcej) dekady tunel będzie ciągle jeszcze głównym narzędziem dla konstruktorów samolotów, śmigłowców i rakiet.

W miarę rozwoju lotnictwa wzrasta, szczególnie szybko od II wojny światowej, ilość godzin badań tunelowych przy konstrukcji kolejnych samolotów. Ilość godzin badań w tunelu aerodynamicznym potrzebnych do skonstruowania nowego samolotu wzrasta w przybliżeniu wykładniczo w przedziale lat 1960 - 80. W zależności od samolotu wynosi to od kilku tysięcy do kilkudziesięciu tysięcy godzin [5, 7, 16].

Obecnie przewiduje się, że projekt nowego samolotu wojskowego lub pasażerskiego wymagać będzie wkrótce 80 tysięcy godzin badań w tunelu. Stanowi to dziesięć lat nieprzerwanych badań w jednym tunelu, co wskazuje na skalę technicznych potrzeb w tej dziedzinie. W badaniach tych najwyższą wagę przywiązuje się do uzyskania wartości charakterystyk aerodynamicznych badanego obiektu, możliwie odpowiadającym wartościom występującym w locie swobodnym. Warunkuje to zachowanie odpowiednich liczb podobieństwa, uniknięcie oddziaływania ścian tunelu na opływ badanego modelu, a także polepszenie jakości strumienia w tunelu i zwiększenia dokładności pomiarów. W rozpatrywanym zakresie dużych prędkości istniejące urządzenia tunelowe umożliwiają dokładne spełnienie liczby Macha, tj. warunków ściśliwości dla badanych dzisiejszych obiektów latających. Natomiast uzyskanie w tunelu liczb Reynoldsa odpowiadających lotom swobodnym jest obecnie trudne czy wręcz niemożliwe [12]. Przez długie lata uważano, że dla powyższych prędkości spełnienie liczby Reynoldsa ma drugorzędne znaczenie i wpływ jej na uzyskane charakterystyki uwzględniano poprzez prostą ekstrapolację wyników tunelowych do warunków lotu przy założeniu, że liczba Reynoldsa wpływa głównie na opór tarcia. Jednakże, jak stwierdzono na przełomie lat 60-tych i 70-tych w pracach nad samolotem C-141 jest to daleko niesłuszne, szczególnie w zakresie transonicznym. Stwierdzono znaczne różnice w położeniu fali uderzeniowej, a także w charakterystykach przede wszystkim momentowych [12].

Wprowadzenie różnych metod symulacji wysokich liczb Reynoldsa w badaniach tunelowych z niskimi wartościami Re poprzez wymuszanie przejścia warstwy w pobliżu krawędzi natarcia, czy tzw. tylnego położenia przejścia nie daje w pełni zadawalających rezultatów. Dlatego też w drugiej połowie lat 70-tych w Stanach Zjednoczonych oraz w ramach współpracy 4-ch krajów zachodnioeuropejskich (Anglii, RFN, Francji i Holandii) podjęto budowę dwu tuneli transonicznych o naturalnych liczbach Reynoldsa. Są to ogromne i kosztowne przedsięwzięcia, które jak wskazują w literaturze, będą mieć podstawowe znaczenie nie tylko dla budowanych obiektów latających, ale także dla dalszego rozwoju samej aerodynamiki zarówno eksperymentalnej, jak i obliczeniowej. Warto przytoczyć choćby tylko zasadnicze dane techniczne tunelu NFT, którego zakończenie budowy w Ośrodku Badawczym w Langley (Stany Zjednoczone) przewidziano na rok 1982 [10]. Jest to kiriogeniczny transoniczny tunel ciągłego działania o przestrzeni pomiarowej $2,44 \times 2,44$ m, w którym jako czynnik roboczy zastosowano azot. Wysokie wartości liczb

Reynoldsa (do $120 \cdot 10^6$ dla $M = 1,0$ przy długości odniesienia 0,244 m) przepływu uzyskano poprzez obniżenie temperatury spiętrzenia czynnika roboczego do 78°K , unikając w ten sposób nadmiernych obciążeń i zmniejszając zapotrzebowanie mocy do napędu tunelu. Temperatura obniżana jest poprzez wtrysk ciekłego azotu w obiegu tunelu.

W tunelu realizowana jest niezależna regulacja temperatury, ciśnienia i prędkości przepływu ($M = 0 - 1,2$), co pozwala na osobne badania wpływu liczby Macha, liczby Reynoldsa, aeroelastyczności na własności aerodynamiczne badanych modeli. Koszt budowy obliczono na 100 mln dol w 1980 r. przy wykorzystaniu układu napędowego i systemu jego regulacji z przeznaczonego do rozbiórki tunelu naddźwiękowego. Projekty wspomnianego tunelu europejskiego przewidują także zastosowanie obniżenia temperatury. Wymiary tunelu $2,4 \times 2,0$ m z ciśnieniem roboczym do 4,5 atm. Oczekuje się możliwości osiągnięcia liczb Reynoldsa rzędu $50 \cdot 10^6$ dla poddźwiękowo/okołodźwiękowych prędkości. W razie podjęcia budowy przewiduje się jej zakończenie w 1990 r. [11].

Tunel aerodynamiczny może być w wielu aspektach uważany za pewnego rodzaju analogowy komputer, który umożliwi efektywne rozwiązanie kompletnych, trójwymiarowych równań Naviera-Stokesa dla ściśliwego turbulenta przepływu. Istnieje jednakże szereg ograniczeń dla każdego tunelu.

Maksymalne wymiary modelu, jaki może być umieszczony w tunelu i graniczne wartości parametrów przepływu, jak ciśnienie, temperatura i prędkość ograniczają liczbę Reynoldsa możliwą do uzyskania. Interferencja ścian i zamocowania modelu ogranicza dokładność symulacji w tunelu warunków swobodnego przepływu czy lotu, szczególnie w tunelach transonicznych.

Aeroelastyczna deformacja modelu zwiększona w stosunku do rzeczywistości na skutek dużych wartości ciśnienia dynamicznego, panującego w tunelu stanowi istotne ograniczenie poprawności modelowania geometrycznego, szczególnie w tunelach o podwyższonych wartościach liczby Reynoldsa. Niejednorodność strumienia w tunelu, a przede wszystkim poziom jego turbulencji ogranicza poprawność symulacji przejścia warstwy przyściennej, występującego w przepływie swobodnym.

Jednym z głównych kierunków przewyższania tych ograniczeń, obok wspomnianej już budowy tuneli o naturalnych liczbach Re , jest wprowadzenie maszyn cyfrowych w eksperymentalne badania aerodynamiczne. Następuje i będzie w najbliższym czasie coraz bardziej się rozszerzała wzajemna integracja tuneli aerodynamicznych i elektronicznych maszyn cyfrowych [4-9]. Kolejne stadia tej integracji to:

- wykorzystanie EMC przy rejestracji i przetwarzaniu danych pomiarowych, obecnie możliwa jest prezentacja wyników pomiarowych w formie odpowiednich współczynników bezwymiarowych w postaci cyfrowej lub graficznej w ciągu kilku zaledwie sekund po badaniach, a także w czasie rzeczywistym w trakcie badań,
- wykorzystanie EMC w programowanym sterowaniu tunelem oraz położeniem i geometrią modelu polegającą na tym, że pewne mierzone w tunelu wielkości aerodynamiczne są używane poprzez maszynę cyfrową w pętli sprzężenia zwrotnego, jako dane w sterowaniu; szereg przykładów przedstawiono w [5, 8, 9].
- wykorzystanie EMC w przeprowadzaniu porównań uzyskiwanych wyników pomiarowych z wynikami obliczeń różnymi metodami w czasie rzeczywistym, co umożliwi

badaczom uzyskanie lepszej znajomości fizycznych procesów opływów badanych modeli i zjawisk,

- wykorzystanie EMC do poprawienia symulacji warunków swobodnego przepływu przez zastosowanie w tunelu koncepcji samoregulujących się ścian, w której pewne mierzone w pobliżu ściany tunelu parametry przepływu wykorzystywane są w pętli sprzężenia zwrotnego układu EMC — kształt geometryczny ściany bądź warunki wymiany masy na ścianie wentylowanej w celu iteracyjnego osiągnięcia bezinterferencyjnego przepływu w tunelu, tj. odpowiadającego przepływowi nieograniczonemu [13, 17, 18]; wprowadzenie w oparciu o odpowiednie programy obliczeniowe poprawek na interferencje zamocowania modelu.

Najważniejszymi zagadnieniami, wymagającymi obecnie poprawy w eksperymentalnych badaniach aerodynamicznych, szczególnie w zakresie dużych prędkości są: jakość czy inaczej mówiąc poprawność uzyskiwanych wyników pomiarowych, efektywność ekonomiczna programów badawczych, możliwość pełnej symulacji naturalnego, swobodnego przepływu.

Przed pierwszą połową lat 70-tych poprawę jakości wyników pomiarowych uzyskiwano głównie dzięki polepszeniu dokładności stosowanych przyrządów, pomiarowych, jak: czujniki ciśnienia, wagi aerodynamiczne statyczne i dynamiczne itp. Obecnie oczekuje się, że dalszą poprawę będzie można uzyskać jako rezultat podwyższenia jakości strumienia w tunelu, głównie poprzez udoskonalenie konstrukcji dyszy i komory pomiarowej tunelu, ich kalibracji, coraz doskonalszej weryfikacji przy użyciu specjalnych modeli wzorcowych oraz zastosowania nowoczesnych technik pomiaru pola, przepływu, omawianych szczegółowo w pracy [15].

Poświęcenie uwagi efektywności ekonomicznej eksperymentalnych programów badawczych wiąże się z szybkim, bo dwu-trzykrotnym wzrostem kosztów energii elektrycznej w ostatniej dekadzie. Należy tu podkreślić, że koszty energii elektrycznej stanowią znaczną część kosztów badań w tunelu, sięgającą 50% w niektórych badaniach [16].

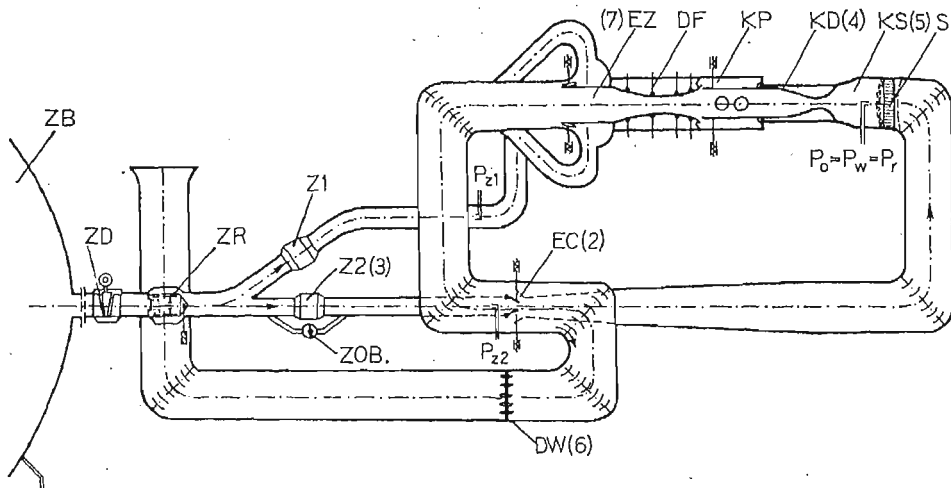
Rekompensaty wpływu wzrostu kosztu energii elektrycznej na koszt badań tunelowych poszukuje się na drodze wzrostu ilości uzyskiwanych danych pomiarowych w jednostce czasu pracy tunelu. Wzrost ilości danych pomiarowych można uzyskać poprzez udoskonalenia wszelkich urządzeń tunelowych, ale przede wszystkim poprzez wspomnianą już integrację maszyn cyfrowych z tunelem.

2. Stan krajowej bazy badawczej

Eksperymentalne badania aerodynamiczne w Polsce prowadzone są w szerokim zakresie prędkości od małych prędkości poddźwiękowych $M = 0,3$ do prędkości hiperdźwiękowych. Motywacje do podejmowania tych badań pochodzą przede wszystkim z zastosowań praktycznych w konstruowanym i produkowanym sprzęcie latającym, a także ze stawianych celów poznawczych dynamiki gazów. -

W zakresie dużych prędkości krajowa baza badawcza obejmuje 4-ry tunele aerodynamiczne oraz rury uderzeniowe. Tunele znajdują się w Instytucie Lotnictwa, Politechnice Warszawskiej i Wojskowej Akademii Technicznej. W Instytucie Podstawowych Problemów Techniki mieszczą się rury uderzeniowe.

Największym i najbardziej nowoczesnym obiektem jest tunel N-3 w Instytucie Lotnictwa o wymiarach przestrzeni pomiarowej $06 \times 0,6$ m, którego schemat przedstawiono na rys. 1. Jest to tunel trisoniczny o zakresie liczb Macha $M = 0,2 - 2,3$, nieciągłego działania, z częściową recyrkulacją powietrza dzięki zastosowaniu eżektora ciśnieniowego. Tunel zasilany jest z dwu kulistych zbiorników sprężonego powietrza o objętości 2880 m^3 i maksymalnym ciśnieniu 9 atm. Powietrze to sprężane jest dwoma sprężarkami odśrodkowymi o mocy 2000 KW, odpowiednio oczyszczone i osuszone. Średni czas pracy tunelu dla naddźwiękowych liczb Macha wynosi około 3 minut, zwiększając się dla mniejszych poddźwiękowych liczb Macha $M = 0,4 - 0,5$ do kilkunastu minut.



Rys. 1. Schemat tunelu dużych prędkości N-3 Instytutu Lotnictwa

W zakresie prędkości pod i okołodźwiękowych w tunelu N-3 możliwe są do uzyskania liczby Macha od 0,2 do 1,15 poprzez zmianę ciśnienia spiętrzenia w komorze stabilizacyjnej. Ciśnienie to zmieniane jest poprzez zmianę szczeliny eżektora (2) przy jednoczesnym utrzymywaniu stałego ciśnienia w komorze eżektora za pomocą zaworu regulującego (3). Zmiana liczby Macha w zakresie naddźwiękowym realizowana jest przez wymianę odpowiednio ukształtowanych wkładek zmieniających kształt dyszy w komorze (4) tunelu.

Dla uzyskania odpowiedniej jednorodności i zmniejszenia turbulencji strumienia w komorze pomiarowej zastosowano dość dużą kontrakcję określoną stosunkiem powierzchni przekrojów komory stabilizacyjnej (5) i komory pomiarowej wynoszącą 8,03. W tym celu także umieszczono w komorze stabilizacyjnej ulownicę i siatki deturbulizacyjne.

Znajdujący się za komorą pomiarową dyfuzor posiada, dzięki czterem węzłom o regulowanych silnikami elektrycznymi położeniach, możliwość zmiany kształtu z rozbieżnego, stosowanego w zakresie pod i okołodźwiękowego do zbieżno-rozbieżnego dla naddźwiękowego zakresu.

W zakresie pod i okołodźwiękowym komora pomiarowa wyposażona jest w górną i dolną ścianę perforowaną. Stopień perforacji określany jako stosunek powierzchni otworów do całkowitej powierzchni danej ściany wynosi 19%. Otwory są kołowe, prostokątne

padle o średnicy 10 mm, uzupełnione w początkowej części komory slotami wzdłużnymi. Poprzez perforację następuje odsysanie powietrza przepływającego przez komorę pomiarową do komory pojemnikowej, skąd zasysane jest z powrotem w obieg główny tunelu do dyfuzora. Pozwala to uniknąć zjawiska „blokowania” przepływu w tunelu dla nadkrytycznych liczb Macha. Perforacja powoduje także zmniejszenie interferencji ścian tunelu na opływ badanego modelu, szczególnie w zakresie okołodźwiękowym. Ściany górna i dolna są wymienne i dla badań w zakresie naddźwiękowym zastępowane są ścianami pełnymi, bez otworów. Należy dodać, że ściany te mają regulowane pochylenie, dla kompensacji wzrostu warstwy przyściennej.

W tunelu istnieje możliwość zmiany w ograniczonym zakresie liczby Reynoldsa, niezależnie od liczby Macha. Zmianę tę uzyskuje się na drodze zmiany ciśnienia spiętrzenia przepływu w tunelu za pomocą dławika wydmuchu (6) i eżektora zasysającego (7). Zakres możliwych do zyskania liczb Reynoldsa w tunelu N-3 przedstawiono w pracy [71].

Dwa naddźwiękowe tunele: N-2 w Instytucie Lotnictwa i na Politechnice Warszawskiej zbliżone są do siebie zarówno wymiarami jak i zasadą działania. Tunel N-2 ma powierzchnię przekroju poprzecznego $0,15 \times 0,15$ m, a tunel P. W. nieco większą $0,2 \times 0,2$ m. Oba tunele są typu wydmuchowego o działaniu nieciągłym, zasilane ze zbiorników sprężonego powietrza. W przypadku tunelu N-2 zbiorniki te mają pojemność 2880 m^3 i ciśnienie 9 atm, co daje bardzo długi — rzędu godziny czas dmuchu. Czas ten dla tunelu P. W. podyktowany niewielką objętością zbiornika wynosi tylko minuty. Zmiany liczb Macha w obu tunelach uzyskuje się poprzez wymianę wkładek dyszy naddźwiękowej. Dla tunelu N-2 uzyskano wymierny i jednorodny przepływ w komorze pomiarowej dla liczb Macha $M = 1,6; 1,75; 1,9; 2; 2,1; 2,35; 2,5; 3; 3,55$.

Bardzo interesujące i rzadko stosowane rozwiązanie konstrukcji komory pomiarowej charakteryzuje naddźwiękowy tunel uruchomiony w Wojskowej Akademii Technicznej w 1975 r. [55]. Komora pomiarowa tego tunelu jest typu zamkniętego ze swobodnym strumieniem powietrza. Ma ona wymiary poprzeczne znacznie większe od wymiarów dyszy w przekroju wylotowym, które wynoszą $0,3 \times 0,3$ m. Komora taka, jak wskazuje się w pracy [55] ma szereg zalet. Tunel jest typu wydmuchowego. W tunelu przeprowadzono specjalną kalibrację badając strukturę strumienia bez i z modelem w zależności od parametrów spiętrzenia przed dyszą. Badania szeregu modeli w kształcie stożków, podwójnych stożków, kombinacji części cylindrycznych i stożkowych pozwoliły ustalić maksymalne wymiary modeli jakie mogą być badane w tunelu. Zbadano także wpływ kształtu i wymiarów modeli na charakter naddźwiękowego strumienia w strefie pomiarowej. Badania przeprowadzono dla liczb Macha $M = 2,05; 2,5; 3; 3,5$.

3. Prace nad techniką badawczą w tunelach dużych prędkości

Eksperymentalne badania aerodynamiczne w zakresie dużych prędkości wymagają stosowania szeregu specjalnych technik pomiarowych. Wysokie wymagania, co do dokładności uzyskiwanych wyników oraz jak najlepszej symulacji warunków swobodnego przepływu wokół badanych modeli stwarzając konieczność stałego doskonalenia stosowanych technik pomiarowych, jak również stosowanych urządzeń i aparatury pomiarowej.

Jednakże nie choćby najbardziej skomplikowane technicznie problemy, stanowią kluczowe zagadnienia w technice badawczej w zakresie dużych prędkości. Jest nim interpretacja uzyskiwanych wyników uwzględniająca poprawność symulacji i modelowania badanych zjawisk i opływów, oddziaływanie ścian tunelu i zamocowań modelu.

Niezbędnym uzupełnieniem staje się wizualizacja badanych problemów. Właśnie te zagadnienia przedstawimy nieco bliżej.

3.1. Zagadnienia interferencji ścian i badania modeli wzorcowych. Zagadnienia interpretacji uzyskiwanych wyników w tunelach dużych prędkości związane są w głównej mierze z zagadnieniami niemodelowania liczby Reynoldsa, jakością strumienia w tunelu, stosowanymi urządzeniami i techniką pomiarową oraz z oddziaływaniem ścian tunelu na badany opływ. Wyniki pomiarów ciśnień i sił na modelu umieszczonym w tunelu różnią się od wartości tych wielkości występujących na tym modelu dla takich samych warunków przepływu, tj. kąta natarcia i liczby Macha, w swobodnym przepływie. Na różnice te spowodowane oddziaływaniem ścian składają się w głównej mierze:

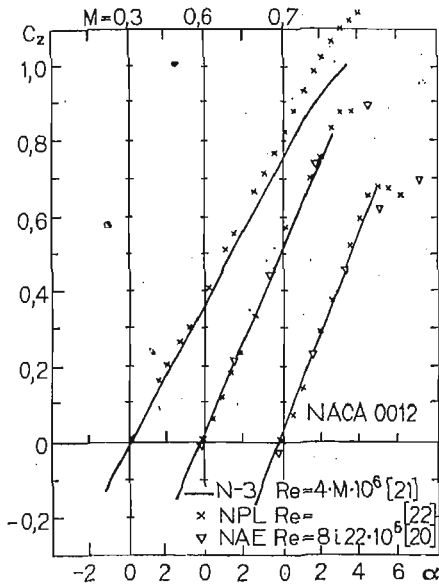
- przyspieszenie przepływu rekompensujące zmniejszenie powierzchni przekroju poprzecznego tunelu w obszarze umieszczenia modelu związane z zachowaniem ciągłości przepływu
- zmiany pola przepływu, kształtu i krzywizny linii prądu, wynikające z konieczności spełnienia, na położonej stosunkowo blisko modelu ścianie tunelu, warunku równoległości do niej przepływu.

W zakresie poddźwiękowym, dzięki opracowaniu odpowiednich metod teoretycznych, możliwe jest, uwzględnienie interferencji ścian poprzez wprowadzenie odpowiednich poprawek [23], wymaga to eksperymentalnej weryfikacji wprowadzonych poprawek. Szczególnie ta weryfikacja jest istotna w zakresie dużych prędkości poddźwiękowych, gdzie w tunelach stosowane są ściany z perforacją lub slotami, z czym wiąże się znaczne skomplikowanie i niejednorodność warunków brzegowych.

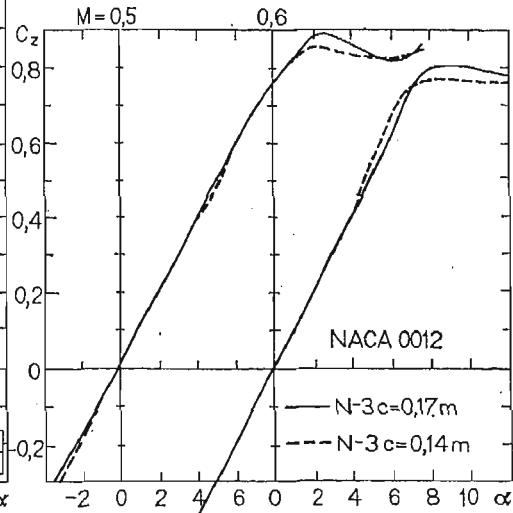
Eksperymentalna weryfikacja wymagana jest także w stosunku do jakości strumienia i poprawności stosowanych urządzeń i techniki pomiarowej, a także dla sprawdzenia poprawności doboru wielkości modelu w stosunku do rozmiarów komory pomiarowej. W badaniach takich stosowane są tak zwane modele wzorcowe. Są to modele o określonej geometrii schematycznej konfiguracji samolotu, ciała osiowosymetrycznego skrzydła lub też płyta o nieskończonym wydłużeniu. Charakterystyki aerodynamiczne tych modeli są znane z badań w szeregu tunelach, szczególnie w przestrzeniach pomiarowych znacznie większych od wymiarów tych modeli. Przykładowo można tu wymienić badania jednego z trójwymiarowych modeli wzorcowych ONERA M w tunelu PTW 16T, gdzie stosunek powierzchni przekrojów poprzecznych modelu i tunelu wynosił 0,01% [24]. Dla badań dwuwymiarowych modele wzorcowe stanowią płyty o nieskończonym wydłużeniu zazwyczaj o profilu NACA 0012 [19, 20]. Na rys. 2 przedstawiono wybrane dla liczb Macha $M = 0,3; 0,6$ i $0,7$ wyniki badań uwzględniające poprawki interferencyjne, profilu NACA 0012 w tunelu N-3, które przeprowadzono w szerokim zakresie $M = 0,3 - 0,9$ [21]. Zależności $c_x(\alpha)$ porównano z wynikami badań w tunelu NPL [22] oraz dodatkowo dla $M \geq 0,6$ z tunelu NAE [20]. Podobnie jak dla $M = 0,6$ bardzo dobrą zgodność uzyskano i dla pozostałych liczb Macha, z wyjątkiem małych prędkości $M = 0,3$, dla której zaznacza się wyraźnie różnica w pochodnej. Wynika to z mniejszej dokładności dokonanego osza-

cowania parametru przenikliwości ścian perforowanych, charakteryzującego warunki brzegowe przepływu w tunelu N-3.

Wcześniej już wspomniano o istotności doboru wielkości modelu do danej przestrzeni pomiarowej. Sprawdzenie prawidłowości tego doboru dokonać można w badaniach modeli geometrycznie podobnych, różniących się wielkością. W tym celu w tunelu N-3 przeprowadzono dodatkowe badania profilu NACA 0012 na modelu o zmniejszonej cięciwie



Rys. 2. Porównanie zależności współczynnika siły nośnej od kąta natarcia profilu NACA 0012 uzyskanej w tunelu N-3 oraz tunelach NPL [22] i NAE [20]

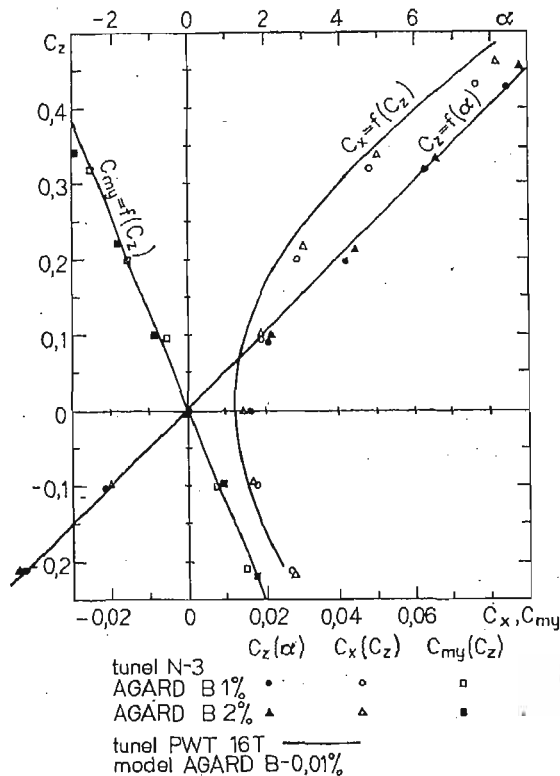


Rys. 3. Wpływ wielkości modelu profilu NACA 0012 na zależność współczynnika siły nośnej od kąta natarcia — tunel N-3

równej 140 mm. Cięciwa taká daje wartość stosunku c/h zbliżoną do dolnej granicy tego stosunku spotykanego w literaturze. Na rys. 3. przedstawiono porównanie zależności współczynnika siły nośnej od kąta natarcia dla modelu profilu NACA 0012 o cięciwach 170 i 140 mm. W zakresie przepływu bez oderwania zgodność rozpatrywanej zależności jest zadawalająca, natomiast na wartość $C_{z,max}$ uwidacznia się wpływ liczby Reynoldsa.

W badaniach trójwymiarowych obecnie w zakresie pod i okołodźwiękowym stosowane są szeroko w międzynarodowej praktyce badawczej przede wszystkim model wzorcowy ONERA M [24], a także i starsze (z początku lat 50-tych) modele wzorcowe AGARD B i C [19], dla których jednakże z racji geometrii właściwym obszarem stosowalności są prędkości naddźwiękowe. Stanowią one bowiem układ skrzydło-kadłub, w którym kadłub to cylinder z owalną częścią przednią, skrzydło natomiast jest typu delta z kątem skosu 60° i dwułukowym profilem o 4% grubości. Jednakże wobec braku innych możliwości w badaniach w tunelu N-3 zastosowano dwa geometrycznie podobne modele AGARD B różniące się wielkością [25], a mianowicie stosunek powierzchni przekrojów poprzecz-

nych modelu i komory pomiarowej wynosił 1% i 2%. Porównanie uzyskanych charakterystyk tych dwóch modeli oraz porównanie ich z danymi literaturowymi pozwoliło na określenie dopuszczalnych wielkości modeli badanych w tunelu, potrzeby stosowania korekcji na interferencję ścian, a także ocenić ogólną poprawność uzyskiwanych wyników w tunelu N-3. Przykładowo na rys. 4 przedstawiono takie porównanie dla liczby Macha $M = 0,8$. Uzyskana zadawalająca zgodność zależności $c_z = f(\alpha)$ pozwala wnosić o pop-

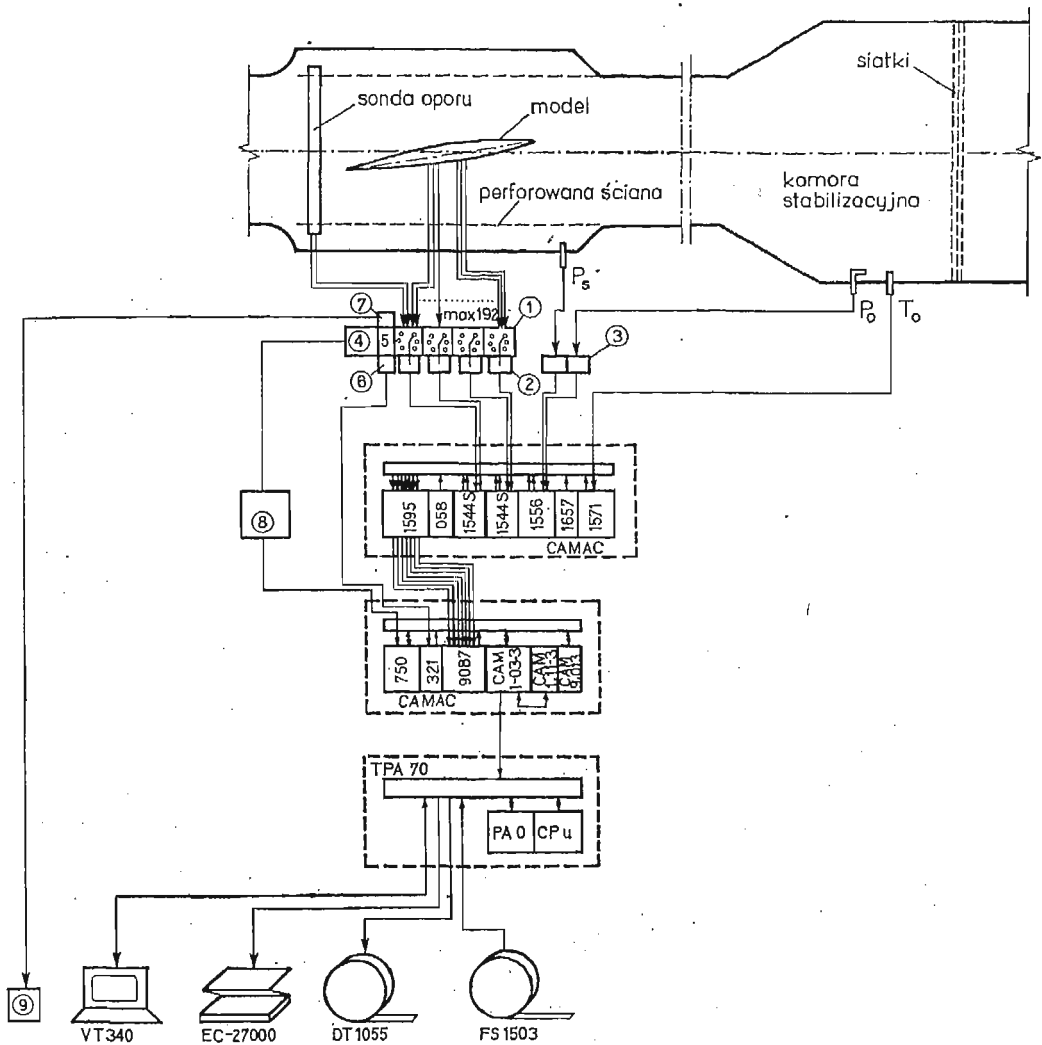


Rys. 4. Porównanie charakterystyk aerodynamicznych modelu wzorcowego AGARD B 1% i 2% uzyskane w tunelu N-3 i PWT 16T -0,01% [24]

rawności badań w tunelu N-3 w zakresie okołodźwiękowym modeli o wielkości blokażu do 2%, w których mogą być pomijane poprawki interferencyjne. Większe wartości współczynnika oporu uzyskane w tunelu N-3 wynikają przede wszystkim z różnicy w liczbach Reynoldsa, ale także mogą być spowodowane gradientem ciśnienia występującym w tunelu N-3, co wskazuje na konieczność stosowania odpowiedniej poprawki [25].

3.2. Automatyzacja pomiarów. Pierwszym krokiem we wprowadzeniu maszyn cyfrowych w eksperymentalne badania aerodynamiczne jest wykorzystanie ich w przetwarzaniu danych pomiarowych, a także w przeprowadzaniu samych pomiarów. Ta faza wspomnianej wcześniej integracji EMC i tunelu realizowana jest w krajowej bazie badawczej.

W tunelu N-3 realizowany jest układ automatyzacji pomiarów i przetwarzania wyników SPITA N-3 oparty o minikomputer TPA-70 produkcji węgierskiej o pamięci operacyjnej



Rys. 5. Schemat ciśnieniowego układu pomiarowo-rejestrującego tunelu N3

32 K. Ponieważ w badaniach rozkładów ciśnienia spotykamy się z największą ilością danych (przykładowo dla badań w zakresie pod i okołodźwiękowym jednego profilu bądź skrzydła jest to rząd około 0,5 mln danych), to w pierwszym rzędzie podjęto dla tych badań wprowadzenie automatyzacji pomiarów. Obecnie zrealizowano i wdrożono uproszczony ciśnieniowy układ pomiarowo-rejestrujący, przedstawiony schematycznie na rys. 5. Do pomiaru ciśnienia w 192 punktach użyto przełącznika typu SCANIVALVE 48 S9GM z napędem solenoidowym, złożonego z 4-ech sekcji wyposażonych w czujniki tensometryczne ciśnienia typu DRUCK PDCR 22. Parametry przepływu niezaburzonego w komorze pomiarowej — ciśnienie spiętrzenia i statyczne — mierzone są czujnikami transformatorowymi typu CCT-MFP (wykonanymi w Instytucie Lotnictwa) dla każdego położenia przełącznika. Minikomputer dzięki specjalnemu oprogramowaniu [27] steruje po-

miarami oraz gromadzi w pamięci operacyjnej dane pomiarowe w trakcie dmuchu. Dane te, po dmuchu rejestrowane na taśmie papierowej, przetwarzane były według specjalnego programu obliczeniowo-graficznego [28] na maszynie cyfrowej NOVA 840 wyposażonej w plotter BENSON. Program umożliwił obliczenie i wydruk współczynników aerodynamicznych oraz wykonanie wykresów mierzonych rozkładów ciśnienia i zależności c_z , c_x , c_m od kąta natarcia. Opisany układ pomiarowo-rejestrujący oraz system przetwarzający obliczeniowo-wykreslny skróciły wielokrotnie czas trwania i pracochłonność badań ciśnieniowych. Pozwoliły badaczom na skupienie swoich wysiłków na analizie rezultatów, przyczyniając się do lepszego poznania badanych zjawisk.

W obecnie realizowanej wersji wspomniany układ SPITA N-3 [26] zbudowany będzie z podsystemów pomiarowego i informacyjnego, sprzężenie których nastąpi poprzez urządzenia standardu CAMAC oraz z podsystemu stymulacyjnego. Podsystem pomiarowy przeprowadzać będzie trzy podstawowe rodzaje badań: wagowe, rozkładów ciśnień statycznych i dynamicznych. Będzie wyposażony w szereg przetworników takich jak wagi aerodynamiczne, przełącznik ciśnienia SCANIVALVE i różnego rodzaju czujniki ciśnienia. Centralną część podsystemu informacyjnego stanowić będzie minikomputer TPA-70/25 wyposażony w blok sprzężenia z magistralą CAMAC. Zasadniczymi zadaniami tego podsystemu będą: rejestracja i gromadzenie danych, sterowanie pomiarem i dmuchem oraz kontrola poprawności pracy urządzeń pomiarowych, wykonywanie obliczeń w czasie rzeczywistym oraz po zakończeniu pomiarów.

W czasie rzeczywistym obliczenia dotyczyć będą parametrów sterowania nastawami kąta natarcia modelu, parametrów strumienia, liczby Macha, wybranych mierzonych wielkości w jednostkach technicznych, kontroli przekroczeń wartości granicznych. Niektóre parametry istotne dla prowadzenia eksperymentu wyświetlane będą na monitorze operatora. Podsystem stymulujący, będący źródłem nastawień zaprogramowanych wielkości, ustala warunki pracy tunelu i badanego modelu.

W naddźwiękowym tunelu WAT-u uruchomiono ciśnieniowy, wielokanałowy system pomiarowy, rejestrujący [56]. W skład tego systemu wchodzi elektroniczny układ pomiarowy „Izolda”, tensometryczne przetworniki ciśnienia z indywidualnymi zasilaczami i wzmacniaczami, interface IC W-23, voltomierze cyfrowe V-628 oraz urządzenia perforacyjne: drukarki, perforator i czytnik taśmy papierowej. Dane zapisane na taśmie papierowej przetwarzane są wg specjalnego programu na EMC ODRA 1305.

3.3. Wizualizacja przepływu. Ważnym uzupełnieniem znanych szeroko w eksperymentalnych badaniach aerodynamicznych w zakresie dużych prędkości metod wizualizacji, wykorzystujących specjalną aparaturę optyczną jest wizualizacja przepływu na opływanej powierzchni badanego modelu. Wizualizacja ta polega na pokryciu powierzchni modelu odpowiednio przygotowaną ciekłą mieszaniną, która w czasie pracy tunelu tworzy obraz linii prądu na tej opływanej powierzchni. Dla uzyskania właściwego obrazu konieczne jest dobranie odpowiedniej lepkości mieszaniny (w ramach specjalnych badań) i sposobu jej nanoszenia, a także czasu pracy tunelu [35].

Badania wizualizacji przepływu na powierzchni modelu pozwalają na lepsze rozpoznanie szeregu zjawisk występujących w zakresie prędkości dużych. W zakresie prędkości podkrytycznych ważnym będzie zbadanie warunków przepływu inicjacji oderwania, określenia miejsca inicjacji oderwania na opływanej powierzchni oraz rozwoju oderwania

przepływu w miarę zwiększania kąta natarcia czy prędkości przepływu. Jeszcze bardziej interesującym będą te badania wizualizacyjne w zakresie prędkości nadkrytycznych. Pozwalają one zwizualizować falę uderzeniową, a właściwie linię odpowiadającą podstawie tej fali rozmieszczonej na opływanej powierzchni, począwszy od stosunkowo niewielkiej jej intensywności. Umożliwia to stosunkowo precyzyjne określenie warunków przepływu (liczby Macha M i kąta natarcia opływającego modelu) pojawiania się fali uderzeniowej zarówno dla kątów natarcia bliskich zeru, jak i dla dużych kątów natarcia bliskich krytycznemu. Możliwe są także badania rozwoju fali uderzeniowej — wzrostu jej intensywności i rozpiętości oraz jej przemieszczanie się w miarę wzrostu liczby Macha czy kąta natarcia oraz w końcu badania oderwania przepływu wywołanego falą o odpowiednio dużej intensywności.

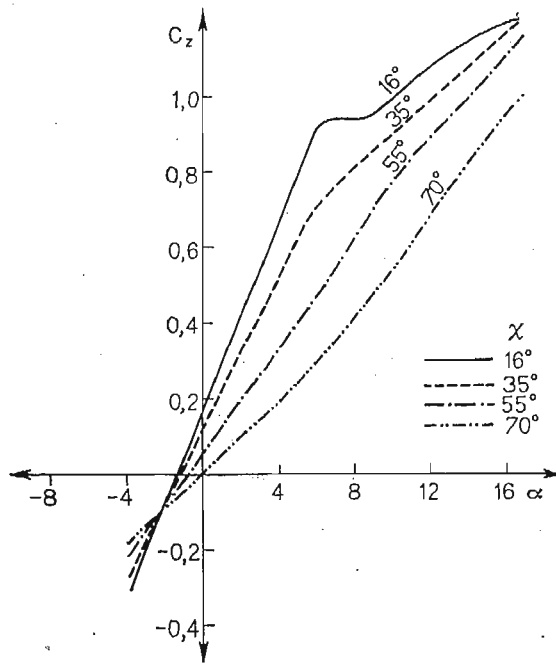
Mówiąc o nowych metodach wizualizacji przepływu warto wspomnieć o kolorowej wizualizacji metodą schlierenowską. Technikę tę wprowadzono w tunelu naddźwiękowym WAT-u.

3.4. Nowe komory transoniczne. W ostatnim czasie w dwu tunelach naddźwiękowych N-2 w Instytucie Lotnictwa i na Politechnice Warszawskiej zbudowano komory transoniczne, rozszerzające zakresy pomiarowe tych tuneli. W obu tunelach wentylowane są tylko górna i dolna ścianka, pod którymi znajdują się komory pojemnikowe, z których powietrze odsysane z głównego przepływu przedostaje się do dyfuzora. Konstrukcje te różnią się natomiast geometrią ścianek wentylowanych. W tunelu PW zastosowane wzdłużne sloty o małym stopniu perforacji 8%. W tunelu N-2 ściany są perforowane o pochylonych pod kątem 50° otworkach o średnicy 3,3 mm. Wprowadzono tu ciekawe rozwiązanie konstrukcyjne pozwalające zmieniać stopień perforacji od 0 do 24%. Prowadzone są wstępne dmuchy obejmujące regulację i kalibrację aerodynamiczną tunelu.

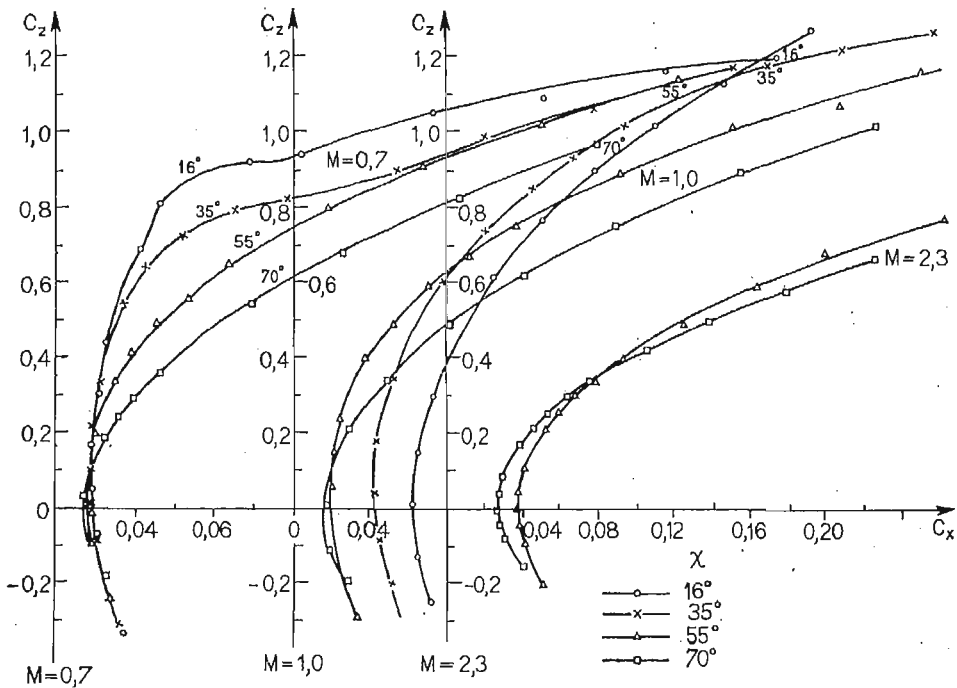
4. Modelowe badania rozwojowe techniki lotniczej

4.1. Badania modelowe samolotów i ich segmentów

4.1.1. Badania wpływu skosu skrzydła na charakterystyki aerodynamiczne samolotu. Jedną z metod optymalizacji własności aerodynamicznych samolotu w szerokim zakresie prędkości lotu od małych prędkości startu do naddźwiękowych jest zmiana skosu skrzydła. Zagadnienie to badano w tunelu N-3 w zakresie liczb Macha od 0,6 do 2,3 na modelu schematyzowanego samolotu o cylindrycznym kadłubie z uderzeniem poziomym i pionowym [33, 34] Na rys. 6 przykładowo pokazano jak w miarę wzrostu kąta skosu skrzydła zmniejsza się współczynnik siły nośnej dla ustalonego kąta natarcia. Dla mniejszych kątów skosu $\chi \leq 35^\circ$ maleje współczynnik $c_{z_{max}}$, natomiast przy wyższych kątach zmiana ulega charakter oderwania. Dla $\chi = 70^\circ$ wyraźnie większy niż liniowy przyrost c_z dla $\alpha > 4$ wskazuje na wystąpienie na krawędzi natarcia stacjonarnego wiru związanego, który w zakresie do $\alpha = 16^\circ$ zachowuje swoją strukturę. Dla poddźwiękowych prędkości można przyjąć, że opór minimalny nie zależy od kąta skosu — rys. 7. Natomiast już dla $c_z > 0,1$ wzrost skosu powoduje znaczny przyrost oporu. Wzrost kąta skosu opóźnia oczywiście wystąpienie kryzysu falowego — rys. 8, przy czym wzrost oporu jest tym większy i gwałtowniejszy im ten kąt jest mniejszy. Dla prędkości $M = 1$ w przypadku nie wystąpienia kryzysu falowego (dla $\chi = 55^\circ$ i 70°), podobnie jak w zakresie poddźwiękowym, zwiększenie kąta

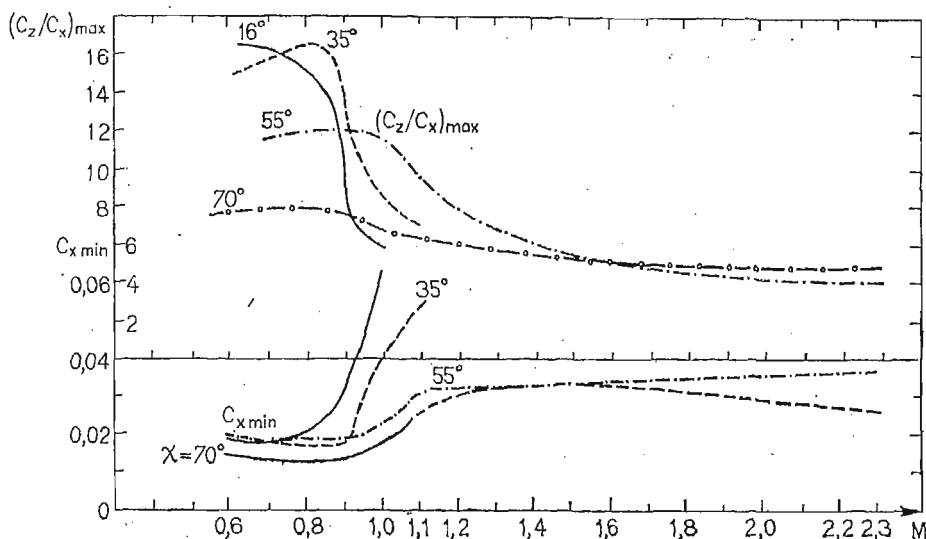


Rys. 6. Zależność współczynnika siły nośnej od kąta natarcia modelu s-tu o zmiennym skosie skrzydła dla $M = 0,7$



Rys. 7. Biegunowe modelu s-tu o zmiennym skosie skrzydła dla $M = 0,7; 1,0; 2,3$

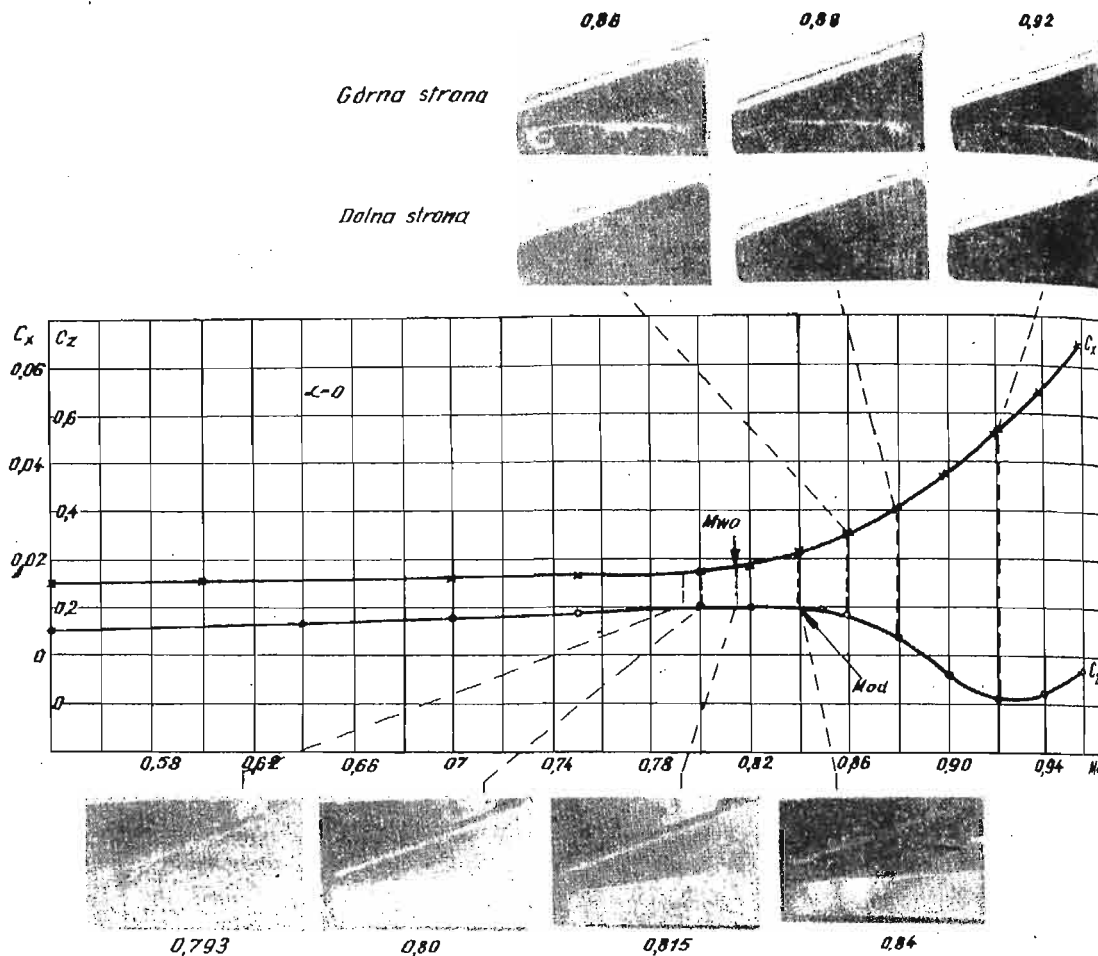
skosu powoduje wzrost oporu. Dopiero dla dużej naddźwiękowej prędkości $M = 2,3$, skrzydło o skosie $\chi = 70^\circ$ wykazuje swoją wyższość — opór jego jest mniejszy niż skrzydła o $\chi = 55^\circ$. Efekty aerodynamiczne wypływające z zastosowania skrzydła o określonym skosie w poszczególnych zakresach prędkości pokazano ogólnie na rys. 8, przedstawiając zależność stosunku $(c_z/c_x)_{\max}$, określającego doskonałość aerodynamiczną od liczby Macha.



Rys. 8. Wpływ liczby Macha na minimalny opór i maksymalną doskonałość modelu s-tu o zmiennym skosie skrzydła

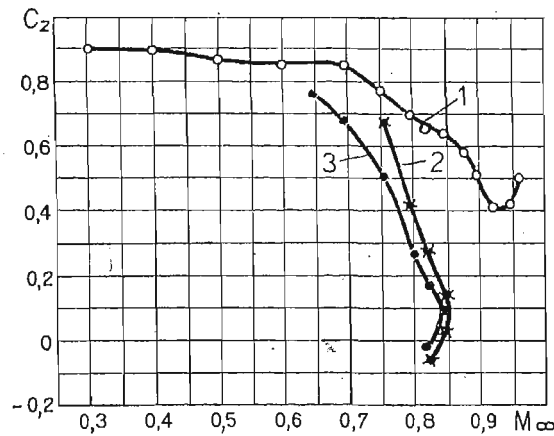
4.1.2. **Badania pod- i przydźwiękowego opływu skrzydła o małym skosie.** Skrzydła o niedużym skosie ze względów konstrukcyjnych oraz z racji posiadania pewnych zalet aerodynamicznych cieszą się zainteresowaniem konstruktorów samolotów o dużych poddźwiękowych prędkościach lotu. W tym zakresie prędkości mogą na skrzydle występować jednocześnie obszary poddźwiękowego i naddźwiękowego przepływu zakończone falą uderzeniową, co znacznie komplikuje zjawiska zachodzące w opływie skrzydła. Rozwój opływu na skrzydle trapezowym o skosie 19° — badanym w tunelu N-3 [35] — przedstawiono na rys. 9 korelując go z zależnościami współczynników (c_x i $c_z = f(M)$). Wystąpienie na skrzydle fali uderzeniowej o bardzo małej intensywności nie powoduje jakościowych zmian w powyższych zależnościach ($M = 0,793$). Dopiero odpowiedni wzrost intensywności tej fali ($M = 0,815$) prowadzi do wystąpienia gwałtownego wzrostu oporu. Dalszy wzrost prędkości zwiększa intensywność fali i w wyniku wzajemnego oddziaływania jej z warstwą przyścienną następuje oderwanie przepływu tuż za falą ($M = 0,84$), które powoduje spadek wartości współczynnika siły nośnej. Określając wartości liczby Macha, przy których zachodzą powyższe zjawiska dla szeregu wartości współczynnika c_z , wyznaczona jest granica wzrostu oporu $M_{wo} = f(c_z)$ i granica oderwania $M_{oa} = f(c_z)$, które dla rozpatrywanego skrzydła przedstawiono na rys. 10.

Wystąpienie obszaru oderwania o znacznej rozległości może prowadzić do buffetingu skrzydła, zjawiska stanowiącego dynamiczną odpowiedź samolotu na przypadkowe



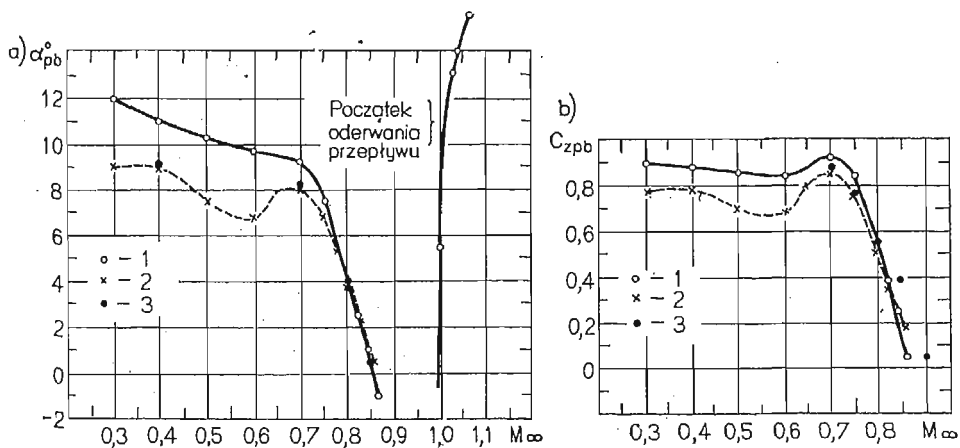
Rys. 9. Rozwój opływu na skrzydle o niedużym skosie przy wzroście liczby Macha dla kąta natarcia $0,4^\circ$

wzbudzenia wywołane pulsacją sił aerodynamicznych. Buffeting skrzydła powodować może nieprzyjemne dla załogi czy pasażerów, a nawet niebezpieczne dla konstrukcji samolotu wibracje, a także zakłócenia w prawidłowym działaniu czułego wyposażenia i wykonywaniu zadań, przyczyniając się do ograniczenia osiągnięć samolotu. W badaniach tunelowych istotne jest więc określenie początku występowania buffetingu. Granicę początku buffetingu $C_{zpb} = f(M)$ rozpatrywanego skrzydła, określoną na drodze pomiaru wartości skutecznej niestacjonarnych naprężeń zginających nasadę sztywnego modelu skrzydła, przedstawiono na rys. 11 [36]. Analiza korelacji rozwoju oderwania przepływu z początkiem występowania buffetingu pozwoliła stwierdzić, że dla małych liczb Macha $M < 0,7$ wystąpienie tych zjawisk przesunięte jest względem siebie o około 2° . Natomiast dla wyższych liczb Macha $M > 0,8$ zjawiska te zachodzą w zasadzie jednocześnie dla tego samego kąta natarcia. Spowodowane jest to tym, że dla tych prędkości oderwanie przepływu wywołane jest przez silną falę uderzeniową — następuje gwałtownie i obejmuje znaczny obszar skrzydła, co powoduje jednoczesne wystąpienie buffetingu.

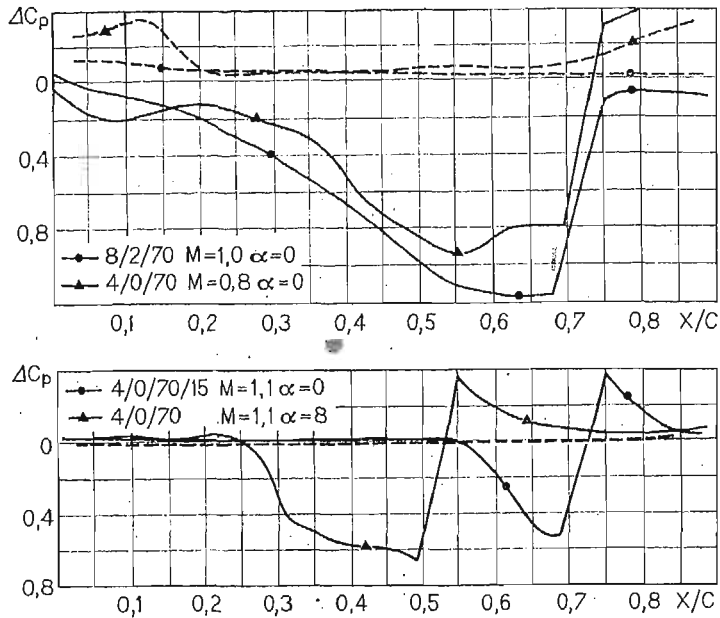


Rys. 10. Granica wzrostu oporu i oderwania dla skrzydła o niedużym skosie
 1. $C_{z\max}$; 2. granica początku oderwania; 3. granica wzrostu oporu

Przeprowadzając analizę poddźwiękowego opływu skrzydła o niedużym skosie z punktu widzenia oderwania przepływu można wydzielić cztery przedziały prędkości, dla których przebieg oderwania i zależność $C_z = f(\alpha)$ ma w przybliżeniu taki sam charakter. W zakresie liczb Macha do około 0,6 występuje oderwanie typu „nieściśliwego” zachodzące na dużych kątach natarcia, spowodowane dużym dodatnim gradientem ciśnienia. Rozwój tego oderwania jest stosunkowo wolny, co znajduje odbicie w przebiegu zmian siły nośnej na dużych kątach natarcia. Oderwanie to powiększając się ze wzrostem kąta obejmuje stopniowo całe skrzydło. Wzrost liczby Macha powoduje zwykle przyspieszenie wystąpienia oderwania, w związku z czym następuje spadek wartości $C_{z\max}$ ze wzrostem prędkości przepływu. Drugi przedział, obejmujący zakres liczb M od około 0,6 do 0,75 charakteryzuje się oderwaniem wywołanym słabą falą uderzeniową, występującą w pobliżu krawędzi natarcia dla odpowiednio dużych kątów natarcia. Charakterystyczną cechą jest



Rys. 11. Granica początku występowania buffetingu skrzydła o niedużym skosie
 a) 1 — pomiar σ_{RMS} — początek buffetingu; 2 — α początku utraty liniowości zależności $C_z = f(\alpha)$; 3 — wizualizacja przepływu — inicjacja oderwania; b) 1 — pomiar σ_{RMS} — początek buffetingu; 2 — C_z początku utraty liniowości w zależności $C_z = f(\alpha)$; 3 — oszacowanie z empirycznej zależności korelacyjnej $C_{zpb} = f(M, t/c, f/c)$

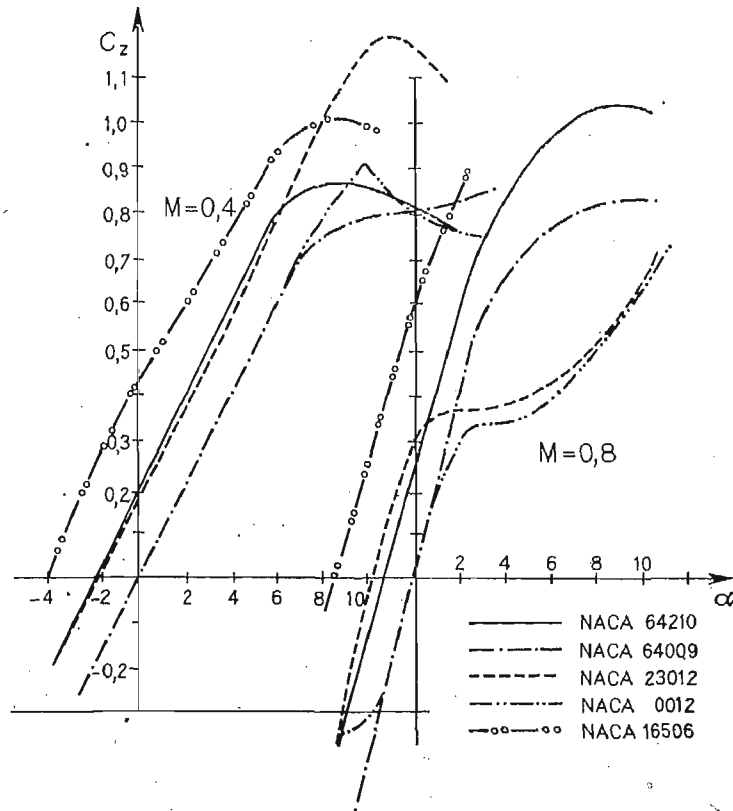


Rys. 12. Oddziaływanie interseptora na opływ profilu w zakresie transonicznym

gwałtowne rozszerzenie się obszaru oderwania na całe skrzydło, czemu towarzyszy spadek siły nośnej. W tym przedziale wzrost liczby Macha powoduje opóźnienie wystąpienia oderwania, co powoduje zazwyczaj wzrost lub utrzymywanie się stałej wartości $C_{z_{max}}$ przy wzroście prędkości. W kolejnym przedziale odpowiadającym zakresowi liczb Macha od około 0,75 do 0,88 oderwanie powstaje w wyniku wzajemnego oddziaływania warstwy przyściennej z silną falą tworzącą się w połowie cięciwy skrzydła na małych kątach natarcia. W tym zakresie oderwanie obejmuje obszar między falą a krawędzią splywu, który nie ulega większym zmianom ze wzrostem kąta natarcia. Po wystąpieniu oderwania zależności $C_z = f(\alpha)$ pozostaje liniowa, jednakże występuje znaczne zmniejszenie pochodnej $dc_z/d\alpha$. Wzrost liczby Macha przyspiesza zdecydowanie wystąpienie oderwania — z czym wiąże się gwałtowny spadek współczynnika początku buffetingu $C_{z_{pb}}$. Ostatni przedział dla $M > \sim 0,88$ charakteryzuje się tym, że na górnej powierzchni skrzydła oderwanie występuje w całym zakresie użytkowych kątów natarcia. Natomiast w zakresie ujemnych kątów natarcia oderwanie przepływu następuje również na dolnej powierzchni skrzydła — co objawia się charakterystyczną postacią zależności $C_z = f(\alpha)$ z nieliniowym przebiegiem dla tych kątów.

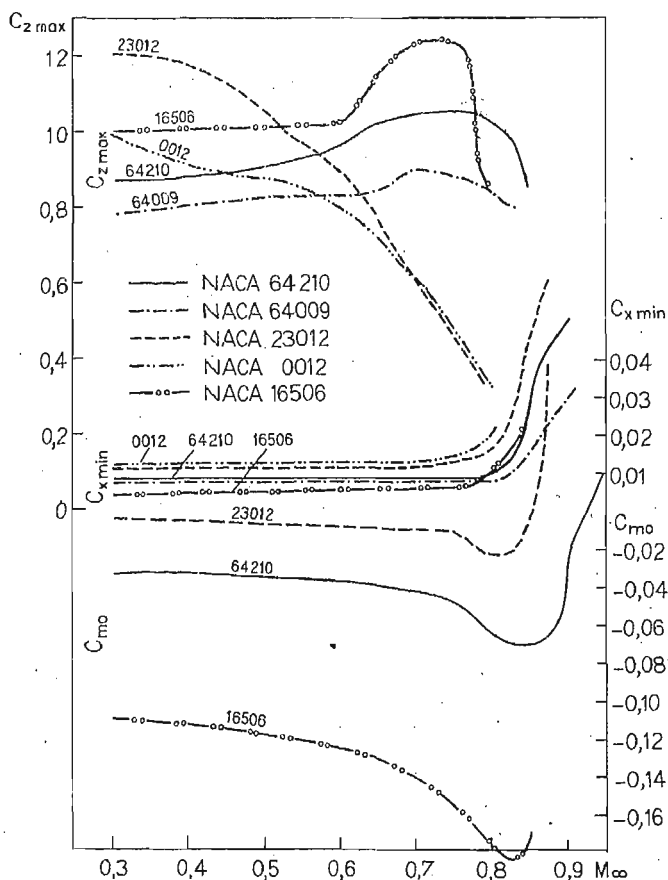
4.1.3. Badania dwuwymiarowe interseptorów. W zakresie dużych prędkości lotu samolotów interseptory mogą stanowić urządzenia wspomagające lotki w sterowaniu poprzecznym. Interseptor jest to zwykle płaska płytka zamocowana zawiasowo do górnej powierzchni skrzydła, która może być odchylana w stosunku do niego pod określonym kątem.

Zagadnienie aerodynamiki interseptorów w dwuwymiarowym przepływie badano w tunelach N-3 i N-2, obejmując cały zakres praktycznego stosowania interseptorów od liczby Macha 0,5 do 2,3. Określono oddziaływanie interseptora i jego parametrów geometrycznych na lokalne własności opływu, jak również integralne, przede wszystkim na siłę



Rys. 13. Zależność współczynnika siły nośnej od kąta natarcia profili katalogowych NACA dla liczb Macha $M = 0,4$ i $0,8$

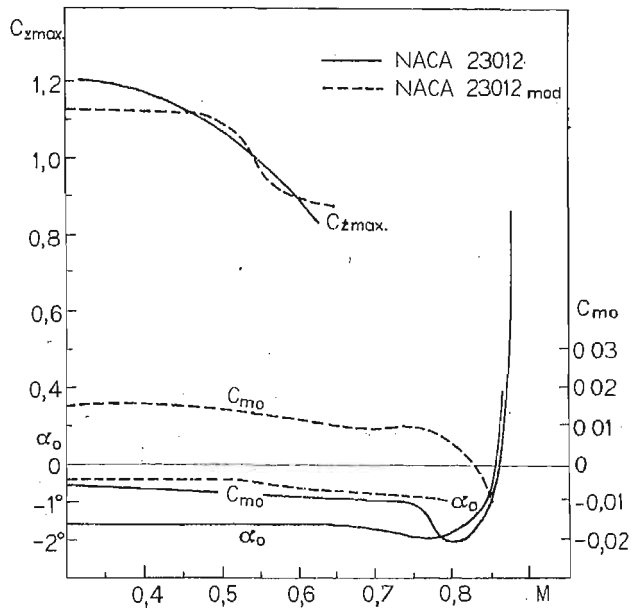
nośną profilu. W niskich poddźwiękowych prędkościach interceptor oddziałuje na opływ wokół całego profilu, powodując zmiany ciśnienia zarówno na górnej, jak i na dolnej stronie profilu. W zakresie transonicznym fala uderzeniowa zamykająca obszar naddźwiękowy znacznie komplikuje obraz opływu profilu z interceptorem, wpływając decydująco na zmianę charakteru oddziaływania interseptora na opływ profilu. W tym zakresie prędkości występują istotne jakościowe różnice w rozkładzie ciśnienia oraz gwałtowne zmiany skuteczności interseptora ze wzrostem liczby Macha. Opierając się na analizie rozkładów ciśnienia i wizualizacji przepływu stwierdzono występowanie siedmiu różnych stanów opływu profilu z interceptorem, w których oddziaływanie jego na opływ profilu i charakter tego opływu są podobne. Począwszy od stanu opływu, w którym interceptor powoduje zmianę z częściowo lub całkowicie naddźwiękowego przepływu na górnej stronie profilu na całkowicie poddźwiękowy, oddziałując na opływ górnej i dolnej strony profilu, podobnie jak dla małych poddźwiękowych prędkości. Skończywszy na stanie opływu, w którym interceptor oddziałuje tylko lokalnie na górnej stronie profilu — przed i za interceptorem, gdzie występują dwa zamknięte obszary oderwania, co charakterystyczne jest także dla naddźwiękowych prędkości. Stwierdzono korelację wspomnianych wyżej



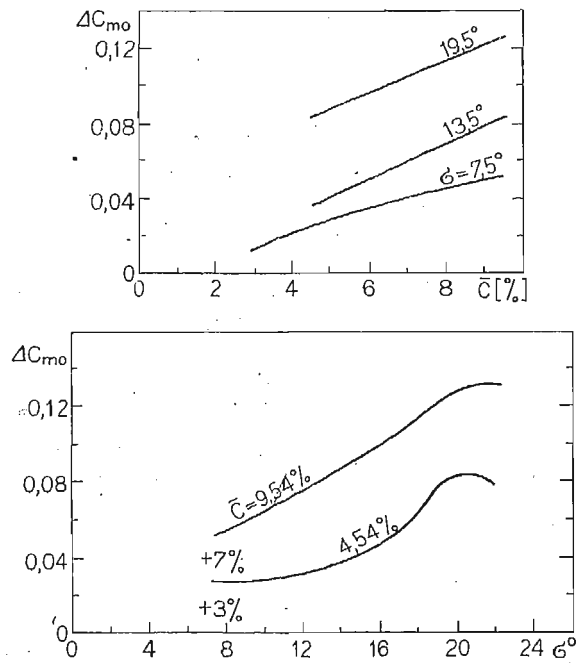
Rys. 14. Wpływ liczby Macha na współczynnik maksymalnej siły nośnej minimalnego oporu i momentu przy zerowej sile nośnej dla profili katalogowych NACA badanych w tunelu N-3

zmian skuteczności interceptora z liczbą Macha ze stanami opływu występującymi w zakresie transonicznym.

4.1.4. Badania opływu klasycznych profili w zakresie dużych prędkości. W szeregu projektowych pracach aerodynamicznych przede wszystkim techniki lotniczej, wymagana jest znajomość charakterystyk aerodynamicznych stosowanych profili w szerokim zakresie prędkości. Na konkretne zapotrzebowanie konstruktorów badania tego rodzaju prowadzone są w tunelu N-3. Dotyczyły one właściwie prawie w całości wszystkich stosowanych praktycznie rodzin profili NACA: a mianowicie 4-ro, 5-cio, 6-cio cyfrowych oraz serii NACA 16. Badano profile NACA 0012, 23012, 64009, 64210 i 16506 [37 - 40], mierząc współczynniki siły nośnej i momentu w oparciu o rozkład ciśnienia na profilu oraz współczynnika oporu w oparciu o pomiar straty impulsu w śladzie. Badany zakres liczb Macha obejmował od 0,3 do 0,9 — 0,95. Przedstawiając na rys. 13 i 14 zależność $c_z = f(\alpha)$ dla wybranych liczb Macha $M = 0,4$ i $0,8$ oraz wpływ liczby Macha na wybrane parametry aerodynamiczne pokazano charakterystyczne własności aerodynamiczne tych profili w różnych zakresach dużych prędkości przepływu.



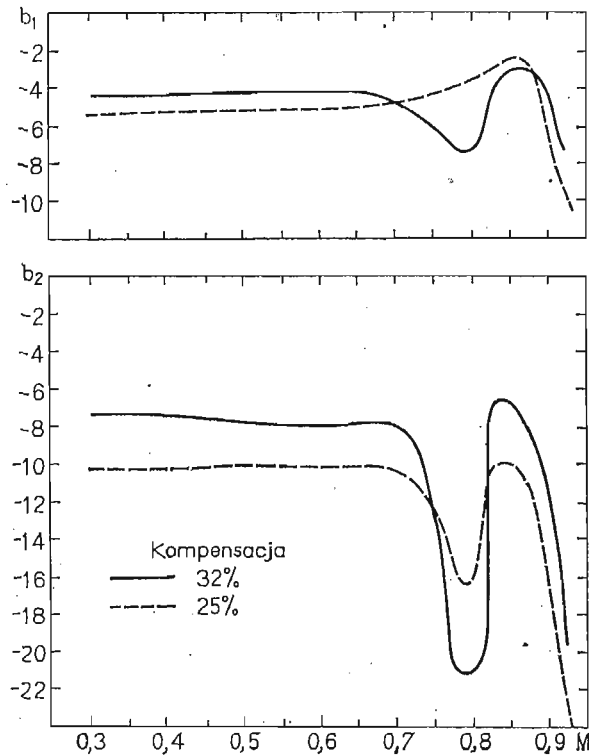
Rys. 15. Wpływ podgięcia krawędzi splywu profilu NACA 23012M na jego charakterystyki aerodynamiczne



Rys. 16. Wpływ długości cięciwy i kąta wychylenia trymera na współczynnik momentu przy zerowej sile nośnej profilu NACA23012M

α_0 — kąt odchylenia trymera; δ — względna długość trymera

Jednym z najważniejszych wymagań dla profili stosowanych na łopaty wirnika nośnego śmigłowca jest możliwie mała wartość współczynnika momentu. Zmniejszenie tego współczynnika można uzyskać poprzez podniesienie krawędzi spływu. Opracowaną przez konstruktorów wersję takiego zmodyfikowanego profilu NACA 23012, w którym krawędź spływu podniesiono o 0,8% cięciwy, badano w tunelu N-3 [37]. Zmianie współczynnika momentu — rys. 15, towarzyszył spadek maksymalnego współczynnika siły nośnej w zakresie małych liczb Macha do 0,45.



Rys. 17. Wpływ liczby Macha na współczynnik momentu zawiasowego steru wysokości

W technice śmigłowcowej stosowane są na łopatach wirników nośnych klatki odciążające — trymery, umieszczone na krawędzi spływu łopaty i wychylane odpowiednio w celu uzyskania zmian momentu skręcającego łopatę. W tunelu N-3 przeprowadzono badania wpływu długości cięciwy i kąta wychylenia trymera na charakterystyki aerodynamiczne profilu NACA 23012M, przede wszystkim momentowe [41]. Stwierdzono, że w badanym zakresie liczb Macha $M = 0,3 - 0,6$ zmiany współczynnika momentu nie zależą od liczby Macha, natomiast wzrastają ze wzrostem długości cięciwy i kąta wychylenia trymera jak przedstawiono to na rys. 16.

4.1.5. Wpływ ściśliwości na moment zawiasowy powierzchni sterowych. W literaturze brak jest danych dotyczących wpływu ściśliwości na moment zawiasowy powierzchni sterowych, szczególnie dla przydźwiękowych prędkości. Dla wypełnienia tej luki i wyjaśnienia możliwości stosowania w obliczeniach teorii liniowej przeprowadzono badania momentu zawiasowego izolowanego modelu steru wysokości [42] w zakresie liczb Macha $M = 3,0 -$

-0,92. Moment zawiasowy steru mierzony był dla różnych położeń osi obrotu steru tzn. różnych kompensacji wyrażonych stosunkiem cięciwy steru i za osią obrotu, dobieranej odpowiednio dla zmniejszenia momentu zawiasowego. W przybliżeniu współczynnik momentu zawiasowego można wyrazić następującą zależnością

$$c_{mz} = b_1 \alpha + b_2 \delta$$

gdzie: $b_1 = dc_{mz}/d\alpha$; $b_2 = dc_{mz}/d\delta$

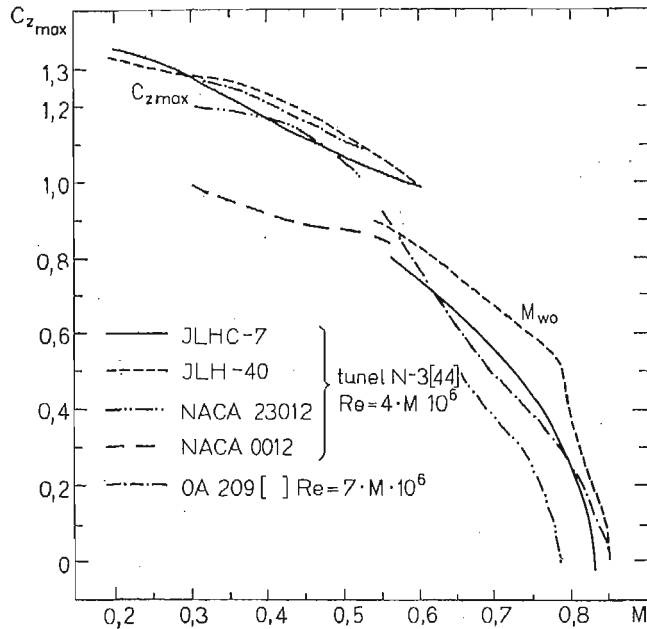
Stwierdzono, że zależność ta obowiązuje w przybliżeniu do liczby Macha $M = 0,9$ dla badanego steru. Dlatego też wpływ ściślności na moment zawiasowy określony może być poprzez w zależnościach b_1 i $b_2 = f(M)$, które przedstawiono na rys. 17 dla dwu skrajnych położeń osi obrotu steru. W podkrytycznym zakresie prędkości do $M = 0,6 - 0,65$ pochodne b_1 i b_2 są zasadniczo niezależne od liczby Macha, a wzrost kompensacji (odpowiada to przesunięciu osi obrotu ku krawędzi spływu) w badanym zakresie powoduje spadek bezwzględnych wartości pochodnych. Dla wyższych liczb Macha, szczególnie nadkrytycznych, występują znaczne zmiany rozpatrywanych pochodnych, które nie są opisane przez liniową teorię. Przebieg pochodnej $b_1 = dc_{mz}/d\alpha$ jakościowo zależy od kompensacji — w zakresie $M = 0,65 - 0,8$ maleje lub rośnie ze wzrostem liczby Macha zależnie od położenia osi obrotu. Szczególnie duże i gwałtowne zmiany występują w nadkrytycznym zakresie pochodnej $b_2 = dc_{mz}/d\delta$. W zakresie $M = 0,75 - 0,85$ odwrotnie niż dla podkrytycznych prędkości wzrost kompensacji powoduje wzrost bezwzględnych wartości pochodnych b_1 i b_2 .

4.2. Badania nowo konstruowanych profili śmigłowcowych i śmigłowych

4.2.1. Profile przeznaczone na łopaty wirnika nośnego śmigłowca. Jednym z najbardziej złożonych zagadnień aerodynamiki jest opływ łopat wirnika nośnego śmigłowca. Warunki opływu łopaty istotnie jakościowo zmieniają się w trakcie jednego obrotu wirnika, a dodatkową komplikację stanowi niestacjonarność i trójwymiarowość tego opływu. W przypadku lotu postępowego wirniki te przechodzą kolejno od nadkrytycznego opływu z falą uderzeniową przy $c_z \sim 0$ na łopacie nacierającej do opływu o małych liczbach Macha rzędu 0,2 - 0,4 przy maksymalnych wartościach współczynnika c_z . W zawiasie na zewnętrznych częściach łopaty przepływ osiąga liczbę Macha 0,6 - 0,7, co przy wartościach współczynnika $c_z \sim 0,6$ powoduje wystąpienie lokalnie w pobliżu krawędzi natarcia naddźwiękowych obszarów zakończonych falą uderzeniową. [1]. Zjawiska falowe stanowią istotne ograniczenie osiągnięć śmigłowca. Jedną z dróg polepszenia tych osiągnięć jest zastosowanie na łopacie nowych, specjalnie skonstruowanych, z uwzględnieniem najnowszych osiągnięć aerodynamiki pod i okołodźwiękowej profili aerodynamicznych, które lepiej byłyby dostosowane do specyficznych opisanych wyżej warunków opływu łopaty [1, 2, 11]. Do niedawna jeszcze powszechnie stosowano na łopaty wirnika profil NACA 0012 bądź NACA 2312.

W drugiej połowie lat 70-tych podjęto w szeregu ośrodkach badawczych prace nad skonstruowaniem specjalnych profili na łopaty wirnikiem. W stosunku do konwencjonalnych, profile te winny mieć poprawione następujące własności:

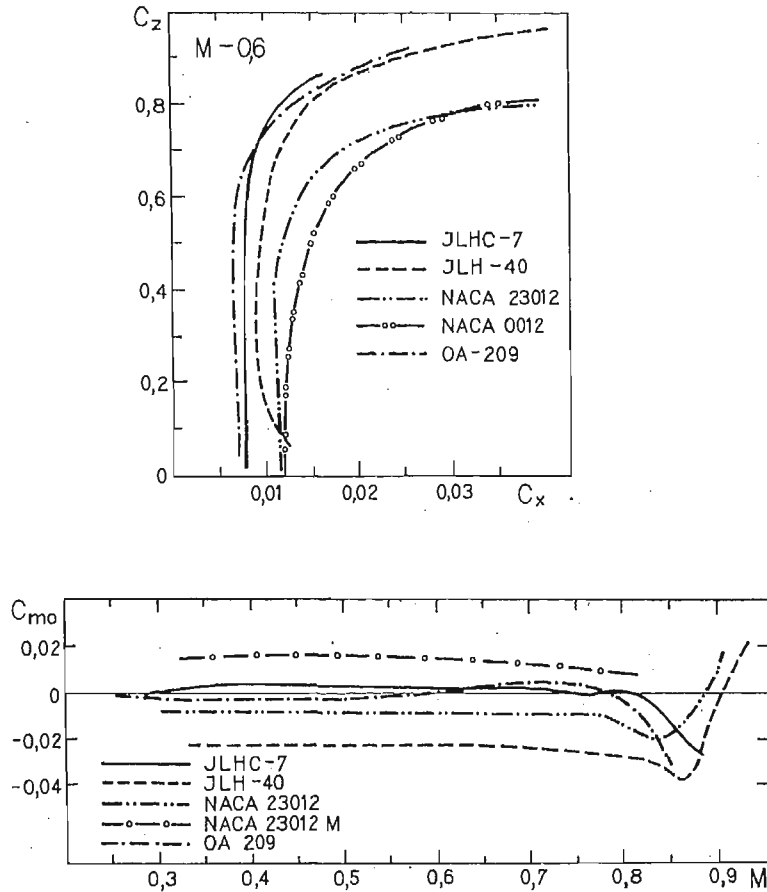
— zwiększoną wartość $c_{z \max}$ dla $M = 0 - 3$ i $0 - 4$



Rys. 18. Maksymalny współczynnik siły nośnej i granica wzrostu oporu profili ILH-40 i ILHC-7 badanych w tunelu N-3

- zwiększoną wartość liczby Macha wzrostu oporu dla $c_z \sim 0$
- zwiększoną doskonałość aerodynamiczną dla $M = 0,6$ i $C_z = 0 - 6$
- wartość współczynnika momentu dla zerowej siły nośnej nie przekraczającej 0,01.

W pracy [43] skonstruowano numerycznie takie ulepszone profile. Dla określenia ich własności aerodynamicznych, istotnych z punktu widzenia zastosowań śmigłowcowych, przeprowadzono badania w tunelu N-3 w zakresie liczb Macha $M = 0,2 - 0,9$ [44]. Najważniejsze charakterystyki tych profili przedstawiono na rys. 18 porównując je z profilami konwencjonalnymi i nowo opracowanymi w ośrodkach zagranicznych. Profil ILH-40, mimo bardzo dobrych charakterystyk $C_{z_{max}}$ i M_{wo} , a także lepszej niż profile konwencjonalne doskonałości jest, ze względu na stosunkowo duży moment i dużą wartość oporu dla zerowej siły nośnej (co jak wynika z badań spowodowane jest oderwaniem na nosku dolnej strony profilu), mało przydatny w obecnej postaci do zastosowania. Natomiast profil ILHC-7 zachowuje dobry kompromis własności aerodynamicznych z punktu widzenia zastosowań śmigłowcowych w stosunku do nowo powstałych profili śmigłowcowych oraz ma lepsze te własności w stosunku do profili konwencjonalnych. Może być on z powodzeniem zastosowany do łopaty wirnika śmigłowca, a także stanowić podstawę do opracowania odpowiedniej rodziny profili o różnych grubościach, dostosowanych do konkretnych wymagań konstruowanego śmigłowca. Profil ILHC-7 posiada najwyższą doskonałość dla $M = 0,6$ i $C_z = 0,6$ spośród znanych profili, stosunkowo dużą liczbę Macha wzrostu oporu i małą wartość współczynnika momentu C_{m_0} . Współczynniki $C_{z_{max}}$ tego profilu są zbliżone do wartości dla innych nowych profili śmigłowcowych [44].



Rys. 19. Biegunowa i współczynnik momentu przy zerowej sile nośnej profili JLH-40 i JLHC-7 badanych w tunelu N-3

4.2.2. Profile łopaty śmigła. Na łopaty śmigła, jeszcze powszechnie obecnie stosowane są profile serii NACA 16 lub CLARK Y. Kryzys paliwowy powoduje zainteresowanie konstruktorów we wprowadzaniu śmigieł o większej sprawności. Z drugiej strony prowadzone są bardzo intensywne prace nad zmniejszeniem hałasu śmigieł. Efektywnym sposobem jest tu zmniejszenie prędkości obwodowej śmigła. Dla zachowania przy tym wartości ciągu i dla uzyskania większej sprawności śmigła należy wprowadzić profile o poprawionych charakterystykach [3]. W Anglii opracowano nową rodzinę profili śmigłowych ARA-D o grubościach od 3% do 20% z warunkiem konstrukcyjnym maksymalizacji doskonałości aerodynamicznej dla dużych wartości C_z .

Zapoczątkowaniem w kraju prac w tej dziedzinie, były przeprowadzone na użytek konstruktorów badania opływu dostarczanego przez nich nowego profilu oznaczonego CNPSL1 o grubości 6%, przeznaczonego na łopaty śmigła [45]. Stwierdzono, że profil ten ma dla liczb Macha $M = 0,6$ wartość współczynnika $C_{z \max}$ równą 1,3, tj. o 30% większą niż profil NACA 16. Korzystnym było także przesunięcie maksymalnej doskonałości na większe wartości C_z o prawie 50% w stosunku do NACA 16. Jednakże wystąpiło sze-

szereg niekorzystnych własności, jak zwiększenie współczynnika $C_{x_{min}}$ spowodowane przedwczesnym oderwaniem przepływu na dolnej stronie krawędzi natarcia, przyspieszenie kryzysu fałowego, spadek maksymalnej doskonałości oraz pewne zaburzenia w rozkładzie ciśnienia na pierwszych 10-ciu % górnej strony profilu.

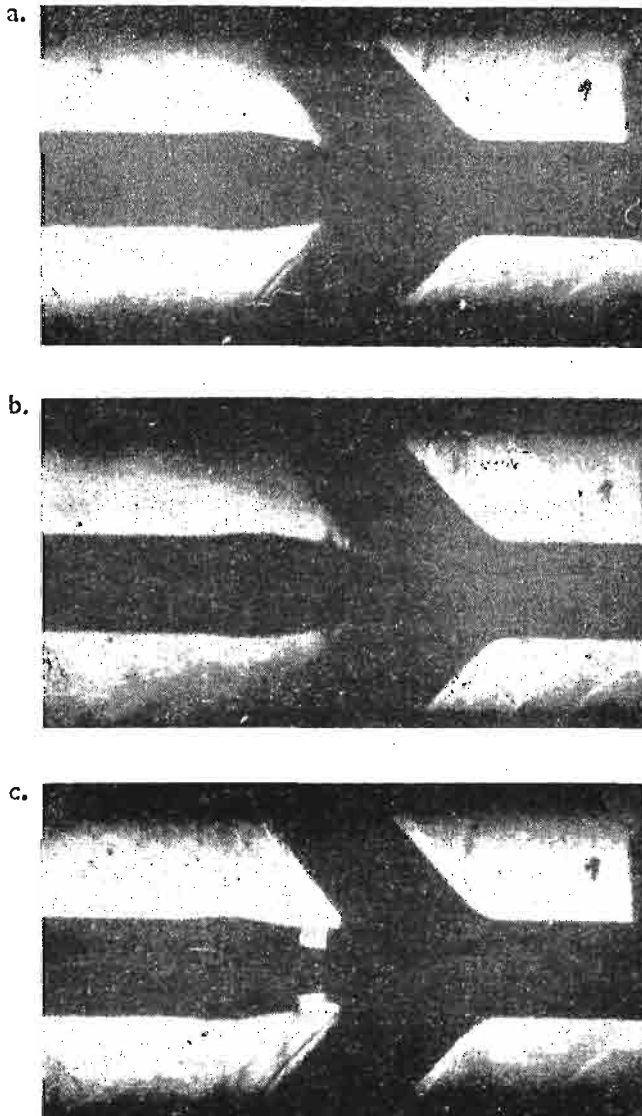
4.3. Badania modelowe w zakresie techniki raketowej

Aerodynamiczne badania tunelowe towarzyszyły, realizowanemu w latach 1962 - 1971 programowi meteorologicznych badań raketowych. W programie tym korzystano z konstruowanych i produkowanych w Instytucie Lotnictwa rakiet meteorologicznych serii „Meteor”. Badania modeli rakiet Meteor 2 i 3 przeprowadzono w tunelu N-2 i N-3 w zakresie liczb Macha $M = 0,5 - 3,46 - 48$. Dokonywano pomiarów wagowych charakterystyk aerodynamicznych modeli oraz wizualizację schlierenowską ich opływu.

Dla rakiety Meteor 3 przeprowadzono w tunelu N-3 bardzo interesujące badania symulacyjne odpalania i rozłączania się stopni tej rakiety [47]. Opracowano specjalny model dwu stopni rakiety, z możliwością zdalnego odpalania I stopnia, który po odpaleniu mógł przemieszczać się z zachowaniem 6-ciu stopni swobody w zakresie 120 mm. Badań dokonano dla liczby Macha $M = 1,5$ filmując kamerą do szybkich zdjęć (4000 klatek/sek) odpalenie i odejście I stopnia modelu rakiety na schlierenowskim obrazie przepływu. Na rys. 20 przedstawiono trzy wybrane klatki filmowe, ukazujące fazę rozłączania się stopni rakiety. Stwierdzono w tych badaniach modelowych, że proces rozłączania przebiega prawidłowo, co znalazło potwierdzenie w badaniach w locie.

W tunelu N-3 prowadzono szereg badań charakterystyk aerodynamicznych i zagadnień sterowania modeli rakiet i innych różnorodnych obiektów latających. Badania te obejmowały również studialne prace nad nowymi układami sterowania, jak na przykład spoilerami strumieniowymi. Interesujące były badania prędkości obrotowej modelu uzyskiwanej dzięki wychyleniu odpowiednich organów sterowania. Badania te przeprowadzono w warunkach ustalonego ruchu obrotowego dla określenia zależności prędkości obrotowej od kąta wychylenia organu sterowania w szerokim poddźwiękowym zakresie liczb Macha i kątów natarcia modelu. Badano także proces nieustalony rozkręcania się modelu, określając przebieg wzrostu prędkości obrotowej w czasie aż do uzyskania obrotów ustalonych. Stwierdzono, że zależność bezwymiarowej prędkości obrotowej (odniesionej do wartości w ruchu ustalonym) od czasu nie zależy od kąta wychylenia organu sterującego w badanym zakresie.

W pracach [52 - 54] badano zagadnienie gazodynamicznego sterowania kierunkiem wektora ciągu silnika raketowego. Badania objęły metody: wdmuchu gazu w naddźwiękową część dyszy, płaskiego naddźwiękowego przerzutnika i statycznego oddziaływania na swobodną granicę naddźwiękowego strumienia wylotowego. Dużą efektywność wykazały metody wdmuchu i płaskiego przerzutnika. W metodzie wdmuchu stwierdzono istotny wpływ względnej średnicy otworu wdmuchu, kąta półrozwarcia dyszy i liczby Macha wylotowego strumienia głównego na statyczną i dynamiczną efektywność sterowania, współczynniki wzmocnienia i przesunięcia fazowe. W badaniach nad zastosowaniem przerzutnika [53] skupiono uwagę nad wpływem kąta i uskoju ścianki komory oddziaływać na kąt odchylenia wektora ciągu.



Rys. 20. Wizualizacja rozdzielania stopni modelu rakiety Meteor 3 — badania w tunelu N-3 dla liczby Macha $M = 1,5$; a, b, c — kolejne fazy rozdzielania

5. Badania podstawowe w zakresie naddźwiękowym

5.1. Badania zewnętrznych opływów ciał

W kraju przeprowadzono niewiele eksperymentalnych badań podstawowych aerodynamiki dużych prędkości. Wymienić tu można badania: położenia punktu krytycznego na tępych ciałach o ostrej krawędzi [49, 50], kształtu linii krytycznej w przepływie za odsuniętą falą uderzeniową [51], wpływu odsysania na naddźwiękowy, turbulentny prze-

plyw z oderwaniem [32] oraz spływu z płytki dwu strumieni naddźwiękowych o różnych prędkościach [59].

W pracach obliczeniowych dotyczących opływu naddźwiękowych ciał tępych z ostrą krawędzią przyjmowana była powszechnie zgodność położenia linii krytycznej i krawędzi ciała. Zgodność położenia tych linii przyjmowano jako bazę szeregu metod obliczeniowych. Dla sprawdzenia poprawności tego założenia przeprowadzono badania położenia punktu krytycznego na trzech modelach z ostrą krawędzią w tunelu N-3 dla liczb Macha $M = 1,5$ i $2,3$. Położenie punktu krytycznego na modelu określono poprzez pomiar rozkładu ciśnienia. Jako punkt krytyczny przyjmowano punkt, w którym występowała krytyczna wartość stosunku ciśnień. We wszystkich przypadkach stwierdzono, że punkt krytyczny nie pokrywa się z ostrą krawędzią ciała [49, 50].

Dla eksperymentalnej weryfikacji poprawności metod obliczeniowych naddźwiękowego opływu ciał tępych mało przydatne są takie parametry, jak kształt czołowej fali uderzeniowej, jej odległość od ciała i rozkład ciśnienia na ciele. Wynika to z faktu, że różne metody dają wyniki dotyczące tych parametrów niewiele różniące się. Natomiast położenie i kształt linii krytycznych za czołową falą, obliczone tymi metodami różnią się znacznie, szczególnie dla naddźwiękowych liczb Macha $M \sim 3$. Jednakże brak było bezpośredniej metody doświadczalnej, jednoznacznie wyznaczającej tę linię. W pracy [51] przedstawiono metodę pomiarową, określającą położenie punktów linii krytycznej, nie mającą ograniczeń związanych z kształtem tej linii. Metoda ta wykorzystuje zjawisko znikania generowanych w obszarze naddźwiękowym między falą czołową a ciałem, słabych zaburzeń w punkcie przecięcia ich z linią krytyczną. Dla liczb Macha $M=1,5$ i $2,3$ wyznaczono linie krytyczne w opływie kuli. Stwierdzono zgodność położenia punktów krytycznych na kuli, wynikających z tak określonych linii krytycznych i z pomiarów rozkładu ciśnienia. Dla liczb $M = 2,3$ porównano uzyskaną w badaniach linię krytyczną z wynikami obliczeń teoretycznych.

W bardzo szeroko prowadzonych na świecie badaniach naddźwiękowych przepływów z oderwaniem mało uwagi poświęcono wpływowi odsysania na parametry aerodynamiczne takiego przepływu. Zagadnienie to dla turbulentnego oderwania, spowodowanego interceptorem podjęto w pracy [32] dla liczb Macha $M = 2,0$ i $2,5$. Stwierdzono, że odsysanie przepływu z obszaru oderwania przed interceptorem poprzez szczelinę w interceptorze powoduje zmniejszenie obszaru oderwania. Długość obszaru oderwania odniesiona do wysokości interceptora liniowo zależy od stosunku wysokości szczeliny i interceptora. Odsysanie przepływu nie spowodowało zmiany charakteru procesu oderwania, który pozostał procesem wzajemnego, swobodnego oddziaływania. Niezależne od odsysania jest ciśnienie oderwania, a wpływ na ciśnienie ustalone jest niewielki. Na rozkład bezwymiarowego ciśnienia w obszarze oderwania odsysanie wpływa tylko w pobliżu interceptora.

Na zmniejszenie strat energetycznych w transonicznej palisadzie istotnym jest zmniejszenie intensywności fal uderzeniowych, powstających za krawędzią spływu łopatki [58]. Eksperymentalne stwierdzenie możliwości zmniejszenia intensywności fal poprzez modyfikację krawędzi spływu podjęto w pracy [59]. Badania zrealizowano w naddźwiękowym tunelu WAT, przy pomocy specjalnej komory dyszowej, w osi której umieszczono płytkę. Płytkę na odcinku kory dyszowej rozdzielała dwa strumienie naddźwiękowe o liczbie Macha $1,5$ i $2,0$. Badano rozkład ciśnień i przeprowadzono wizualizację schlierenowską

strumienia za krawędzią spływu płytki. Pomiary wykonano dla pięciu różnych kształtów krawędzi spływu płytki.

5.2. Badania fal uderzeniowych w gazie

Doświadczalne badania fal uderzeniowych w gazie prowadzone są w Zakładzie Mechaniki Cieczy i Gazów IIPT PAN w sposób systematyczny od początku lat 60-tych. Początkowe prace obejmowały przygotowanie odpowiedniej bazy doświadczalnej, przede wszystkim rury uderzeniowej. Rurę uderzeniową stanowi kanał, najczęściej o stałym przekroju, zamknięty na obu końcach i podzielony na dwie części membraną, łatwą do usunięcia. Z jednej części obniża się ciśnienie do wartości bliskich próżni, a w drugiej spręża się gaz „napędzający”. Po rozerwaniu membrany następuje przejście fali uderzeniowej przez część próżniową. Pierwsza uruchomiona nieduża rura (o przekroju $0,16 \times 0,08$ m i długości 5,67 m) [61] umożliwiła zebranie doświadczeń w zakresie konstrukcji, wykonania i eksploatacji tego typu urządzeń, jak również dostarczyła podstaw do opracowania odpowiednich metod i urządzeń pomiarowych: do pomiaru prędkości fali, ciśnienia w trakcie pracy rury, temperatury i strumienia cieplnego.

Dalsze badania objęły analizę struktury fal uderzeniowych i regularnego odbicia skośnej fali od płaskiej ścianki [62, 63]. W badaniach tych wspomnianą wyżej rurę, zastąpiono rurą uderzeniową o średnicy 0,12 m i długości 10 m. W badaniach fali uderzeniowej, poruszającej się wzdłuż płaskiej ścianki w nieruchomym powietrzu mierzono strukturę fali (oraz jej kształt w pobliżu ścianki) dla liczb Macha $M = 2,2; 3; 6$. Stwierdzono, że fala jest w przybliżeniu prostopadła do ścianki, a nie tworzy kąta Macha ze ścianką, co wypływa z teorii, zakładającej ciągłość ośrodka i warunek nie występowania poślizgu na ściance. Parametry fali są niezależne od odległości od ścianki. Otrzymane wyniki nie potwierdzają poprawności teoretycznego ujęcia struktury fali uderzeniowej w pobliżu ścianki opartego na wspomnianych wyżej założeniach [62]. Podobne wnioski wysnuto z badań zjawiska regularnego odbicia silnej fali uderzeniowej od pochyłej ścianki [63].

Powyższym pracom badawczym towarzyszył równoległe dalszy rozwój bazy doświadczalnej. W połowie lat 70-tych uruchomiono nową rurę uderzeniową, która ówczesnie porównywalna była z analogicznymi urządzeniami najbardziej znanych ośrodków badawczych [64]. Średnica wewnętrzna tej rury wynosi 0,252 m. Długość rury równa 17 m, przy czym części próżniowej wynosi 14,35 m. Rura wewnątrz jest oszlifowana i polerowana. Wyposażona jest w zespół pomp próżniowych, umożliwiających odpompowanie rury do ciśnienia 5×10^{-6} Tr oraz układ dozujący gaz roboczy. Do pomiarów fal uderzeniowych rurę wyposażono w działki elektronowe o energii wiązki od 3 do 18 keV oraz interferometr różnicowy z laserowym źródłem światła.

W opisanej powyżej rurze przeprowadzono badania zjawisk rządzących falami uderzeniowymi w mieszaninach gazowych [65, 66]. Badano mechanizm separacji składników, która polega na zmianie koncentracji ich wewnątrz fali w stosunku do wartości równowagowych przed i za falą. Poświęcono także uwagę zmianie struktury fali związanej z separacją. Badania dotyczyły mieszanin: hel-ksenon i wodór-ksenon. Stwierdzono występowanie zupełnie nieoczekiwanej „dwugarbnej” struktury fali — tj. w składniku lżejszym występują dwa dodatkowe punkty przegięcia między stanami równowagi przed

i za falą. Wskazano, że istniejące teorie nie pozwalają na wyjaśnienie powyższych rezultatów. Istnieje konieczność znalezienia nowego, adekwatnego opisu teoretycznego fal uderzeniowych w mieszaninach gazowych.

6. Modelowe badania zagadnień maszyn przepływających w zakresie dużych prędkości

W pierwszej połowie lat 70-tych podjęto w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN temat dotyczący badania przepływu transonicznego przez mało odchylające turbinowe palisady łopatek [67]. Motywacje do tych badań stanowiły, jak stwierdzono, pilne potrzeby przemysłu w związku z rozwijaniem i zastosowaniem w produkcji ekstremalnych stopni turbinowych. Doświadczalne badania tego rodzaju przepływu rozpoczęto na stanowisku analogii hydrodynamicznej, które ze względu na jakościowy charakter badań analogowych traktowano jako poligon szkoleniowy [67]. Godnymi uwagi badaniami analogowymi była eksperymentalna analiza wpływu zmiany składnika izentropii czynnika na obraz przepływu naddźwiękowego w dyszy. [68]. Stwierdzono pewien wpływ takich zmian na prędkość strumienia wylotowego oraz na rozkład nachylenia wektorów prędkości [68], należy tu jednakże pamiętać o jakościowym charakterze rezultatów analogii hydrodynamicznej.

Badania wpływu ściśliwości powietrza na przepływ przez płaską palisadę profili kierowniczych przeprowadzono w odpowiednio zaadoptowanym naddźwiękowym tunelu WAT [69]. Badania te polegały na pomiarze rozkładu strat ciśnienia strumienia po przejściu przez palisadę. W komorze pomiarowej tunelu — na wylocie dyszy poddźwiękowej — pionowo ustawiono palisadę profili kierowniczych wraz z oprzyrządowaniem do pomiaru rozkładu ciśnienia. Pomiarzy dla określonej palisady profili o ustalonej podziące, względnej wysokości i kącie ustawienia przeprowadzono dla liczb Macha przepływu w zakresie od 0,2 do 0,95. Stwierdzono istotny wpływ liczby Macha na straty przepływu występujące na palisadzie [69].

Biorąc pod uwagę nawet dodatkowo pracę [59], która związana jest z około i naddźwiękowym przepływem przez palisady należy stwierdzić, że doświadczalne badania tego zagadnienia są w kraju przeprowadzane w stosunkowo wąskim zakresie. Wydaje się, że pewnym poszerzeniem możliwości badawczych byłoby podjęcie takich badań w tunelu N-3, co dałoby nie tylko zwiększenie skali badanych modeli, ale rozszerzenie zakresu liczb Macha w transonice do około $M = 1,2$ oraz możliwość badań naddźwiękowych z liczbą Macha $M = 1,5$. Podobne włączenie w tematykę typowych tuneli aerodynamicznych obserwuje się w Ośrodku ONERA—Francja [70].

7. Podsumowanie

Krajowa aerodynamiczna baza doświadczalna w zakresie dużych prędkości jest stosunkowo skromna. Obejmuje cztery tunele aerodynamiczne oraz dwie rury uderzeniowe. Z istniejących tuneli trzy to naddźwiękowe, które w stosunku do światowego stanu tuneli można uważać za małe. Jeden tunel ma zakres prędkości pod-, około- i naddźwiękowy

(tzw. tunel trisoniczny) stanowi tunel średniej wielkości. Należy podkreślić brak w kraju tunelu o dużych rozmiarach t.j. o ponad metrowej przestrzeni pomiarowej. Jedną z rur uderzeniowych, przeznaczoną do badań podstawowych, jest porównywalnym urządzeniem z istniejącymi w renomowanych ośrodkach zagranicznych.

Eksperymentalne badania aerodynamiczne przeprowadzone w kraju obejmowały szeroki zakres prędkości od liczb Macha 0,2 do 3,0 oraz zakres hiperdźwiękowy w badaniach fal uderzeniowych. Jednakże badania główne były skupione w zakresie pod- i około-dźwiękowym oraz nieliczne przeprowadzono dla małych naddźwiękowych prędkości. Z dokonanego powyżej przeglądu oraz biorąc pod uwagę niewymienione badania poświęcone bezpośrednio konkretnym konstruowanym czy produkowanym wyrobom (16 prac) można sądzić, że eksperymetalne badania aerodynamiczne w dużych prędkościach poświęcone są w głównej mierze technice lotniczej. Badania te mają charakter stosowany bądź są ukierunkowywane bezpośrednio. Badania typu podstawowego w zakresie techniki lotniczej właściwie nie są prowadzone. W bardzo niewielkim stopniu podejmowane były tematy badawcze z zakresu dużych prędkości dotyczące maszyn przepływowych. W tym zakresie zaznacza się brak odpowiedniej bazy badawczej. Pewnym rozwiązaniem mogłoby być włączenie wspomnianego tunelu trisonicznego, odpowiednio zaadaptowanego do badań zagadnień maszyn przepływowych.

Za wyjątkiem tematyki fal uderzeniowych, badania doświadczalne typu podstawowego aerodynamiki dużych prędkości, wynikające ze stawianych celów poznawczych, prowadzone są w minimalnym stopniu. Jedynym wyjątkiem, jak wspomniano wyżej, są badania struktury fal uderzeniowych w gazach i ich mieszaninach dokonywane w rurach uderzeniowych, które prowadzone są długiufalowo i systematycznie, czemu towarzyszy znaczący rozwój bazy badawczej i stosowanych technik pomiarowych.

Wykaz oznaczeń

- c — cięciwa profilu
- c_{my} — współczynnik momentu pochylającego
- c_{mo} — współczynnik momentu pochylającego przy zerowej sile nośnej
- Δc_{mo} — zmiana współczynnika momentu pochylającego przy zerowej sile nośnej spowodowana wychyleniem trymera
- c_p — współczynnik ciśnienia
- Δc_p — zmiana współczynnika ciśnienia spowodowana interceptorem
- c_{mz} — współczynnik momentu zawiasowego
- c_z — współczynnik siły nośnej
- c_{zmax} — współczynnik maksymalnej siły nośnej
- c_{zpb} — współczynnik siły nośnej dla którego występuje początek buffetingu
- c_x — współczynnik oporu
- c_{xmin} — współczynnik oporu minimalnego
- M — liczba Macha
- M_{wo} — liczba Macha wzrostu oporu
- M_{od} — liczba Macha oderwania
- α_{pb} — kąt natarcia dla którego występuje początek buffetingu

- α — kąt natarcia
 Re — liczba Reynoldsa
 δ — kąt wychylenia steru
 χ — kąt skosu krawędzi natarcia skrzydła

Literatura cytowana w tekście

1. *Transonic Aerodynamics and the Helicopter Rotor*, P. G. WILBY, J. GRANT. IUTAM Symposium Göttingen 1975 r. Springer — Verlag Berlin.
2. J. J. THIEBERT, J. J. PHILIPPE, *Studies of aerofoils and blade tips for helicopter*, La Recherche Aero-spatiale, Nr. 4, 1982 r.
3. A. B. HAINES, *Aerodynamics*, Aeronautical Journal, July 1976.
4. A. B. HAINES, *Computers and wind Tunnels: complementary aids to aircraft design*, Aeronautical Journal, July 1977 r.
5. J. D. WHITFIELD, S. R. PATE, W. F. KIMZEY, D. L. WHITFIELD, *The role of computers in aerodynamic in aerodynamic testing*. Computers and Fluids vol. 8, nr. 1980 r.
6. P. G. COLLINS, *Summary of the 1977 USAF/OSR/ASEE summer desing study program on the integration of wind tunells and computers*, AIAA paper 78 - 783, 1978 r.
7. J. D. WHITFIELD, B. J. GRIFFITH, *Overview of Fligth and ground testing with emphasis on the wind tunnel*, AIAA, Paper 81 - 2974, 1981 — tłumaczenie w jęz. rosyjskim — Awiaostrojanie 41, 1982.
8. P. POISSON-QUINTON, *Some new approaches for wind tunnel testing through the use of computers*, ONERA T. P. r 1979, 24.
9. W. KANIA. *Komputer w tunelowych badaniach modeli obiektów latających*, Technika Lotnicza i Aerodynamiczna (w druku).
10. L. W. Mc KONNEY, R. R. HOWELL, *The characteristics of the planned national transonic facility*, AIAA 9 th Aerodynamic Testing Conference 1976, Aerlington.
11. E. W. E. ROGERS, *Aerodynamics-retrospect and prospect*, The Aeronautical Journal. Nr 852, February 1982 r.
12. B. J. DAYMAN, A. W. FIORE, J. D. WHITFIELD, *Ground testing and simulation*, Aeronaut and Astronaut, nr 6, 1974 r.
13. H. SIMMONS, *Filling the Reynolds number gap*. Astronaut and Aeronaut, nr 6, 1976.
- 13a. W. R. SEARS, *Self-correcting wind tunnels*, The Aeronaut. Jour., Vol. 78, Nr 758/759, 1974 r.
14. R. HILS, *The need for a large transonic wind tunnel in Europe: a summary of the report of on AGARD working group (La WS)*, AIAA Pap. Nr 630, 1974 r. tłumaczenie w Jęz. rosyjskim Aviastrojenie Nr 1, 1975 r.
15. C. W. PETERSON, *A survey of the utilisation aspects of advanced flow-field diagnostic techniques*, AIAA Paper nr 78 - 796, 1978 r.
16. R. SMELT, *The role of wind tunnels in future aircraft devolpment*, The Aeronautic. Jour. Vol. 82, Nr 815, 1978 r.
17. M. J. GOODYER, S. W. D. WOLF, *Development of a self- streamlining flexible walled transonic test section*, AIAA Jour, Vol. 20, Nr 2, 1982 r.
18. R. L. PARKER JR., W. L. SICLES, *Application of addaptive wall techniques in a three dimensional wind tunnel with variable wall porosity*, Jour. of Aircraft, Vol. 18 March 1981 r.
19. T. R. REED, T. C. PAPE, J. M. COOKSEY, *Calibration of transonic and supersonic wind tunnels*, NASA Contractor Report 2920, 1977 r.
20. R. C. DIXON, *High Reynolds number investigation of an ONERA model of the NACA 0012 airfoil section*, NAE Raport LTR-MA-5 x 5/0069, 1975 r.
21. W. KANIA, J. SKOWROŃSKI, *Analiza porównawcza wyników badań modeli profili NACA 0012 w transonicznym tunelu N-3 z uwzględnieniem interferencji ścian (w przygotowaniu)*.
22. N. GREGORY, P. G. WILBY, *N. P. L 9615 and NACA 0012 a comparison of aerodynamic data ARC CP nr. 1261*, 1973 r.

23. M. PINDZOLA, C. F. LO, *Boundary interference at subsonic speeds in wind tunnels with ventilated walls*, AEDC-TR-69-17, 1969 r.
24. Ph. PASSON-QUINTON, X. VAUCHERET, *Prevision des caracteristiques aerodynamiques dun avion dapres coparaison des resultats sur maquette etalon dand div. grand souffleries transsoniq*, ONERA TP 1978 - 22.
25. W. KANIA, *Wpływ wielkości modelu i liczby Reynoldsa na charakterystyki aerodynamiczne modelu wzorcowego AGARD B uzyskane w tunelu N-3*, Sprawozdanie Instytutu Lotnictwa nr 15/BA/78, 1978 r.
26. A. RADOŃ, I. OSIPIAK-CHMIELEWSKA, D. KONOPSKA, *System powymiarowo-informacyjny tunelu aerodynamicznego N-3 (SPITA N3)*, Sprawozdanie Instytutu Lotnictwa, 1978 r.
27. A. GODLEWSKI, D. KONOPSKA, *System zbierania danych z rozkładu ciśnienia na profilu przy użyciu przelącznika ciśnienia typu SCANIVALVE w tunelu N-3 oraz minikomputera TPA-70*. Sprawozdanie wew. Instytutu Lotnictwa.
28. K. CZYŻEWSKI, *Program obliczeniowo-wykreślający na przeiworzenie badań ciśnieniowych z przelącznikiem ciśnienia SCANIVALVE w tunelu N-3*, Opracowanie wew. PDP, 1982 r.
29. W. KANIA, M. BUCZEK, *Badanie wpływu profilu z interseptorem w zakresie liczb Macha od 0,5 do 2,3*, Prace Instytutu Lotnictwa, Nr. 54, 1973 r.
30. W. KANIA, *Transonic flow over on airfoil with spoiler*, Rozprawy Inżynierskie, Vol. 23, Nr 4, 1975 r.
31. W. KANIA, *Badania naddźwiękowego opływu interseptora*, Prace Instytutu Lotnictwa, Nr 86, 1981 r.
32. W. KANIA, *Study of the effects of gap suction on turbulent separated flows at superconic speeds*, Rozprawy Inżynierskie, Vol. 23, Nr. 3, 1975 r.
33. A. ŁASKOWSKI, *Badania modelu samolotu o kątach skosu skrzydła 16° i 70°*, Sprawozdanie Instytutu Lotnictwa, Nr 43/TA/72, 1972 r.
34. M. BUCZEK, A. ŁASKOWSKI, *Badania schematycznego modelu samolotu o zmiennym skosie skrzydeł*, Sprawozdanie wew. Instytutu Lotnictwa, Nr 42/PA/73, 1973 r.
35. W. KANIA, A. KRZYSIAK, *Eksperymentalne badania pod i przydźwiękowego opływu skrzydła*, Prace Instytutu Lotnictwa, Nr. 85, 1981 r.
36. W. KANIA, *Turbulentne badania granicy początku buffetingu skrzydła w pod i okolodźwiękowym zakresie prędkości*, Prace Instytutu Lotnictwa, nr 87, 1981 r.
37. J. SKOWROŃSKI, *Eksperymentalne badania profili NACA 23012M, NACA 23012 oraz NACA 0012 w zakresie dużych prędkości*, Sprawozdanie Instytutu Lotnictwa nr 18/RA/79, 1979 r.
38. A. ŁASKOWSKI, W. KANIA, *Badania charakterystyk aerodynamicznych profilu NACA 64009 w zakresie liczb Macha 0,3 - 0,95*, Sprawozdanie Instytutu Lotnictwa, Nr 29/RA/78, 1978 r.
39. J. SKOWROŃSKI, *Badania eksperymentalne profilu NACA 64-210 w zakresie liczb Macha 0,3-0,95*, Sprawozdanie Instytutu Lotnictwa, nr 24/BA/78, 1978 r.
40. W. KANIA, *Badania aerodynamiczne modelu profilu NACA 16506 w tunelu N-3 w zakresie dużych prędkości*, Sprawozdanie Instytut Lotnictwa, nr 6/RA/82/C, 1982 r.
41. J. SKOWROŃSKI, *Wpływ ciężewy i kąta wychylenia trymera na charakterystyki aerodynamiczne profilu NACA 23012M*, Sprawozdanie Instytutu Lotnictwa, nr 9/RA/82/B.
42. A. KRZYSIAK, *Badanie wpływu liczby Macha na momenty zawiasowe steru wysokości w tunelu N-3*. Prace Instytutu Lotnictwa (w druku).
43. W. KANIA, K. CZYŻEWSKI, M. WITKOWSKA, *Konstrukcja numeryczna nowych ulepszonych profili śmigłowcowych*, Sprawozdanie Instytutu Lotnictwa, nr 5/RA/81/B, 1981 r.
44. W. KANIA, *Badania charakterystyk nowych profili śmigłowcowych ILH w tunelu N-3 w zakresie liczb Macha $M = 0,3 - 0,9$* , Sprawozdanie Instytutu Lotnictwa nr 8/RA/82/B, 1983.
45. W. KANIA, P. SŁAWIŃSKI, B. ZWIERZCHOWSKA, *Badania aerodynamiczne modelu profilu CNPSL-1 w tunelu N-3 i ocena jego charakterystyk w świetle śmigłowcowych profili konwencjonalnych*, Sprawozdanie Instytutu Lotnictwa, nr 7/RA/82/C, 1982 r.
46. W. KANIA, *Badanie charakterystyk aerodynamicznych modelu rakiety Meteor-2H w tunelu N-2*, Sprawozdanie Instytutu Lotnictwa 12/TA/68.
47. M. BUCZEK, *Badania zjawisk rozdzielania modelu rakiety Meteor 3*. Sprawozdanie Instytutu Lotnictwa nr 27/TA/69, 1969 r.
48. M. BUCZEK, E. SNIATOWSKI, *Badania charakterystyk aerodynamicznych modelu rakiety Meteor 2H w tunelu N-3*, Sprawozdanie Instytutu Lotnictwa, nr 15/RA/69, 1969 r.

49. M. BUCZEK, A. GRYGA, W. KANIA, *Badania położenia punktu krytycznego kuli i kul obciążonych oraz wizualizacja linii krytycznej*, Sprawozdanie Instytutu Lotnictwa, nr 26/TA969, 1969 r.
50. J. STASIAK, *Badania doświadczalne położenia linii krytycznej na tępych ciałach o ostrej krawędzi*, Prace Instytutu Lotnictwa, nr 44, 1970 r.
51. A. GRYGA, W. KANIA, *Eksperymentalna metoda wyznaczenia linii krytycznej w przepływie za odsuniętą falą uderzeniową*, Prace Instytutu Lotnictwa, nr 45, 1971 r.
52. M. GAŁĄSKA, *Dynamiczne efekty uzyskiwane przy prostopadłym wdmuchu dodatkowego strumienia małej mocy w stożkowy strumień naddźwiękowy*, I Krajowa Konferencja Mechaniki Cieczy i Gazów, 1974 r.
53. M. GAŁĄSKA, J. KAMIŃSKI, *Wpływ parametrów naddźwiękowego przerzutnika strumieniowego na jego pracę*, Naukowe problemy konstrukcji i technicznej eksploatacji sprzętu lotniczego. II Konferencja 1977, WAT wewn. 621/77.
54. M. GAŁĄSKA, K. RUTKOWSKI, *Ocena efektywności strumieniowego sterowania wektorem ciągu przez zastosowanie pneumatycznej komory oddziaływań*, II Konf. Nauk-Tech. ITL WAT, 1974.
55. Z. DŻYGADŁO, J. KACZMARCZYK, *Analiza parametrów przepływu w komorze pomiarowej naddźwiękowego tunelu aerodynamicznego z uwzględnieniem zaburzeń swobodnego strumienia*, III Konf. Nauk. Techn. ITL WAT, 1977, *Badania struktury przepływu w komorze pomiarowej naddźwiękowego tunelu aerodynamicznego ze strumieniem swobodnym*, III Konf. Mechaniki Cieczy i Gazów, 1978 r.
56. W. SOBIERAJ, *Metodyka badań aerodynamicznych profili kierowniczych turbin z uwzględnieniem ściśliwości*, Materiały III Szkoły Letniej Mech. Płyn. Metody doświadczalne w mechanice płynów, 1981 r.
57. Z. DŻYGADŁO, J. KACZMARCZYK, W. SOBIERAJ, *Wpływ ściśliwości na straty przepływowe w palisadzie profili kierowniczych*, IV Krajowa Konferencja Mech. Cieczy i Gazów, 1980 r.
58. P. DOERFFER, *Zmniejszenie intensywności fal uderzeniowych poprzez modyfikację kształtu krawędzi splywowej łopatki transonicznej*, III. Krajowa Konf. Mech. Cieczy i Gazów, 1978 r.
59. P. DOERFFER, *Badania eksperymentalne splywu z płytki o zmiennym kształcie krawędzi splywowej dwóch strumieni naddźwiękowych o różnych prędkościach*, IV. Konf. Mech. Cieczy i Gazów, 1980 r.
60. A. TARNOGRODZKI, E. ŁUCZYWEK, *Badania doświadczalne opływu naddźwiękowego ciała o dwu prostopadłych płaszczyznach symetrii*, Prace IPPT PAN nr 5, 1968 r.
61. Z. A. WALENTA, T. T. RUDOWSKA, *Rura uderzeniowa, Pomiar i wnioski*, Rozpr. Inżynierskie, Nr 3, 1964 r.
62. E. M. LEŚKIEWICZ, M. PEŁCZYŃSKA, Z. A. WALENTA, *The structure of the shock wave moving along a plane wall in a stationary gas*, Fluid Dynamics Transactions, Vol. 6 part. II, 1971 r.
63. Z. WALENTA, *Regular reflection of the plane shock wave from an inclined wall*, Arch. Mech. Stos., Nr 5, 1974 r.
64. Z. A. WALENTA, A. S. GMURCZYK, W. W. HARASIMOWICZ, E. M. LEŚKIEWICZ, M. TARCZYŃSKI, J. ORZEŃSKI, K. SALGUT, *Rura uderzeniowa ZMCiG*, Prace IPPT PAN, nr 47, 1976 r.
65. A. S. GMURCZYK, M. TARCZYŃSKI, Z. A. WALENTA, *Struktura fali uderzeniowej w mieszaninie gazów szlachetnych*, Prace IPPT PAN, Nr 60 1978.
66. A. S. GMURCZYK, *Eksperymentalne badania struktury fali uderzeniowej w mieszaninie wodór-ksenon*, IV Krajowa Konferencja Mechaniki Cieczy i Gazów.
67. J. KRZYŻANOWSKI, *Zakład Dynamiki Gazów w zbiorze: „Działalność naukowa Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w latach 1973-1975*, PWN, 1978 r.
68. P. DOEFFER, *Analiza wpływu zmiany wykładnika izentropii czynnika na obraz przepływu w naddźwiękowej części dyszy de Laveła*, Zeszyty naukowe IMP PAN, nr 28/916/77, 1977 r.
69. Z. DŻYGADŁO, J. KACZMARCZYK, W. SOBIERAJ, *Wpływ ściśliwości na straty przepływu w palisadzie profili kierowniczych*, IV Konf. Mech. Cieczy i Gazów 1980 r.
70. J. LEYNAERT, *Cascade test methods in wind tunnel at ONERA*, ONERA T. P. nr 1977-72E, 1977 r.
71. M. BUCZEK, Z. DROPIEWSKA, *Badania możliwości rozszerzania zakresów pomiarowych w tunelu N-3 w przepływie pod- i okołodźwiękowym w aspekcie zróżnicowania liczb Reynoldsa*, Sprawozdanie Instytutu Lotnictwa, nr 20/BA/A/76, 1976 r.

OCENA KRAJOWYCH BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH Z ZAKRESU TURBULENCJI ORAZ AERODYNAMIKI DUŻYCH PRĘDKOŚCI

J. S. OSTROWSKI

Politechnika Warszawska

(koreferat artykułów dra S. Drobnaka i dra W. Kani, — uwagi ogólnej)

Łączne ustosunkowanie się do rozwoju badań w zakresie turbulencji i aerodynamiki dużych prędkości nie jest możliwe. Jedyną cechą wspólną łączącą te ukierunkowania mechaniki płynów jest właściwie tylko wspólny okres intensywnego ich rozwoju (od lat trzydziestych bieżącego stulecia). Turbulencja i zjawiska turbulencji ingerują wprawdzie pośrednio w zjawiska występujące w przepływach z dużymi prędkościami i są źródłem różnych trudności w analizie i badaniach tych zjawisk, jednak metodyka badań, charakter badań, związany ze specyfiką przepływów w tych dwóch ukierunkowaniach, różni się w sposób zasadniczy. Badania turbulentne dotyczą struktury przepływów i zjawisk związanych z wewnętrznymi procesami zachodzącymi w wyniku zaburzeń pola prędkości. Badania z zakresu aerodynamiki dużych prędkości obejmują analizę zjawisk procesów ciepłno-przepływowych, uwzględniającą zmianę wielkości parametrów uśrednionych. Przepływy nieustalone i pulsacje występujące w tych przepływach różni się zasadniczo skalą od pulsacji turbulentnych.

Sprawą drugą jest sprawa doboru odpowiedniej koncepcji opracowania koreferatu. Układ treści koreferatu jest inspirowany przez dobór treści referatu, sposób prezentacji przez referenta materiału i ukierunkowanie dyskusji. Jest on ponadto uwarunkowany poglądami autorów obu prezentacji. Przy wszelkich ocenach sprawą istotną jest określenie i omówienie układu odniesienia. W ocenie dorobku naukowego jest istotne nakreślenie tła, na jakim ten dorobek się ocenia. Dla oceny działalności badawczej w określonej problematyce w skali krajowej tłem może być tylko skala osiągnięć światowych. Obaj Autorzy referatów przeglądowych mniej lub bardziej wyraźnie takie tło szkicują, choć nie są konsekwentni w wyciągnięciu wniosków. Rolę koreferenta było zatem wyciągnięcie i przedyskutowanie wniosków oraz wyraźniejsze zarysowanie tła, w szczególności dokonanie pewnych uzupełnień w naświetleniu i odpowiednim zaakcentowaniu spraw istotnych dla rozwoju badań w dyskutowanych ukierunkowaniach.

1. Omówienie badań w zakresie turbulencji

Turbulencja jest zjawiskiem budzącym ciągle wiele kontrowersji co do jej istoty, możliwości poznawczych, potrzeby i metodologii badań oraz prawdopodobieństwa uzyskania

poprawnych zamkniętych rozwiązań. Nikt nie neguje ważności zjawiska turbulencji w przebiegu procesów w technice i w naturze. Ogromna intensyfikacja procesów transportu w wyniku turbulizacji przepływów ma nie tylko zasadniczy wpływ, ale wręcz umożliwia rozwiązanie techniczne urządzeń dla procesów wymiany ciepła w skali możliwej do stosowania w praktyce, umożliwia realizację niesłychanie ważnych w technice procesów spalania. Wbrew ogólnym poglądom właśnie dzięki tylko turbulencji możemy uzyskać duże siły nośne na powierzchniach nośnych i mały opór konturów opływowych, umożliwiając w ogóle start i lądowanie samolotów oraz uzyskiwanie dużych sprawności maszyn przepływowych. Turbulencja odgrywa zasadniczą rolę wszędzie tam, gdzie w technice i w naturze spotykamy się z przepływami gazów i cieczy, tzn. praktycznie wszędzie.

Niekorzystnym aspektem turbulencji jest jedynie jej wpływ na zwiększenie oporów tarcia (na przykład przy przepływach w instalacjach) lecz w ogólnym bilansie zysków i strat tego typu straty są pomijalnie małe, w stosunku do zysków, jakie turbulizacja przepływów przynosi. Paradoksem jest tu fakt, że mając do czynienia z tak ważnym czynnikiem wpływającym na przebieg zjawisk w naturze i w różnych procesach stosowanych w technice posiadamy bardzo ograniczone możliwości wpływania przez sterowanie strukturą turbulencji na intensyfikację tych procesów. Łatwo możemy turbulizować przepływy w różnych warunkach, i z większymi kłopotami, tłumić pulsacje, nie potrafimy natomiast stworzyć takich struktur i tak sterować procesami turbulizacji aby wymuszać pożądane efekty w zastosowaniach praktycznych.

Jedynym sukcesem w tym względzie jest możliwość laminaryzacji opływów brył wymuszana ujemnym gradientem ciśnienia. W pozostałych przypadkach, jeżeli przepływ uległ już pełnej turbulizacji nawet duże zmiany intensywności turbulencji niewiele wpływają na jej aplikacyjne efekty.

Lepiej z tymi sprawami radzi sobie natura. Ryby, ptaki i owady wytworzyły mechanizmy zaburzeń zmniejszające tarcie i opór i zwiększające siłę nośną. Do tej pory jednak nie udało się w sposób wystarczający wyjaśnić mechanizmów tych procesów ani tym bardziej naśladować ich w technice mimo ciągle podejmowanych prób. Ten aspekt sprawy (trudność sterowania procesów pod kątem aplikacyjnym) jest bardzo istotny dla oceny efektów i potrzeby działalności badawczej w tym zakresie.

Rozwój działalności badawczej miał w Polsce dość specyficzny charakter. Problematyka turbulencji nie znalazła się w programach naukowych stymulowanych centralnie lecz badania na ten temat wynikały z bezpośredniego zainteresowania kilku osób działających w różnych ośrodkach krajowych. Nie bazowały one ponadto na problematyce wymiany masy i ciepła, jak to stwierdza raport przedkongresowy PAN, ponieważ nikt w kraju nie prowadził badań struktury turbulencjonalnej przepływów pod tym kątem. Jedyną pozycją z tego zakresu jest literatura [1], realizowana za granicą, a związana z generacją struktur zwiększających konwekcję poprzeczną przy przepływach w szczelinie.

Specyfikę badań prowadzonych w Polsce było nie badanie procesów turbulencji jako takich, ale pomiary wielkości, na ogół prostych charakterystyk turbulentnych w różnego typu przepływach. Różnorodność tła przepływowego była właśnie cechą szczególną, określającą typ charakteru badań wykonywanych w kraju i różnicującą ukierunkowania działalności poszczególnych ośrodków.

Początkiem badań bliżej związanych z problematyką turbulencji w kraju były prace

zainspirowane budową tunelu niskiej turbulencji w Katedrze Aerodynamiki Politechniki Warszawskiej w początkach lat sześćdziesiątych. Istniała już wówczas w niektórych instytucjach aparatura specjalistyczna do pomiarów turbulencji, lecz nie były i nie zostały później uwidocznione w skali krajowej prace na temat turbulencji z tego okresu. Budowę tunelu niskiej turbulencji podjęto następnie w Instytucie Lotnictwa w Warszawie oraz zainteresowano się problematyką turbulencji w odniesieniu do przepływów palisadowych w Instytucie Techniki Ciepłej Politechniki Częstochowskiej. Podkreślić trzeba, że badania w Katedrze Aerodynamiki ukierunkowane były głównie na sprawy opływów profilów laminarnych, w szczególności generację turbulencji w strefach przejścia, a nie jak to sugeruje referat S. Drobniaka na sprawy modelowania przepływów atmosferycznych.

Z uwagi na brak kontaktów pomiędzy ośrodkami istniejących w latach sześćdziesiątych nie można scharakteryzować w sposób poprawny rozwoju tematyki prowadzonych wówczas prac, można jednak przyjąć, że miały one charakter wstępnych kompilacyjnych opracowań i próbnych pomiarów. Szersze na ten temat informacje posiadamy z okresu organizacji ogólnokrajowych konferencji Mechaniki Płynów, które zainicjowała w 1974 roku I Konferencja pod hasłem „TURBULENCJA” w Częstochowie.

W tej sytuacji przyjęty przez autora opracowania do oceny materiał obejmujący głównie publikacje materiałów konferencyjnych wydaje się słuszny. Zwrócić jednak należy uwagę na fakt, że nie wszystkie ogłaszane w streszczeniach referaty były przedstawiane na konferencjach, np. referat pozycja [19], wymieniony w opracowaniu, również nie zawsze tytuł pracy oddawał jej treść. Ponadto referaty wygłaszane na konferencjach nie były kwalifikowane, stąd liczba podanych publikacji nie określa istotnego potencjału działalności badawczej i jej poziomu. Również wiele prac wymienionych w spisie literatury poza oceną pewnych zjawisk występujących w przepływach burzliwych nie zawiera informacji związanych bezpośrednio z badaniami turbulencji.

Stanowi w pewnym sensie osobliwość fakt, że zdecydowana większość prac ma charakter eksperymentalny. Baza badawcza, w szczególności wyposażenie krajowe do badań turbulencji jest daleko niewystarczające i wydawać by się mogło, że w tej sytuacji, jak to bywa w innych ukierunkowaniach mechaniki płynów, rozwiną się w większym stopniu badania teoretyczne. Powodem tego, że tak się nie stało był z jednej strony brak osób przygotowanych odpowiednio do takich badań. Nie bez wpływu był również fakt, że rokowania na uzyskanie znaczących wyników były i są nadal bardzo niske. Natomiast możliwość ukierunkowania badań eksperymentalnych przez zmianę tła przepływu stwarzało możliwość względnie łatwego uzyskiwania oryginalnych przesłanek.

Autor przeglądu upatruje, a uważam to za słuszne, że głównym, podstawowym ukierunkowaniem w zakresie badań turbulentnych powinny być badania struktur koherentnych oraz usiłowania zamknięcia równań. Sprawa pierwsza stanowi istotny postęp w kierunku bliższego zrozumienia mechanizmów transportu, a więc sprawy najważniejszej z punktu widzenia zastosowań. Drugie ukierunkowanie, może doprowadzić do racjonalnego zamknięcia tych równań dla niektórych przypadków przepływu. Pominięto natomiast dwa bardzo istotne problemy, których poznanie również powinno wytyczać kierunki przyszłych badań, zarówno w aspekcie prac eksperymentalnych, jak i teoretycznych. Chodzi mianowicie o kryteria modelowania struktur turbulencji oraz o rozwój metod statystycznych, jedynych za pomocą których można w pełni opisać i wyjaśnić proces stochas-

tyczny, jakim jest turbulencja. Jednak we wszystkich tych kierunkach, badania krajowe nie rokują powodzenia tak w sensie osiągnięcia znaczących wyników w zakresie badań eksperymentalnych, jak i opracowań teoretycznych, a to z uwagi na szczupłość bazy badawczej i kadry naukowej.

Te ograniczenia potencjału krajowego nakazują zwrócenie uwagi na inne aspekty sprawy uzasadniające prowadzenie badań mimo wszystkich aktualnych trudności. Chodzi mianowicie o pogłębienie i upowszechnienie wiedzy o zjawiskach turbulencji w środowiskach zajmujących się problematyką przepływową. Podnieść to niewątpliwie kwalifikacje i przyczyni się do lepszego zrozumienia zjawisk przepływowych wśród osób zajmujących się badaniami przepływów. Będzie to też miało niewątpliwą wpływ na prawidłowość rozwiązań aplikacyjnych. Drugą sprawą stanowiącą również istotną motywację jest potrzeba utrzymania bezpośredniego kontaktu z osiągnięciami nauki światowej w tej dziedzinie, czego nie da się osiągnąć bez prowadzenia własnych prac badawczych.

Już realizacja tych dwóch celów wymaga podtrzymania działalności krajowych ośrodków badawczych przez dostarczenie środków i zapewnienie stażów zagranicznych dla pracowników tych ośrodków. Wszelkie znaczące osiągnięcia, które mogą pojawić się przy realizacji tych celów będą mile widziane. Trzeba bowiem otwarcie przyznać, że aplikacyjność większości krajowych opracowań, tak często podkreślana przez autorów, jest sprawą co najmniej wątpliwą, bowiem ani badania modelowe przepływów, ani założenia przyjmowane odnośnie struktury nie odpowiadają przepływowi modelowemu. Ponadto wyniki badań, które w szeregu przypadkach stanowiąc mogą liczące się osiągnięcia autorów nie wnoszą istotnego wkładu w ogólny postęp wiedzy w tej dziedzinie.

Do omawianej przez Autora tematyki badawczej poszczególnych ośrodków krajowych chciałbym wnieść kilka uwag. W przypadku ośrodka w Politechnice Warszawskiej, nie wszystkie prace z zakresu inżynierii wiatru są bezpośrednio związane z turbulencją. Pominięto natomiast znacznie bardziej istotny dla tego ośrodka ze względów aplikacyjnych problem stateczności warstwy na profilach lotniczych. Na wymienienie i szersze omówienie zasłużył Ośrodek Poznański. W szczególności za podjęcie badań związanych z wymianą ciepła. Natomiast nie uzasadnione jest wymienienie Ośrodka Białostockiego. Sposób realizacji, jedynej zresztą wymienionej pracy (lit. 62) tego Ośrodka budzi poważne zastrzeżenia co do poprawności prowadzonych badań i ich interpretacji. Brak dobrego zrozumienia zjawisk przepływowych jest również widoczny w szeregu opracowań pochodzących z innych ośrodków. Wynika to zapewne z faktu, że wiele ośrodków, zajmujących się problemami turbulencji nie miało tradycji badań z zakresu mechaniki płynów, jak również z faktu, że sprawami turbulencji zajęły się osoby innych specjalności.

Na tle działalności krajowej uderza bardzo mała liczba, wśród prezentowanych prac wykonanych w Instytucie Lotnictwa, którego baza badawcza i wyposażenie niewspółmiernie przewyższa skromne i przestarzałe zaplecze innych ośrodków.

W zakresie metodologii pomiarów i konstrukcji sprzętu dorobek krajowy jest jeszcze skromniejszy. Międzynarodową pozycję osiągnęła grupa konstruktorów z Instytutu Mechaniki Górotworu AGH, lecz działalność tej grupy jest głównie „eksportowa” i nie widoczna na krajowym „ryнку”. W innych ośrodkach działalność ta uwzględnia własne potrzeby, a dopracowania metodologiczne służą własnym badaniom.

Pisząc o sprawach aparatury nie sposób nie podkreślić krytycznej sytuacji istniejącej

w tym względzie w skali ogólnokrajowej. Istniał wprawdzie okres, w którym dokonywano dość licznych zakupów, stymulowanych również i modą — bowiem w aparaturę do badań turbulencji zaopatrywały się liczne ośrodki, głównie przemysłowe, które nie wykazały w tym względzie żadnej działalności. Okres ten jest dość odległy i krajowe ośrodki stoją w sytuacji grożącej zatrzymaniem badań z powodu braku aparatury i części zamiennych. Nie wspominam tu zresztą o brakach, jakie istniały zawsze w wyposażeniu w aparaturę umożliwiającą odpowiednią obróbkę sygnałów.

Krytyczna ocena działalności badawczej przedstawiona w koreferacie wynika z odniesienia wyników działalności krajowej do osiągnięć światowych w tym zakresie. Trzeba bowiem zdawać sobie sprawę z dystansu jaki nas dzieli. W tym jednak przypadku ta wielkość dystansu nie jest równoznaczna opóźnieniu naukowemu i technicznemu, jest to po prostu różnica w potencjale i możliwościach badawczych, nie większa zresztą w tej problematyce, niż w wielu innych ukierunkowaniach naukowych. Istnieje bowiem, omówiona na wstępie specyfika badań w zakresie turbulencji. Nie rokują one mianowicie szybkiego dojścia do wyników stanowiących odkrycia naukowe i stwarzających możliwość efektywnego wykorzystania ich w technice.

Natomiast niewątpliwą jest rzeczą, że trzeba bieżące badania i osiągnięcia śledzić tak dla zachowania kontaktu z nauką światową, jak i w celu pogłębiania znajomości ogólnych zjawisk przepływowo-wych wśród środowisk krajowych.

Autor przeglądu przedstawił obszerną literaturę. Opuścił jednak kilka prac, zasługujących na wymienienie, które zamieściłem w spisie literatury na końcu niniejszego opracowania.

2. Omówienie badań w zakresie aerodynamiki dużych prędkości

Omówieniu działalności badawczej zakresu aerodynamiki dużych prędkości nadał Autor opracowania (dr W. Kania) nieco inny układ, niż uczyniono to w przeglądzie prac z zakresu turbulencji. Dużą część opracowania stanowi szczegółowe referowanie technik badawczych oraz omawianie poszczególnych prac i dyskusja ich wyników. W większości są to prace wykonywane w Instytucie Lotnictwa. Dobór tematyki prac nie stanowi jednak uporządkowanego przeglądu dającego czytelnikowi możliwość śledzenia problematyki badań w ogólnym aspekcie fenomenologicznym bądź aplikacyjnym. Bardziej przeglądowy charakter ma wprowadzenie, oraz ta część artykułu, która przedstawia działalność ośrodków poza rodzimym ośrodkiem Autora (Instytut Lotnictwa). W referacie ograniczył się Autor do badań wykonywanych w tunelach i rurach uderzeniowych, pominął całkowicie problematykę badań strumieni i hałasu aerodynamicznego realizowaną w Instytucie Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej Politechniki Warszawskiej oraz badania opływu brył tępych związane z dość szeroko prowadzonymi pracami teoretycznymi w tymże samym Instytucie.

Brak jest również w artykule informacji o rozwoju tematyki i ukierunkowaniu w czasie działalności badawczej w zakresie aerodynamiki dużych prędkości. By uzupełnić ten brak pozwolę sobie scharakteryzować główne kierunki tego rozwoju. Ułatwi to ocenę działalności krajowej na tle osiągnięć światowych. Z perspektywy czasu i w świetle osiągniętych

wyników wyróżnić można trzy okresy, w których badania w zakresie dużych prędkości ukierunkowane były na osiągnięcie pewnych głównych celów.

Pierwszym takim celem było pokonanie bariery dźwięku i trudności związanych z przejściem przez strefę przepływów mieszanych. Cel drugi stanowiło opracowanie aerodynamiki samolotów wysmukłych (slender) i badania związane z rozwojem techniki raketowej (te dwa cele zostały już w swoich głównych założeniach zrealizowane). Okres trzeci — obecny — jest okresem badań nad rozwojem nowych geometrii układów (za przedstawiciela tego układu może być uważany płat typu „CARRET”) generujących siłę nośną w wyniku wymuszenia odpowiednich układów fal ciśnieniowych i rozrzedzeniowych. Dużo uwagi poświęca się również rozwojowi konstrukcji silników przelotowych z poddźwiękowymi i naddźwiękowymi komorami spalania (RAM-JET, SCRAM-JET).

W okresie pierwszym badania obejmowały głównie zjawiska falowe w przepływach mieszanych. Szczególną trudność sprawiało tu odejście od klasycznej aerodynamiki płatów, w której dominowała dwuwymiarowość (zasada płaskich przekrojów) i konieczność uwzględnienia efektów trójwymiarowych (skos płata i zmniejszenie wydłużenia) co komplikowało znacznie badania i kontrolę zjawisk. Badania nad poprawą właściwości aerodynamicznych samolotu w tym zakresie lotu trwają jeszcze obecnie, lecz główny postęp dokonał się już trzydzieści lat temu. Przykładem ogromu prac i kosztów jakie badania w tym zakresie pochłonęły mogą być prace nad ewolucją tylko jednego typu samolotu — F-86. W ciągu niecałych dziesięciu lat skonstruowano i wyprodukowano około 20 wersji począwszy od znanego z okresu II wojny światowej MUSTANGA przez SABRE'a do F-100. Poszczególne prototypy posiadały skrzydła różniące się geometrią obrysu, profili i mechanizacją. Wynikiem tych prac było zwiększenie krytycznej liczby Macha z 0.72 na 0.92, przekroczenie bariery dźwięku, przeszło dwukrotnie zmniejszenie współczynnika oporu falowego i ogromna poprawa zdolności manewrowej samolotów.

Problem główny drugiego okresu, to sprawa zapewnienia stateczności smukłych samolotów naddźwiękowych oraz poprawa właściwości aerodynamicznych tych samolotów przez dopracowanie różnych elementów geometrii (skrzydła nastawne, skrzydła hybrydowe, układ kaczka — „canard”). Przykładem może być tu samolot „CONCORDE” oraz liczne konstrukcje samolotów wojskowych.

Jest sprawą interesującą, że poprawę właściwości aerodynamicznych w zakresie naddźwiękowym uzyskiwano bardzo często przez wymuszanie i odpowiednie sterowanie zjawisk przepływu w obszarach poddźwiękowych. Do badań tego zakresu zaliczyć można jeszcze badania związane z projektowaniem aerodynamicznym raket, ze szczególnym ukierunkowaniem na aerodynamikę gazów rozrzedzonych i problematykę związaną z nagrzewaniem i chłodzeniem.

Podany powyżej przykład produkcji dwudziestu kolejnych wersji samolotów w jednej tylko serii w krótkim okresie czasu (10 lat) wskazuje na dużą trudność zdobywania informacji aplikacyjnych z badań modelowych i obliczeń teoretycznych w tej dziedzinie. Jest natomiast dowodem na efektywność badań prototypowych w zdobywaniu właśnie tych informacji.

Poruszam tę sprawę, gdyż Autor przeglądu dość szeroko dyskutując rozwój i możliwości badań eksperymentalnych nie wspomina o konieczności badań prototypowych dopracowaniu modelowych rozwiązań w oparciu o te badania. Istniały w przeszłości

i istnieją dotychczas niepokonane trudności spełnienia kryterium podobieństwa w badaniach modelowych. I dopiero badania prototypu w locie dostarczyć mogą wiarygodnych informacji, które poza oceną samego rozwiązania służyć mogą do porównań i analiz wyników badań tunelowych i obliczeń teoretycznych. Z kolei wyniki takich analiz umożliwiają bardziej prawidłowe wnioskowanie przy badaniach kolejnych wersji. Śledząc rozwój konstrukcji lotniczych dostrzeżemy wiele przykładów dopracowania nowych rozwiązań w oparciu o badania w locie.

Wymienione przez Autora obszary aplikacji badań eksperymentalnych nie akcentują właściwych proporcji potrzeb. Podany zresztą podział na wymienione trzy grupy jest sztuczny, gdyż postęp w poznaniu ogólnym nie wynika z określonego ukierunkowania badań, jak również weryfikacja opracowań teoretycznych nie następuje wyłącznie w wyniku prowadzonych pod tym kątem badań doświadczalnych. Badania w zakresie dużych prędkości, a zwłaszcza badania dla zastosowań lotniczych, obejmują analizę zjawisk, w których z uwagi na charakterystyczną geometrię konturów opływanych występują różnego rodzaju złożone oddziaływania przepływów w obszarach naddźwiękowych i poddźwiękowych. Bardzo duża czułość tych zjawisk na zmianę czynników kształtujących przepływ jak i na zmiany zakresu prędkości, wymaga każdorazowo prowadzenia bardzo szczegółowych badań każdego przypadku, bowiem bardzo małe zmiany tych czynników spowodować mogą bardzo duże zmiany ilościowe i jakościowe badanego zjawiska. I właśnie te badania szczegółowe stanowią główne źródło informacji dla ogólniejszych opracowań koncepcyjnych i teoretycznych.

Z drugiej strony konieczność dopracowań szczegółowych zmniejsza możliwość zastosowań teoretycznych uwzględniających na ogół wpływ tylko głównych parametrów kształtujących przepływ.

Jako przykład można tu wymienić skrzydła hybrydowe. Uzyskanie poprawnych właściwości aerodynamicznych układu takiego skrzydła zależy od dopracowania elementów generujących wiry krawędziowe i czynników zapewniających stateczność i trwałość tych wirów w określonym zakresie zmian warunków lotu. Elementy te stanowią ok. 10% powierzchni płata lecz dzięki ich dopracowaniu można zwiększyć maksymalną siłę nośną o 50%, poprawić znacznie stateczność i inne właściwości samolotu. Podkreślić trzeba, że zmiany parametrów płata podstawowego (90% powierzchni) mają w tym układzie mniejszy wpływ niż elementów kształtujących wir. Badania tych elementów (leading edge extension-LEX) zainicjowane przez firmę Northrop Corporation są dobrym przykładem podkreślonej powyżej potrzeby badań prototypowych. „LEX” zastosowany w formie szczątkowej na samolocie F-5A w roku 1960 przeszedł szczegółowe badania na samolocie YF-17 w latach 1972 - 75 i znalazł pełne zastosowanie na samolocie F-18 w 1975 roku.

Innym przykładem jest zastosowanie siedmiu kolejnych wersji skrzydła samolotu F-4, w których poprawę właściwości uzyskiwano w wyniku dopracowania poszczególnych elementów geometrii skrzydła i urządzeń nośnych.

Poświęcam tym sprawom tak dużo miejsca, gdyż istnieje ogólne przekonanie, ukształtowane zresztą o rezultaty badań w zakresie poddźwiękowym, że zmiany głównych parametrów geometrycznych płata jednoznacznie określają jego właściwości aerodynamiczne i że właściwości profilu odgrywają podstawową rolę w osiągnięciu dużej doskonałości skrzydeł.

Z drugiej strony to dość szerokie naszkicowanie problematyki badawczej i przedstawione przykłady tworzą tło odniesienia, na którym to tle łatwo ocenić można przytoczone przez Autora opracowania przykładów jak również poziom i możliwości potencjalne w zakresie badań własnych. Ocena ta może być niemal automatyczna. Wystarczy stwierdzić, że do tej pory we własnych opracowaniach konstrukcyjnych nie zdecydowano się odejść od klasycznych układów skrzydeł prostych i zastosowań klasycznych profilów NACA, co umieszcza tego rodzaju badania w sferze badań podejmowanych w początkach okresu ewolucji samolotu F-86. Większość informacji i danych prezentowanych przez Autora w spisie literatury dotyczy informacji znanych z podręczników sprzed lat kilkadziesiąt. Uważniejszy Czytelnik dostrzeże również, że tylko nieliczne, podane w spisie literatury pozycje zostały przedstawione na szerszym forum krajowym — konferencjach krajowych lub publikacjach w czasopismach krajowych, o szerszym zasięgu i ostrzejszej selekcji prezentowanych materiałów.

Istnieje wiele obiektywnych przyczyn takiej sytuacji, natomiast w tej złej sytuacji sprawą bardzo już niedobłą jest brak perspektyw rozwoju kadry. O ile w zakresie badań nad problematyką turbulencji ujawniła się grupa osób względnie młodych o obiecujących możliwościach, o tyle w tematyce eksperymentalnych badań w zakresie dużych prędkości takiej grupy, związanej z tematyką lotniczą, nie widać. Wyszkolenie takiej grupy jest w naszej sytuacji niezmiernie trudne, gdyż nie można jak w przypadku turbulencji, z uwagi na specyfikę omawianych badań, korzystać z ośrodków zagranicznych.

Z uwagi na wspomnianą specyfikę problem ten nie jest problemem środowiskowym, tak jak np. turbulencja, której tematyka wyrosła w środowisku naukowym niezależnie od działań instytucjonalnych. A więc rozwiązanie tego problemu nie zależy od środowiska, choć środowisko nie powinno w tej sprawie pozostawać obojętne.

Podkreśliłem tu sprawy kadrowe, gdyż jak na możliwości krajowe wielkość bazy pomiarowej należy ocenić pozytywnie. Brak jest natomiast urządzeń towarzyszących i aparatury pomiarowej oraz stosunkowo wysokie są koszty prowadzenia badań.

Te dwa ostatnie czynniki nie stanowiły istotnej przeszkody, i nie one są powodem, że w przeszło 40 lat po przekroczeniu prędkości dźwięku przez samoloty w locie nie stać nas na własny projekt aerodynamiczny skrzydła o Ma_{kryt} wynoszącej np. 0.9.

Jak wspomniano na wstępie w przeglądzie nie omówiono wszystkich prac charakteryzujących przedstawioną tematykę badawczą. W szczególności pominięte zostały prace wykonywane w Katedrze Aerodynamiki, a później w Zakładzie Aerodynamiki Instytutu Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej Politechniki Warszawskiej. Obejmowały one badania przepływów w rurach uderzeniowych, przepływów przez różnego rodzaju elementy przewodów, badania struktury strumieni i badania opływu ciał tępych. W szczególności prace związane z dysypacją fali uderzeniowej przez rurę perforowaną, prace związane ze strukturą strumieni oraz generacją hałasu aerodynamicznego reprezentują tu wysoki poziom. Prace związane z opływem ciał tępych stanowiły ilustrację eksperymentalną rozwiniętych w tym zakresie prac teoretycznych.

Wiele z tych prac prezentowanych było na konferencjach krajowych i zagranicznych i publikowanych w uznanych czasopismach.

Tematykę tych prac ilustrują bliżej tytuły wybranych publikacji, które zamieściłem w dodatkowym spisie literatury (łączna liczba publikacji w tym zakresie przekracza 60

pozycji). Brak w spisie literatury tych pozycji stanowił istotne zubożenie przedstawionego dorobku krajowego, szczególnie na arenie międzynarodowej.

Dodatkowy wykaz ważniejszych pozycji literatury w zakresie turbulencji¹⁾

1. R. MERONEY, J. OSTROWSKI, *Wind Tunnel Testings of Wood Drying Processes*, Report Nr 6. Colorado State University, s. 70 1967.
2. J. OSTROWSKI, J. WOJCIECHOWSKI, *Generation of the Turbulent Boundary Layer in Unsteady Flow*, Lecture Notes on Physics, 1978 Springer Verlag.
3. P. SIERPOTOWSKI, N. SHIRAIISHI, *On Nonstationary Gusts with Pressure Waves*, Proceedings of National Conference on Disaster Prevention, Fukuoka 1978, Japan.

Dodatkowy wykaz ważniejszych pozycji literatury w zakresie problematyki naddźwiękowej

A. SZUMOWSKI

1. *On the flow pattern behind a shock wave propagating along a perforated tube*, Fluid Dynamics Transactions, Vol. 5, Part II, 1971, PWN.
 2. *Attenuation of a shock wave along a perforated tube. Shock tube Research*, Proceedings of the Eight International Shock Tube Symposium, London 5 - 8, Juli, 1971 Chapman and Hall.
 3. *Motton of shock wave along a uniform perforated duct*, Prace Naukowe, Mechanika, N18, Wydawnictwa PW, W-wa, 1972.
- W. JUNGOWSKI i współpracownicy: K. WITCZAK, W. SELEROWICZ, J. S. ANDERSON, G. GRABITZ, G. E. A. MAYER
1. *Analiza wpływu tarcia gazu i masy tłoka na temperaturę spiętrzenia w hiperdźwiękowym tunelu aerodynamicznym z ruchomym tłokiem*, A. B. M., Zeszyt 1, 1961.
 2. *Metoda obliczania temperatury spiętrzenia w hiperdźwiękowym tunelu aerodynamicznym z ruchomym tłokiem i uwagi o projektowaniu tuneli tego typu*, A. B. M., Zeszyt 3, 1962.
 3. *On the pressure oscillating in a sudden enlargement of a duct section*, Fluid Dynamics Transactions edited by W. Fiszdon, Pergamon Press and PWN, Vol. 3, 1967.
 4. *On the flow in a sudden enlargement of a duct*, Fluid Dynamics Transactions, edited by W. Fiszdon, Pergamon Press and PWN, Vol. 4, 1969.
 5. *Flow Oscillations in a duct with a rectangular cross-section*, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 79, 1977 (trzech współautorów) Part 4, pp. 769 - 784.
 6. *Schwingungen gemischter Unter-und Überschallströmungen in einem Kanal mit Querschnittsspreng*, MPT für Strömungsforschung, Göttingen, Ber. 10, 1976 (trzech współautorów).
 7. *Some features of choked air jets generating discrete frequency noise*, Proceedings of 76 Noise Control, Warsaw, 13 - 15 October, 1976 (dwóch współautorów), pp. 231 - 235.
 8. *Oscillations in supersonic flow in a rectangular duct with an abrupt change in section*, Proceedings of the „DAGA 76” Conference, Deutsche Arbeitsgemeinschaft für Akustik, 20 - 23 Sept. 1976, Heidelberg (trzech współautorów), pp. 555 - 558.
 9. *Base pressure oscillations in a rectangular duct with a sudend enlargement*, The City University, Research Memorandum, Dept. of Mechanical Engineering, Memorandum No. ML 97, Sept. 1977, London (trzech współautorów) pp. 1 - 54.
 10. *Transsonischer Generator für Resonanzschwingungen in Rohr*, „DAGA 78”, VDE-Verlag, pp. 379 - 382 (dwóch współautorów), 1978.

¹⁾ Nie wykazano publikacji z Politechniki Poznańskiej wskutek nie otrzymania wykazu w terminie umożliwiającym ich druk.

11. *Oscillations of the supersonic flow downstream of an abrupt increase in duct cross-section*, Mitteilungen aus den Max-Planck-Institut für Strömungsforschung und der Aerodynamischer Versuchsanstalt, Nr 65, stron 172 (4 współautorów) 1978.
12. *Generator Hartmanna-Sprengera jako źródło dźwięku o dyskretnej częstotliwości*, Zeszyty Naukowe AGH im. St. Staszica, str. 137 - 145, (1 współautor), 1979.
13. *Prevention of noise generated by the release of gas into the atmosphere*, Proceedings Inter-noise 79, str. 155 - 158, (3 współautorów), 1979.
14. *Influence of closely located solid surfaces on the sound spectra radiated by gas jets*, *Mechanics of Sound Generation in Flows*, IUTAM/ICA/AIAA Symposium Göttingen August 28 - 31, 1979, Editor E.-A. Müller, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, pp. 116 - 122, 1979.
15. *Computation of a cooperation between reciprocating compressor and complex piping system including mufflers*, Proceedings of Purchase Compressor Technology Conference, July 23 - 25, 1980, 6 stron, (jeden współautor).

Praca została złożona w Redakcji dnia 20 lipca 1983 roku.

TERMODYNAMIKA FENOMENOLOGICZNA — STAN BADAŃ I PERSPEKTYWY

KRZYSZTOF WILMAŃSKI

IPPT PAN

1. Wstęp

1.1. Cel artykułu. Opis problemów, wchodzących w skład termodynamiki fenomenologicznej i stanowiących względnie krótki artykuł stanowi przedsięwzięcie beznadziejne. Wynika to zarówno z różnej treści podkładanej przez różnych badaczy pod pojęcie termodynamiki, jak i z olbrzymiego bogactwa materiału w każdej możliwej interpretacji tego terminu. Z tego powodu nie należy traktować przedstawianego artykułu jako pełnej prezentacji problemów termodynamiki, nawet w zakresie jej formalnych podstaw.

Wybór materiału został oparty na subiektywnych zainteresowaniach autora. Choć prezentowane problemy mają olbrzymią literaturę i tworzą burzliwie rozwijającą się dziedzinę nauki, nie wyczerpują one wszystkich trendów rozwojowych. Przykładowo, pomijamy całkowicie ten nurt w termodynamice, który został zapoczątkowany przez Onsagera i jest obecnie intensywnie rozwijany głównie przez szkołę belgijską z I. Prigoginem na czele. Wydaje się, że mimo dość istotnych różnic pomiędzy tym podejściem, a tzw. termodynamiką racjonalną, którą tu głównie prezentujemy, istnieją szanse na unifikację tych dwóch trendów bez szkody dla żadnego z nich.

Celem artykułu jest nie tylko określenie uzyskanych dotąd granic poznania w termodynamice oraz uwypuklenie polskiego wkładu, ale również pokazanie możliwości i konieczności dalszych prac w tej dziedzinie.

W tym punkcie pracy przedstawimy jeszcze zarys historii rozwoju termodynamiki. Punkt 2 zawiera omówienie stanu badań w zakresie aksjomatyzacji termodynamiki. W punkcie 3, najobszerniejszym, przedstawiamy szkic metody termodynamicznej w teorii materiałów, opartej na termodynamice racjonalnej. Punkt 4 stanowi uzupełnienie punktu 3 o te elementy teorii materiałów, które na ogół nie są traktowane jako część termodynamiki. Wreszcie w punkcie 5 omawiamy krótko trendy rozwojowe termodynamiki, możliwe do zaobserwowania w najnowszej literaturze przedmiotu.

Literatura, cytowana w pracy jest dalece niekompletna. W miarę możliwości cytowane są monografie, spośród prac opublikowanych w czasopismach naukowych wybrano jedynie te, które są najbardziej reprezentatywne dla danej dziedziny.

1.2. Wczesny okres rozwoju pojęć termodynamiki. Poczynając od najwcześniejszych prac z XVII wieku, dotyczących pojęcia ciepła, można w rozwoju termodynamiki wyróżnić trzy okresy. W okresie pierwszym, obejmującym wiek XVIII, interesowano się głównie aspektami poznawczymi, prowadzącymi do określenia tak podstawowych pojęć termodynamiki,

jak temperatura i ciepło. Następnie wiek XIX przyniósł burzliwy rozwój termodynamiki stosowanej, głównie ze względu na postępy technologii, a zwłaszcza budowę i zastosowanie maszyn parowych. Wreszcie, poczynając od końca XIX wieku, rozpoczął się nawrót do podstawowej problematyki poznawczej umieszczając na stałe termodynamikę wśród podstawowych działów fizyki.

Pierwsze próby liczbowego określenia podstawowego parametru termodynamicznego — temperatury — pochodzą od Galileusza (1564—1642), który skonstruował pierwszy termometr (gazowy). Konstrukcja Galileusza i jej udoskonalone wersje spowodowały rozwój spekulacji na temat istoty temperatury i ciepła. Już Galileusz i Newton spekulowali na temat ruchu małych cząstek jako uzasadnienia różnej ciepłoty ciał. Jednakże dopiero o 150 lat późniejsze prace Gibbsa wyjaśniły rzeczywisty związek pomiędzy temperaturą i energią kinetyczną molekuł. Przepływ ciepła natomiast próbowano wyjaśnić ruchem hipotetycznej substancji. Ostateczny dowód jej nieistnienia przeprowadził Thompson (1753—1814), który jednocześnie wskazał na związek pomiędzy transportem ciepła i pracą. Ostatecznie ilościowy związek tych dwóch pojęć ustalił Joule (1818—1889).

Jednocześnie, na skutek prac Boyle'a (1627—1691), Mariotte'a (1620—1684), Amon-tonsa (1663—1705), Charlesa (1746—1829), a przede wszystkim Bernoulli'ego (1760—1782) powstawała pierwsza teoria materiałów — teoria gazu idealnego. Jej pięknym uwieńczeniem były teorie molekularne Maxwell'a (1831—1879) i Boltzmanna (1844—1906).

Prace nad sposobem przekazywania ciepła doprowadziły do sformułowania **pierwszej zasady termodynamiki** — zasady zachowania energii. Została ona podana niezależnie przez Mayera (1814—1878) i Helmholtza (1821—1894).

Wiek XIX przyniósł również gwałtowny rozwój termodynamiki stosowanej. Było to związane z popularyzacją maszyny parowej. Pierwszą taką maszynę skonstruował Savery (1650—1715), jednakże powszechne zastosowanie znalazła dopiero maszyna Jamesa Watta (1736—1819). Ze względów czysto praktycznych zaczęto się zastanawiać nad uzyskaniem możliwie dużej sprawności, co doprowadziło Carnota (1796—1832) do pierwszego technicznego sformułowania **drugiej zasady termodynamiki**, opartego na pojęciu idealnego silnika cyklicznego. Prawie jednocześnie Clausius (1822—1888) określił ograniczenia, jakie druga zasada termodynamiki nakłada na przepływ ciepła.

Wszystkie te rezultaty doprowadziły pod koniec XIX wieku do zbudowania termodynamiki równowagowej w takiej postaci, w jakiej jest ona do dziś używana.

Na początku wieku XX prace Gibbsa, Plancka, Caratheodory'ego spowodowały dalszy rozwój termodynamiki, a w pierwszym rzędzie — zapoczątkowały próby konstrukcji teorii procesów termodynamicznych, zależnych od czasu. Współczesny stan wiedzy w tej dziedzinie omawiamy dalej w tej pracy.

2. Aksjomatyczne sformułowania termodynamiki

2.1. Teoria Gurtlna, Nolla, Williamsa. Aksjomatyzacja podstaw termodynamiki fenomenologicznej posiada dwa uzasadnienia. Po pierwsze, zapewnia ona wewnętrzną niesprzeczność budowanej teorii w takim stopniu, jak w innych działach matematyki. Po drugie, wskazuje na formalne ograniczenia zakresu stosowalności modelu.

Otrzymane dotąd wyniki nie stanowią pełnej aksjomatyzacji termodynamiki. Cel został osiągnięty jedynie w zakresie problemu istnienia pól fizycznych dla ośrodków ciągłych z tzw. **lokalnymi oddziaływaniami przestrzennymi**. Wynik ten, pochodzący od M. E. GURTINA, W. NOLLA i W. O. WILLIAMSA (por. K. WILMAŃSKI [1974]) przedstawiamy w zarysie poniżej.

Pozostaje natomiast do dziś otwarty problem aksjomatyzacji pełnej teorii procesów termodynamicznych. Pewne próby, oparte na geometryzacji przestrzeni stanów uogólnionych, przedstawiamy dalej w tym punkcie. Otrzymane w tym zakresie rezultaty giną na ogół w gąszczu matematycznych trudności technicznych i niepewnej interpretacji fizycznej.

Przejdźmy do opisu wyników, uzyskanych przez Gurtina, Nolla i Williamsa. O ile w mechanice analitycznej układu punktów materialnych podstawowym obiektem geometrycznym jest dowolny **skończony zbiór punktów materialnych**, to w teorii ośrodka ciągłego takim obiektem jest **podciało**, tzn. podzbiór pewnej trójwymiarowej różniczkowalnej, spełniający pewne ograniczenia algebraiczne i topologiczne. Taki wybór obiektu jest podyktowany względami praktycznymi — pomiarów w fizyce makroskopowej dokonuje się zawsze na układach trójwymiarowych o skończonej wielkości, a nie w każdym punkcie układu. W związku z tym opis analityczny układu prowadzi do funkcji określonych na rodzinie zbiorów, a nie funkcji punktowych. Metody rozwiązywania równań dla takich funkcji nie są na ogół znane i, w związku z tym, powstaje problem zastąpienia funkcji zbiorów przez funkcje punktów czyli **gęstości**. Jest on rozwiązywany przez twierdzenia o reprezentacji w ramach **teorii miary**.

Przedstawimy sposób postępowania na przykładzie **równania bilansu energii dla sztywnego przewodnika ciepła**. Niech B oznacza podzbiór trójwymiarowej przestrzeni euklidesowej, zajmowany przez badany układ. Utwórzmy rodzinę \mathcal{B} podzbiorów zbioru B taką, by każdy element tej rodziny był zbiorem mierzalnym (względem miary objętościowej Lebesgue'a) oraz taką, aby spełnione były warunki

$$(2.1) \quad \begin{aligned} 1) & \quad \emptyset \in \mathcal{B}, \quad B \in \mathcal{B}, \\ 2) & \quad P_1, P_2 \in \mathcal{B} \Rightarrow P_1 \vee P_2 \in \mathcal{B}, \quad P_1 \wedge P_2 \in \mathcal{B}, \\ 3) & \quad P \in \mathcal{B} \Rightarrow P^d \in \mathcal{B} \end{aligned}$$

gdzie

$$(2.2) \quad \begin{aligned} P_1 \vee P_2 & := P_1 \cup P_2 \\ P_1 \wedge P_2 & := \overline{\text{Int}(P_1 \cap P_2)} \\ P^d & := \overline{B \setminus P} \end{aligned}$$

oraz \emptyset oznacza zbiór pusty, \cup i \cap oznaczają, odpowiednio, sumę i iloczyn teorio-mno-gościowy, \setminus oznacza różnicę teorio-mno-gościową, Int jest wnętrzem zbioru w topologii trójwymiarowej przestrzeni euklidesowej, a kreska nad zbiorem oznacza jego domknięcie w tej topologii.

Zakłada się, że zjawiska, zachodzące w sztywnym przewodniku są opisane przez dwie funkcje

— energię podciał

$$(2.3) \quad E_i : \mathcal{B} \rightarrow R$$

— strumień energii między podciałami

$$(2.4) \quad K_t: \text{sep}(\mathcal{B} \times \mathcal{B}) \rightarrow R,$$

gdzie

$$(2.5) \quad \text{sep}(\mathcal{B} \times \mathcal{B}) := \{(P_1, P_2) \in \mathcal{B} \times \mathcal{B} \mid P_1 \wedge P_2 = \emptyset\}.$$

Funkcje te mają następującą interpretację fizyczną. Wartość $E_t(P)$ oznacza energię podciała P w chwili t , natomiast $K_t(P_1, P_2)$ oznacza ilość energii, przekazywanej w jednostce czasu z podciała P_2 do podciała P_1 w chwili t . Zakłada się, że funkcje te są powiązane następującym **równaniem bilansu energii**

$$(2.6) \quad \frac{dE_t}{dt}(P) + K_t(P, P^d) = 0 \quad \text{dla każdego } P \in \mathcal{B}$$

Oznacza ono, że zmiany energii w podciele P mogą powstawać jedynie na skutek przepływu energii między tym podciałem, a resztą przewodnika P^d . Celem aksjomatyzacji Gurtina, Nolla, Williama jest zastąpienie układu równań (2.6) przez układ równań, zachodzących w każdym punkcie $X \in B$. W tym celu należy dowieść, że funkcje E_t i K_t można napisać, na przykład, w postaci

$$(2.7) \quad E_t(P) = \int_P e_t(X) dv,$$

$$K_t(P, P^d) = \int_{\partial P} q_{s,t}(X) ds$$

gdzie całki mają sens całek Lebesgue'a względem, odpowiednio, miary objętościowej i powierzchniowej, ∂P jest brzegiem podciała P , który jest jednocześnie powierzchnią orientowalną i mierzalną. Funkcja e_t ma wtedy interpretację objętościowej gęstości energii, a funkcja $q_{s,t}$ oznacza strumień energii przez powierzchnię S na jednostkę powierzchni i jednostkę czasu.

Wynik (2.7) otrzymuje się przy pomocy twierdzenia Radona-Nikodyma, wykorzystując następujący aksjomat:

1) E_t jest funkcją **addytywną**, tzn.

$$(2.8) \quad E_t(P_1 \vee P_2) = E_t(P_1) + E_t(P_2) \quad \text{dla każdej pary } (P_1, P_2) \in \text{sep}(\mathcal{B} \times \mathcal{B}),$$

2) E_t jest funkcją **ciągłą** względem objętościowej miary Lebesgue'a, tzn. istnieje taka stała $\alpha_t > 0$, że dla każdego podciała $P \in B$

$$(2.9) \quad |E_t(P)| \leq \alpha_t v(P),$$

3) K_t jest funkcją **biaddytywną**, tzn.

$$(2.10) \quad K_t(P_1 \vee P_2, P_3) = K_t(P_1, P_2) + K_t(P_2, P_3),$$

$$K_t(P_1, P_2 \vee P_3) = K_t(P_1, P_2) + K_t(P_1, P_3),$$

dla każdej trójki podciał P_1, P_2, P_3 takiej, że

$$P_1 \wedge P_2 = \emptyset, \quad P_1 \wedge P_3 = \emptyset, \quad P_2 \wedge P_3 = \emptyset,$$

4) K_t jest funkcją **ciągłą** względem powierzchniowej miary Lebesgue'a, tzn. istnieje taka stała $\beta_t > 0$, że

$$(2.11) \quad |K_t(P_1, P_2)| \leq \beta_t s(P_1 \cap \partial P_2) \quad \text{dla każdej pary } (P_1, P_2) \in \text{sep}(\mathcal{B} \times \mathcal{B}).$$

Z powyższych założeń wynika nie tylko istnienie reprezentacji punktowych e_t , $q_{s,t}$ funkcji E_t , K_t , ale również twierdzenie Cauchy'ego o istnieniu wektora strumienia energii

$$(2.12) \quad q_{s,t}(x) = q_t(X) \cdot n,$$

gdzie n jest jednostkowym wektorem normalnym do powierzchni S w punkcie X . Twierdzenie to pozwala zapisać równanie bilansu (2.7) w klasycznej postaci **lokalnej**

$$(2.13) \quad \frac{de_t}{dt} + \text{Div } q_t = 0$$

w prawie każdym punkcie $X \in B$ (tzn. z wyjątkiem co najwyżej zbiorów o zerowej mierze objętościowej).

Prace GURTINA, NOLLA, WILLIAMS, SAMPAIO [1976, 1979], W. BARAŃSKIEGO [1972, 1974_{1,2}], K. WILMAŃSKIEGO [1978, 1979] i innych pozwalają nie tylko stwierdzić, że przedstawiony aksjomat jest warunkiem **konicznym i wystarczającym** dla zachodzenia lokalnego równania bilansu (2.13). Zawierają one również próby rozszerzenia tej aksjomatyki na pewne przypadki **nielokalnych oddziaływań przestrzennych** oraz niektóre problemy teorii ośrodków wieloskładnikowych. Wydaje się, że uzyskane w tej dziedzinie rezultaty pokrywają w pełni potrzeby, wynikające z konstrukcji różnych ciągłych modeli termodynamicznych. Z tego powodu nie należy oczekiwać dalszych istotnych badań w tej dziedzinie.

2.2. Geometryzacja przestrzeni stanów. System aksjomatów, opisany w poprzednim paragrafie dotyczy jedynie małej części problemów termodynamiki, związanych z opisem ośrodka ciągłego. Pełna aksjomatyzacja nie istnieje do dziś mimo wielu wysiłków w tym kierunku.

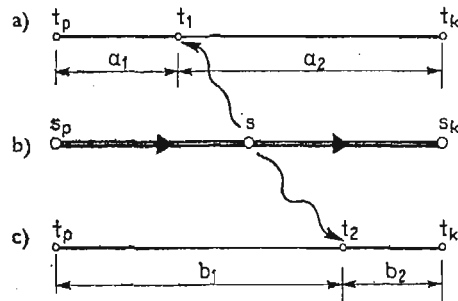
Przedstawimy zarys tego zagadnienia nie wnikając w dosyć skomplikowane szczegóły matematyczne. Punktem wyjścia jest pewien zbiór \mathcal{S} , którego elementy nazywamy **stanami układu**. Przykładem stanu układu jest para funkcji $(\chi(\cdot) \Theta(\cdot))$, które opisują konfigurację i rozkład temperatury ciała termomechanicznego B :

$$(2.14) \quad \begin{aligned} \chi(\cdot) : B &\rightarrow R^3 \\ \Theta(\cdot) : B &\rightarrow R^+. \end{aligned}$$

Jest oczywiste, że przestrzeń stanów \mathcal{S} jest ściśle związana z wybranym układem. Pewne cechy tej przestrzeni mają jednak charakter uniwersalny. Taką cechą jest **relacja dostępności** stanów. Fizycznie oznaczają ona możliwość ewolucji układu poprzez różne sekwencje stanów. Relacja dostępności z matematycznego punktu widzenia jest relacją częściowego porządku i wprowadza do przestrzeni stanów naturalną topologię. Topologią ta jest jednak zbyt słaba na to, by bez dodatkowych założeń można było określić tak podstawowe pojęcia, jak **proces termodynamiczny**. Przykład przedstawiamy na Rys. 1.

Rysunek 1b obrazuje przejście ze stanu s_p do stanu s_k przez pewną sekwencję stanów, zawierającą stan s . Przejście to jest opisane przez relację dostępności w przestrzeni \mathcal{S} . Rysunki 1a i 1c przedstawiają dwie różne fizyczne realizacje tego przejścia. W przypadku a) czas przejścia od stanu s_p do s jest równy a_1 , a ze stanu s do s_k — a_2 . W przypadku c) czas przejścia od stanu s_p do s wynosi b_1 , a od s do s_k — b_2 . Jest oczywiste, że a_1 nie musi

być równe b_1 , a a_2 nie musi być równe b_2 , mimo, że poszczególne odcinki zawierają te same stany. Przykład ten pokazuje, że relacja dostępności w \mathcal{S} musi być nie tylko relacją porządku, ale winna zawierać pewne dodatkowe elementy strukturalne. Problem próbowano rozwiązać wprowadzając klasy **parametryzacji** do przestrzeni \mathcal{S} , ale nie wydaje się, by uzyskano zadowalające rozwiązanie.



Rys. 1.

Omówiona powyżej przestrzeń stanów stanowi punkt wyjścia do wprowadzenia obiektów, które przynajmniej w szczególnych przypadkach mają znaną interpretację fizyczną taką, jak energia wewnętrzna, praca, strumień energii itd. Postęp w tej dziedzinie jest jeszcze mniejszy, niż w zakresie badań struktury przestrzeni \mathcal{S} .

Pierwszej próby geometryzacji termodynamiki dokonał C. CARATHEODORY [1909]. Próba ta została uwieńczona sukcesem w zakresie procesów bliskich stanom równowagi termodynamicznej. Wyniki Caratheodory'ego, szczególnie zaś dowód istnienia entropii i uniwersalnej funkcji temperatury, są do dziś istotnym elementem uogólnień termodynamiki na procesy nierównowagowe i stanowią jeden z testów sensowności uogólnienia.

Następne próby, wśród których należy wymienić prace G. FALKA, H. JUNGA [1959], R. GILESA [1964], H. A. BUCHDAHLA [1966], J. L. B. COOPERA [1967], nie doprowadziły do rozwiązania problemu geometryzacji termodynamiki.

Pewien postęp w tej dziedzinie spowodowały prace polskie (por. K. WILMAŃSKI [1971, 1972_{1,2}, 1976], M. ELŻANOWSKI [1973, 1974, 1976, 1977]). Połączenie tych wyników z propozycją W. A. DAY'A [1975, 1977_{1,2}, 1977₃] stwarza możliwości rozwiązania problemu (por. M. ŠILHAVY [1978, 1980], choć brak jest jeszcze ostatecznych sformułowań).

Elementy geometryczne zawierają również propozycje B. D. COLEMANA i D. R. OWENA [1974, 1975, 1976] oraz J. SERRINA [1979], choć większość uzyskanych wyników dotyczy termodynamicznego modelowania jednoskładnikowego ośrodka termomechanicznego.

Naszkicowany powyżej problem wciąż czeka na rozwiązanie. Dziedzina ta będzie się z pewnością dalej rozwijać — również ze względów praktycznych. Jednym z nich jest określenie statusu i zakresu stosowalności termodynamiki racjonalnej, którą przedstawiamy w następnym punkcie pracy.

3. Termodynamika racjonalna

3.1. Struktura równań. Termin termodynamika racjonalna został wprowadzony przez C. Truesdella pod koniec lat 60-ych dla określenia naturalnego rozszerzenia nieliniowej

mechaniki ośrodków ciągłych na problemy procesów nieodwracalnych w takich ośrodkach. Rozwój tej dziedziny jest nierozłącznie związany z teorią materiałów, którą nieco szerzej omawiamy w punkcie 4. Obok problemów, związanych z opisem konkretnych materiałów, termodynamika zawiera również szereg zagadnień o charakterze ogólnym. Należą do nich zwłaszcza

- określenie klasy procesów dopuszczalnych z punktu widzenia drugiej zasady termodynamiki
- wyznaczenie klasy tzw. funkcji uniwersalnych, umożliwiających makroskopową interpretację wyników pomiarów.

Dla rozwiązania tych problemów opracowano w ramach termodynamiki racjonalnej strategię działania, opartą na twierdzeniu Liu, które przedstawiamy w następnym paragrafie. Strategia ta polega na wyznaczeniu równań pola dla wielkości modelowych w oparciu o równania bilansu. Równania pola winny być tak skonstruowane, aby ich rozwiązania spełniały **tożsamościowo** drugą zasadę termodynamiki. Rozwiązania takie nazywamy **dopuszczalnymi procesami termodynamicznymi**. W ramach takiej strategii należy wykonać następujące kroki

- wybór zmiennych polowych, opisujących proces w ośrodku,
- wybór równań bilansu, redukujący się dla układów izolowanych do zasad zachowania,
- domknięcie układu równań poprzez związki konstytutywne tak, aby wynikający układ równań pola stanowił dobrze postawiony problem dla zmiennych polowych,
- określenie klasy związków konstytutywnych, prowadzących do dopuszczalnych procesów termodynamicznych,
- uzgodnienie otrzymanych wyników z wynikami termodynamiki (własności stanu równowagi termodynamicznej), oraz wyznaczenie klasy funkcji uniwersalnych dla modelowanego układu.

Należy zaznaczyć, że opisany program działania byłby całkowicie zbędny, jeśli znane byłyby związki konstytutywne dla badanego układu. Eksperymentalne wyznaczenie takich związków, lub też znalezienie ich przy pomocy modeli strukturalnych (np. przy pomocy mechaniki statystycznej) napotyka jednak na tak wielkie trudności, że jedynie w nielicznych przypadkach możemy uniknąć postulowania a priori związków konstytutywnych. Ma to, na przykład, miejsce dla gazu idealnego.

Przykładem wykorzystania powyższej strategii jest konstrukcja modelu jednoskładnikowego ośrodka, w którym zachodzi proces termomechaniczny. **Zmiennymi polowymi** są wtedy gęstość masy ϱ , ruch χ i temperatura empiryczna Θ . Określone są one w każdym punkcie X ośrodka w każdej chwili t z pewnego zadanego przedziału

$$(3.1) \quad \begin{aligned} \varrho &= \varrho(X, t), \\ \chi &= \chi(X, t), \\ \Theta &= \Theta(X, t). \end{aligned}$$

Dla wyznaczenia tych funkcji poszukujemy równań pola, wykorzystując **równania bilansu** — masy

$$(3.2) \quad \frac{\partial \varrho}{\partial t} + \operatorname{div}(\varrho v) = 0,$$

— pędu

$$(3.3) \quad \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v - t) = \rho b, \quad t = t^T,$$

— energii

$$(3.4) \quad \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \varepsilon + \frac{1}{2} \rho v \cdot v \right) + \operatorname{div} \left(\rho \varepsilon v + \frac{1}{2} v \rho v \cdot v - t v + q \right) = \rho v \cdot b + \rho r.$$

gdzie V jest polem prędkości, t — tensorem naprężeń Cauchy'ego, b — siłą zewnętrzną na jednostkę masy, ε — gęstością energii wewnętrznej, q — wektorem strumienia ciepła, a r — napromieniowaniem zewnętrznym na jednostkę masy. Wszystkie funkcje są określone na przestrzeni konfiguracyjnej, tzn. są funkcjami x i t .

Jest oczywiste, że mimo zgodności liczby niewiadomych pól i liczby równań, równania bilansu (3.2—4) nie stanowią równań pola dla wielkości (3.1). Po pierwsze, wielkości

$$(3.5) \quad t, \varepsilon, q,$$

występujące w równaniach (3.2—4) nie są określone, po drugie — na przykład temperatura empiryczna w ogóle w tych równaniach nie występuje. W celu otrzymania równań pola musimy więc dodać związki pomiędzy wielkościami konstytutywnymi (3.5) a polami (3.1). Związki te, nazywane konstytutywnymi, definiują klasę materiałów. Przykładowo, klasa klasycznych materiałów termosprężystych określona jest związkami

$$(3.6) \quad \begin{aligned} t &= \hat{t}(F, \Theta, G), & G &:= \operatorname{Grad} \Theta \\ \varepsilon &= \hat{\varepsilon}(F, \Theta, G), & F &:= \operatorname{Grad} \chi \\ q &= \hat{q}(F, \Theta, G), \end{aligned}$$

gdzie \hat{q} , \hat{t} , $\hat{\varepsilon}$ są funkcjami analitycznymi swoich argumentów; klasa materiałów z pamięcią określona jest związkami

$$(3.7) \quad \begin{aligned} t &= \mathcal{T}(F^t, \Theta^t, G^t), & F^t(s) &:= F(t-s), & s &\in [0, \infty] \\ \varepsilon &= \mathcal{E}(F^t, \Theta^t, G^t), & \Theta^t(s) &:= \Theta(t-s), \\ q &= \mathcal{Q}(F^t, \Theta^t, G^t), & G^t(s) &:= G(t-s), \end{aligned}$$

gdzie \mathcal{T} , \mathcal{E} , \mathcal{Q} są funkcjami na przestrzeni funkcji $F^t(\cdot)$, $\Theta^t(\cdot)$, $G^t(\cdot)$, spełniającymi odpowiednie warunki gładkości; klasa materiałów lepko-termosprężystych określona jest związkami

$$(3.8) \quad \begin{aligned} t &= \hat{t}(F, \dot{F}, \Theta, G), & \dot{F} &= \frac{\partial F}{\partial t}, \\ \varepsilon &= \hat{\varepsilon}(F, \dot{F}, \Theta, G), \\ q &= \hat{q}(F, \dot{F}, \Theta, G) \end{aligned}$$

i tak dalej.

Podstawienie wybranych związków konstytutywnych do równań bilansu (3.2—4) prowadzi do równań pola dla wielkości (3.1). Pewne rozwiązania tych równań mają własności sprzeczne z obserwacjami makroskopowymi. Są wśród nich, na przykład, takie, które opisują przepływ ciepła w ciałach termosprężystych z obszarów chłodniejszych do cieplej-

szych, o ile nie ograniczymy dodatkowo klasy związków konstytutywnych. Ograniczeniem takim jest **druga zasada termodynamiki**. Ingo MÜLLERA [1967] zaproponował postać tej zasady, stanowiącą uogólnienie tzw. **nierówności Clausiusa-Duhema**. Postać ta jest dotąd powszechnie stosowana w termodynamice racjonalnej. Jeśli η oznacza gęstość entropii, h — jej strumień, a s — zewnętrzne napromieniowanie entropijne, to **nierówność Clausiusa-Duhema-Müllera** ma postać

$$(3.9) \quad \frac{\partial(\rho\eta)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho\eta\mathbf{v} + \mathbf{h}) - \rho s \geq 0.$$

Stanowi ona ograniczenie, nakładane na związki konstytutywne przez drugie prawo termodynamiki. Aby można było określić skutki tego ograniczenia, należy dodatkowo wprowadzić związki konstytutywne dla pól

$$(3.10) \quad \eta, \mathbf{h}.$$

Jedną z metod określania klasy **dopuszczalnych procesów termodynamicznych**, tzn. klasy procesów ograniczonych nierównością (3.9), wyznacza opublikowane w 1972 r. twierdzenie Liu, które omawiamy poniżej.

3.2. Twierdzenie Liu. W olbrzymiej większości rozważanych modeli termodynamicznych równania pola i nierówność Clausiusa-Duhema-Müllera są **quasiliniowymi związkami różniczkowymi**. Fakt ten pozwala zalgabraizować procedurę wyznaczania procesów termodynamicznie dopuszczalnych. Po wybraniu związków konstytutywnych dla wielkości (3.10) poszukujemy mianowicie rozwiązań nierówności (3.9) przyjmując, że równania bilansu (3.2—4) stanowią więzy nakładane na te rozwiązania. Oznacza to, że pewne pochodne pól (3.1) nie mogą przyjmować dowolnych wartości w dowolnie wybranym punkcie x i w chwili t . Na przykład, pochodna $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ musi być powiązana z $\operatorname{grad} \rho$ i $\operatorname{grad} \mathbf{v}$ przy pomocy równania bilansu masy. Wybranie pewnych wartości dla pochodnych $\operatorname{grad} \rho$ i $\operatorname{grad} \mathbf{v}$ w punkcie x i w chwili t oznacza, że $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ musi być obliczone z (3.2).

Tak ograniczonych wartości pochodnych pól będzie dokładnie tyle, ile równań bilansu. Można więc postępować dwójako — podobnie, jak w klasycznej procedurze wariacyjnej dla mechaniki ciał z więzami

- eliminować z nierówności (3.9) pochodne pól, które można wyznaczyć z równań bilansu, a następnie poszukiwać rozwiązań zredukowanej nierówności,
- uzupełnić nierówność (3.9) członami, eliminującymi więzy przy pomocy mnożników Lagrange'a, traktując jako niezależne wszystkie pochodne pól w otrzymanej w ten sposób zmodyfikowanej nierówności.

Drugi sposób został sformalizowany przez I-Shih LIU [1972] w następującym **twierdzeniu**:

dla zadanej macierzy A o współrzędnych $A_{\Delta\gamma}$, $1 \leq \Delta \leq p$, $1 \leq \gamma \leq n$, wektorów $\mathbf{Y} \in R^n$, $\boldsymbol{\alpha} \in R^n$, $\boldsymbol{\alpha} \neq 0$, $\mathbf{B} \in R^p$ i skalaru $\beta \in R$, jeśli

$$(3.11) \quad S := \{\mathbf{Y} \in R^n \mid A\mathbf{Y} + \mathbf{B} = 0\} \neq \emptyset,$$

to następujące warunki są równoważne

- 1) dla każdego $Y \in S$, $\alpha \cdot Y + \beta \geq 0$,
 2) istnieje wektor $A \in R^p$, $A \neq 0$ taki, że dla każdego $Y \in R^u$

$$(3.12) \quad \alpha \cdot Y + \beta - A \cdot (AY + B) \geq 0$$

- 3) istnieje wektor $A \in R^p$, $A \neq 0$ taki, że

$$(3.13) \quad \alpha - A^T A = 0, \quad \beta - A \cdot B \geq 0.$$

Punkt pierwszy powyższego twierdzenia opisuje problem, sformułowany w poprzednim paragrafie. Zbiór S , określony związkami (3.11) zawiera wszystkie rozwiązania równań pola, otrzymane z równań bilansu przez podstawienie związków konstytutywnych. Wektor Y reprezentuje wszystkie pochodne pól, które wchodzi do równań pola w sposób liniowy. Warunek 1) oznacza, że spośród wszystkich rozwiązań ze zbioru S wybieramy te, które spełniają nierówność Clausiusa-Duhema-Müllera. Twierdzenie orzeka, że tak sformułowany problem jest równoważny istnieniu mnożników Lagrange'a A , które są funkcjami tych samych zmiennych konstytutywnych, co pozostałe funkcje konstytutywne (na skutek przynależności do przestrzeni R^p) i które redukują procedurę rozwiązywania wyjściowego problemu do rozwiązywania nierówności (3.12). Punkt 3) stanowi częściowe rozwiązanie nierówności (3.12). Jeśli $n > p$, to związki (3.13)₁ stanowią nie tylko równania dla określenia mnożników A , ale również pewne ograniczenia na związki konstytutywne. W tym bowiem przypadku układ (3.13)₁ jest przekreślony ze względu na zmianę A . Eliminacja mnożników z końcowych wyników jest naturalna, gdyż, jako wielkości pomocnicze nie powinny one pozostawać w otrzymanych wynikach. Istotnym rezultatem są więc związki pozostające po takiej eliminacji, które wraz z **nierównością rezydualną** (3.13)₂ stanowią warunki konieczne i wystarczające na to, by rozwiązania tak ograniczonych równań pola spełniały drugą zasadę termodynamiki.

Zaznaczamy, że w wielu przypadkach niektóre współrzędne wektora A posiadają interpretację fizyczną i prowadzą do uproszczenia końcowych wyników. Z tego powodu pozostawia się je często w modelu w uzyskiwanych wynikach. Na przykład, w kilku prostych modelach mnożnik A^e równania bilansu energii jest odwrotnością temperatury absolutnej, a więc ma znaczenie **chłodności**. W modelach niektórych cieczy mnożnik A^e równania bilansu masy jest **potencjałem chemicznym** itd. Tego rodzaju interpretacja musi być jednak każdorazowo dowiedziona, gdyż jej istnienie zależy w sposób decydujący od przyjętych związków konstytutywnych.

Dla ilustracji omówionego twierdzenia przedstawmy jego działanie na prostym przykładzie materiału termosprężystego. Równanie bilansu masy daje się w tym przypadku scałkować niezależnie od związków konstytutywnych. W związku z tym nie ogranicza ono klasy procesów termodynamicznie dopuszczalnych. Polami, podlegającymi wyznaczeniu są

— ruch

$$x = \chi(X, t),$$

— temperatura empiryczna

$$\theta = \Theta(X, t).$$

Związki konstytutywne mają postać (3.6). Równania pola, które określają zbiór S , są wtedy postaci

$$(3.14) \quad \begin{aligned} \varrho_0 \frac{\partial^2 \chi}{\partial t^2} - \partial_F \hat{T}(\text{Grad } F) - \partial_\theta T(G) - \partial_G \hat{T}(\text{Grad } G) &= 0 \\ \varrho_0 [\text{tr } \partial_F \hat{\varepsilon}(\dot{F}^T) + \partial_\theta \hat{\Theta} + \partial_\theta \hat{\varepsilon} \cdot \dot{G}] - \text{tr } T^T \dot{F} + \\ + \text{tr } \partial_F \hat{q}(\text{Grad } F) + \partial_\theta \hat{q} \cdot G + \text{tr } \partial_G \hat{q}(\text{Grad } G) &= 0 \end{aligned}$$

gdzie ϱ_0 jest gęstością masy w konfiguracji odniesienia, T jest tensorem naprężeń Pioli-Kirchhoffa, oraz

$$(3.15) \quad G := \text{Grad } \theta, \quad \dot{F} := \frac{\partial F}{\partial t}.$$

Wielkości podkreślone wchodzą liniowo do tych równań i stanowią współrzędne wektora Y w rozważanym problemie.

Nierówność Clausiusa-Duhema-Müllera ma w tym przypadku postać

$$(3.16) \quad \varrho_0 [\text{tr } \partial_F \hat{\eta}(\dot{F}) + \partial_\theta \hat{\Theta} + \partial_\theta \hat{\eta} \cdot \dot{G}] + \text{tr } \partial_F \hat{h}(\text{Grad } F) + \partial_\theta \hat{h} \cdot G + \text{tr } \partial_G \hat{h}(\text{Grad } G) \geq 0.$$

Zgodnie z drugim punktem twierdzenia klasa rozwiązań związków (3.14), (3.16) jest identyczna z klasą rozwiązań nierówności

$$(3.17) \quad \begin{aligned} \varrho_0 \text{tr} \left[\partial_F \hat{\eta} - A^{(\varepsilon)} \partial_F \hat{\varepsilon} + \frac{1}{\varrho_0} A^{(\varepsilon)} \hat{T} \dot{F}^T \right] + \varrho_0 [\partial_\theta \hat{\eta} - A^{(\varepsilon)} \partial_\theta \hat{\varepsilon}] \dot{\Theta} + \varrho_0 [\partial_G \hat{\eta} - A^{(\varepsilon)} \partial_G \hat{\varepsilon}] \cdot \dot{G} + \\ + \text{tr} [\partial_F \hat{h} - A^{(\varepsilon)} \partial_F \hat{q} + (\partial_F \hat{T})^T A^{(\nu)}] \text{Grad } F + \text{tr} [\partial_G \hat{h} - A^{(\varepsilon)} \partial_G \hat{q} + \\ + (\partial_G \hat{T})^T A^{(\nu)}] \text{Grad } G + [\partial_\theta \hat{h} - A^{(\varepsilon)} \partial_\theta q + (\partial_\theta \hat{T})^T A^{(\nu)}] \cdot G - \varrho_0 A^{(\nu)} \cdot \frac{\partial^2 \chi}{\partial t^2} \geq 0 \end{aligned}$$

Nierówność ta jest liniowa względem podkreślonych wielkości. W związku z tym trzeci punkt twierdzenia Liu ma w rozpatrywanym przypadku postać

$$(3.18) \quad \begin{aligned} A^{(\nu)} &= 0 \\ \text{sym}(\partial_G \hat{h} - A^{(\varepsilon)} \partial_G \hat{q}) &= 0, \quad \text{sym } A := \frac{1}{2} (A + A^T), \\ \text{sym}(\partial_F \hat{h} - A^{(\varepsilon)} \partial_F \hat{q}) &= 0, \\ \partial_G \hat{\eta} - A^{(\varepsilon)} \partial_G \hat{\varepsilon} &= 0, \\ \partial_\theta \hat{\eta} - A^{(\varepsilon)} \partial_\theta \hat{\varepsilon} &= 0, \\ \frac{1}{\varrho_0} A^{(\varepsilon)} T &= A^{(\varepsilon)} \partial_F \hat{\varepsilon} - \partial_F \hat{\eta}, \end{aligned}$$

oraz

$$(3.19) \quad (\partial_\theta \hat{h} - A^{(\varepsilon)} \partial_\theta \hat{q}) \cdot G \geq 0$$

Związki (3.18) pozwalają nie tylko określić mnożniki $A^{(\nu)}$ i $A^{(\varepsilon)}$ ale także ograniczają w sposób istotny dopuszczalną klasę związków konstytutywnych. Na przykład ostatni z nich prowadzi do stwierdzenia, że tensor naprężeń ma dla materiału termosprężystego

potencjał, którym jest energia swobodna Helmholtza. Związki (3.18) implikują również szereg warunków całkowalności, których nie będziemy tu przytaczać.

Nierówność rezydualna (3.19) stanowi również pewne ograniczenie nakładane na związki konstytutywne. Przede wszystkim jest ona jednak wykorzystywana do badania własności **stanu równowagi termodynamicznej**. Wspólną własnością stanu równowagi dla wszystkich układów jest minimalizacja funkcji, występującej w tej nierówności w punkcie, w którym osiąga ona wartość zerową. Funkcja ta jest nazywana funkcją dysypacji i w naszym przypadku ma ona postać

$$(3.20) \quad \sigma := (\partial_\theta \hat{h} - A^{(\epsilon)} \partial_\theta \hat{q}) \cdot G$$

Przedstawiona powyżej strategia budowania modelu w ramach termodynamiki racjonalnej nie wyczerpuje problemów, które stoją przed termodynamicami. Niezwykle ważnym problemem jest określenie własności obiektów termodynamicznych na powierzchniach kontaktu różnych układów. Można wtedy określić klasę sensownych problemów brzegowych, wyznaczanych dla nieznanego układu przez **miar** wielkości w układzie znanym. Podstawową rolę grają wtedy tzw. **funkcje uniwersalne**, czyli funkcje, które nie zależą od wyboru układu. Przykładem takiej funkcji jest **temperatura absolutna**. Dowód istnienia lub nieistnienia funkcji uniwersalnych jest oparty na **równaniach bilansu dla powierzchni osobliwych**

— masy

$$(3.21) \quad \llbracket \rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} - c) \rrbracket = 0,$$

— pędu

$$(3.22) \quad \llbracket \rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} - c)\mathbf{v} - t\mathbf{n} \rrbracket = 0,$$

— energii

$$(3.23) \quad \left[\rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} - c) \left(\epsilon + \frac{1}{2} \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} \right) - \mathbf{v} \cdot t\mathbf{n} + q\mathbf{n} \right] = 0,$$

— entropii

$$(3.24) \quad \llbracket \rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} - c)\eta + \mathbf{h} \cdot \mathbf{n} \rrbracket = 0,$$

gdzie

$$(3.25) \quad \llbracket a \rrbracket := a^+ - a^-$$

a^+ , a^- są granicami wielkości a po stronie dodatniej i ujemnej powierzchni osobliwej, zorientowanej polem wektorów jednostkowych \mathbf{n} , a c jest szybkością propagacji tej powierzchni.

Nie będziemy tu przedstawiać procedury postępowania. Należy jednak zaznaczyć, że powierzchnia kontaktu dwu ośrodków nie jest zwykle tak prosta, aby można ją było opisać związkami (3.21—24). Posiada ona zazwyczaj swą własną **powierzchniową** strukturę fizyczną. Problem ten jest bardzo słabo zbadany, a jego implikacje w termodynamice, szczególnie w ramach problemu istnienia funkcji uniwersalnych nie są znane. Dopiero w ostatnich 2—3 latach zaczęły się ukazywać pierwsze prace na ten temat i jest on jednym z **głównych kierunków rozwoju** termodynamiki racjonalnej w chwili obecnej.

Omówiony powyżej sposób modelowania termodynamicznego ma już dosyć bogatą literaturę, choć brak jest jeszcze opracowań monograficznych. Z wczesnych prac na ten temat należy wymienić monografię C. TRUESDELLA [1969] i I. MÜLLERA [1973]. Obaj ci autorzy przygotowują unowocześnione wersje tych opracowań. Oba winny się ukazać w 1984 r. — książka C. Truesdella ponownie w wydawnictwie McGraw-Hill, a nowa monografia I. Müllera — w wydawnictwie Pitman Publ. Należy dodać, że ta ostatnia będzie głównie poświęcona metodzie, opartej na twierdzeniu Liu. Przegląd termodynamiki racjonalnej można również znaleźć w dwóch pracach autora tego artykułu [1980, 1984]. Druga z tych prac, pisana w 1975 r. zawiera wczesne wyniki, otrzymane przy pomocy twierdzenia Liu.

3.3. Termodynamika racjonalna ośrodków wieloskładnikowych. Szczególnie ważną dziedzinę zastosowań twierdzenia Liu stanowi termodynamika ośrodków wieloskładnikowych. Waga modeli w tej dziedzinie wynika, przede wszystkim, z ich znaczenia praktycznego przy opisie mieszanin z reakcją chemiczną, ośrodków porowatych, przejść fazowych, plazmy itd. Jednocześnie, ze względu na skomplikowaną strukturę zarówno równań bilansu, jak i związków konstytutywnych uzyskane wyniki są nieporównanie skromniejsze, niż dla ośrodków jednoskładnikowych. Prace w dziedzinie racjonalnej termodynamiki mieszanin rozpoczął C. TRUESDELL [1961], a następnie rozwinął w szczególności R. M. BOWEN [1976] i MÜLLER [1984]. Istotny wkład do teorii mieszanin mają również autorzy polscy (por. np. H. KEHLEN, B. BARANOWSKI, J. POPIELAWSKI [1973, 1975], W. DERSKI, S. J. KOWALSKI [1979], J. KUBIK [1980] itd.), których prace dotyczą głównie aplikacyjnych aspektów teorii mieszanin w chemii fizycznej oraz teorii ośrodków porowatych. Termodynamika ośrodków wieloskładnikowych rozwija się w ostatnich latach szczególnie intensywnie i należy oczekiwać, że będzie szeroko uprawiana również w najbliższej przyszłości.

Przedstawimy na prostych przykładach kilka podstawowych problemów termodynamiki mieszanin. Ograniczmy się dla prostoty do mieszaniny płynów, złożonej z A rozróżnialnych składników. Poszukujemy wtedy pól: gęstości masy każdego ze składników ρ^α , $\alpha = 1, \dots, A$, pól prędkości V^α , $\alpha = 1, \dots, A$, pól i temperatur empirycznych Θ^α , $\alpha = 1, \dots, A$. Punktem wyjścia do wyznaczenia równań pola są równania bilansu dla każdego ze składników

— masy

$$\frac{\partial \rho^\alpha}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho^\alpha V^\alpha) = * \rho^\alpha, \quad \sum_{\alpha=1}^A * \rho^\alpha = 0,$$

— pędu

$$(3.26) \quad \frac{\partial(\rho^\alpha V^\alpha)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho^\alpha V^\alpha \otimes V^\alpha - t^\alpha) = * m^\alpha + \rho^\alpha b^\alpha, \quad \sum_{\alpha=1}^A * m^\alpha = 0, \quad t^\alpha = (t^\alpha)^T,$$

— energii

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho^\alpha \varepsilon^\alpha + \frac{1}{2} \rho^\alpha V^\alpha \cdot V^\alpha \right) + \operatorname{div} \left[\rho^\alpha \left(\varepsilon^\alpha + \frac{1}{2} V^\alpha \cdot V^\alpha \right) V^\alpha - t^\alpha V^\alpha + q^\alpha \right] = \\ = * \varepsilon^\alpha + \rho^\alpha b^\alpha \cdot V^\alpha + \rho^\alpha r^\alpha, \quad \sum_{\alpha=1}^A * \varepsilon^\alpha = 0 \end{aligned}$$

— entropii

$$\frac{\partial[\varrho^\alpha \eta^\alpha]}{\partial t} + \operatorname{div}[\varrho^\alpha \eta^\alpha V^\alpha + h^\alpha] = * \eta^\alpha + \varrho^\alpha s^\alpha$$

gdzie $*\varrho^\alpha$, $*m^\alpha$, $*\varepsilon^\alpha$, $*\eta^\alpha$ są, odpowiednio, źródłami masy, pędu, energii i entropii, t^α — parcjalnym tensorem naprężeń Cauchy'ego w składniku α , ε^α — gęstością energii wewnętrznej w składniku α , q^α — strumieniem ciepła w składniku α , η^α — gęstością entropii w składniku α , h^α — strumieniem entropii w składniku α , wreszcie b^α , r^α , s^α są odpowiednio, gęstością sił masowych, gęstością zewnętrznego napromieniowania energetycznego i gęstością napromieniowania entropijnego w składniku α .

Ze względu na obecność źródeł, równania bilansu dla składnika α nie stają się zasadami zachowania nawet w przypadku izolacji układu od świata zewnętrznego (tzn. gdy $b^\alpha \equiv 0$, $r^\alpha \equiv 0$, $s^\alpha \equiv 0$). Źródła muszą jednak spełniać ograniczenia, podane w układzie równań (3.26) aby równania bilansu dla mieszaniny jako całości, to znaczy po wysumowaniu po składnikach, prowadziły do zasad zachowania ośrodka jednoskładnikowego. W przeciwnym przypadku model zawierałby procesy opisujące perpetuum mobile.

Druga zasada termodynamiki dla mieszanin jest w literaturze postulowana w dwóch nierównoważnych postaciach: dla każdego składnika oddzielnie

$$(3.27) \quad * \eta^\alpha \geq 0, \quad \alpha = 1, \dots, A$$

lub dla całej mieszaniny

$$(3.28) \quad \sum_{\alpha=1}^A * \eta^\alpha = 0.$$

Postać (3.27) wydaje się mieć znaczenie wyłącznie historyczne. Zarówno argumenty, wywodzące się z kinetycznej teorii gazów, jak i wnioski, płynące z nierówności (3.27) wydają się wskazywać, że bardziej uzasadniona jest słabsza postać drugiej zasady termodynamiki (3.28). Ta ostatnia jest obecnie powszechnie stosowana w literaturze przedmiotu.

Dodajmy jeszcze, że druga zasada termodynamiki w postaci (3.28) pozwala nadać interpretację fizyczną źródłom w równaniach bilansu. Okazuje się, że źródła masy dają wkład do dysypacji energii tylko wtedy, gdy potencjały chemiczne składników mają różne wartości. Oznacza to, że źródła masy są wyrazem dysypatywnych **reakcji chemicznych** w układzie. Źródła pędu dają z kolei wkład do dysypacji, jeśli składniki mają różne prędkości. Źródła $*m^\alpha$ można więc interpretować jako **siły dyfuzyjne**. Wreszcie źródła energii uczestniczą w dysypacji, gdy temperatury empiryczne składników Θ^α są różne. Oznacza to, że $*\varepsilon^\alpha$ należy interpretować, jako lokalną wymianę energii, przywracającą w układzie **lokalną równowagę termodynamiczną**, w której $\Theta^\alpha = \Theta$ dla każdego α .

Po uzupełnieniu równań bilansu (3.26) związkami konstytutywnymi otrzymujemy, podobnie jak w ośrodku jednoskładnikowym, równania pola dla poszukiwanych wielkości. Na przykład, tzw. prosta mieszanina cieczy nielepkich określona jest związkami

$$(3.29) \quad \begin{aligned} t^\alpha &= \hat{t}^\alpha(\varrho^\beta, V^\beta, \Theta^\beta, \operatorname{grad} \Theta^\beta), \\ \varepsilon^\alpha &= \hat{\varepsilon}^\alpha (\text{—————}) \\ \eta^\alpha &= \hat{\eta}^\alpha (\text{—————}) \\ q^\alpha &= \hat{q}^\alpha (\text{—————}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (3.29) \quad & h^\alpha = \hat{h}^\alpha (\varrho^\beta, V^\beta, \Theta^\beta, \text{grad}\Theta^\beta), \\
 [\text{cd.}] \quad & {}^* \varrho^\alpha = {}^* \varrho^\alpha \left(\text{-----} \right) \\
 & {}^* m^\alpha - {}^* \varrho^\alpha V^\alpha = M^\alpha \left(\text{-----} \right) \\
 & {}^* \varepsilon^\alpha - {}^* m^\alpha \cdot V^\alpha - {}^* \varrho^\alpha \left(\varepsilon^\alpha - \frac{1}{2} V^\alpha \cdot V^\alpha \right) = {}^* E^\alpha \left(\text{-----} \right)
 \end{aligned}$$

Szczególne postacie związków dla źródeł wynika z częściowego zastosowania tzw. zasady obiektywności, którą omawiamy w punkcie 4. Wynikiem tej zasady jest również fakt, iż wśród A pól prędkości jedynie $A-1$ prędkości względnych może występować jako argument w związkach konstytutywnych.

Cechą szczególną związków (3.29) jest zależność wielkości konstytutywnych dla składnika α od pól **wszystkich** składników. Prowadzi to do istotnych komplikacji przy eksploatacji drugiej zasady termodynamiki. Strategia działania, oparta na twierdzeniu LIU pozostaje jednak niezmienną. Ogranicza ona ponownie klasę związków konstytutywnych tak, aby uzyskiwane rozwiązania były **procesami termodynamicznie dopuszczalnymi**.

Przykładowo rozważmy dalsze ograniczenie związków (3.29) do postaci

$$\begin{aligned}
 (3.30) \quad & t^\alpha = \hat{t}^\alpha(\varrho^\beta, u^\beta, \Theta^\beta), \quad q^\alpha = \hat{q}^\alpha(\varrho^\beta, u^\beta, \Theta^\beta, \text{grad}\Theta^\beta), \\
 & \varepsilon^\alpha = -\hat{\varepsilon}^\alpha(\varrho^\beta, \Theta^\beta), \quad h^\alpha = \frac{q^\alpha}{\Theta^\alpha}, \\
 & \eta^\alpha = \hat{\eta}^\alpha(\varrho^\beta, \Theta^\beta),
 \end{aligned}$$

gdzie

$$(3.31) \quad u^\beta := V^\beta - V, \quad \varrho V := \sum_{\alpha=1}^A \varrho^\alpha V^\alpha, \quad \varrho := \sum_{\alpha=1}^A \varrho^\alpha,$$

a pozostałe związki — dla źródeł — pozostają bez zmian. W wyniku zastosowania nierówności (3.28) otrzymujemy

$$\begin{aligned}
 (3.32) \quad & t^\alpha = -p^\alpha I = -(\varrho^\alpha)^2 \frac{\partial \psi^\alpha}{\partial \varrho^\alpha} I, \\
 & \eta^\alpha = - \sum_{\beta=1}^A \frac{\Theta^\alpha}{\Theta^\beta} \frac{\varrho^\beta}{\varrho^\alpha} \frac{\partial \psi^\beta}{\partial \Theta^\alpha}, \\
 & \varepsilon^\alpha = \psi^\alpha + \Theta^\alpha \eta^\alpha, \quad \psi^\alpha = \psi^\alpha(\varrho^\alpha, \Theta^\beta), \\
 & \sum_{\alpha=1}^A \varrho^\alpha \left(\frac{\partial \eta^\alpha}{\partial \Theta^\beta} - \frac{1}{\Theta^\alpha} \frac{\partial \varepsilon^\alpha}{\partial \Theta^\beta} \right) = 0,
 \end{aligned}$$

oraz następującą nierówność rezydualną

$$\sigma \geq 0$$

gdzie σ jest funkcją dysypacji, określoną związkiem:

$$\begin{aligned}
 \sigma := \sum_{\alpha=1}^A \left\{ \frac{1}{(\Theta^\alpha)^2} q^\alpha \cdot \text{grad}\Theta^\alpha + {}^* \varrho^\alpha \left[\frac{1}{\Theta^\alpha} \left(\psi^\alpha + \frac{p^\alpha}{\varrho^\alpha} \right) - \frac{1}{\Theta^\alpha} \left(\psi^A + \frac{p^A}{\varrho^A} \right) + \right. \right. \\
 \left. \left. + \frac{1}{\Theta^A} \cdot \frac{1}{2} (u^\alpha - u^A) \cdot (u^\alpha - u^A) \right] + \frac{1}{\Theta^A} M^* \cdot (u^\alpha - u^A) - \left(\frac{1}{\Theta^\alpha} - \frac{1}{\Theta^A} \right) E^* \right\}
 \end{aligned}$$

Postać tej funkcji uzasadnia poprzednie uwagi o interpretacji źródeł.

Łatwo dostrzec, że nawet przytoczony najprostszy przykład ośrodka wieloskładnikowego prowadzi do związków istotnie różnych od tych, jakie otrzymujemy w przypadku jednoskładnikowym.

Największe trudności pojawiają się w teorii mieszanin przy poszukiwaniu funkcji uniwersalnych. W przypadkach szczególnych, gdy mieszanina jest bezdyfuzyjna (R. C. BOWEN [1979]), lub ma jednakową temperaturę składników (K. HUTTER, I. MÜLLER [1973]) można dowieść istnienia takich funkcji, uzasadniających fizyczny sens modeli termodynamicznych. Niestety w przytoczonym tu przykładzie, jak i tym bardziej w modelach bardziej złożonych, istnienie takich funkcji wydaje się nieprawdopodobne. Być może, uda się je znaleźć dla układów liniowych względem małego odchylenia od stanu równowagi, ale problem jest dotąd nierozwiązany. Trudności są, w pierwszym rzędzie, związane ze strukturą równań na powierzchni osobliwej.

Rozważmy przykładowo powierzchnię materialną względem składnika A . Przyjmijmy, że po dodatniej stronie powierzchni znajduje się czysty składnik A , a po ujemnej — mieszanina A — składnikowa. Jeśli własności czystego składnika A są znane, to taki układ może być traktowany jako prototyp urządzenia pomiarowego dla mieszaniny. W tym celu musimy jednak ustalić, co „mierzy” układ jednoskładnikowy na powierzchni osobliwej. Wprowadźmy oznaczenie

$$(3.33) \quad W^\alpha := V^\alpha - V^A, \quad W^A \equiv 0.$$

Wtedy równania bilansu na opisanej powyżej powierzchni mają postać

$$(3.34) \quad \begin{aligned} & \sum_{\alpha=1}^{A-1} \bar{\varrho}^\alpha \bar{W}^\alpha \cdot n = 0, \\ & \sum_{\alpha=1}^A [\bar{t}^\alpha n - \bar{\varrho}^\alpha (\bar{W}^\alpha \cdot n) \bar{W}^\alpha] = \bar{t}^A n, \\ & \sum_{\alpha=1}^A \left[\bar{\varrho}^\alpha \bar{w}^\alpha \cdot n \left(\bar{\varrho}^\alpha + \frac{1}{2} \bar{W}^\alpha \cdot \bar{W}^\alpha \right) - \bar{W}^\alpha (\bar{t}^\alpha n) + \bar{q}^\alpha n \right] = \bar{q}^A \cdot n \\ & \sum_{\alpha=1}^A [\bar{\varrho}^\alpha \bar{W}^\alpha \cdot n \eta^\alpha + \bar{h}^\alpha \cdot n] = \bar{h}^A \cdot n. \end{aligned}$$

Powyższy układ równań pokazuje, że istnienie takich idealnych powierzchni kontaktu dla wszystkich A składników nie jest wystarczające do wyznaczenia obiektów, które występują po ujemnej stronie powierzchni. Co więcej, samo istnienie takich powierzchni, które nazywa się **ściankami idealnymi**, jest wielce wątpliwe. Przykładowo, dla mieszaniny dwuskładnikowej pierwsze równanie ma postać

$$\bar{\varrho}^1 \bar{W}^1 \cdot n = 0$$

co oznacza, że ścianka musi być również materialna dla składnika $\alpha = 1$. Jest to niemożliwe w przypadku błon półprzepuszczalnych, gdy składnik zatrzymywany oddaje część pędu błonie. Prowadzi to ponownie do wniosku, że w teorii mieszanin **należy** uwzględnić powierzchniovą strukturę na granicy kontaktowej. Czy można wtedy dowieść istnienia funkcji uniwersalnych — nie wiadomo.

4. Termodynamiczna teoria materiałów

Poczynając od prac R. S. RIVLINA z końca lat pięćdziesiątych rozwija się szczególnie intensywnie dziedzina termodynamiki ośrodków ciągłych, którą nazywa się **termodynamiczną teorią materiałów**. Szczególną rolę odegrały tu prace B. D. COLEMANA [1964]. Połączył on analizę formalnej struktury równań konstytutywnych z wykorzystaniem drugiej zasady termodynamiki w postaci nierówności Clausiusa-Duhema. Obok drugiej zasady termodynamiki przyjmuje się w teorii materiałów szereg dodatkowych ograniczeń, wynikających z obserwacji o nietermodynamicznym charakterze. Należą do nich przede wszystkim

- zasada obiektywności
- zasada izotropii materiałowej.

Pierwsza z nich głosi, że równania pola powinny być niezmiennicze względem zmiany obserwatora, opisanej transformacją

$$(4.1) \quad x' = Q(t)x + k(t), \quad \dot{x} = Q(\dot{x}' - \dot{k})$$

gdzie Q jest dowolną macierzą ortogonalną. Łatwo się przekonać, że same równania bilansu nie spełniają tej zasady. Mianowicie, transformacja pola prędkości, wynikająca ze zmiany obserwatora (4.1) ma postać

$$(4.2) \quad \dot{x}' = Q\dot{x} + \dot{Q}x + x\dot{k},$$

a transformacja odwrotna, jak łatwo obliczyć, jest opisana wzorem

$$(4.3) \quad V = Q^T[V' - W(x' - k) - \dot{k}], \quad W := \dot{Q}Q^T.$$

Macierz W jest nazywana **macierzą prędkości kątowych**.

Powyższe związki pozwalają znaleźć regułę transformacyjną dla przyspieszenia

$$(4.4) \quad \begin{aligned} a' &= Qa + 2\dot{Q}v + \ddot{Q}x + \ddot{k} \\ a &= Q^T[a' - 2W(v' - \dot{k}) + W^2(x - k) - \dot{W}(x - k) - \ddot{k}]. \end{aligned}$$

W powyższym związku można rozpoznać przyspieszenia ruchu względnego, znane z mechaniki analitycznej.

$2W(v' - \dot{k})$	— przyspieszenie Coriolisa
$-W^2(x - k)$	— przyspieszenie odśrodkowe
$\dot{W}(x - k)$	— przyspieszenie Eulera
\ddot{k}	— przyspieszenie przesunięcia względego układów.

Powróćmy teraz do równań bilansu dla ośrodka jednoskładnikowego. W układzie primowanym mają one postać

$$(4.5) \quad \begin{aligned} \dot{\rho}' + \rho' \operatorname{div}' v' &= 0, \quad \dot{\rho}' := \frac{\partial \rho'}{\partial t} + v' \cdot \operatorname{grad}' \rho', \\ \rho' a' - \operatorname{div}' t' &= \rho' b' + \rho' i' \\ \rho' \dot{e}' &= t' (\operatorname{grad}' v')^T - \operatorname{div}' q' + \rho' r' \end{aligned}$$

gdzie

$$(4.6) \quad i' := 2\dot{W}(v' - \dot{k}) - W^2(x - k) + \dot{W}(x - k) + \ddot{k}.$$

Łatwo się przekonać, że reguła transformacyjna dla wektora i' powoduje, iż równania (4.5) są niezmiennicze względem transformacji (4.1). Wpływ braku niezmienniczości równań bilansu względem zmiany obserwatora objawia się więc jedynie obecnością dodatkowej siły — wektora i' w równaniach przetransformowanych. Tym samym równania pola będą niezmiennicze względem tej transformacji, jeśli związki konstytutywne dla τ , ε i q będą również niezmiennicze. To żądanie przyjmuje, na przykład dla materiałów termosprężystych następującą postać

$$(4.7) \quad \begin{aligned} t(x, F, \Theta, G) &= Q^T t(Qx + k, QF, \Theta, G)Q, \\ q(x, F, \Theta, G) &= Qq(Qx + k, QF, \Theta, G), \\ \varepsilon(x, F, \Theta, G) &= \varepsilon(Qx + k, QF, \Theta, G), \end{aligned}$$

Istotną cechą tej transformacji jest występowanie **tej samej** funkcji konstytutywnej po obu stronach związków (4.7).

Zasada obiektywności — zarówno jej skutki, jak i motywacja fizyczna mają bardzo bogatą literaturę. Warto wspomnieć, że mechanika statystyczna dostarcza argumentów **przeciwno** uniwersalnemu charakterowi tej zasady (por. I. MÜLLER [1972]). Wydaje się, że można ją traktować jedynie jako dobre przybliżenie w skali makroskopowej bardzo skomplikowanych reguł transformacyjnych, opisujących zmianę obserwatora.

Dodajmy, że problem ten jest znacznie bardziej skomplikowany w przypadku ośrodków wieloskładnikowych, co jest związane z obecnością źródeł w równaniach bilansu oraz z ruchem względnym, czyli dyfuzją składników.

Druga ze wspomnianych wyżej zasad — **zasada izotropii materiałowej** — jest związana z własnościami symetrii opisywanego materiału. Określa ona reguły transformacyjne związków konstytutywnych przy zmianie układu materialnego. Jeśli dokonamy przekształcenia

$$(4.8) \quad X' = HX,$$

to niezmienniczość względem tego przekształcenia dla materiału termosprężystego opisana jest związkami

$$(4.9) \quad \begin{aligned} t(x, F, \Theta, G) &= t(x, FH^T, \Theta, GH^T), \\ q(x, F, \Theta, G) &= q(x, FH^T, \Theta, GH^T), \\ \varepsilon(x, F, \Theta, G) &= \varepsilon(x, FH^T, \Theta, GH^T). \end{aligned}$$

Wybór macierzy H zależy od rodzaju materiału. W przypadku gazu, który jest ośrodkiem ciągłym o najwyższej symetrii, H jest macierzą ortogonalną. **Grupa izotropii**, będąca zbiorem wszystkich macierzy H dla danego materiału jest w tym przypadku grupą ortogonalną. W przypadku ciał stałych, jak również dla niektórych cieczy grupy izotropii są znacznie uboższe od grupy ortogonalnej. Pierwszy monograficzny przegląd rezultatów w tej dziedzinie można znaleźć w pracy C. TRUESDELLA i W. NOLLA [1965]. Dziedzina ta rozwija się intensywnie do dnia dzisiejszego, zarówno w kierunku aplikacyjnym, tzn. określania grup symetrii i odpowiadających im reprezentacji związków konstytutywnych, jak i w podstawowym — na przykład w zakresie opisu symetrii materiału, zmieniającej się w czasie procesu termodynamicznego w wyniku ruchu defektów, przejść fazowych itp.

Należy dodać, że bardzo istotny wkład do teorii związków konstytutywnych mają autorzy polscy. Dotyczy to w szczególności teorii materiałów sprężysto-plastycznych, sprężysto-lepkoplastycznych i materiałów z parametrami wewnętrznymi. Szczegółowy przegląd literatury światowej ze szczególnym uwzględnieniem prac polskich można znaleźć w monografiach P. PERZYNY [1966, 1978].

5. Perspektywy rozwoju

5.1. Modelowanie termodynamiczne w ramach teorii racjonalnej. Jak w każdej dziedzinie nauki, tak i w termodynamice nie można wskazać celów zbyt odległych w przyszłości. Wydaje się jednak, że ostatnie dwudziestolecie spowodowało zarówno ugruntowanie podstaw, jak i metod termodynamiki, wprowadzając te ostatnie jako trwałe narzędzie przy budowie modeli nowych materiałów i zjawisk. Z tego powodu można przewidywać intensywny rozwój zastosowań termodynamiki w tych właśnie dziedzinach. W literaturze szczególnie często pojawiają się prace, dotyczące następujących zagadnień

- procesy termodynamiczne w ośrodkach ciągłych z uwzględnieniem pól elektromagnetycznych
- teoria nierównowagowych procesów w ośrodkach wieloskładnikowych
- termodynamika materiałów z więzami.

Motywacją do podjęcia zagadnień pierwszej grupy jest głównie aspekt praktyczny. Istniejące dotąd teorie takich ośrodków wywodzą się głównie z modeli mikroskopowych. Zaletą takiego podejścia jest dobra motywacja fizyczna oraz opis zjawisk wykluczanych przez modele ciągłe (np. propagacja bardzo krótkich fal). Wadą jednakże jest niezwykle skomplikowana struktura równań, praktycznie uniemożliwiająca rozwiązywanie zagadnień brzegowo-początkowych. W pewnym zakresie lukę tą mogą wypełnić termodynamiczne modele ciągłe. Odniesiono w tym zakresie już sporo sukcesów przy modelowaniu plazmy i dielektryków, wydaje się, że równie atrakcyjnymi dziedzinami są modele elektrolitów i ciekłych kryształów. W Polsce problematyka ta jest dobrze rozwinięta i należy oczekiwać kontynuacji prac w tym kierunku (por. W. NOWACKI [1983]).

Jak już wspominaliśmy, teoria ośrodków wieloskładnikowych napotyka dotąd na wiele trudności, choć i w tej dziedzinie okres formułowania podstaw można uznać za zakończony. Wielorakie zastosowania mieszanin do opisu procesów chemicznych, plazmy, ośrodków porowatych, dynamiki przejść fazowych oraz trudności w konstrukcji modeli mikroskopowych prowadzą do wniosku, iż również w tej dziedzinie nastąpi dalszy rozwój w najbliższym czasie.

Trzecia dziedzina, termodynamika materiałów z więzami, jest w początkowym stadium rozwoju (por. T. ALTS [1979]). Mimo potencjalnych możliwości zastosowań, na przykład przy modelowaniu kompozytów, trudno w tej chwili określić kierunek i intensywność badań.

Wydaje się również, że należy oczekiwać dalszych prac dotyczących samej metody termodynamicznej. Przedstawiona obszernie w p. 3 metoda mnożników Lagrange'a jest oparta na bardzo silnych założeniach. Dotyczy to założenia gładkości rozwiązań, prowadzącego do istnienia i jednoznaczności lokalnego rozwiązania problemu Cauchy'ego.

Takie założenie nie może być spełnione w wielu sensownych problemach fizycznych, co stwarza konieczność odpowiedniego osłabienia założeń w twierdzeniu Liu. Twierdzenie to wykorzystuje również w sposób istotny regułę różniczkowania funkcji złożonych. Już w przypadku funkcjonalnych związków konstytutywnych (np. dla materiałów z pamięcią) reguła ta przestaje być trywialna, a wykorzystywana dotąd propozycja B. D. COLEMANA [1964] wydaje się zbyt uproszczona, gdyż prowadzi zawsze do istnienia potencjału dla naprężeń.

Oddzielny problem, sygnalizowany już w pracy, stanowi opis powierzchni kontaktu. Założenie o idealności jest w oczywisty sposób sprzeczne z faktami fizycznymi, zwłaszcza w takich ośrodkach, jak mieszanina, czy nawet jednoskładnikowy model plazmy.

5.2. Termodynamika rozszerzona. W ostatnim okresie (I-SHIH LIU, I. MÜLLER [1984]) pojawiła się nowa propozycja modelowania termodynamicznego, zmieniająca w sposób zasadniczy podejście do budowania równań pola. Autorzy cytowanej wyżej pracy proponują wyprowadzanie równań pola nie z klasycznego układu równań bilansu masy, pędu i energii, a z układu równań, stanowiących odpowiednik równań na momenty funkcji rozkładu. W powyższej pracy postuluje się układ analogiczny do układu otrzymanego przez Grada w teorii 13 momentów, gdy punktem wyjścia jest równanie Boltzmanna. Ma on postać

$$(5.1) \quad \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial F_k}{\partial x_k} &= 0, \\ \frac{\partial F_l}{\partial t} + \frac{\partial F_{lk}}{\partial x_k} &= F(b_l + i_l) + 2W_{lk}F_k, \\ \frac{\partial F_{lj}}{\partial t} + \frac{\partial F_{ljk}}{\partial x_k} - P_{\langle lj \rangle} &= F_{(l}(b_{j)} + i_{j)}) + 4F_{k(l}W_{jk)}, \\ \frac{\partial F_{lll}}{\partial t} + \frac{\partial F_{llk}}{\partial x_k} - P_{lll} &= 3F_{(lj}(b_{j)} + i_{j)}) + 2W_{lk}F_{kl}, \end{aligned}$$

gdzie

$$(5.2) \quad i_i + 2W_{ik}v_k = -W_{ik}^2(x_k - k_k) + 2W_{ik}(v_k - \dot{k}_k) + \dot{W}_{ik}(x_k - k_k) + \ddot{k}_i,$$

oraz wprowadzono kartezjański układ współrzędnych do przestrzeni konfiguracyjnej. W_{ik} oznacza współrzędne macierz prędkości kątowych, $F \equiv \rho$ jest gęstością masy, $F_k \equiv \rho V_k$ — gęstością pędu, $F_{ik} \equiv \rho V_i V_k - t_{ik}$ — strumieniem pędu, F_{ljk} , F_{ijkl} — strumieniami wyższych rzędów, P_{ij} , P_{ijk} oznaczają człony źródłowe. Nawias przy wskaźnikach oznacza pełną symetryzację, a nawias ostry $\langle \cdot \rangle$ — część bezśladową. Jak widać pierwsze dwa równania są identyczne z równaniem bilansu masy i bilansu pędu termodynamiki racjonalnej. Zamiast jednak bilansu energii mamy układ 9 równań, w których jedynie niektóre człony mają klasyczną interpretację makroskopową.

Zaletą formalną takiego podejścia jest sprowadzenie równań pola do quasiliniowych równań różniczkowych **pierwszego rzędu**. Wynika to z możliwości **rozszerzenia zbioru zmiennych polowych**, która jest skutkiem dodatkowych równań bilansu. W przypadku, rozważanym przez I-Shih LIU i I. MÜLLERA zmiennymi tymi są

$$(5.3) \quad F, F_l, F_{ij}, F_{lll},$$

tzn. gęstość masy, gęstość pędu, gęstość strumienia pędu i gęstość strumienia energii.

Związki konstytuowne są wtedy funkcjami od tych zmiennych, ale nie od ich pochodnych. Powoduje to przejście równań (5.1) w równania pola pierwszego rzędu.

Okazuje się, że przeniesienie metody mnożników Lagrange'a do tak zbudowanej termodynamiki znakomicie upraszcza procedurę i jednocześnie pozwala efektywnie wykorzystać takie ograniczenia, jak zasada obiektywności, czy hiperboliczność układu równań pola.

W cytowanej pracy pokazano, że równania (5.1) mogą opisać jedynie procesy w klasycznym gazie idealnym, oraz w zdegerowanych gazach Bose'go i Fermi'ego. Aby uzyskać rozszerzony opis termodynamiczny bardziej skomplikowanych układów fizycznych należy więc zmodyfikować układ równań bilansu. Jedną z takich modyfikacji zaproponował Z. BANACH w przygotowywanej do druku pracy. Punktem wyjścia jest w tej pracy uogólnienie równania Boltzmanna podane przez KLIMONTOWICZA [1975].

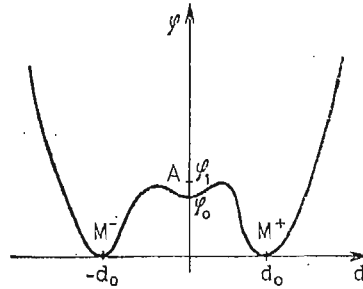
Ze względu na powiązania z mechaniką statystyczną, wprowadzające istotnie nowe elementy strukturalne do teorii makroskopowej wydają się, że rozszerzona termodynamika będzie stanowić jeden z wiodących kierunków badań termodynamicznych w najbliższych latach. Może ona stanowić pomost, łączący strukturalne zalety teorii mikroskopowych z efektywnością teorii makroskopowych.

5.3. Problemy niestabilności i fenomenologiczne teorie przejść fazowych. Wśród problemów termodynamicznych o bardziej ograniczonym charakterze wyróżniają się ostatnio dużym zainteresowaniem środowiska naukowego zagadnienia niestabilności procesów i nierównowagowych przejść fazowych. W związku z zastosowaniami w teorii reakcji chemicznej i w zagadnieniach biologicznych pewne aspekty niestabilności są badane w ramach termodynamicznych propozycji I. Prigogina (por. P. GLANSDORFF i I. PRIGOGINE [1971]). Brak jest jednak systematycznej metody o dostatecznej ogólności, która pozwoliłaby w sposób jednolity zdefiniować pojęcie niestabilności procesu termodynamicznego oraz pozwoliłaby badać stabilność zadanych procesów. Pewne szanse na taką systematyzację stwarza sprowadzenie analizy do traktowania procesów termodynamicznych jako ewolucji pewnego uogólnionego układu dynamicznego, dla którego analiza stabilności jest już dobrze opracowana. W tym celu należy jednak rozwiązać problem geometryzacji przestrzeni stanów (por. punkt 2 pracy).

Niektóre szczególne zagadnienia, a zwłaszcza problem przejść fazowych, można również potraktować inaczej. Punktem wyjścia jest rozszerzenie zbioru zmiennych konstytuwnych o pewne parametry wewnętrzne (por. np. A. I. MURDOCH [1977]). Przedstawimy ten problem na przykładzie przejścia fazowego austenit martenzyt w tzw. stopach z pamięcią kształtu (por. M. ACHENBACH, I. MÜLLER, K. WILMAŃSKI [1981]). Austenit jest w takim stopie fazą o wysokiej symetrii, a dwie bliźniacze fazy martenzytowe — fazami o niskiej symetrii. Jeśli przez d oznaczymy miarę deformacji pewnego jednorodnego mikroskopowego elementu ciała (zagadnienie jednowymiarowe!) to w danej temperaturze potencjał średni takiego elementu ma postać przedstawioną na rys. 2. Przyjmujemy, że w stanie wyjściowym ciała próbka była w stanie austenitycznym A . Na skutek przyłożenia obciążenia zewnętrznego elementy ciała będą stopniowo przechodziły z fazy A w, powiedzmy, fazę M^+ . Jeśli przez ξ oznaczymy udział fazy A w całkowitej deformacji, to mamy

$$(5.4) \quad d_{\text{makro}} = \xi d_A + (1 - \xi) d_{M^+},$$

gdzie d_A jest deformacją, jaką miałyby przy danym obciążeniu próbka austenityczna,



Rys. 2

d_{M^+} — deformacją, jaką miałaby przy tym samym obciążeniu próbka czysto martenzytyczna M^+ , a d_{makro} jest rzeczywistością deformacyjną makroskopową. Jak widać, prezentowany przykład przejścia fazowego wymaga rozszerzenia zbioru zmiennych konstytutywnych z , na przykład (σ, Θ) na (σ, Θ, ξ) , gdzie σ jest naprężeniem w rozważanym problemie jednowymiarowym. Co więcej, zamiast jednego związku konstytutywnego dla całkowitej deformacji musimy zadać dwa związki; na przykład

$$(5.5) \quad d_A = d_A(\sigma, \Theta, \xi = 1), \quad d_{M^+} = d_{M^+}(\sigma, \Theta, \xi = 0).$$

Wreszcie pojawienie się dodatkowego pola wymaga sformułowania dodatkowego równania pola, które zwykle przyjmuje się w postaci równania ewolucji. W prezentowanym przykładzie

$$(5.6) \quad \frac{d\xi}{dt} = (1 - \xi)e^{-\frac{B_M}{KT}} - \xi e^{-\frac{B_A}{KT}},$$

gdzie

$$(5.7) \quad B_A := \varphi_1 - \varphi_0 - \sigma d_{\text{makro}}, \quad B_M := \varphi_1 - \sigma d_{\text{makro}},$$

są tzw. barierami potencjału.

Równanie (5.6) ma charakter mikroskopowy, wynika bowiem z określenia prawdopodobieństwa przejścia z fazy A do M^+ i z fazy M^+ do A .

Przeniesienie nowych elementów, zawartych w powyższym przykładzie do uogólnionej termodynamiki ośrodków ciągłych jest problemem dotąd otwartym. Badania w tym kierunku są jednak bardzo intensywne — również w Polsce, zwłaszcza dzięki pracom W. KOSINSKIEGO i P. PERZYNY. Należy oczekiwać, również ze względu na potrzeby inżynierii materiałowej, że również ta dziedzina będzie szeroko uprawiana w najbliższych latach.

Literatura cytowana w tekście

- 1909 C. CARATHEODRY, *Untersuchungen über die Grundlagen der Thermodynamik*, Math. Ann., 67.
 1959 G. FALK, H. JUNG, *Axiomatik der Thermodynamik*, Handbuch der Physik, III/2, Springer Verlag.
 1961 C. TRUESDELL, *Una teoria meccanica della diffusione*, Celebrazioni Archimedee del secolo XX, Siracusa 11 - 16 aprile 1961, vol. III, Simposi di meccanica e matematica applicata.
 1964 B. D. COLEMAN, *Thermodynamics of materials with memory*, Arch. Rat. Mech. Anal., 17.
 R. GILES, *Mathematical foundations of thermodynamics*, Pergamon Press, Oxford.

- 1965 C. TRUESDELL, W. NOLL, *The non-linear field theories of mechanics*, Handbuch der Physik, III/3, Springer Verlag.
- 1966 H. A. BUCHDAHL, *The concepts of classical thermodynamics*, Cambridge University Press.
P. PERZYNA, *Teoria lepkoplastycznosci*, PWN.
- 1967 J. L. B. COOPER, *The foundations of thermodynamics*, Jour. Math. Anal. Appl., **17**.
I. MÜLLER, *On the entropy inequality*, Arch. Rat. Mech. Anal., **26**.
- 1969 C. TRUESDELL, *Rational thermodynamics*, McGraw—Hill Book Co.
- 1971 P. GLANSDORFF, I. PRIGOGINE, *Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuations*, Wiley—Interscience.
K. WILMANSKI, *Some topological properties of the space of states of isolated systems*, Bull. Acad. Polon. Sci., Sér. Sci. Techn., **19**, 7 - 8.
- 1972 W. BARAŃSKI, *Additivity of mechanical power and the principle of stress*, Arch. Mech. Stos., **24**.
W. A. DAY, *A condition equivalent to the existence of entropy in classical thermodynamics*, Arch. Rat. Mech. Anal., **49**.
I-SHIH LIU, *Method of Lagrange multipliers for exploitation of the entropy principle*, Arch. Rat. Mech. Anal., **46**.
I. MÜLLER, Arch. Rat. Mech. Anal., **45**.
K. WILMANSKI, *On thermodynamics and functions of states of nonisolated systems*, Arch. Rat. Mech. Anal., **45**.
K. WILMANSKI, *The local form of the entropy inequality in neoclassical thermodynamics*, Bull. Acad. Polon. Sci., Sér. Sci. Techn., **20**, 9.
- 1973 H. KEHLEN, B. BARANOWSKI, J. POPIELAWSKI, *Zur Thermodynamik irreversibler Prozesse in einem Zwei-Phasen-System*, I. Bilanz-gleichungen und Entropieproduktion, Z. phys. Chemie, **254**, 5/6.
- 1973 I. MÜLLER, *Thermodynamik. Die Grundlagen der Materialtheorie*, Bertelsmann Universitätsverlag.
M. ELŻANOWSKI, *On the geometry of the state space in neoclassical thermodynamics*, Arch. Mech. Stos., **25**, 5.
- 1974 W. BARANSKI, *Certain algebraic and topological properties of a universum*, Bull. Acad. Polon: Sci., Sér. Sci. Techn., **22**, 10.
W. BARANSKI, *A continuous model of the material universum*, Bull. Acad. Polon. Sci., Sér. Sci. Techn., **22**, 10.
B. D. COLEMAN, D. R. OWEN, *A mathematical foundation for thermodynamics*, Arch. Rat. Mech. Anal., **54**, 1.
M. ELŻANOWSKI, *On the first law of neoclassical thermodynamics*, Bull. Acad. Polon. Sci., Sér. Sci. Techn., **22**, 7 - 8.
K. WILMANSKI, *Podstawy termodynamiki fenomenologicznej*, PWN.
- 1975 B. D. COLEMAN, D. R. OWEN, *On thermodynamics and elastic-plastic materials*, Arch. Rat. Mech. Anal., **59**, 1.
W. A. DAY, *Continuum thermodynamics based on a notion of rate of loss information*, Arch. Rat. Mech. Anal., **59**, 1.
R. L. FOSDICK, J. SERRIN, *Global properties of continuum thermodynamics processes*, Arch. Rat. Mech. Anal., **59**, 2.
K. HUTTER, I. MÜLLER, *On mixtures of relativistic fluids*, Helvetica Physica Acta, **48**.
H. KEHLEN, B. BARANOWSKI, J. POPIELAWSKI, *Zur Thermodynamik irreversibler Prozesse in einem Zwei-Phasen-System*, II. Phänomenologische Gleichungen, Z. phys. Chemie, **256**, 4.
Ю. Л. Климонович, *Кинетическая теория неидеального газа и неидеальной плазмы*, изд. Наука
- 1976 R. M. BOWEN, *Theory of mixtures*, w: Continuum Physics, ed. A. C. Eringen, Academic Press.
B. D. COLEMAN, D. R. OWEN, *Thermodynamics of elastic-plastic materials*, Acad. Naz. dei Lincei, Ser. 8, **59**, 1 - 2.
- 1976 M. ELŻANOWSKI, *The entropy function of the thermodynamic isolated sytem*, Bull. Acad. Polon. Sci., Sér. Sci. Techn., **24**, 2.
R. SAMPAIO, *An axiomatic theory of mixtures with diffusion*, Arch. Rat. Mech. Anal., **62**, 2.
K. WILMANSKI, *Foundations of neoclassical thermodynamics: metrization of direct thermodynamic*

- processes, w: Trends in Applications of Pure Mathematics to Mechanics, ed. G. Fichera, Pitman Publ.
- 1977 W. A. DAY, *The inaccessibility of the past in linear viscoelasticity: an information theory approach*, Arch. Rat. Mech. Anal., **64**, 3.
- W. A. DAY, *Entropy and hidden variables in continuum thermodynamics*, Arch. Rat. Mech. Anal., **62**.
- W. A. DAY, M. ŠILHAVÝ, *Efficiency and the existence of entropy in classical thermodynamics*, Arch. Rat. Mech. Anal., **66**, 1.
- M. ELŻANOWSKI, *Some problems of the geometrization of neo-classical thermodynamics*, Bull. Acad. Polon. Sci., Sér. Sci. Techn., **25**, 3.
- A. I. MURDOCH, *On phase transitions of elastic continua*, Jour. App. Math. Phys., **28**.
- 1978 P. PERZYNA, *Termodynamika materiałůw niesprężystych*, PWN.
- M. ŠILHAVÝ, *A condition equivalent to the existence of nonequilibrium entropy and temperature for materials with internal variables*, Arch. Rat. Mech. Anal., **68**, 4.
- K. WILMAŃSKI, *Continuity of fluxes in thermodynamics*, Lett. Appl. Engn. Sci., **16**.
- 1979 T. ALTS, *Thermodynamik elastischer Körper mit thermo-kinematischen Zwangsbedingungen — fadenverstärkte Materialien*, Technische Universität Berlin.
- R. C. BOWEN, *A theory of constrained mixtures with multiple temperatures*, Arch. Rat. Mech. Anal., **70**.
- 1979 W. A. DAY, *Global Mean Value theorems in thermodynamics*, Arch. Rat. Mech. Anal., **70**.
- W. DERSKI, S. J. KOWALSKI, *Equations of linear thermoconsolidation*, Arch. Mech. Stos., **31**, 3.
- R. SAMPAIO, W. O. WILLIAMS, *Thermodynamics of diffusing mixtures*, Jour. Méc., **18**, 1.
- J. SERRIN, *Conceptual analysis of the classical second law of thermodynamics*, Arch. Rat. Mech. Anal., **70**.
- K. WILMAŃSKI, *Localization problem of nonlocal continuum theories*, Arch. Mech. Stos., **31**, 1.
- 1980 J. KUBIK, *Balance of mass of a fluid-solid mixture with directional properties of the skeleton*, Bull. Acad. Polon. Sci., Sér. Sci. Techn., **28**, 9 - 10.
- M. ŠILHAVÝ, *On measures, convex cones and foundations of thermodynamics*, I. Systems with vector-valued actions, Czech. Jour. Phys., **B30**; II. Thermodynamic systems, Czech. Jour. Phys., **B30**.
- K. WILMAŃSKI, *Thermodynamic foundations of thermoelasticity*, w: Recent developments in thermo-mechanics of solids, ed. G. Lebon i P. Perzyna, Springer Verlag.
- 1981 M. ACHENBACH, I. MÜLLER, K. WILMAŃSKI, *A model for creep and strain hardening in martensitic transformation*, Jour. Therm. Stresses, **4**.
- 1983 W. NOWACKI, *Efekty elektromagnetyczne w stałych ciałach odkształcalnych*, PWN.
- 1984 I-SHIH LIU, I. MÜLLER, *Extended thermodynamics of classical and degenerate ideal gases*, Arch. Rat. Mech. Anal. (w druku).
- I. MÜLLER; —, Pitman Publ.
- K. WILMAŃSKI, *Termodynamika fenomenologiczna*, w: Mechanika techniczna, t. I, ed. H. Zorski.

Praca została złożona w Redakcji dnia 30 czerwca 1983 roku

WSPÓŁCZESNE METODY BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH W MECHANICE CIAŁA STAŁEGO

MAREK BIJAK-ŻOCHOWSKI

Politechnika Warszawska

JACEK KAPKOWSKI

Instytut Mechanizacji Budownictwa

Na początku lat siedemdziesiątych prognozowano, że w wyniku żywiołowego rozwoju techniki komputerowej badania doświadczalne sprowadzone zostaną na bardzo ograniczone pole działania. Okazało się, że metody komputerowe nie tylko nie wyeliminowały technik eksperymentalnych, ale same przyczyniły się do ich udoskonalenia i dalszego szybkiego rozkwitu. W wielu przypadkach połączenie aparatury doświadczalnej z systemem komputerowym stworzyło nowe narzędzie o prawie nieograniczonych możliwościach w zakresie doświadczalnej analizy naprężeń i odkształceń.

Nowoczesne metody eksperymentalne stosowane są nadal — jako ostatecznie weryfikujące obliczenia — do badania wielkich systemów konstrukcyjnych (statków, samolotów, tam, reaktorów atomowych itd.), zarówno w procesie montażu jak i kontroli eksploatacyjnej, czy kontroli jakości.

Szerokim obszarem zastosowania metod doświadczalnych jest badanie problemów podstawowych, szczególnie takich jak duże odkształcenia konstrukcji, propagacji fal naprężeń i odkształceń, zmęczenia i zniszczenia konstrukcji, czy zachowania się materiałów o nieliniowej charakterystyce lub z niejednorodnościami. Tych zagadnień i wielu innych problemów mechaniki ciała odkształcalnego nie można rozwiązać na obecnym poziomie wiedzy bez zastosowania analizy doświadczalnej.

W artykule tym przedstawiono przegląd najbardziej rozpowszechnionych nowoczesnych metod doświadczalnych, stosowanych w mechanice ciała stałego. Aby nie rozbudowywać zbyttno objętości opracowania dokonano pewnej selekcji. Szerzej opisano jedynie te, które zdaniem autorów rokują największe nadzieje jeśli chodzi o ich dalszy rozwój. Wyodrębniono kilka grup metod: bardziej uniwersalne bazujące na wykorzystaniu tych samych zjawisk fizycznych i dość wąsko wyspecjalizowane służące do rozwiązywania określonych problemów badawczych.

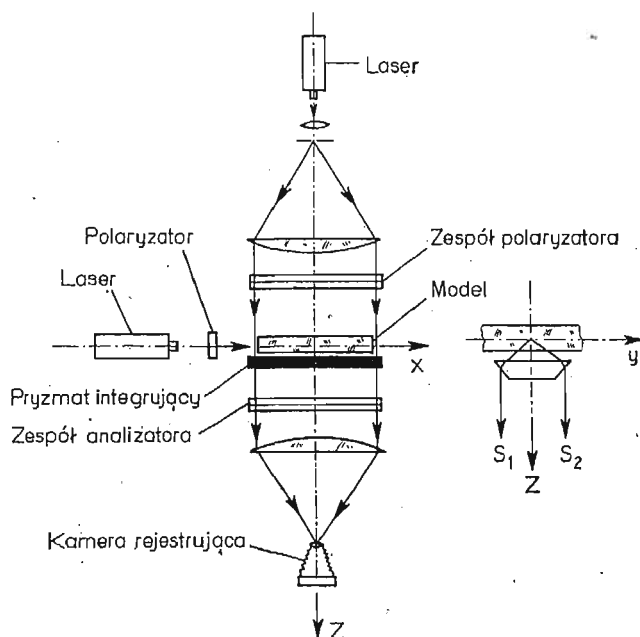
Autorzy mają świadomość tego, że na dokonany przez nich podział i wybór miały także wpływ ich własne preferencje i kompetencje.

Metody polaryzacyjno-optyczne

W obecnym stadium rozwoju metody polaryzacyjno-optyczne osiągnęły bardzo wysoki stopień użyteczności w badaniach stosowanych. Dotyczy to zarówno techniki transmisyjnej (klasyczna elastooptyka — badania modelowe) jak i refleksyjnej (metoda elastooptycznej warstwy powierzchniowej — badania na rzeczywistych konstrukcjach). Techniki te wykorzystywane są również do badań podstawowych poza tradycyjnymi dziedzinami zastosowań. Można tu przykładowo wymienić prace z zakresu modelowania materiałów kompozytowych przy pomocy tworzyw optycznie czynnych z odpowiednio dobranymi zbrojeniami [1]. Metoda warstwy optycznie czynnej znajduje zastosowanie w badaniach procesów obróbki plastycznej [2], czy też ostatnio coraz częściej w doświadczeniach z zakresu mechaniki pękania [3].

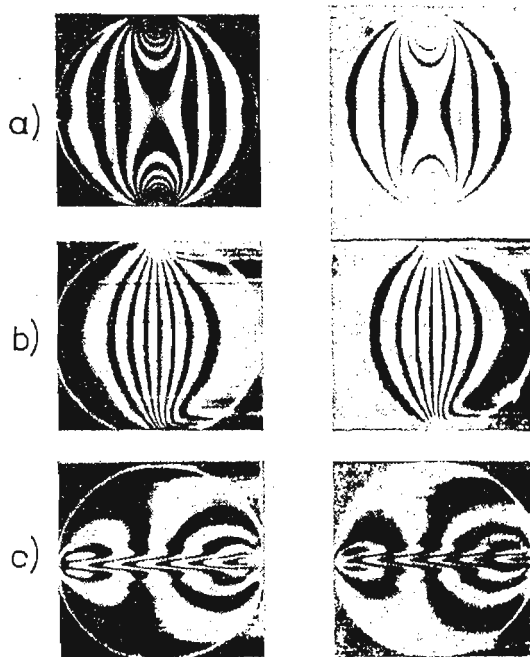
Nie należy jednak sądzić, że metody polaryzacyjno-optyczne stanowią zamknięty temat. Można wyróżnić dwa zasadnicze kierunki, w których prowadzone są obecnie badania mające na celu rozwijanie i udoskonalenie tych metod. Pierwszym jest opracowywanie nowych technik pomiarowych, polegających często na jednoczesnym wykorzystaniu innych zjawisk fizycznych. Oprócz tego zasadniczego kierunku rozwojowego obserwuje się dążenie do udoskonalenia tradycyjnych technik pomiarowych. Chodzi o zwiększenie dokładności pomiarów oraz o jak najdalej posuniętą ich automatyzację często z wykorzystaniem komputerów do analizy wyników.

Jeżeli chodzi o nowe techniki pomiarowe daje się zaobserwować dążność do wykorzystania takich zjawisk jak dwójłomność w polu elektrycznym (efekt Kerra), dwójłomność w polu magnetycznym, skręcenie płaszczyzny polaryzacji w polu magnetycznym (efekt Faradaya). Klasycznym przykładem wykorzystania tego rodzaju zjawisk są propozycje



Rys. 1. Schemat układu do analizy naprężeń metodą światła rozproszonego

Abena, w których wprowadzenie sztucznego obrotu głównych płaszczyzn polaryzacji pozwala badać trójwymiarowe stany naprężeń w polaryskopie transmisyjnym. Można tego dokonać przez stosowanie modeli o uprzednio zamrożonych polach naprężeń, albo też przez zastosowanie silnych pól magnetycznych. Tego rodzaju technikę pomiarową nazwano **elastoptyką całkową**. Uwzględnienie efektu Faradaya doprowadziło do opracowania podstaw **magnetoelastoptyki** i zbudowania magnetopolaryskopu [4]. Przy wykorzystaniu elastoptyki całkowej uzyskano szereg wartościowych wyników w badaniach płyt, powłok, ciał osiowo-symetrycznych [5], a także w badaniu kryształów [6].

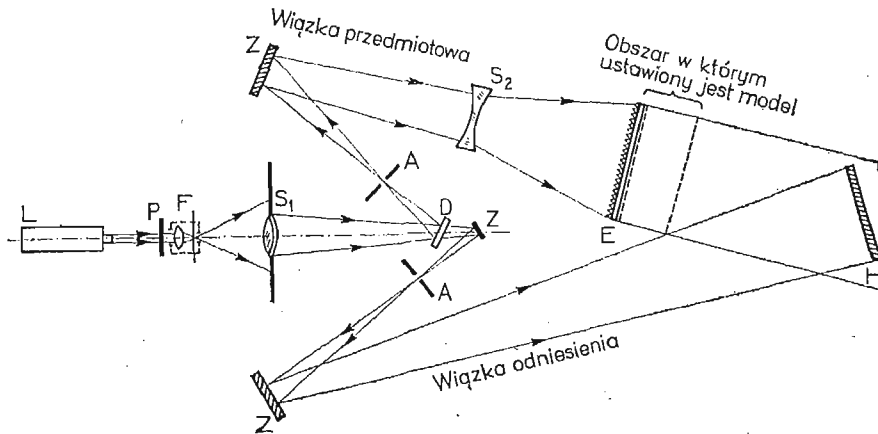


Rys. 2. Tarcza kołowa ściskana wzdłuż średnicy: a) izochromy m ; b) izodyny S_x , c) izodyny S_y

Jednym z etapów rozwoju metody elastoptycznej są badania modeli w świetle rozproszonym. Technika ta znana od 1938 roku nie doczekała się jednak szerszego zastosowania. Stało się tak z tego powodu, że nie był znany dokładny analityczny opis zjawiska rozproszenia światła, a ponadto koniecznym było stosowanie skomplikowanej i bardzo kosztownej aparatury. W ostatnich latach rozwinięto pewną szczególną odmianę badań elastoptycznych w świetle rozproszonym nazwaną **metodą izodyn**. W pracy opublikowanej w 1973 roku PINDERA i STRAKA [7] zaproponowali zastosowanie tzw. pryzmatu integrującego przykładanego do powierzchni modelu badanego w polaryskopie transmisyjnym (rys. 1). Pryzmat związany jest z dodatkowym źródłem światła spójnego. Analizując wiązki światła S_1 i S_2 otrzymuje się informacje o różnicy naprężeń $\sigma_y - \sigma_z$, a w przypadku płaskiego stanu naprężeń daje to możliwość bezpośredniego wyznaczenia naprężeń σ_y . Przesuwając pryzmat wraz z jego źródłem światła w kierunku osi y i dokonując ekspozycji na tym samym filmie otrzymuje się w ten sposób pełny obraz linii nazwanych izodynami. Nazwa ta pochodzi stąd, że jak udowodniono w pracy MAZURKIEWICZA i PINDERY [8] są to linie,

które w obszarze modelu wyznaczają stałą wartość obciążenia, prostopadłego do kierunku wiązki światła, zsumowanego na odcinku od brzegu modelu do rozpatrywanej izodyny.

Wykonując analogiczny jak poprzednio pomiar pryzmatem skierowanym wzdłuż osi y uzyskuje się informacje o wartości σ_x . Wraz z obrazem izochrom otrzymanych w zasadniczym układzie polaryskopu jest to pełny zestaw informacji potrzebnych do wyznaczenia rozkładu naprężeń w modelu. Na rysunku 2 zaczerpniętym z pracy [9] pokazano przykładowo komplet danych uzyskanych metodą izodyn dla tarczy kołowej ściskanej wzdłuż średnicy kołowej. Metoda izodyn nadaje się szczególnie do analizy pola kontaktu [8]. Ostatnio prowadzone są badania mające na celu zastosowanie metody izodyn do badań dynamicznych [9].

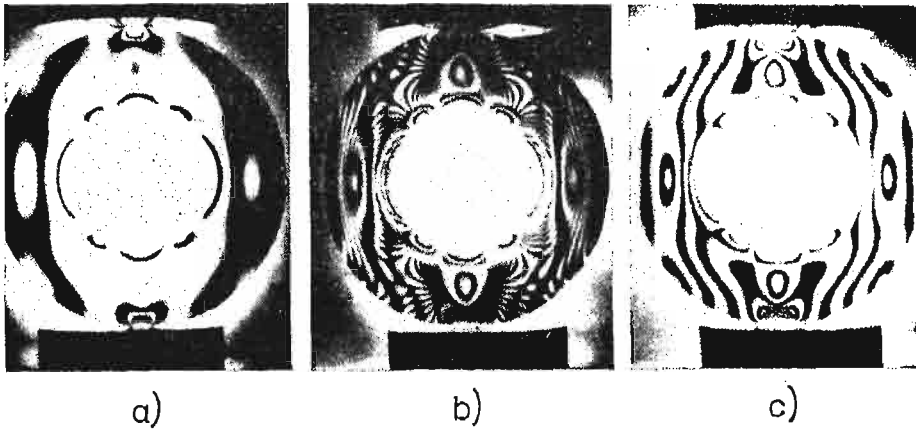


Rys. 3. Schemat polaryskopu holograficznego: L — laser, P — płytka fazowa, F — filtr przestrzenny, D — dzielnik wiązki, Z — zwierciadło, A — diafragma, S_1 , S_2 — soczewki, E — ekran rozpraszający, H — płyta holograficzna

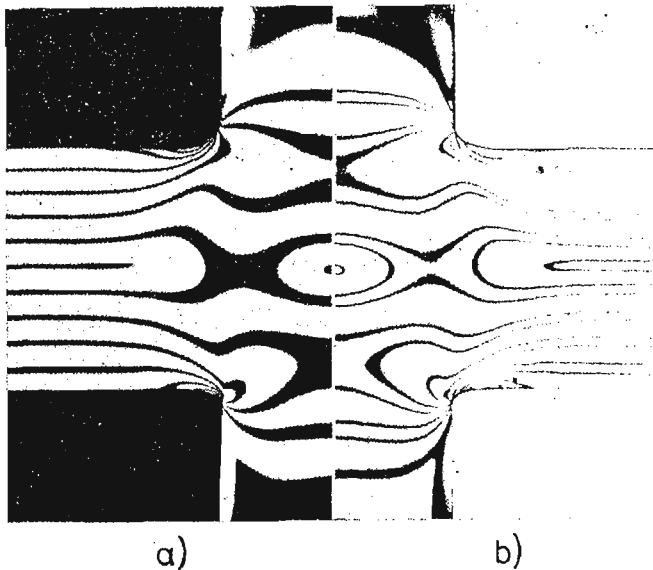
Osobnym zagadnieniem w metodzie światła rozproszonego jest dobór odpowiednich materiałów modelowych. Wykonywane są badania mające na celu opracowanie receptur materiałów wykazujących duży efekt rozproszenia przy wymaganym efekcie dwójłomności wymuszonej. Jak wykazują dotychczasowe wyniki najodpowiedniejszym dodatkiem do żywic epoksydowych podwyższających efekt rozproszenia są krzemionki koloidalne modyfikowane [10].

Nowoczesnym narzędziem doświadczalnej analizy naprężeń jest **elastoptyka holograficzna**. Oprócz danych uzyskiwanych w klasycznym polaryskopie, w układzie holograficznym, którego schemat [11] pokazano na rys. 3 otrzymuje się izopachy, które pozwalają określić sumę naprężeń głównych. Jest to więc pełny zestaw danych umożliwiający wyznaczenie pola naprężeń w badanym modelu. Wadą tego układu jest to, że hologram przedstawia nałożone na siebie izochromy i izopachy, które często trudne są do rozróżnienia. Dlatego też prowadzone są prace mające na celu zwiększenie kontrastu izochrom. Stosuje się dwukrotną ekspozycję hologramu przy równych co do wielkości, lecz różnoimiennych (np. rozciąganie i ściskanie) obciążeniach. Inny wariant to wprowadzenie wstępnego obciążenia modelu [12], co daje efekt pokazany na rys. 4. Lewa fotografia (a) przedstawia same izochromy przy obciążeniu wstępnym, prawa (c) izochromy przy obciążeniu trzykrotnie

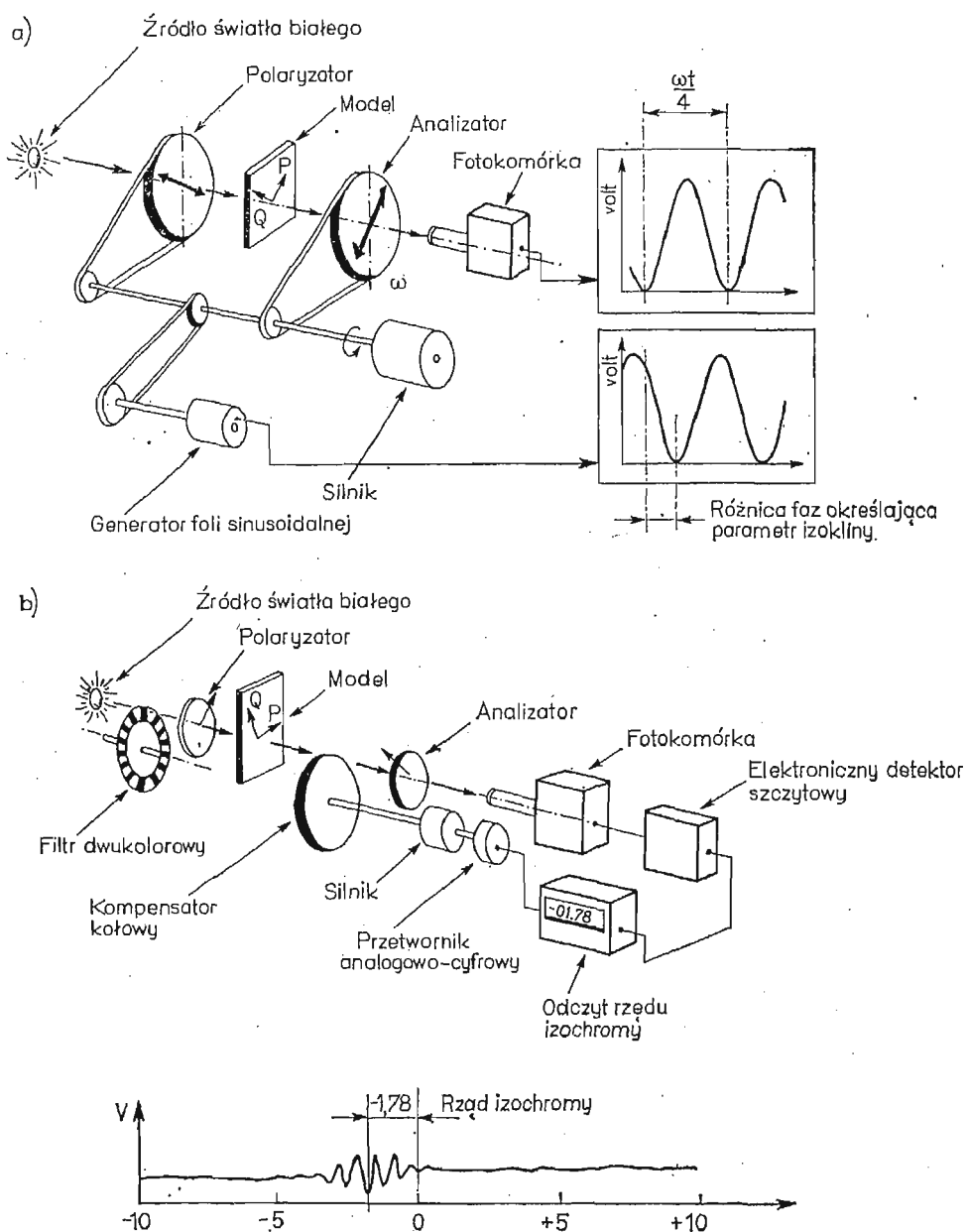
wyższym. Na środkowej fotografii (rys. 4b) widać zarówno izochromy (ciemniejsze) jak i izopachy. W 1974 roku zbudowano układ pozwalający dokonywać odczytu w czasie rzeczywistym [13]. Przyrząd ten nazwany **polaryskopem holograficznym** różni się od układu z rys. 3 ustawieniem za hologramem na drodze wiązki przedmiotowej dodatkowego układu analizatora, a zamiast płyty holograficznej używa się hologramu wykonanego dla modelu nieobciążonego. Interesującym rozwinięciem elastooptyki holograficznej jest warstwicowanie imersyjne [14], które może być zastosowane zarówno do badań płaskich modeli elastooptycznych jak i płytek z zamrożonymi odkształceniami wyciętych z modeli trójwymiarowych.



Rys. 4. Obrazy izochrom i izopach otrzymane przy zastosowaniu elastooptyki holograficznej



Rys. 5. Krzywe ekwidensytometryczne (b) otrzymane z obrazu izochrom (a)



Rys. 6. Układ polaryskopu z automatycznym odczytem wyników: a) pomiar parametru izokliny, b) pomiar rzędu izochromy

Niezależnie od opisanych wyżej nowych technik pomiarów polaryzacyjno-optycznych prowadzone są prace nad udoskonaleniem metod tradycyjnych. W pierwszej kolejności należy tu wymienić te, które mają na celu zwiększenie dokładności pomiarów. W celu „wyostżenia” obrazu izochrom stosuje się specjalną obróbkę chemiczną czarno-białych

negatywów nazwaną **ekwidensyometrią** (wyznaczenie linii stałego zaczerńnienia negatywu) [15]. Efekt tej operacji widać na rys. 5, zaczerpniętym z pracy [16], w której przeprowadzono także analizę błędów techniki ekwidensymetrycznej. Wyznaczenie ułamkowych rzędów izochrom, a więc zagęszczenie obrazu izochrom jest tematem pracy [17] gdzie autor wykorzystał analizę spektralną, oraz pracy [18], w której zastosowano specjalny przetwornik optyczno-elektroniczny do pomiaru natężenia światła wychodzącego z polaryskopu. W metodzie tej przeprowadza się pomiary punktowe analogiczne do pomiarów przy użyciu konwencjonalnego kompensatora.

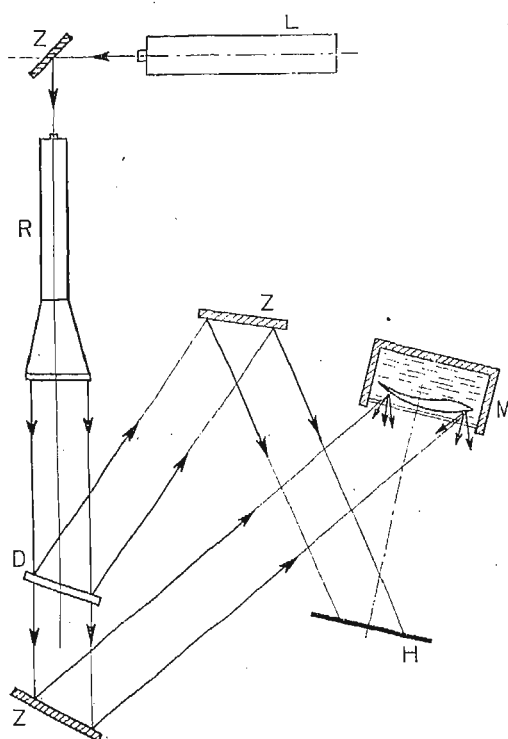
Automatyzacja badań polaryzacyjno-optycznych obejmuje z jednej strony budowę automatycznych systemów do analizy danych otrzymywanych z polaryskopów konwencjonalnych, a z drugiej opracowanie nowych polaryskopów z automatycznym odczytem danych. Połączenie tych dwóch rozwiązań daje w pełni zautomatyzowany proces badań. Automatyczna obróbka danych może być przeprowadzona przez analizowanie obrazów w czasie rzeczywistym za pomocą techniki telewizyjnej [19] albo metodą fotoelektryczną [20]. Techniki te można stosować także do analizy obrazów izoklin i izochrom zarejestrowanych fotograficznie. Otrzymane wyniki analizy są następnie wprowadzone do komputera, który dokonuje rozdzielania naprężeń przy użyciu jednej ze znanych metod [20] [21]. Często stosuje się tu dyskretyzację badanego obszaru trójkątnymi elementami skończonymi [22] [23]. Aby przystosować technikę pomiarową do automatycznej obróbki danych, realizowanych jest szereg prac peryferyjnych jak np. [24], w której podano uogólnienie techniki skośnego prześwietlenia w metodzie warstwy elastoptycznej, co pozwala uniknąć kłopotliwego ustawiania modelu w kierunkach głównych.

Przechodząc do omówienia idei budowy automatycznego polaryskopu należy w pierwszym rzędzie wymienić koncepcję podaną w pracy [25], która przewiduje osobne układy optyczno-mechaniczno-elektroniczne do pomiarów parametru izokliny (rys. 6a) i rzędu izochromy (rys. 6b). Autorzy podają, że dokładności wynoszą $\pm 0,2^\circ$ jeżeli chodzi o parametr izokliny, oraz $\pm 0,01$ przy pomiarze rzędu izochromy. Nieco inne koncepcje i rozwiązania konstrukcyjne polaryskopu z automatycznym odczytem danych podają prace m.in. [26] i [27]. W niektórych z nich wykorzystuje się dodatkowe efekty jak np. wprowadzenie pola magnetycznego podobnie jak w elastoptyce całkowej.

Inne optyczne metody badań

Wśród metod doświadczalnych, które w ostatniej dekadzie znalazły zastosowanie w mechanice ciała stałego **interferometria holograficzna** jest tą, która wykazuje największe tendencje rozwojowe. Stanowi ona niezwykle dokładne narzędzie badawcze wykorzystywane zarówno w elastoptyce holograficznej jak i do pomiaru przemieszczeń konstrukcji. Elastoptykę holograficzną opisano poprzednio, tak więc poniżej omówione zostaną ostatnie osiągnięcia interferometrii holograficznej w badaniach przemieszczeń, czy wprost kształtu konstrukcji.

Na początku należy wymienić prace, które mają na celu przystosowanie metody interferometrycznej do badania rzeczywistych konstrukcji. Okazuje się, że wysoka dokładność metody może być przeszkodą w badaniach przemieszczeń konstrukcji, zwłaszcza jeśli ba-

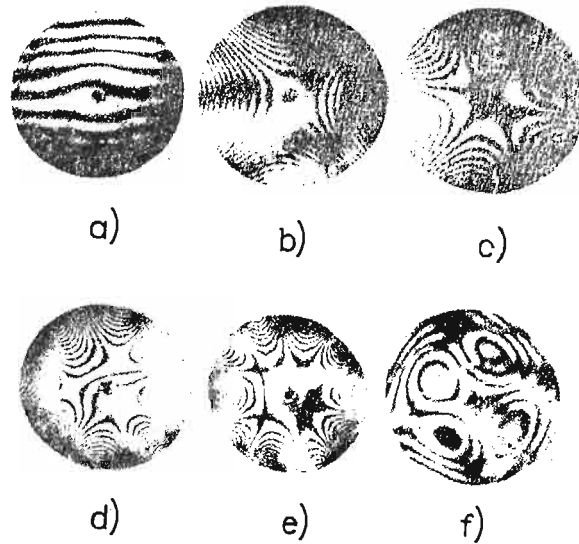


Rys. 7. Schemat układu do warstwicowania powierzchni rozpraszającej światło: L — laser, R — rozszerzacz wiązki, D — dzielnik wiązki, Z — zwierciadło, M — model w naczyniu z cieczą immersyjną, H — płyta holograficzna

dana powierzchnia rozprasza światło. Zastosowanie techniki immersyjnej pozwala wykonywać dwuwymiarowe mapy warstwicowe tego rodzaju powierzchni [28]. W badaniach tych użyto alkoholu etylowego oraz mieszaniny tego alkoholu z wodą jako cieczy immersyjnych. Odpowiedni dobór składu mieszaniny pozwala zmieniać odległość warstwic w granicach od ułamka milimetra do kilku milimetrów. Schemat układu holograficznego przedstawiono na rys. 7. Metoda immersyjna może być zastosowana zarówno do badania powierzchni rozpraszającej światło jak i do badania obiektów przezroczystych.

W ciągu kilku ostatnich lat interferometria holograficzna została z powodzeniem zastosowana do badania drgań tarcz wirujących o kształcie kołowym. Uzupełnienie układu interferometru o tzw. derotator, czyli urządzenie eliminujące na drodze optycznej obrót tarczy, pozwala otrzymać mapy warstwicowe powierzchni tarczy podczas drgań. Na rysunku 8 zaczerpniętym z pracy [24] przedstawiono hologramy obrazujące postacie drgań tarczy dla różnych prędkości obrotowych. W dalszym rozwinięciu [30] metoda ta pozwala przeprowadzić analizę drgań wirującej tarczy w czasie rzeczywistym przy użyciu lasera argonowego o działaniu ciągłym, zamiast jak poprzednio lasera impulsowego.

Niezależnie od rozwoju samej aparatury badawczej, obserwuje się dążność do uproszczenia procesu analizy wyników otrzymywanych metodą interferometryczną. Geometryczne podejście do analizy map warstwicowych przedstawia praca [31], natomiast w pracy [32]



Rys. 8. Hologramy przedstawiające postacie drgań tarczy dla różnych prędkości obrotowych: a) liczba obrotów $n = 4440$ obr/min., częstość drgań $f = 202$ Hz, b) $n = 2740$ obr/min., $f = 51$ Hz, c) $n = 2020$ obr/min., $f = 399$ Hz, d) $n = 7920$ obr/min., $f = 1155$ Hz, e) $n = 3910$ obr/min., $f = 1193$ Hz, f) $n = 4140$ obr/min., $f = 937$ Hz

zaproponowano metodę różniczkowania obrazów interferometrycznych w celu otrzymania wielkości występujących w mechanice konstrukcji. Prace tego rodzaju często prowadzą do opracowania nowych układów rekonstruujących hologram.

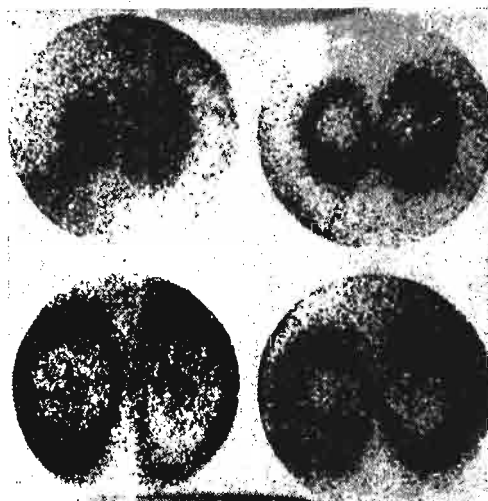
Próbie zbudowania dokładnego modelu matematycznego hologramu Fresnela podano w pracy [33]. Zastosowanie tego opisu może doprowadzić do optymalnego wykorzystania holografii jako metody badawczej.

Zastosowanie laserów jako źródła światła pozwoliło opracować jeszcze jedną metodę pomiarów odkształceń konstrukcji tzw. interferometrię plamkową. Wykorzystuje się w niej ziarnistą strukturę światła laserowego rozproszonego przez mikronierówności powierzchni badanego obiektu. Rejestracji obrazu dokonuje się drogą podwójnej ekspozycji na płytce o emulsji drobnoziarnistej. Tak zarejestrowany obraz interferencyjny podlega rekonstrukcji metodami polowymi lub punktowymi. Jeden z wariantów rekonstrukcji polowej umożliwiający pomiar składowych przemieszczenia liniowego lub kąтового punktów powierzchni badanego obiektu przedstawiono w pracy [34]. W pracy [35] podano teorię i praktykę rekonstrukcji punktowej obrazu plamkowego. Najważniejszą zaletą interferometrii plamkowej w stosunku do interferometrii holograficznej są zmniejszone wymagania w zakresie stabilności układu rejestrującego.

Możliwości interferometrii plamkowej są szerokie i jak się przewiduje [36] może ona znaleźć zastosowanie w następujących obszarach mechaniki doświadczalnej:

- analiza płaskiego stanu naprężeń
- badanie ugięć płyt
- analiza drgań
- analiza trójwymiarowego stanu naprężeń.

Na rysunku 9 przedstawiono dla ilustracji obrazy plamkowe propagacji linii stałych kątów ugięcia utwardzonej płyty kołowej poddanej obciążeniu udarowemu w środku. Rejestracji dokonano przy pomocy lasera impulsowego. Systematykę poszczególnych technik pomiarowych w interferometrii plamkowej wraz z przykładami zastosowań podano w opracowaniu PARKSA [37].



Rys. 9. Linie stałych kątów ugięcia płyty kołowej otrzymane metodą interferometrii plamkowej. [36]

Na zakończenie opisu współczesnych metod optycznych stosowanych w badaniach doświadczalnych należy wspomnieć o metodzie mory, w której co prawda nie obserwuje się nowości w sensie metodologicznym, ale dotychczasowe techniki są udoskonalane. W pierwszym rzędzie dotyczy to bardziej precyzyjnej analizy obrazów interferencyjnych w celu zwiększenia dokładności pomiarów i to zarówno obrazów zarejestrowanych fotograficznie jak i obserwowanych w czasie rzeczywistym. Podstawową jest technika filtracji przestrzennej [38], która pozwala podwyższyć wartość i jakość pomiarów.

Oddzielnym zagadnieniem jest obróbka danych doświadczalnych, a w szczególności różniczkowanie warstwicowych map morowych w celu uzyskania odkształceń. Z reguły stosuje się tu technikę komputerową. Niektórzy autorzy [39] wykorzystują metodę różnic skończonych. W ostatnim czasie rozpowszechniła się metoda funkcji sklepanych służąca do aproksymacji danych dyskretnych wziętych z map warstwicowych [40]. Przeprowadza się także próby wprowadzenia techniki telewizyjnej do różniczkowania map warstwicowych [41] na drodze elektronicznej analizy i przetwarzania obrazu.

Wśród wielu zastosowań metody mory należy wymienić analizę obciążonych dynamicznie płyt szklanych za pomocą techniki odbiciowej [42]. Rejestracji obrazów dokonano przy użyciu lampy błyskowej.

Metody badania naprężeń własnych

Z wielu technicznych problemów doświadczalnej analizy odkształceń i naprężeń w sposób szczególny wyróżniają się te, które wymagają zastosowania specyficznych metod po-

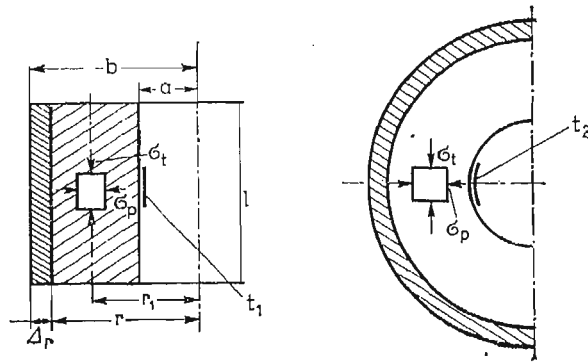
miaru, metod bazujących nieraz na sposobach mających bardziej uniwersalny charakter, ale również często stworzonych specjalnie do badania określonego zjawiska czy obiektu. Do problemów takich należy pomiar naprężeń własnych.

Zagadnienie pomiaru naprężeń własnych sprowadza się do określenia w dowolnym punkcie nieobciążonego ustroju wszystkich składowych tensora naprężeń. Zadanie to, rozwiązywane dla dowolnego materiału w sposób nieniszczący tylko na powierzchni, gdy konstrukcja jest obciążona znanym, zadaniem układem sił czy przemieszczeń, staje się wielokrotnie trudniejsze w sytuacji ustroju nieobciążonego, kiedy stany naprężeń są samorzównoważone w jego obszarze lub części jego obszaru. W ogólnym przypadku zadanie to jest do tej pory nierozwiązane.

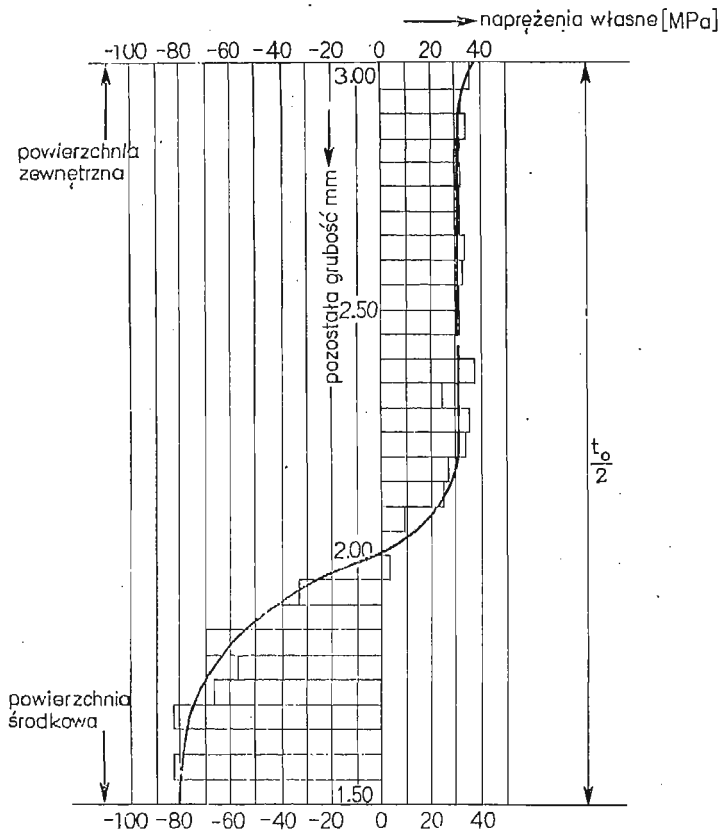
Istnieje bardzo wiele metod wyznaczania naprężeń własnych i różnie można je klasyfikować. Wspólną cechą niemal wszystkich jest fakt, że na ogół służą do oceny naprężeń własnych pierwszego rodzaju (makronaprężeń, które równoważą się w obszarach porównywalnych z wymiarami całego ciała). Tylko niektóre z nich (metody penetratora i promieni X) mogą być stosowane do pomiaru naprężeń drugiego rodzaju (mikronaprężeń równoważących się w objętościach o wymiarach rzędu kilku ziaren krystalicznych). Przyjmijmy tu klasyfikację najbardziej funkcjonalną z praktycznego punktu widzenia: ze względu na stopień zniszczenia ustroju, jaki wywołuje przeprowadzenie na nim badań naprężeń, wyróżniamy zatem:

- metody niszczące
- metody półniszczące
- metody nieniszczące.

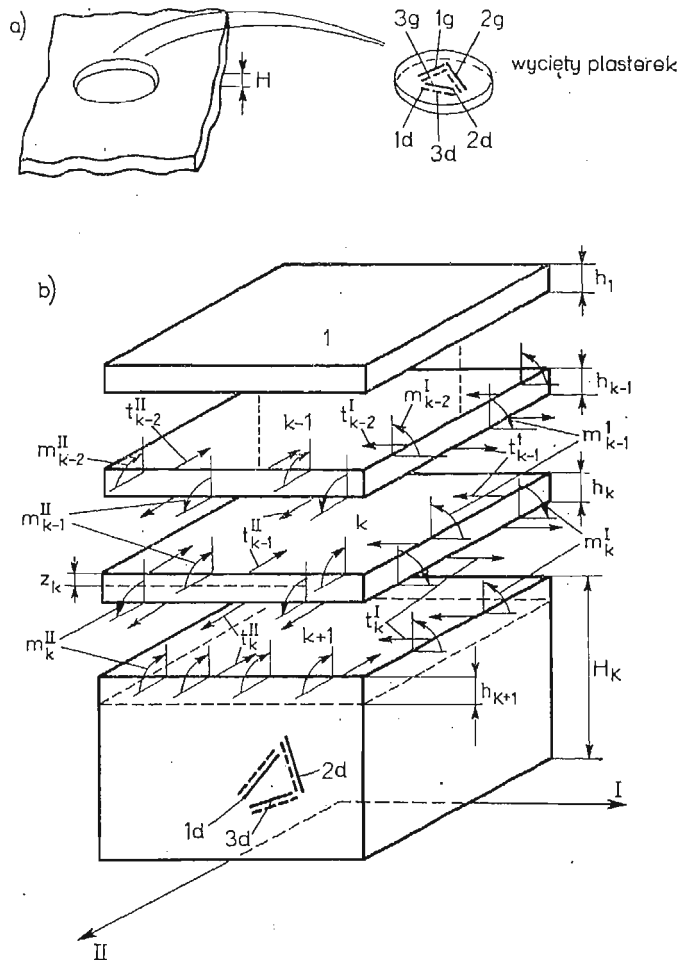
1. Metody niszczące. Są to takie metody, które zastosowane do określenia rozkładu naprężeń w danym obiekcie powodują jego całkowite zniszczenie. Metody te zawsze polegają na pomiarach odkształceń wywołanych odprężeniem badanego ustroju przez podzielenie go na elementy. Z odkształceń tych elementów określa się wielkość naprężeń własnych, które odkształcenia te spowodowały. Sytuacja ta jest źródłem pewnych ograniczeń i błędów przy ocenie ilościowej naprężeń, gdyż trzeba a priori założyć zależność między odkształceniami a naprężeniami. Zakładamy tu zwykle zależność liniową (prawo Hooke'a) dla ciał izotropowych lub ortotropowych. Gdy zmierzone odkształcenia są większe niż odpowiadające granicy plastyczności materiału, wtedy określenie rzeczywistych naprężeń w bardziej złożonych zagadnieniach, jest do tej pory praktycznie niemożliwe. Istotnym problemem jest także prawidłowość interpretacji mierzonych odkształceń, innymi słowy, droga obliczeniowa pozwalająca z pomiaru odkształceń uzyskać wartość naprężeń. Dlatego też zwykle, poszczególne metody niszczące stworzone zostały do badania obiektów o ściśle określonych kształtach i przy pewnych założeniach co do charakteru istniejącego w nich rozkładu naprężeń własnych. Pamiętać również należy, żeby otrzymać dostatecznie dokładne rozwiązanie musimy ciało dzielić na wystarczająco drobne elementy. Elementy te jednak powinny być na tyle duże, aby można było zmierzyć jakkolwiek bądź metodą ich odkształcenia i na tyle dostępne przed podziałem aby określić można było ich wymiary pierwotne jako bazę do pomiaru odkształceń. Ta sytuacja powoduje, że wielokrotnie (np. przy gwałtownych gradientach naprężeń własnych wywołanych obróbką powierzchniową) nie dzielimy obiektu badanego na elementy, lecz usuwamy cienkie (nieraz rzędu kilku setnych milimetra) warstwy materiału dokonując pomiaru odkształceń pozostałej części ustroju.



Rys. 10. Zasada pomiaru metodą Sachsa

Rys. 11. Rozkład naprężeń własnych w walcowanej blasze duraluminiowej uzyskany metodą Ståbleina
 $t_0/2 = 3 \text{ mm}$

Prawidłowe określenie rozkładu naprężeń własnych przy tej metodzie postępowania jest wielokrotnie trudniejsze. Zawsze natomiast, bardzo ważną sprawą jest takie prowadzenie obróbki odprężającej (podziału na elementy) by nie powodowała ona wprowadzenia dodatkowych stanów naprężeń własnych.



Rys. 12. Zasada metody miejscowej trepanacji: a) wycinanie plastra, b) oddziaływania między kolejno usuwanymi warstwami plastra

Niezależnie od wszystkich przytoczonych wad i ograniczeń, metody niszczące uważane są do tej pory za takie, dzięki którym można uzyskać najpełniejsze i najbardziej dokładne informacje — służą zatem częstokroć do weryfikacji innych metod pomiaru.

Wśród najważniejszych do tej pory rozwijanych metod niszczących wymienić należy:

a. Metoda SACHSA [43] pozwala ocenić jedynie osiowo-symetryczne, lub osiowo-anty-symetryczne rozkłady naprężeń w prętach okrągłych, grubościennych i cienkościennych rurach, drutach. Zasadę pomiaru pokazuje rys. 10. Tensometry elektryczne mierzą odkształcenia obwodowe i poosiowe spowodowane usuwaniem warstw zewnętrznych z powierzchni rury. Chociaż zasada metody powstała w 1927 r., rozwijana jest ona do dziś — wspomnieć tu można pracę z 1978 r. [44] dotyczącą pomiarów dla materiału ortotropowego.

b. Metoda STĄBLEINA [45] — określa się nią na ogół rozkłady jednoosiowych stanów naprężeń w elementach płaskich. Polega ona na usuwaniu warstw materiału z jednej strony

elementu i pomiarze odkształceń bądź zmiany krzywizny pozostałej części. Przebieg naprężeń w walcowanej blasze aluminiowej uzyskany tą metodą [46] pokazuje rys. 11.

c. Sposoby trepanacyjne — stosuje się do określenia dwu składowych głównych stanu naprężenia w ustrojach płaskich (płyty, tarcze spawane, cienkie odlewane ścianki) poprzez wycinanie z tych ustrojów niewielkich elementów (na ogół kołowych krążków) i pomiar ich odkształceń. Wspomnieć tu można o metodzie trepanacji miejscowej opracowanej w 1975 r. [47]. Polega ona (rys. 12a) na wycięciu kołowego plasterka z płaskiego elementu, pomiarze odkształceń na powierzchni górnej i dolnej spowodowanych tym zabiegiem, a następnie zdejmowaniu kolejnych warstw (rys. 12b) z wyciętego plasterka, mierząc przy pomocy 3 tensometrów odkształcenia pozostałej części ustroju. W rezultacie uzyskać można rozkład dwu składowych głównych naprężeń własnych wzdłuż grubości cienkich ścianek odlewów, płyt i innych ustrojów dwuwymiarowych w płaszczyznach równoległych do powierzchni. Trzecią składową główną (\perp do powierzchni) przyjmuje się za równą zeru.

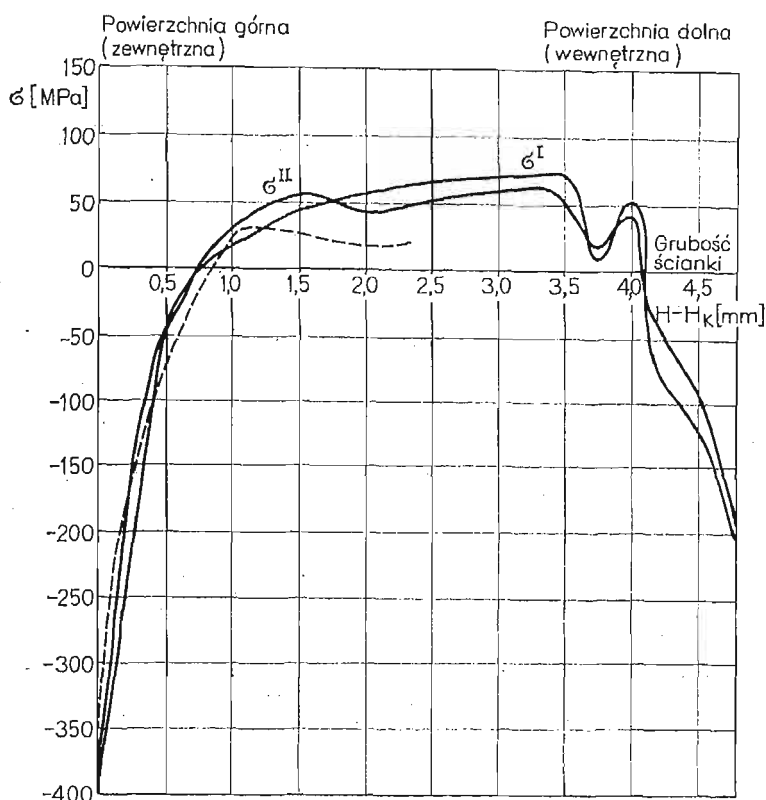
2. Metody późniszczące. Za metody późniszczące uważać będziemy takie, które w trakcie pomiaru wywołują na tyle niewielkie uszkodzenie badanego ustroju, że po przeprowadzeniu naprawy, a niekiedy i bez niej, może on pracować nadal, zgodnie z jego pierwotnym przeznaczeniem. Metody późniszczące wykorzystują do oceny naprężeń własnych wielkość odkształceń w niewielkim obszarze elementu wywołanych przez taką, czy inną obróbkę odprężającą przeprowadzoną w tym obszarze.

W zasadzie pomiarowej metod późniszczących występuje pewna teoretyczna nieściślność. Otóż równania opisujące stan elementu czy konstrukcji w zakresie sprężystym są typu eliptycznego, rozkład naprężeń jest zatem określony przez warunki na całej powierzchni ustroju. Pomiar odkształceń wykonany w niewielkim obszarze w okolicy miejsca obróbki odprężającej nigdy nie może wystarczać do ścisłego określenia naprężeń nawet w tym obszarze. Jednak wg zasady de Saint-Venanta samorzównoważone stany naprężeń rozprzestrzeniają się w ciele sprężystym w bardzo ograniczony sposób i przy poprawnym zaprojektowaniu doświadczenia nieściślność ta praktycznie nie ma większego wpływu na wyniki pomiaru. Istotniejszym problemem jest tu uzyskanie dokładnego pomiaru stosunkowo niewielkich zmian odkształceń i właściwa interpretacja uzyskanych rezultatów doświadczalnych, zważywszy iż czujniki pomiarowe umieszczone być mogą tylko na powierzchni obiektu. Wynikają stąd znaczne ograniczenia metod późniszczących. Służyć one mogą jedynie do określenia pewnych składowych stanu naprężenia na powierzchni ustroju bądź rozkładu na stosunkowo małej głębokości. Wymagają stosowania przyrządów bardzo czułych o geometrii ustalonej z wysoką dokładnością. Mają natomiast dwie niezaprzeczalne zalety:

- możliwość oceny naprężeń na małym obszarze — zatem zbliżenie się do punkтового pomiaru naprężeń,
- są na ogół metodami uniwersalnymi — możliwe jest przeprowadzenie satysfakcjonujących pomiarów na obiektach o dowolnych kształtach.

Obecnie, praktycznie stosuje się tylko jedną metodę późniszczącą: wiercenia małego otworu.

Jest to metoda (obok metody promieni X), której poświęcono i poświęca się aktualnie najwięcej prac i w praktyce stosowana jest najczęściej. Metoda wiercenia otworu ma bardzo długą historię. Zapoczątkowały ją badania Mathara [48] z r. 1934. Prace [49], [50], [51], [52] i inne dały podstawy do rozszerzenia możliwości pomiarowych metody. Jednakże



Rys. 13. Rozkład naprężeń własnych wzdłuż grubości ścianki karтеру silnika spalinowego odlanego z żeliwa określony metodami trepanacji miejscowej i wiercenia małego otworu: ——— metoda trepanacji miejscowej — — — — metoda wiercenia małego otworu

w swojej dotychczasowej formie metoda wiercenia otworu obarczona była bardzo znacznym błędem. Błąd ten jest szczególnie duży przy ostrych gradientach naprężeń, a wtedy, gdy w zakresie pomiarowym naprężenia zmieniają swój znak może osiągać kilkaset procent. W pracach [53], [54], [55] przedstawiono metodę postępowania, pozwalającą uniknąć tego błędu i przeprowadzać badania bez żmudnych pomiarów kalibrujących dla dowolnego materiału i dowolnej geometrii otwór — czujniki pomiarowe. Na rysunku 13 pokazany jest rozkład naprężeń własnych w ściance korpusu silnika spalinowego uzyskany metodą wiercenia otworu [55] i metodą trepanacji miejscowej [47]. [Metoda jest szczególnie czuła na dokładność wykonania otworu i delikatność obróbki.] Najnowsze prace [56] wskazują, że obydwa wymagania najlepiej spełnia wiercenie wysokoobrotowym (do 40000 obr/min) frezem. Ten sposób obróbki wprowadza minimalne zgnioty oraz gwarantuje wysoką dokładność kształtu i wymiarów otworu.

3. Metody nieniszczące. Metody nieniszczące praktycznie nie naruszają struktury materiału badanego obiektu. Wśród nich są takie, które do określenia naprężeń wykorzystują pomiar odkształceń (np. metoda promieni X, czy pomiaru twardości) i takie, które wykorzystują zmianę pewnych fizycznych własności materiału na skutek istnienia w nim naprężeń (np. ultradźwiękowa i magnetyczna).

a. Metoda promieni X jest najstarszą i najszerzej stosowaną. Nie wdając się w dokładniejszy opis zasady badania, krótko tylko przypominamy, że głównym zadaniem metody jest skorelowanie odkształceń sieci krystalicznej z odkształceniami i naprężeniami ε , σ określonymi w teorii sprężystości ciała izotropowego. Tutaj też leży podstawowy błąd metody. Wynika on ze sprzeczności w samej zasadzie badania. Z jednej strony uważa się, że ciało jest opisane modelem continuum — jednorodne, izotropowe i podlegające prawu Hooke'a — z drugiej przeprowadza pomiar odkształceń sieci przestrzennej kryształu, który wykazuje bardzo znaczną anizotropię. W niektórych przypadkach wpływu tej anizotropii nie można wyeliminować dodatkowymi pomiarami pozwalającymi na określenie wielkości nowych stałych sprężystych materiału specjalnie dla potrzeb analizy rentgenowskiej. Stałe te zmieniają się silnie w procesie plastycznej deformacji, zmęczenia, obróbki chemicznej itp. Dodatkowym ograniczeniem metody jest bardzo niewielki zasięg jej penetracji w głąb materiału (rzędu mikronów).

Rekapitulując stwierdzić należy, że w szeregu wypadkach wyniki ilościowe badania metodą promieni X są bardzo wątpliwe, a niekiedy (np. utwardzania zgniotem) w ogóle nie daje ona rezultatów możliwych do interpretowania ilościowego. Niektóre prace np. [57] i [58] oceniają uzyskiwaną dokładność na ± 30 MPa w najbardziej sprzyjających okolicznościach pomiaru, na ± 240 MPa w najgorszych, przyjmując średnio ± 60 MPa.

b. Metoda magnetyczna

Najogólniej mówiąc wykorzystuje ona zjawisko magnetostrykcji, tzn. silnej zależności magnetycznych własności materiału (np. przenikliwość magnetycznej ferromagnetyków) od naprężeń wprowadzonych w ciało. W dotychczasowych pracach np. [59] udało się metodą tą przeprowadzić badania prętów kołowych o zmiennym rozkładzie naprężeń własnych wzdłuż promienia i stałym w kierunku osi pręta. Wykorzystywano tu osiowe pola magnetyczne o zmiennej częstotliwości i ekranizujące działanie powstających prądów wirowych w badanej próbce. Uzyskane wyniki mają bardziej charakter jakościowy niż ilościowy (tab. 1). Zwraca uwagę ogromna rozbieżność wyników metody promieni X i metody niszczącej.

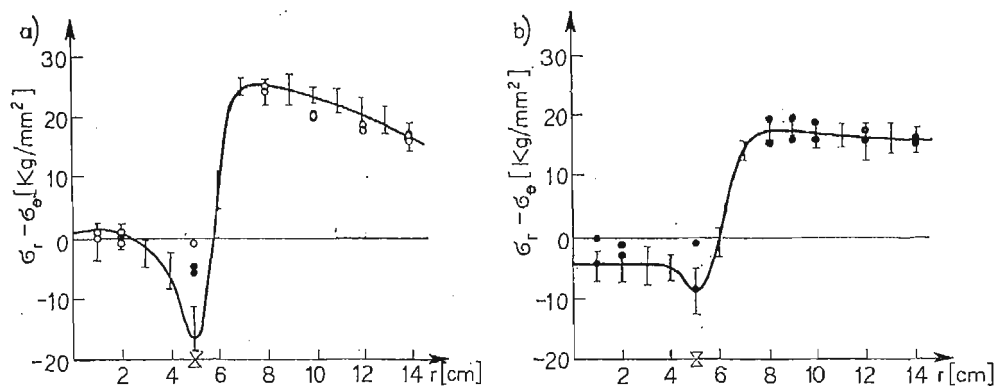
Tabela 1

Rodzaj materiału i obróbki	Naprężenia na powierzchni [MPa] określone metodą:		
	magnetyczną	promieniami X	mechaniczną niszczącą (przecinanie wzdłuż tworzącej)
nikiel ciągniony	12	45	250
nikiel hartowany	-48	-81	-220
stal po obróbce skrawaniem	9	-160	2
stal hartowana	-108	-130	-360

Najnowsze prace badaczy radzieckich np. [60] stwierdzają, że na efekt „magnetosprężysty” bardzo znaczny wpływ ma struktura metalu, a uzyskiwane rezultaty pomiarów naprężeń własnych porównywalne są jedynie dla obiektów poddanych takiej samej, bądź bardzo podobnej obróbce cieplnej, chemicznej itp. Autor cytowanej pracy mierzy dwie

składowe płaskiego stanu naprężenia na powierzchni elementów maszyn oraz — łącząc metodą magnetyczną z metodami niszczącymi — określa rozkłady naprężeń w wałach poprzez pomiary na powierzchni płaskich dysków wyciętych z tych wałów.

Duże możliwości badawcze daje wykorzystanie magnetycznego efektu Barkhausena. Skonstruowane urządzenia pomiarowe [61] pozwalają na określenie składowych płaskiego stanu naprężenia na powierzchni i pod powierzchnią metalu na niewielkich obszarach (o wymiarach kilku mm). Wyniki ilościowe można uzyskać jednakże tylko wtedy, gdy przyrząd przed każdym pomiarem cechowany jest przy pomocy próbki wykonanej z metalu o tej samej strukturze, tzn. poddanej tej samej obróbce cieplnej, chemicznej i powierzchniowej co badany obiekt. Brak odpowiednich danych w literaturze nie pozwala na ocenę dokładności tej metody badawczej.



Rys. 14. Rozkład naprężeń własnych w spawanych tarczach uzyskany metodą ultradźwiękową: a) tarcza wykonana z materiału walcowanego, b) tarcza wykonana z materiału wyżarzanego po walcowaniu
Znak: I — pomiary metodą ultradźwiękową, o — pomiary metodą niszczącą, ∇ — spoina

c. Metoda ultradźwiękowa — jest metodą bardzo młodą opierającą się na zjawisku, że prędkość rozchodzenia się fal ultradźwiękowych (w szczególności fali poprzecznej) w izotropowym materiale jest zależna od naprężeń w to ciało wprowadzonych. Prawo łączące prędkość rozchodzenia się drgań akustycznych z wielkością naprężeń jest tu podobne do prawa elastoptyki i uzależnia tę prędkość od różnicy naprężeń głównych w kierunkach prostopadłych do kierunku rozchodzenia się fali.

Wynika stąd szereg wad metody:

- trudności rozdzielenia naprężeń głównych,
- trudności badania płaskich hydrostatycznych stanów naprężeń gdzie oba naprężenia główne są sobie równe,
- badac można tylko równomierne rozkłady naprężeń własnych wzdłuż grubości próbki — zatem nie można określić rozkładu naprężeń w głąb materiału.

Jako przykład praktycznego zastosowania metody można podać rezultaty pracy [62].

Określono tam rozkład naprężeń własnych w płycie kołowej powstałej na skutek koncentrycznego wspawania w nią kołowego krążka. Na rys. 14 podana jest zmienność różnicy naprężeń promieniowych i obwodowych w funkcji promienia.

d. Metody wykorzystujące pomiar twardości:

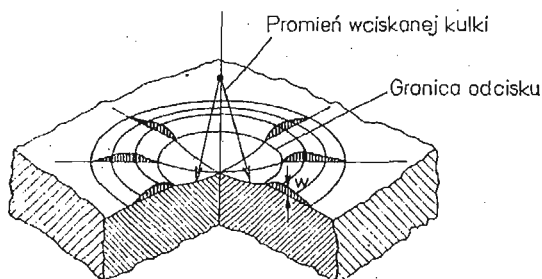
Najogólniej mówiąc bazują na związku między twardością materiału a stanem naprężeń własnych w nim istniejących. Pozwalają określić raczej jakościowo niż ilościowo naprężenia własne na powierzchni obiektu, przy czym trudno jest tu ocenić głębokość penetracji, tzn. uściślić co właściwie praktycznie znaczy „na powierzchni”.

Znane są tu takie metody pomiaru jak:

- badanie momentu pojawienia się pierwszych plastycznych odkształceń w procesie wciskania kulki. Nacisk odpowiadający pojawieniu się tych odkształceń okazuje się być liniową funkcją naprężeń własnych,
- metoda Oppla [63] polegająca na wciskaniu ostrosłupa Knoopa (przekrój w postaci bardzo wąskiego rombu). Mierząc długości 3 odcisków w 3 kierunkach można określić wielkości i kierunki naprężeń własnych głównych na powierzchni,
- metoda ZARKI i FRELATA [64] polegająca na wciskaniu kulek o różnych średnicach i pomiarze siły nacisków koniecznych do pojawienia się pierwszych odkształceń plastycznych. Według autorów metodą tą można pokusić się o określenie rozkładu naprężeń w głąb materiału.

Wspólną wadą wszystkich tych metod jest ich bardzo niska dokładność, którą ocenić można na ± 150 MPa, bądź nawet jeszcze gorzej.

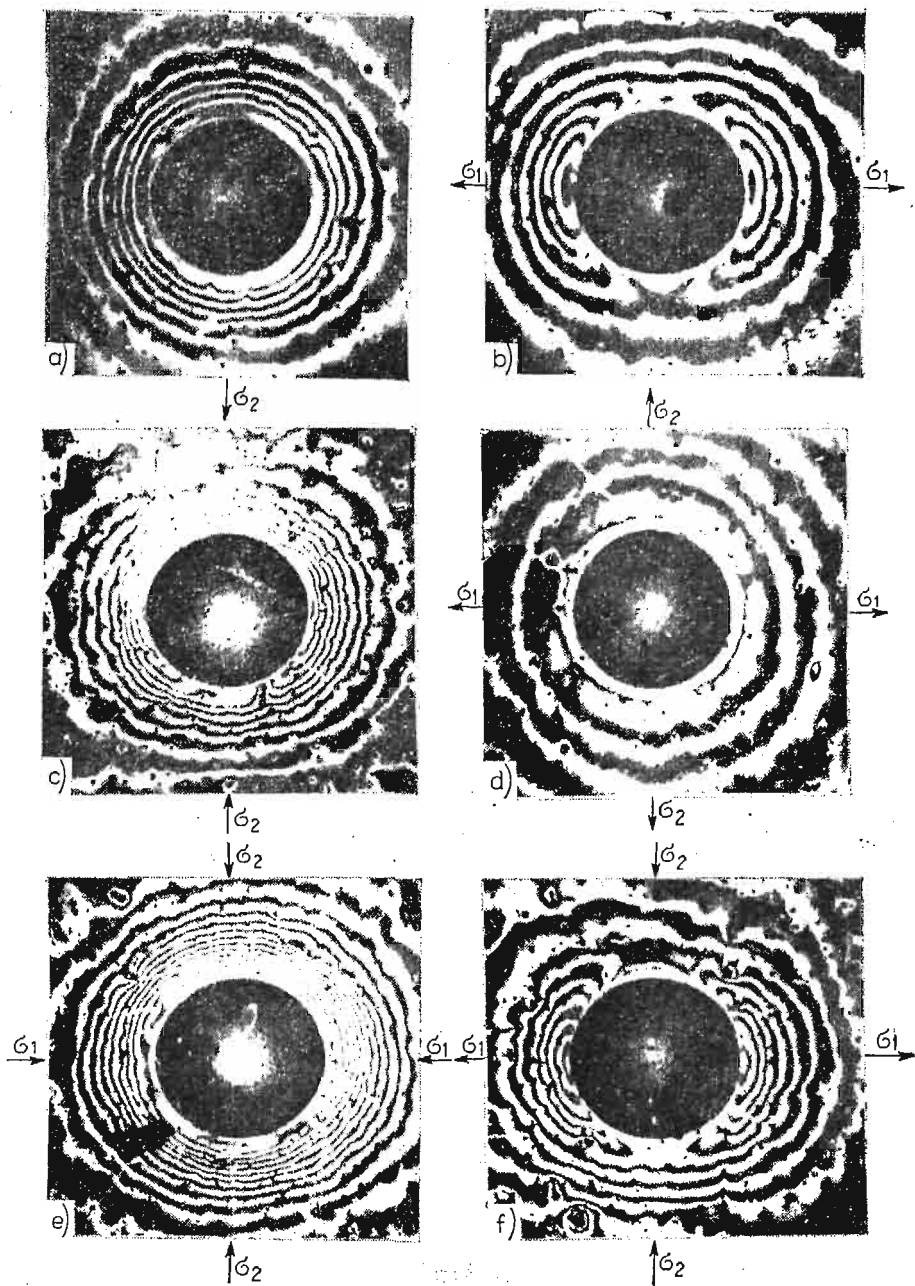
Na tym tle budzącą bardzo duże nadzieje wydaje się metoda penetratora, której pierwszy pomysł podał Underwood w r. 1973 [65], a szeroko została rozwinięta i doprowadzona do stanu przydatności technicznej w 1978 i 1979 r. w pracach [66], [67]. Punktem wyjścia tej metody jest zaobserwowany doświadczalnie fakt, że kształt powierzchni wokół plastycznego odcisku osiowo-symetrycznego stempla ulega zmianie jeżeli w badanym elemencie istnieją naprężenia. Gdy stemplem tym jest kulka, to jakościowy obraz przemieszczeń w otoczeniu odcisniętej przez nią czaszy pokazuje rys. 15. Obraz przemieszczeń określać można przy pomocy interferencji optycznej.



Rys. 15. Obraz przemieszczeń materiału w okolicy wciskanej kulki

Jak wykazały szerokie badania różnych materiałów z obrazu jednego odcisku uzyskać można 3 niezależne informacje wystarczające do określenia wielkości i kierunku naprężeń głównych na powierzchni obiektu.

Typowe obrazy warstwic dla różnych stanów naprężeń pokazuje rys. 16. Metodą tą można badać naprężenia własne na powierzchni materiałów o twardości w granicach $100\text{--}320 H_B$ z dokładnością ± 10 MPa. Dalsze prace trwają nad rozszerzeniem zakresu działania metody na materiały o wyższych twardościach, możliwości jej zastosowania do



Rys. 16. Warstwcowe obrazy przemieszczeń wokół odcisków kulki wykonanych w stali 30 HGSA ($H_B = 320$) dla różnych stanów naprężeń: a) stan bez naprężeń, b) jednoosiowe rozciąganie: $\sigma_1 = 304$ MPa, $\sigma_2 = 0$, c) jednoosiowe ściskanie: $\sigma_1 = 0$, $\sigma_2 = -304$ MPa, d) płaskie hydrostatyczne rozciąganie: $\sigma_1 = 304$ MPa, $\sigma_2 = 304$ MPa, e) płaskie hydrostatyczne ściskanie: $\sigma_1 = -304$ MPa, $\sigma_2 = -304$ MPa, f) czyste ścinanie, $\sigma_1 = 260$ MPa, $\sigma_2 = -260$ MPa

badania gradientu naprężeń w głąb materiału. Istotną sprawą jest również ocena grubości warstwy materiału pod powierzchnią, w której działanie naprężeń określa kształt odczytu powierzchniowego.

Na zakończenie tego bardzo niepełnego i skrótowego omówienia podstawowych, stosowanych współcześnie metod badania naprężeń własnych wspomnieć należy o zasadnych i potrzebnych kierunkach dalszych eksploracji w tej dziedzinie. Wydaje się, że prace winny tu iść w kilku kierunkach:

— Stworzenia prostej i uniwersalnej metody nieniszczącej określania wielkości naprężeń własnych w warstwie powierzchniowej obiektu. Często stwierdzenie, że na powierzchni istnieją dostatecznie duże naprężenia ściskające daje gwarancję znacznie bezpieczniejszej pracy zmęczeniowej ustroju. Ogromne nadzieje rokuje tu bardzo już zaawansowana metoda penetratora.

— Opracowanie skutecznej metody badania naprężeń drugiego rodzaju w mikro-objętościach o wymiarze kilku ziaren krystalicznych. Możliwość przeprowadzenia takich badań dawałaby szansę bardziej głębokiego wnikięcia w zachowanie się materiałów w trakcie stałych — a co jest szczególnie istotne — zmiennych w czasie obciążeń.

— Udoskonalenia metod niszczących i półniszczących do badania rozkładu makro-naprężeń I-go rodzaju, a szczególnie najbardziej uniwersalnej z nich metody wiercenia małego otworu. Chodzi tu o to, by można było oceniać stany naprężenia również wtedy, gdy wielkość mierzonych odkształceń przekracza wartość odpowiadającą granicy plastyczności materiału.

— Stworzenia efektywnej nieniszczącej, chociażby tylko jakościowej, połowej metody oceny wielkości naprężeń własnych I-go rodzaju na powierzchni ustroju. Chodzi tu głównie o zlokalizowanie miejsc koncentracji, obszarów występowania naprężeń rozciągających itp. Dokładniejsze dalsze badania przeprowadzać można wtedy metodami punktowymi. Metody takiej do tej pory brak jest zupełnie.

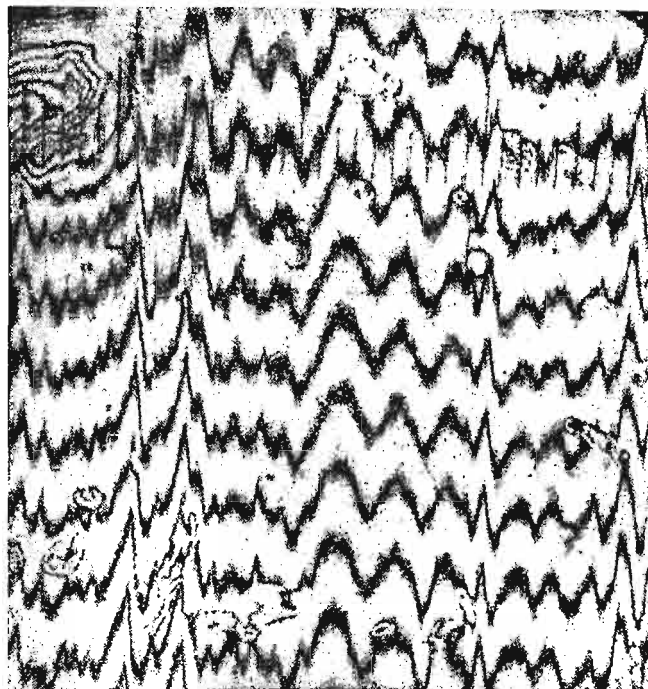
Metody badań w mechanice kontaktu

Problemy badawcze występujące w mechanice kontaktu podzielić można na kilka zasadniczych typów zagadnień, z których każdy wymaga innej techniki, bądź technik eksperymentalnych. Wykorzystywane są tutaj oczywiście możliwie szeroko metody doświadczalne stosowane generalnie w analizie naprężeń i odkształceń mechaniki ciała stałego, jednakże w wielu przypadkach muszą być one odpowiednio dostosowane i przebudowywane, by zmierzyć istotne, a specyficzne dla omawianej grupy problemów, zjawiska fizyczne.

1. Pomiar geometrii powierzchni. Kształt i mikrotopografia stykających się powierzchni ma zasadniczy wpływ na ich współpracę i pozwala wyznaczyć szereg parametrów trybologicznych bezpośrednio charakteryzujących „jakość” tej współpracy. Od dawna znanymi i szeroko stosowanymi w laboratoriach badawczych i przemysłowych metodami określania nierówności powierzchni są metody czujnikowo-kopiujące, które pozwalają uzyskiwać w dużych powiększeniach profilogramy powierzchni w wybranych przekrojach. Chociaż suma takich profilogramów wykonana z dostateczną gęstością może pozwolić na ocenę geometrii całej badanej powierzchni, nie można ich jednakże dokładnie złożyć w jedną

zwartą mapę topograficzną i trudno jest kontrolować zniszczenie czy zużycie określonych elementów powierzchni po pewnym czasie pracy.

Wad tych nie mają optyczne metody badania geometrii powierzchni, chociaż np. równie długo stosowana metoda interferencji optycznej daje obraz warstwic tylko na powierzchni odbijającej, bardzo zagęszczony i trudno czytelny (przy przypadkowym rozkładzie nierówności ocena gdzie jest „wzniesienie” a gdzie „zagłębienie” nie jest prosta do przeprowadzenia). Na tym tle niewątpliwą przewagę ma metoda immersyjna interferometrii holograficznej przedstawiona w pracy [68] z 1982 r. Uzyskiwane przy jej pomocy mapy warstwicowe



Rys. 17. Obraz topograficzny powierzchni szlifowanej (9 klasa gładkości) uzyskany metodą immersyjną interferometrii holograficznej

mogą być niejako trójwymiarowe znakomicie poprawiając czytelność obrazu, możliwa do regulowania jest gęstość warstwic (różnica wysokości między dwoma kolejnymi warstwicami). Pomiar przeprowadzony jest nie bezpośrednio na badanym obiekcie, lecz na przezroczystej replce wykonanej z gumy silikonowej, co pozwala na testowanie elementów powierzchni ustrojów o dowolnych wymiarach i kształtach. Typowy obraz topograficzny powierzchni uzyskany tą metodą pokazuje rys. 17.

2. **Obserwacja obszaru kontaktu przy obciążeniu roboczym.** Szereg metod, głównie optycznych, pozwala na bezpośrednie badanie obszaru kontaktu i zmian geometrii tego obszaru przy obciążeniach roboczych. Główną wadą (szczególnie metod optycznych) jest to, że jedna, bądź obie współpracujące powierzchnie muszą być przezroczyste. Pomiar ilościowy są tu obarczone dość znacznym błędem (30—40%) wynikającym z faktu, że obserwowana

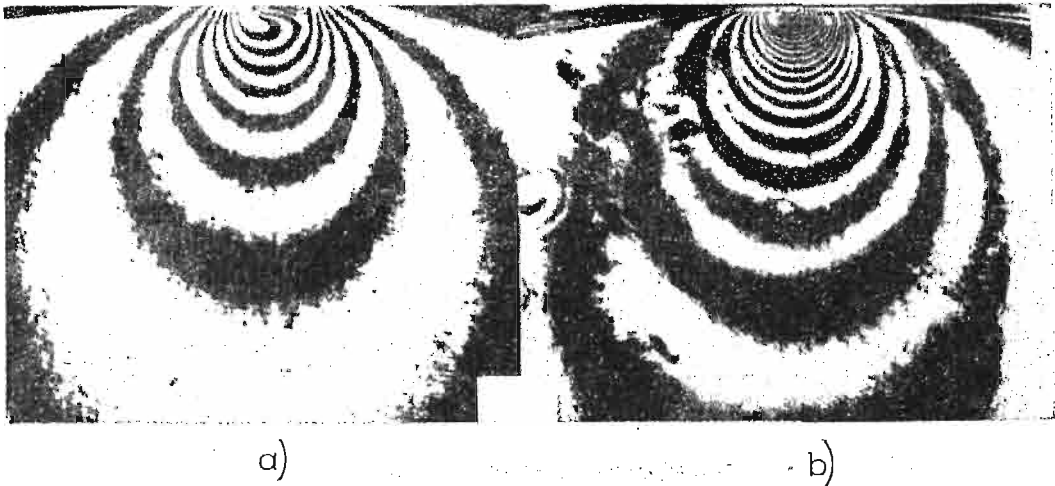
powierzchnia „optycznego” kontaktu może znacznie się różnić od rzeczywistej powierzchni kontaktu mechanicznego. Z ciekawszych metod wymienić tu należy:

— Metoda Mechau bazuje na zjawisku zniszczenia całkowitego wewnętrznego odbicia. Badana niegładka powierzchnia zostaje wprowadzona w kontakt z trójkątną szklaną pryzmą; równoległą wiązkę światła kieruje się na powierzchnię styku pryzmy pod takim kątem, by następowało całkowite wewnętrzne odbicie. W miejscach kontaktu całkowite odbicie zostaje „zniszczone” i obszary kontaktu stają się widoczne w odbitym świetle.

— Metoda interferencji w kontrastowym oświetleniu [69] polega na ujawnieniu konturów nierówności powierzchni (o równym kącie nachylenia) w świetle o różnych barwach. Po odkształceniu badanej niegładkiej powierzchni, na powierzchni płaskiej wszystkie obszary kontaktu leżące w jednej płaszczyźnie określone zostaną prążkami tej samej barwy. Wykonując kolorowe zdjęcia przez mikroskop określić można liczbę i wielkość uzyskanych pól kontaktu. Dokładność pomiaru głębokości nierówności oceniana jest tu na 15 \AA .

— Metoda wiązki neutronów [70] ma tę zaletę, że badanie kontaktu nie wymaga przezroczystości jednego lub obu stykających się ciał. Idea metody polega na przepuszczeniu równoległej wiązki neutronów prostopadle do współpracujących powierzchni. Wolna przestrzeń między powierzchniami wypełniona jest kompozycją pochłaniającą neutrony, tak że staje się dla nich nieprzepuszczalną poza obszarami rzeczywistego kontaktu. Wiązka neutronów po przejściu przez ciała stykające się pada na metalową płytę, która ją absorbuje emitując z kolei promieniowanie γ i β . Promieniowanie to naświetla odpowiednio błonę fotograficzną. Nie trzeba tu dodawać, że omówiona metoda może być zastosowana przy bardzo zaawansowanych możliwościach technicznych.

Niektórzy badacze określają nie tylko geometrię kontaktu przy obciążeniu roboczym lecz starają się znaleźć rozkład obciążeń wynikający z nierówności powierzchni wchodzących w kontakt. Angażuje się w tym celu różne metody; przykładem połączenia elastooptyki i holografii jest praca [71]. Pokazane na rys. 18 obrazy izochrom (różnica naprężeń,

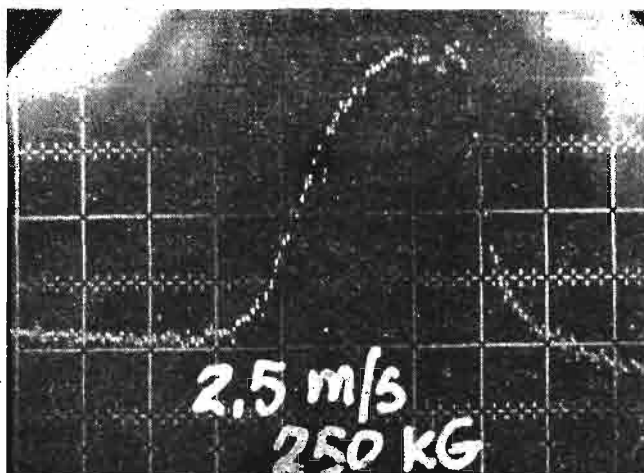


Rys. 18. Obrazy izochrom (a) i izopach (b) w okolicy styku chropowatych powierzchni walca i półprzestrzeni sprężystej. Walec wykonany jest z materiału przezroczystego wykazującego efekt dwójłomności wymuszonej

głównych) i izopach (suma naprężeń głównych) w okolicy styku chropowatych powierzchni walca i półprzestrzeni sprężystej pozwalają na ocenę rozkładu naprężeń i określenie stąd zaburzeń Hertzowskiej dystrybucji obciążenia między dwoma ciałami.

3. Dynamiczne i hydrodynamiczne problemy kontaktu. Badania dynamicznego, a szczególnie hydrodynamicznego kontaktu (gdy stykające się ciała podzielone są warstwą oleju smarującego) muszą uwzględniać szereg dodatkowych zjawisk, które wykraczają znacznie poza — szeroko nawet przyjętą — dziedzinę mechaniki ciała stałego. Pomiary takich wielkości jak temperatura oleju i kontaktujących się powierzchni, grubość warstwy filmu olejowego między poruszającymi się ciałami, ciśnienie w warstwie oleju, wymagają konstruowania bardzo specjalnych przyrządów, zważywszy dodatkowo, że wprowadzone one być muszą w niewielkie obszary kontaktów w taki sposób, by nie zaburzać kształtu powierzchni i warunków przepływu oleju. Badacze mają tu zatem do wyboru dwie drogi: albo miniaturyzacji ustrojów pomiarowych, albo wykorzystywania samych poruszających się względem siebie ciał jako nadajników odpowiednich informacji.

Przykładem pierwszego podejścia może być praca [72], gdzie zastosowano mikrodedektor podający sygnał do pomiaru temperatury o wymiarach elementu wprowadzanego w obszar kontaktu rzędu $38 \mu\text{m}$ bądź praca [73], w której do pomiaru ciśnienia w warstwie oleju użyto czujnika o szerokości rzędu $0,01 \text{ mm}$ i grubości kilkunastu \AA . Rozkład ciśnienia w obszarze styku dwóch walców uzyskany na ekranie oscyloskopu przy pomocy tego czujnika pokazuje rys. 19.



Rys. 19. Oscylogram rozkładu ciśnienia oleju w obszarze dynamicznego kontaktu dwóch walców metalowych uzyskany przy pomocy zminiaturyzowanego czujnika rezystancyjnego. Prędkość obwodowa walców $v = 2,5 \text{ m/sek.}$, nacisk $P = 250 \text{ kG}$

Drugie podejście najpełniej wykorzystane zostało w pracach [74], [75], gdzie jedno z wchodzących w kontakt dynamiczny ciał (płaski walec) wykonane zostało z materiału przezroczystego wykazującego efekt dwójłomności wymuszonej, a pomiar ciśnienia w warstwie oleju uzyskiwano określając rozkłady izochrom w spolaryzowanej kołowo wiązce światła przechodzącego przez ten walec.

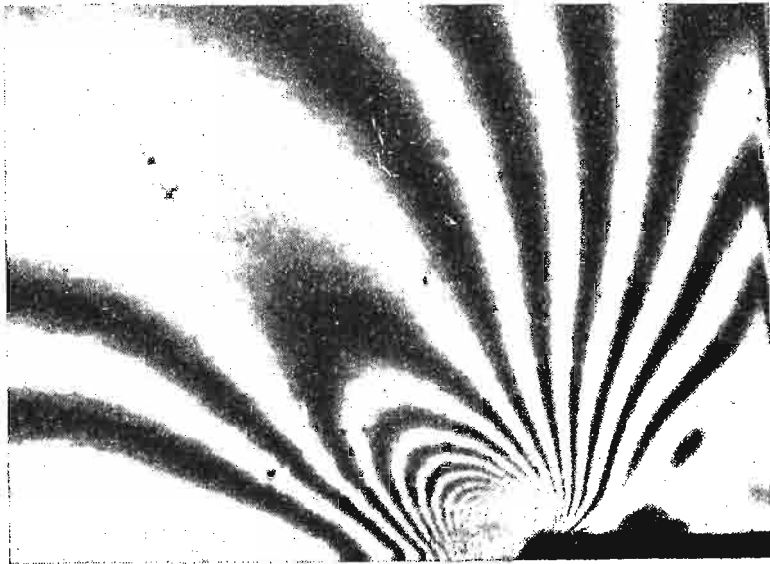
Inne drogi badawcze hydrodynamicznych zagadnień kontaktu polegają na określaniu użycia powierzchni współpracujących elementów. Badania takie przeprowadza się bądź poprzez analizę ilości i wielkości ubytków materiału zawartych w kolejno pobieranych próbkach oleju smarującego (stosuje się tu techniki ferrograficzne w polu magnetycznym i spektrograficzne np. [76]), bądź bezpośrednio obserwując pod mikroskopem stan powierzchni pozostających w kontakcie po kolejnych etapach pracy.

Metody badań zagadnień plastyczności

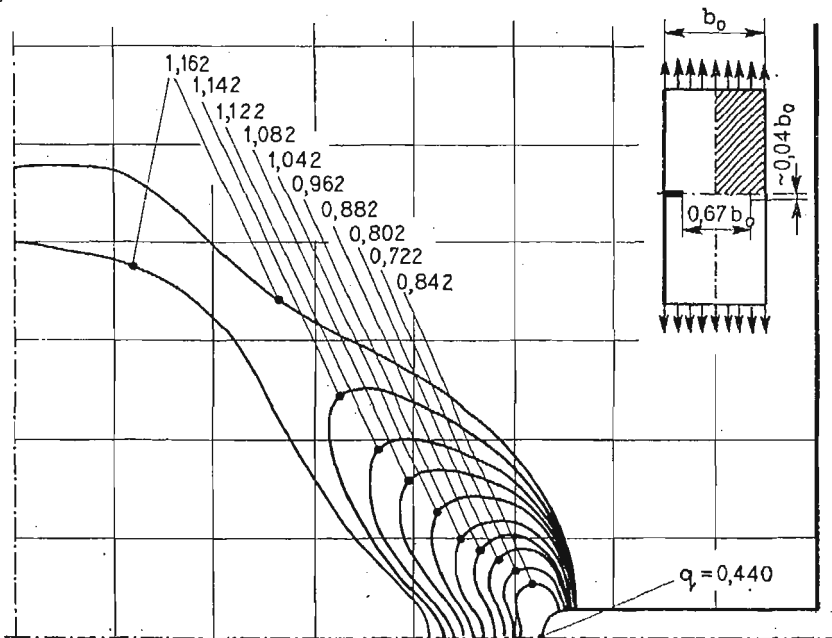
Badania doświadczalne dotyczące zachowania się materiału i elementów konstrukcyjnych po przekroczeniu (choćby miejscowym) granicy plastyczności nabierają w ostatnim okresie coraz większego znaczenia. Jest to wywołane tendencją do rewizji dotychczasowych zasad nie dopuszczających występowania odkształceń plastycznych w żadnym punkcie konstrukcji. Obecnie uważa się, że odkształcenia plastyczne w elementach konstrukcji mogą się pojawić pod warunkiem, że zasięg ich jest ograniczony i ściśle określony. Problemy pracy konstrukcji w zakresie sprężysto-plastycznym nie są jak dotychczas opracowane teoretycznie, a proponowane modele matematyczne dalekie są od ideału. Również metody projektowania oparte na teorii nośności granicznej operując pewnym końcowym stanem pracy konstrukcji nie uwzględniają stadiów pośrednich. Wydaje się, że badania doświadczalne mogą tu dać nie tylko informacje potrzebne do zbudowania modelu matematycznego, ale także mają za zadanie weryfikację rozwiązań teoretycznych. Tego rodzaju podejście proponowane jest w pracy [77], w której autor podaje tzw. **hybrydową metodę analizy konstrukcji** na przykładzie płyty kołowej obciążonej siłą skupioną i opartej na podłożu plastycznym, lub pręta obciążonego siłą i leżącego na podłożu nieskończenie sztywnym. Taka **filozofia modelowania** może dać wyniki pod warunkiem istnienia efektywnych metod doświadczalnych, przy pomocy których można analizować problemy plastyczności nie tylko w zakresie badań materiałowych, ale także badań konkretnych elementów konstrukcji.

W badaniach procesu uplastycznienia elementów konstrukcyjnych można wyróżnić dwa zasadnicze kierunki. Pierwszym z nich jest badanie rzeczywistych elementów konstrukcyjnych metodami tradycyjnymi. Wykorzystywane tu metody ograniczają zakres badań do elementów płaskich, lub na zewnętrznych powierzchniach elementów przestrzennych. Znajduje tu przede wszystkim zastosowanie metoda elastooptycznej warstwy powierzchniowej [78], która pozwala wyznaczyć zasięg obszarów uplastycznionych, a także umożliwia analizę rozwoju tych obszarów przy kolejnych cyklach obciążenia powtarzalnego (tzw. przystosowanie się konstrukcji). Istotną trudność stanowi tu rozdzielenie odkształceń w obszarze uplastycznionym. Na rys. 20 przedstawiono przykładowo obraz izochrom i rozwój stref plastycznych w rozciągającym paśmie z karbem szczelinowym.

Wykonane zostały próby zastosowania termowizji do badania stref plastycznych [79]. W technice tej, wykorzystującej promieniowanie podczerwone dokonuje się pomiaru zmiany rozkładu temperatury w badanym obszarze. Większy przyrost temperatury odpowiada większym wartościom odkształcenia plastycznego. Wydaje się, że efektywną metodą pomiarów odkształceń plastycznych jest metoda mory, ponieważ jest metodą bezstykową i nie powoduje zmiany sztywności badanego elementu jak to ma miejsce w metodzie elasto-

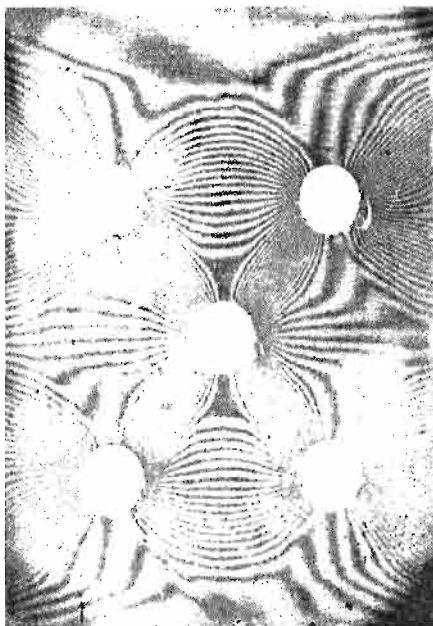


a)



Rys. 20. Analiza sprężysto-plastyczna rozciąganego pasma z karbem szczelinowym: a) obraz izochrom dla poziomego obciążenia $q = 1,102$, b) propagacja granicy obszaru plastycznego

optycznej warstwy powierzchniowej. Przy użyciu metody mory przeprowadzo analizę stref plastycznych w rozciąganych pasmach z otworami [80]. Na rys. 21 pokazano otrzymane tą metodą obrazy prążków mory. Okazuje się, że metodę mory można zastosować również do analizy płynięcia materiału w procesach obróbki plastycznej. Pomiaru dokonuje się na wewnętrznych powierzchniach badanych próbek [81].



Rys. 21. Strefy dużych odkształceń plastycznych otrzymane przy pomocy badań metodą mory

Do badania zagadnień sprężysto-plastycznych wykorzystywane są również tensometry elektryczne. Pewną trudność nastręcza tu obliczanie naprężeń z pomiarów tensometrycznych. W pracy [82] podano metodę rozwiązania tego zagadnienia na podstawie znajomości krzywej naprężenie — odkształcenie dla badanego materiału otrzymanej w próbie jednoosiowego rozciągania.

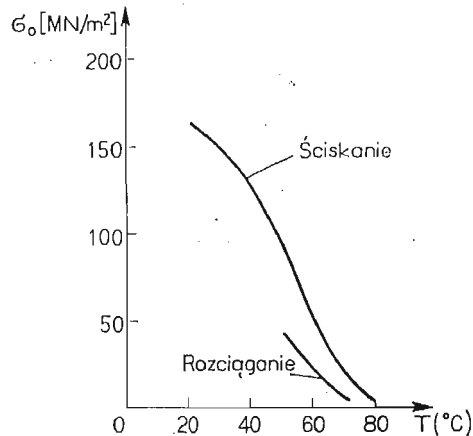
Interesującą próbę zastosowania kolejnych rozwiązań sprężystych do badania ośrodka plastycznego metodą elastooptyczną przedstawiono w pracy [83].

Opisane dotychczas metody stosowane są do badań konstrukcji. Od dłuższego czasu prowadzi się prace zmierzające do modelowania zagadnień plastyczności przez dobór odpowiednich optycznie czynnych materiałów na modele. Ta dziedzina badań nosi nazwę **fotoplastyczności**. Materiał modelowy musi zachowywać się podobnie jak materiał rzeczywistej konstrukcji, a w szczególności powinien spełniać następujące kryteria:

- podobny charakter przebiegu krzywej $\sigma - \varepsilon$ dla materiału modelowego i materiału konstrukcji,
- identyczne kryteria płynięcia,
- jednakowe współczynniki Poissona zarówno w zakresie sprężystym jak i plastycznym,

Spełnienie wszystkich tych warunków jest bardzo trudne. Tak się składa, że stosowane materiały spełniają tylko niektóre kryteria w mniejszym lub większym stopniu. Materiałem, który stosunkowo dobrze odpowiada zachowaniu się metali jest poliwęglan. W badaniach nad tym materiałem [84] [85] wykazano, że poliwęglan spełnia dość dobrze kryteria podobieństwa krzywych rozciągania, liczby Poissona ($\nu = 0,32$) oraz z dużą dokładnością kryterium płynięcia Hubera-Misesa. Jednakże, jak podano [86] zależność efektu optycznego od odkształceń jest nieliniowa, co stwarza trudności w interpretacji wyników.

Jeden z twórców fotoplastyczności — Javornicky uważa jednak, że materiały polikrystaliczne w zakresie dużych odkształceń mogą okazać się nieprzydatne [87]. Preferuje on jako materiał modelowy celuloid.



Rys. 22. Zmianę granicy plastyczności w funkcji temperatury dla twardej żywicy poliestrowej

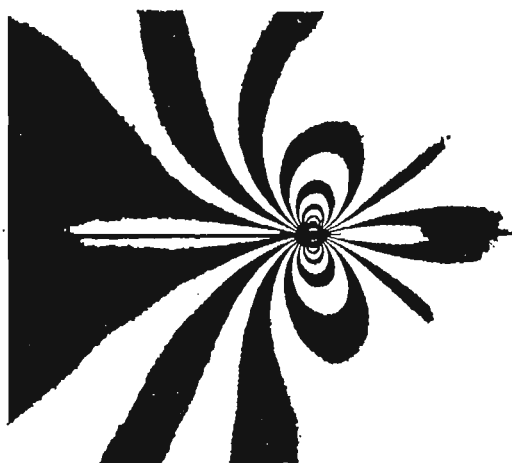
Interesujące wyniki dotyczące spełnienia kryterium płynięcia dla materiałów modelowych stosowanych w fotoplastyczności zamieszczono w pracy [88]. Ważnym wnioskiem jest to, że dla materiałów typu poliestrów zachowanie się w zakresie plastycznym zmienne jest z temperaturą w dużych granicach, co przykładowo przedstawiono na rys. 22.

Jak wynika z powyższych uwag problem znalezienia materiałów do badań fotoplastyczności nie jest jeszcze całkowicie rozwiązany. Pomimo to uzyskano już szereg wartościowych wyników [89], które można podzielić na trzy grupy:

- badania koncentracji naprężeń
- badanie procesów obróbki plastycznej
- badanie podstaw mechaniki zniszczenia.

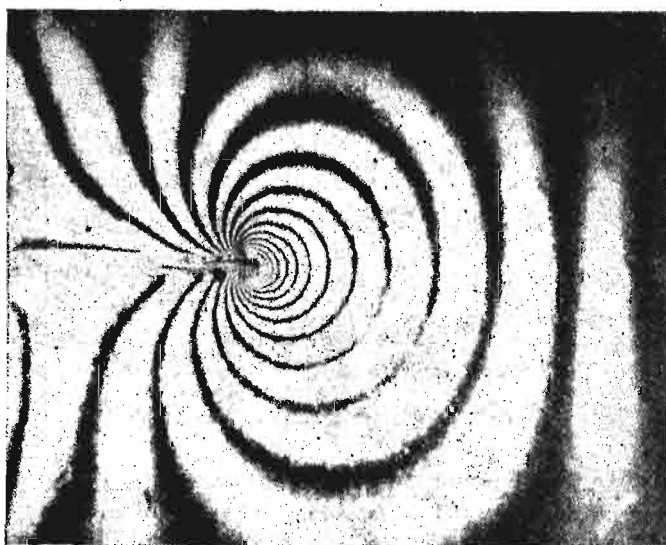
Metody badań w mechanice pękania

Gwałtowny rozwój badań teoretycznych z zakresu mechaniki pękania w ostatnim dziesięcioleciu wywołał pilną potrzebę znalezienia odpowiednich metod doświadczalnych, które pozwoliłyby z jednej strony weryfikować wyniki teorii, z drugiej — ujawniać nowe fakty fizyczne tak o charakterze bardziej generalnym jak i wynikającym z własności poszczególnych materiałów.



Rys. 23. Typowy rozkład izochrom wokół szczeliny rozprzestrzeniającej się w materiale przezroczystym

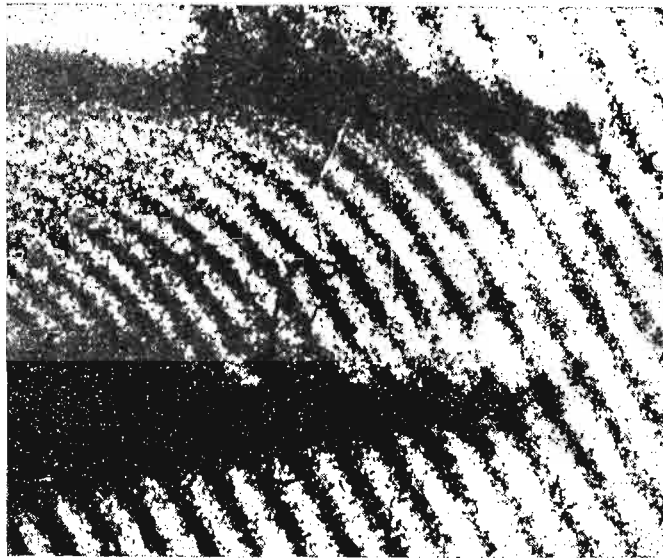
Rozważane w mechanice pękania zadanie określenia warunków i sposobu dynamicznej propagacji szczeliny, bądź układu kilku szczelin w pewnym zadanym polu naprężeń jest trudne do eksperymentalnej eksploracji: badany obszar jest stosunkowo niewielki, a najbardziej interesująca, mała jego część — w okolicy czoła szczeliny — jest polem bardzo wysokiej koncentracji naprężeń, która wywołuje plastyczne poślizgi. Dodatkowym oczywiście utrudnieniem jest dynamiczny charakter procesu inicjacji i rozbudowywania się szczeliny. Mimo tych specyficznych wymagań jednakże, mechanika pękania nie stworzyła nowych metod badawczych, lecz do przeprowadzenia eksperymentu głównie zaangażowała metody ogólnie stosowane w mechanice ciała stałego adoptując je co najwyżej do swoich



Rys. 24. Typowy rozkład izopach wokół szczeliny rozprzestrzeniającej się w materiale przezroczystym uzyskany metodą interferometrii holograficznej

potrzeb. Są one bądź od dawna znane, bądź zostały szerzej omówione w pierwszych częściach tego opracowania; w tym miejscu zatem ograniczymy się do krótkiego ich wyliczenia.

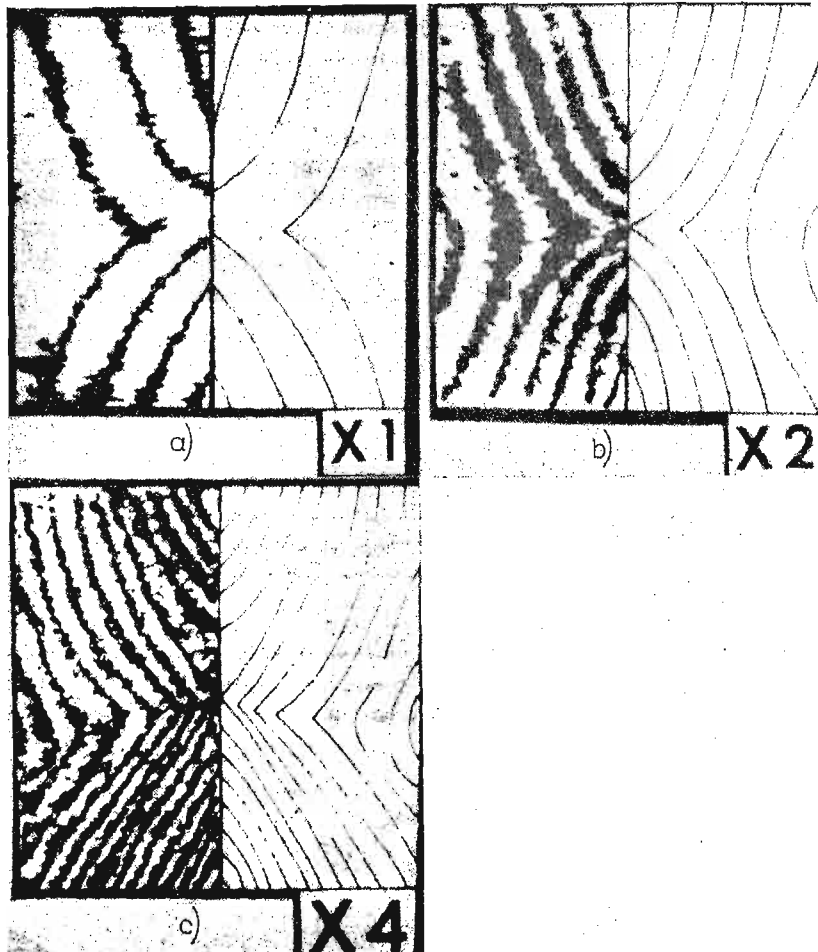
Metodę elastoptyczną do badania zadań płaskich zastosowano tu najwcześniej bo już w 1953 r. [90]. Szereg badaczy (np. [91]) stosuje ją z powodzeniem do dnia dzisiejszego przy statycznych i dynamicznych problemach pękania, określając koncentrację naprężeń w okolicy czoła szczeliny zarówno w modelach przezroczystych przy świetle przechodzącym jak i w ustrojach rzeczywistych przy użyciu pokryć optycznie czynnych. Wadą pierwszego wariantu jest modelowy charakter eksperymentu, drugiego wszystkie znane i szeroko w literaturze dyskutowane błędy wynikające ze skończonej grubości pokrycia (szczególnie duże przy eksploracji małych pól o dużych gradientach naprężeń), wadą obydwóch — mała dokładność pomiaru w obszarze czoła szczeliny. Typowy rozkład izochrom wokół szczeliny pokazany jest na rys. 23.



Rys. 25. Układ prążków interferencyjnych wokół mikropęknięcia w ceramicznej łopatkce turbiny uzyskany metodą holograficznej mikroskopii

Metody holograficzne stosowane również do zagadnień płaskich prowadzą do określenia rozkładu izopach (sumy naprężeń głównych) wokół szczeliny w modelu przezroczystym, bądź przemieszczeń normalnych do powierzchni ustroju rzeczywistego. Użycie zamiast zwykłego systemu holograficznego metod holograficznej mikroskopii [92] pozwala na badanie mikropęknięć. Typowy rozkład izopach pokazany jest na rys. 24, układ prążków interferencyjnych uzyskany za pomocą mikroskopu holograficznego w okolicy pęknięcia ceramicznej łopatkki turbiny (łopatka poddana zginaniu we własnej płaszczyźnie) na rys. 25.

Znaczne zwiększenie dokładności odczytu w bliskości czoła szczeliny uzyskać można przez multiplikację prążków holograficznych [93] uzyskując „zagęszczony” obraz przemieszczeń zarówno w płaszczyźnie, jak i w kierunku normalnym do płaszczyzny badanego obiektu. Rezultat takiej multiplikacji pokazany jest na rys. 26.



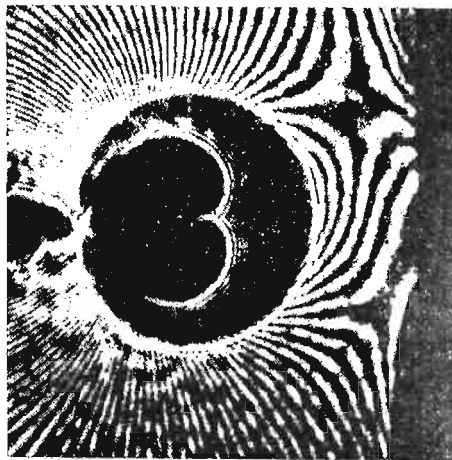
Rys. 26. Obrazy uzyskane na drodze kolejnych multiplikacji prążków holograficznych. Przesunięcia mierzone w płaszczyźnie obiektu: a) bez multiplikacji, b) dwukrotna multiplikacja, c) czterokrotna multiplikacja

Metoda mory — używana jest rzadko [94] ze względu na stosunkowo małą dokładność i słabą czytelność w małych obszarach jedynie jako uzupełnienie innych metod np. elastooptycznej.

Metoda fotografii plamkowej zastosowana została po raz pierwszy do badań w mechanice pęknięcia w pracach autorów polskich [95], [96]. Pomiar połowy uzyskany tą metodą tzw. spektogramy, będące obrazem prążków o stałych normalnych (do obserwowanej powierzchni) składowych przemieszczeń (izotety) jest mało precyzyjny, źle czytelny i służyć może do orientacyjnego określenia np. pasm poślizgu w okolicy szczeliny. Znacznie lepsze rezultaty uzyskać można metodą punktową, która pozwala na rejestrację przemieszczeń od rzędu ułamków mikrometra do kilkuset mikrometrów, w zależności od sposobu ustawienia układu optycznego. Uchwycenie punktów o największych przemieszczeniach, jak również

uzyskanie pełnej mapy przemieszczeń nie jest jednakże operacją prostą i dającą się uwieńczyć w pełni satysfakcjonującym rezultatem.

Metoda kaustyk zaproponowana po raz pierwszy przez Manogga w 1966 [97], rozwinięta i szeroko rozpropagowana przez Theocarisa w wielu jego pracach (np. [98]), jest niewątpliwie jedną z najprostszych w realizacji, a jednocześnie najbardziej eleganckich i efektywnych optycznych metod określania współczynników intensywności naprężeń w mechanice pękania, jak również uzyskiwania rozwiązań szeregu płaskich zagadnień w obszarze gwałtownych koncentracji naprężeń. Niewątpliwym ograniczeniem metody jest fakt, że stosować ją można jedynie do badań modelowych na przezroczystych, mechanicznie i optycznie izotropowych (w zakresie sprężystym) materiałach. Co do dokładności metody zdania są podzielone. Główny jej twórca (P. S. Theocaris) uważa ją za wyraźnie lepszą, efektywniejszą i dokładniejszą od wszystkich pozostałych optycznych metod pomiaru, inni natomiast badacze np. [99] określają ją jako — w zagadnieniach mechaniki pękania — stosunkowo mało dokładną. Autorzy niniejszego opracowania nie czują się uprawnieni do pełnienia roli arbitrów w tym sporze.



Rys. 27. Kaustyka wokół czoła szczeliny rozprzestrzeniającej się w próbce pleksiglasowej

Typowa efektowna kaustyka w okolicy czoła szczeliny uformowanej w próbce pleksiglasowej pokazana jest na rys. 27.

Metoda emisji akustycznej wykorzystuje zjawisko szumów indukowanych w materiałach przez fale naprężeń powstające w efekcie propagacji pęknięcia. Szумы te, których częstotliwość zależy od prędkości propagacji dadzą się zarejestrować przy pomocy specjalnych detektorów (np. piezoelektrycznych). Metodę tą, używaną do badania poślizgów plastycznych zastosowano w ostatnich latach (np. [100], [101]), ze znacznie lepszym efektem w mechanice pękania do określania całki Reissa; amplituda szumów wywołanych propagacją szczeliny jest — jak twierdzą autorzy wspomnianych prac — trzykrotnie większa niż rejestrowana podczas poślizgów.

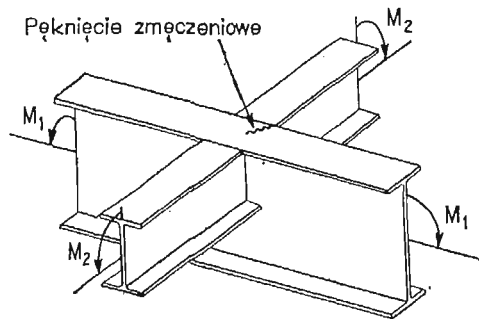
Metody termowizji stosowane są w mechanice pękania tak jak i w innych działach analizy naprężeń i odkształceń raczej sporadycznie i bardziej w sensie jakościowym niż ilościowym. Badać nimi można głównie procesy zachodzące w materiale w trakcie szybkich

deformacji lub przy obciążeniach cyklicznych. Pewne, uzyskane eksperymentalnie zależności między deformacją a temperaturą w trakcie rozprzestrzeniania się szczeliny przytacza praca [102].

Metody badań zmęczeniowych

Badania zjawisk zmęczeniowych przeprowadzone w ostatnich latach przechodzą pewną ewolucję. Polega ona głównie na powiązaniu badań konwencjonalnych z analizą procesu propagacji pęknięć zmęczeniowych. W związku z tym koniecznym staje się wprowadzenie takich technik pomiarowych, które pozwolą obserwować i rejestrować proces pękania. Znalazły tu jak dotychczas zastosowanie metody interferometryczne, tensometria oporowa, rentgenograficzne, metoda mory i inne.

Ciekawą propozycją obserwacji pęknięć zmęczeniowych jest metoda stereoskopowa [103]. Opiera się ona na analizie w układzie stereoskopowym dwóch fotografii szczeliny wykonanych przy różnych poziomach obciążenia. Dane uzyskane tą drogą są wprowadzone do komputera, którego programy pozwalają wyznaczyć odkształcenia w badanym obszarze, a także zasięg strefy uplastycznionej.



Rys. 28. Model węzła, na którym badano wpływ dwuwymiarowego stanu naprężeń na proces pęknięcia zmęczeniowego

Osobną dziedziną badań zmęczeniowych, w której ostatnio dokonuje się znaczący postęp są badania elementów konstrukcji. Badania materiałowe są niewystarczające do określenia trwałości zaprojektowanego rozwiązania konstrukcyjnego. Przeprowadza się więc badanie węzłów lub elementów konstrukcji. Z natury rzeczy stanowiska badawcze i technika pomiaru jest do każdego przypadku dostosowywana indywidualnie. Z prac tego rodzaju przykładowo można wymienić pracę dotyczącą badania zmęczeniowego łopatek turbin [104]. W badaniach tych wykorzystano zjawisko rezonansu mechanicznego do wywołania giętych drgań łopatek. Inny rodzaj maszyny rezonansowej do badania elementów konstrukcyjnych opisany jest w pracy [105]. Układ obciążający posiada napęd pneumatyczno-elektryczny.

Interesująca praca [106] dotyczy wpływu dwuosiowego stanu naprężenia na propagację pęknięcia zmęczeniowego. Badaniu podlegały węzły ram o przekroju dwuteowym (rys. 28). Stwierdzono, że dwuosiowy stan naprężeń obniża prędkość pęknięcia zmęczeniowego, lecz

wpływ ten jest niewielki. Wyniki podobnych badań węzłów pojazdów szynowych przedstawiono w pracy [107]. We wnioskach z tych badań stwierdza się, że badania zmęczeniowe węzłów konstrukcyjnych powinny być przeprowadzone przy takim widmie obciążenia, jakie występuje w rzeczywistości. Tylko takie badania mogą dać wiarygodną informację o trwałości zmęczeniowej.

Jeśli chodzi o zmęczeniowe badania materiałowe to obserwuje się w tej dziedzinie rozwój badań przy małej liczbie cykli. Wyniki w tym zakresie odbiegają od wyników przy zmęczeniu wysokocyklowym, głównie ze względu na występowanie większych odkształceń plastycznych. Prace z tego zakresu [108] [109] mają na celu ustalenie takich wymagań dotyczących obróbki plastycznej, cieplnej czy powierzchniowej, aby podwyższyć trwałość przy zmęczeniu niskocyklowym.

* * *

Przedstawione opracowanie pokazało — w sposób na pewno niepełny i skrótowy — główne kierunki rozwoju metod doświadczalnych w mechanice ciała stałego. Ciągły wzrost liczby stosowanych metod, podnoszenie jakości i techniki eksperymentu jest wynikiem istniejącego i chyba ciągle zwiększającego się zapotrzebowania przemysłu na ten typ badań.

Literatura cytowana w tekście

1. T. FEKETE, *Optical Stress Analysis of the Surrounding of Reinforcing Fibres embeded in Flexible Medium*, 7th Congress on Material Testing, Budapest 1978.
2. W. CUDNY, S. DONIMIRSKI, Z. DYLAŁ, *Technika badań pewnych przypadków obróbki plastycznej metodą optycznie czulej warstwy powierzchniowej*, VII Sympozjum Badań Doświadczalnych w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1976.
3. C. W. SMITH, *Photoelasticity in Fracture Mechanics*, Experimental Mechanics vol. 20, November 1980.
4. H. K. ABEN, *Additional Physics Fields in Photoelasticity*, IUTAM Symposium on the Photoelastic Effect and its Applications, Brüssel, September 1973.
5. H. K. ABEN, *Integrated Photoelasticity*, VIII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała stałego, Warszawa 1978.
6. H. K. ABEN, E. BROSMAN, *Integrated Photoelasticity of Cubic Single Crystals*, 7 th Congress on Material Testing, Budapest 1978.
7. J. T. PINDERA, P. STRAKA, *Response of the Integrated Polariscope*, Journal of Strain Anal. vol. 8, No 1/1973.
8. S. B. MAZURKIEWICZ, J. T. PINDERA, *Integrated-plane Photoelastic Method-Application of Photoelastic Isodynes*, Exp. Mechanics vol. 19, July 1979.
9. J. T. PINDERA, S. B. MAZURKIEWICZ, T. Y. KEPICH, *Photoelastic Isodynes in Static and Dynamic Stress Analysis*, 7th Congres of Material Testing, Budapest 1978.
10. I. SŁOWIKOWSKA, A. KOZŁOWSKI, *Kompozycje do badań elastooptycznych metodą rozproszenia światła*. IX Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1980.
11. R. J. SANFORD, *Photoelastic Holography — A Modern Tool for Stress Analysis*, Experimental Mechanics vol. 20, Dec. 1980.
12. R. J. SANFORD, *Differential Stress — Holo — Interferometry*, Experimental Mechanics, vol. 13, Aug. 1973.

13. R. J. SANFORD, *Multi-Purpose Real-Time Holographic Polariscopes*, U. S. Patent No. 3831436 (Aug. 1974).
14. M. LECH, I. MRUK, J. STUPNICKI, *Multiple — Refracting — Index Holographic Interferometry for Determining Isopachics*, IUTAM Symposium „Optical Methods in Mechanics of Solids”, — Poitiers. Sep. 1979.
15. C. L. MEHROTRA, M. L. MEYER, *Equidensitometry Applied to Photoelasticity*, Experimental Mechanics, vol. 16, Oct. 1976.
16. G. FIEDRICH, *Error Assessment Using Equidensity Fringes in Photoelasticity*, Experimental Mechanics vol. 19, Aug. 1979.
17. T. FEKETE, *Bestimmung der Funktionskurven von Isochromatenwerten entlang beliebigen Geraden mit Hilfe der Spektralanalyse*, Technoplat 69, Budapest 1969.
18. V. REIMANN, *Asi Method for Punctual Measurement of Optical Phase Differences regarding the Dispersion of Birefringence*, IX Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1980.
19. R. K. MILLER, L. R. SAACKEL, *Complete Automatic Analysis of Photoelastic Fringes*, Experimental Mechanics vol. 19, Jul. 1979.
20. H. D. GERLACH, *Electronic Devices for Automation of Photoelastic Data Acquisition*, Int. Symp. „Methodology and Technique of Testing Structures”, RILEM, Bucuresti 1969.
21. S. IDNURM, J. JOSEFSON, H. ABEN, *Automation of Photoelastic Data Acquisition*, 7th Congress on Material Testing, Budapest 1978.
22. Y. SEGUCHI, Y. TOMITA, M. WATANABE, *Computer — aided Fringe — pattern Analyzer — A case of Photoelastic Fringe*, Experimental Mechanics, vol. 19, Oct. 1979.
23. J. KAPKOWSKI, B. KOZŁOWSKA, *Komputeryzacja procesu analizy wyników otrzymanych metodami polaryzacyjno-optycznymi*, VIII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1978.
24. Y. Y. HUNG, M. G. POTTINGER, *An Improved Obligue — incidence Technique for Principal — strain Separation in Photoelastic Coatings*, Experimental Mechanics, vol. 20, May 1980.
25. P. NURSE, M. I. ALLISON, *Automatic Acquisition of Photoelastic Data*. I.B.C.S.A. Conference 1972.
26. S. REDNER, *New Automatic Polariscopes System*, Experimental Mechanics, vol. 14, Dec. 1974.
27. A. I. PENKOWSKI, R. T. ADAGAMOWA, *Automaticzeskij probot dla polarizacjonno-opticzeskich issledowanij*, Prace VI Wszeczhwiązkowej Konferencji Metod Polaryzacyjno-Optycznych w Analizie Naprężeń, Tallin 1971.
28. J. STUPNICKI, *Immersion Method of Holographic Interferometry a Link in the Chain of Experimental Methods*, IX Sympozjum Badań doświadczalnych w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1980.
29. J. G. MAC BAIN, J. E. HORNER, W. A. STANGE, J. S. OGG, *Vibration Analysis of a Spinning Disk Using Image — derotated Holographic Interferometry*, Experimental Mechanics vol. 19, Jan. 1979.
30. J. C. MAC BAIN, W. A. STANGE, H. G. HARDING, *Real — time Response of a Rotating Disk Using Image — derotated Holographic Interferometry*, Experimental Mechanics vol. 21, Jan. 1981.
31. W. J. BERANEK, A. J. A. BRUINSMA, *A Geometrical Approach to Holographic Interferometry*, Experimental Mechanics, vol. 20, Sept. 1980.
32. A. BEZŁOWSKI, M. ZAKRZEWSKI, *Badanie pochodnych funkcji ugięcia płyt zginanych z zastosowaniem metod interferometrii holograficznej*, VIII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1978.
33. W. BACHMACZ, J. PISAREK, *Model matematyczny hologramu Fresnela rejestrowanego i rekonstruowanego w układzie optycznym z rozbieżną wiązką odniesienia*, VIII Sympozjum Doświadczalnych badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1978.
34. A. BEŁZOWSKI, H. KASPRZAK, *Zastosowanie interferometrii plamkowej z rekonstrukcją połową w badaniach nieniszczących*, IX Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1980.
35. J. HOLOUBEK, *A Strain Analysis by Scattered — Light Speckle Interferometry*, 7th Congress of Material Testing, Budapest 1978.

36. F. P. CHIANG, *A New Family of 2D and 3D Experimental Stress Analysis Techniques Using Laser Speckles*, IX Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1980.
37. V. J. PARKS, *The Range of Speckle Interferometry*, Experimental Mechanics vol. 20, June 1980.
38. G. J. CLOUD, *Simple Optical Processing of Moiré — grating Photographs*, Experimental Mechanics vol. 20, Aug. 1980.
39. P. JASTRZĘBOWSKI, S. WICHNIEWICZ, S. LUTOMIRSKI, A. GLINICKA, *Zastosowanie ETO do analizy pól odkształceń metodą mory*, IX Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1980.
40. D. J. SEGELMAN, D. B. WOYAK, R. E. ROWLANDS, *Smooth Spline Finite-element Differentiation of Full-field Experimental Data over Arbitrary Geometry*, Experimental Mechanics vol. 19, Dec. 1979.
41. K. STRACHALSKI, J. J. WĄSOWSKI, *Wykorzystanie techniki telewizyjnej do różniczkowania obrazów izolacji metodą mory*, IX Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1980.
42. H. SCHWEGER, R. STREUBEL, *The Deformation Analysis of Transversely Strick Glass Plates by means of Dynamic Moiré Methods*, 7th Congres of Material Testing, Budapest 1978.
43. G. SACHS, *Der Nachweis inner Spannungen in Stangen und Rohren*, Zeitschrift für Metallkunde, t. 19, Nr 9, 1927.
44. J. KOO, *Sur la détermination des contraintes résiduelles dans les cylindres creux non-homogenes*, VDI-Berichte, Nr 313, 1978.
45. E. STÄBLEIN, *Stress Measurements on Billets Quenched from one Side*, Stahl und Eisen Nr 52, 1932.
46. E. HOSPERS und L. B. VOGELANG, *Determination of Residual Stresses in Aluminium — alloy Sheet Material*, Experimental Mechanics, March 1975.
47. M. BIJAK-ŻOCHOWSKI, *Badanie rozkładu naprężeń własnych metodą miejscowej trepanacji*, ABM Nr 4, 1976.
48. J. MATHAR, *Determination of Initial Stress by Measuring the Deformation Around Holes*, Transaction ASME Nr 56, 1934.
49. W. SOETE, R. VANEROMBRUGGE, *An Industrial Method for the Determination of Residual Stress*, Proc. SESA, VIII (1), June 1950.
50. R. A. KELSEY, *Measuring Non-uniform Residual Stresses by the Hole Drilling Method*, Proc. SESA, XIV, Nr 1, 1956.
51. N. J. RENDLER and J. VIGNESS, *Hole-drilling, Strain-gage Method of Measuring Residual Stresses*, Experimental Mechanics, Dec. 1966.
52. P. GUPTA, BHAGWATI, *Hole-drilling Technique: Modifications in the analysis of Residual Stress*, Experimental Mechanics Jan. 1973.
53. M. BIJAK-ŻOCHOWSKI, *Pólniszcząca metoda wiercenia nalego otworu do pomiaru rozkładu naprężeń własnych w glęb materialu. Osowo-symetryczny stan naprężenia*, ABM, 3, 1977.
54. M. BIJAK-ŻOCHOWSKI, *Pólniszcząca metoda wiercenia malego otworu do pomiaru rozkładu naprężeń własnych w glęb materialu. Dowolny stan naprężenia*, ABM 2, 1978.
55. M. BIJAK-ŻOCHOWSKI, *A Semidestructive Method of Measuring the Residual Stresses*, VDI-Berichte Nr 313, 1978.
56. T. M. FLAMAN, *Brief Investigation of Induced Drilling Stresses in the Center — Hole Method of Residual — stress Measurement*, Experimental Mechanics, Jan. 1982.
57. K. W. ANDREWS, J. C. GREGORY and BROOKSBANK, *Stress Measurement by X-ray Diffraction Using Film Techniques*, Strain Jul. 1974.
58. A. DIAMENT, *La methode radiocristallographique d'analyse des contraintes. Ses possibilites et ses limites*, Revue Francaise de Mecanique Nr 45, 1973.
59. S. ABUKU and B. D. CULLITY, *A Magnetic Method for the Determination of Residual Stress*, Experimental Mechanics Nr 5, 1971.
60. G. T. ORIECHOW, *Magnetoelastic method for Measuring of Internal-stresses*, Wissenschaftliche Beitrage, III Kolloquium Eigenspannungen und Oberflächenverfestigung, Zwickau, (DDR), 1982.
61. W. M. WASSILIEW, *Some peculiarities in Measurement of inner Stress by Barkhausen effect*, III Kolloquium Eigenspannungen und Oberflächenverfestigung, Zwickau (DDR), 1982.

62. H. FUKUOKA, H. TODA, and T. YAMANE, *Acoustoelastic Stress Analysis of Residual Stress in a Patch-welded disk*, Experimental Mechanics, July 1978.
63. G. U. OPPEL, *Biaxial Elastic-plastic Analysis of Load and Residual Stress*, Experimental Mechanics Nr 5, 1964.
64. J. FRELAT, J. ZARKA, *A New Non Destructive Method to Measure Residual Stresses*, VDI-Berichte, Nr 313, 1978.
65. J. H. UNDERWOOD, *Residual-stress Measurement Using Surface Displacements Around an Indentation*, Experimental Mechanics Nr 9, 1973.
66. M. BIJAK-ŻOCHOWSKI, *Nieniszczące metody badania naprężeń własnych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Warszawskiej, seria Mechanika, z. 54, 1978.
67. M. BIJAK-ŻOCHOWSKI, *Zerstörungsfreie Untersuchung von Eigen-spannungen mit Hilfe Eindringkörpers*, VDI, Nr 71, 1980.
68. M. LECH, J. MRUK, J. STUPNICKI, *Badania chropowatości powierzchni metodą immersyjną interferometrii holograficznej*, X Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa, 1982.
69. A. H. UPPAL, S. D. PROBERT, T. R. THOMAS, *Wear* 22, 1972.
70. P. JOHANNET, *Proceedings Conference on Electric Contact Phenomena*, I. I. T. 1972.
71. W. MIRSKI, *Effect of Surface Roughness on the Load Distribution in Contact*, Proceedings of the Euromechcolloquim No 110, Contact Problems and Load Transfer, Rimborsa, Sveden, 1978.
72. H. S. NAGARAJ, D. M. SAUBORN, W. O. WINER, *The effect of surface roughness on surface temperature fluctuations in EHD contacts*, Proceedings of the 4th Leeds—Lyon Symposium on Tribology, Lyon, France, 1977.
73. Z. FELIKSIK, M. SZCZEREK, *Metoda badania rozkładu ciśnienia w elastohydrodynamicznej warstwie smarnej*. Praca doktorska obroniona na Wydziale MEiL, PW, 1981.
74. J. STUPNICKI, *Photoelastic Study of the Influence of Oil on Contact Stresses*, Int. J. Mech. Sci., Pergamon Press, 1971, vol. 13.
75. J. STUPNICKI, E. KWAŚNIAK, W. MIRSKI, *Photoelastic Study of Elastohydrodynamic Lubrication*, Proceedings of the IUTAM Symposium on Photoelastic Effect and its Applications, Brussels, Belgium, Sept. 1973.
76. M. H. JONES, V. R. K. SASTRY, G. YODAN, *A study of the running -in wear of a diesel engine by ferrographic and spectrographic techniques*, Proceedings of the 4th Leeds—Lyon Symposium on Tribology, Lyon, France, 1977.
77. K. H. LAERMANN, *Recent Developments and Further Aspects of Experimental Stress Analysis in the Federal Republik of Germany and Western Europe*, Experimental Mechanics vol. 21, Feb. 1981.
78. J. KAPKOWSKI, J. STUPNICKI, *Techniczne zastosowania analizy propagacji obszarów plastycznych*, II Sympozjum Mechaniki Stosowanej, Moskwa 1978.
79. Z. HANDZEL-POWIERZA, J. CHOROŚ, *Próba zastosowania termowizji do badania strefy plastycznej na wierzchołku karbu*, VIII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa, 1978.
80. C. AJDUKIEWICZ, P. JASTRZĘBSKI, *Zastosowanie metody mory do badania kinematycznych mechanizmów zniszczenia na przykładzie płaskich pasm stalowych z otworami kolistymi*. X Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1982.
81. J. NAUMANN, *Messung plastischer Deformationen mit Hilfe des Moire-verfahrenes*, VIII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1978.
82. S. KEIL, O. BENNING, *On the Evaluation of Elasto-plastic Strains Measured with Strain Gages*, Experimental Mechanics, vol. 19, Aug. 1979.
83. J. LIETZ, R. WOJNAR, B. MICHAŁSKI, *Elastooptyczne badanie ośrodka plastycznego z otworem walcowym metodą kolejnych rozwiązań plastycznych*, VIII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1978.
84. W. A. BRILL, *Basic Studies in Photoplasticity*, Ph. D. Dissertation Stanford University 1976.
85. J. K. WHINFIELD, C. W. SMITH, *Characterization Studies of a Potential Photoelastoplastic Material*, Experimental Mechanics, vol. 12, Feb. 1972.

86. G. A. GURTMAN, W. C. JENKINS, T. K. TUNG, *Characterization of a Birefringent Material for Use in Photoelastoplasticity*, Douglas Report SM-47796, (1965).
87. J. JAVORNICKY, *Photoplastic Methods, the State of the Art*, VII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1978.
88. L. J. F. FREIRE, W. F. RILEY, *Yield Behaviour of Photoplastic Materials*, Experimental Mechanics, vol. 20, Apr. 1980.
89. Ch. P. BURGER, *Nonlinear Photomechanics*, Experimental Mechanics, vol. 20, Nov. 1980.
90. D. POST, *Photoelastic Stress Analysis for an Edge Crack in a Tensile Field*, Proc. of SESA, vol. 12, no 1, 1954.
91. J. W. DALLY, *Developments in Photoelastic Analysis of Dynamic Fracture*, Proc. of the IUTAM Symposium on Optical Methods in Mechanics of Solids, Poitiers, France, Sijthoff and Noordhoff, 1981.
92. C. A. SCIAMMARELLA, R. NARAYANAN, *A Holographic Non-Destructive Technique for the Detection of Cracks of 100 um Length or Less in Ceramic Materials*, Proc. of the IUTAM Symposium on Optical Methods in Mechanics of Solids, Poitiers, France, Sijthoff and Noordhoff, 1981.
93. C. A. SCIAMMARELLA, S. K. CHAWLA, *Multiplication of Holographic Fringes, its Applications to Crack Detection*, VDI-Berichte, No 313, 1978.
94. M. PAVLIK, *Die Ausnützung der Kombination des Moirè-Verfahrens mit der Spannungsoptik für die Untersuchung von Platten mit Rippen*, VDI-Berichte, No 313, 1978.
95. R. WÓJCIK, *Analiza odkształceń i naprężeń w obszarze czola pęknięcia w strefie kontaktu ciał odkształcalnych*. Rozprawa doktorska. Wyd. MEiL PW, 1981.
96. Z. MIAZGA, *Badanie pola przemieszczeń w obszarze otaczającym szczelinę metodą fotografii plankowej*, X Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1982.
97. P. MANNOC, *Die Lichtablenkung durch eine elastisch beanspruchte Platte und die Schatten-figuren von Kreis- und Risskerbe*, Glastechnische Berichte 39, 1966.
98. P. S. THEOCARIS, *Caustics for the Determination of Singularities in Cracked Plates*, Proc. of the IUTAM Symposium on Optical Methods in Mechanics of Solids, Poitiers, France, Sijthoff and Noordhoff, 1981.
99. J. F. KALTHOFF, J. BEINERT, S. WINKLER, *Analysis of Fault Running and Arresting Crack by the Shadow Optical Method of Caustics*, Proc. of the IUTAM Symposium on Optical Methods in Mechanics of Solids, Poitiers, France, Sijthoff and Noordhoff, 1981.
100. J. CRHA, J. ADAMEK, K. MAZENEC, *Application of the Acoustic Emission Technique in Checks on Engineering Production Processes*, Proc. of the 7th Congress of Material Testing, Budapest, 1978.
101. D. RACKO, *Monitoring Crack Initiation and Growth by Means of Acoustic Emission*, Proc. of the 7th Congress of Material Testing, Budapest 1978.
102. R. H. BLANC, E. GIACOMETTI, *Thermomechanical Behaviour of Materials and Structures Studied by Infrared Telethermography*, Proc. of the IUTAM Symposium on Optical Methods in Mechanics of Solids, Poitiers, France, Sijthoff and Noordhoff, 1981.
103. D. R. WILLIAMS, P. R. DAWIDSON, J. LANKFORD, *Fatigue — crack tip Plastic Stains by Stereoeimaging Technique*, Experimental Mechanics, vol. 20, Apr. 1980.
104. R. H. MARLOFF, *Resonant Fatigue Testing of Riveted Joints*, Experimental Mechanics, vol. 20 Feb. 1980.
105. J. DUFEK, HUJEČEK, *The Facility for High-cycle-fatigue Tests of the Resonance — oscillating Machine Elements*, 7th Congress on Material Testing, Budapest, 1978.
106. G. G. GARRET, P. E. G. ANDERSON, I. M. H. CHARVAT, *The Influence of Biaxial Stresses of High — cycle — Fatigue — crack Propagation*, Experimental Mechanics, vol. 20, Feb. 1980.
107. M. RATIU, C. HALCHINI, T. SCHULTZ, *On Random-fatigue-life Evaluation of Welded Railway-bogie Structures Based on Experimental Stress Analysis*, 7th Congress on Material Testing, Budapest, 1978.
108. S. KOCANĀDA, *Low Cycle Fatigue of Hardened Tool, Steels*, 7th Congress on Material Testing, Budapest 1978.
109. S. KOCANĀDA, *Badanie nisko-cyklicznego zmęczenia stali NC*, VII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa 1976.

NOWA LISTA HASEŁ W APPLIED MECHANICS REVIEWS

ZBIGNIEW OLESIAK

Uniwersytet Warszawski

Piśmiennictwo naukowe liczy sobie ponad 300 lat. Dopiero i już ponad 300 lat. Pierwszym we współczesnej historii czasopismem naukowym było wydawane w Paryżu pismo pod tytułem „Le Journal des Scavans”. Pierwszy jego zeszyt ukazał się w styczniu 1665 r. Gwałtowny rozwój czasopism naukowych nastąpił w okresie po drugiej wojnie światowej tak, że obecnie szacuje się, że na całym świecie ukazuje się pomiędzy 50 tysięcy a 100 tysięcy tytułów. Tylko w ostatnich 10 latach w dziedzinie mechaniki przybyło znacznie ponad 100 nowych czasopism. Już od wielu lat zorientowanie się w takiej liczbie publikacji przestało praktycznie być wykonalne. Powstały więc czasopisma recenzyjne, a ostatnio zaprzęgnięto do tego celu komputery i opracowane specjalne systemy. Do najbardziej znanych czasopism recenzyjnych z dziedziny mechaniki należy radziecki „Referatiwnyj Żurnał — seria Miechanika” oraz wydawany w San Antonio w Teksasie, amerykański Applied Mechanics Reviews. W Polsce podobną rolę spełnia „Bibliografia Analityczna — Mechanika”. Applied Mechanics Reviews zastąpiło „Zentralblatt fur Mathematik und ihre Grenzgebiete”.

W pierwszym okresie istnienia, jeszcze w latach czterdziestych, czasopismo to obejmowało 4 hasła zasadnicze (tzw. superhasła), 32 hasła główne i pewną, zresztą dokładnie nieokreśloną, liczbę podhasła. Było tak przez wiele lat. Jednak wraz z rozwojem nowych dziedzin mechaniki, wzrastającą liczbą czasopism, nie mówiąc o liczbie prac naukowych z tej dziedziny, konieczne było rozszerzenie liczby hasła. Co pewien czas uzupełniano i aktualizowano zarówno liczbę jak i same hasła. Duża zmiana nastąpiła od stycznia 1983 r. kiedy to wprowadzono 9 superhasła (hasła zasadniczych) 93 hasła główne oraz aż 1151 podhasła. Najliczniejsze hasła główne to mechanika ciała stałego zawierająca 307 podhasła i mechanika płynów 284 podhasła. Jednym z powodów wprowadzenia nowej klasyfikacji było to, że wiele zagadnień pierwotnie empirycznych zaczęto traktować w sposób naukowy. Oprócz tego zaobserwować można znaczne rozszerzenie tematyki badań spowodowane przejściem absolwentów uniwersytetów kierunku mechaniki klasycznej, lub zastosowań matematyki (w Związku Radzieckim wydziałów „Miech. — Mat’.) do pracy nad nowymi zagadnieniami, w których z powodzeniem można stosować aparat teoretyczny mechaniki. Powstało szereg hasła poprzednio nie znanych, lub występujących jedynie w bardzo ograniczonym zakresie.

Wydaje się, że konieczność zmiany układu hasła i nowe hasła wprowadzone przez Applied Mechanics Reviews świadczą najlepiej o kierunkach rozwoju mechaniki w dniu dzisiejszym i o nowych trendach rozwojowych w tej gałęzi nauki w najbliższej przyszłości,

tak jak to widział zespół ponad 1500 recenzentów czasopisma. Publikację tych haseł traktujemy jako uzupełnienie wypowiedzi dotyczących przyszłości poszczególnych dziedzin mechaniki publikowane w tym numerze *M. T. i S.* w 3 artykułach.

Warto może dodać, że *Applied Mechanics Reviews* recenzuje prace naukowe napisane w 29 następujących językach, w tym w 7 słowiańskich. Są to: angielski, arabski, bułgarski, chiński, chorwacki, czeski, fiński, flamandzki, francuski, grecki, hebrajski, hinduski, hiszpański, holenderski, irański, japoński, łacina, polski, portugalski, rosyjski, rumuński, serbski, słowacki, turecki, ukraiński, węgierski oraz włoski.

Podstawy mechaniki i podstawowe metody w mechanice

100 Mechanika ośrodków ciągłych

Teoria ogólna,
Teoria związków konstytutywnych,
Rozważania termodynamiczne,
Modelowanie zjawisk fizycznych,

102 Metody elementów skończonych

Teoria ogólna,
Zastosowania w mechanice ciała stałego,
Zastosowania w mechanice płynów,
Inne zastosowania,
Rozwój algorytmów i elementów skończonych,

104 Metody różnic skończonych

Teoria ogólna,
Zastosowania w mechanice ciała stałego,
Zastosowania w mechanice płynów,
Inne zastosowania,
Rozwój algorytmów i siatek,

106 Inne metody obliczeniowe w mechanice

Metody elementów skończonych dla zagadnień brzegowych
Metody kolokacji, najmniejszego kwadratu i pokrewne,
Metody transformacyjne,
Metody hybrydowe i inne (transformacji odwrotnego rozpraszania, Pade'a itp.),
Analiza stochastyczna,
Metody asymptotyczne i zaburzeń,
Metody wariacyjne,
Rozwój algorytmów i oprogramowania,

108 Modelowanie

Modele fizyczne,
Związki podobieństwa,
Analogie,
Symulacja analogowa,
Symulacja cyfrowa,
Symulacja hybrydowa,

110 Doświadczalna analiza systemowa

Projektowanie doświadczeń,
Systemy otrzymywania danych,
Kontrola doświadczeń,
Synteza parametrów wejściowych,

Algorytmy komputerowe,
Techniki redukcji danych,
Wywody statystyczne,

Dynamika i drgania

150 Kinematyka i dynamika

Teoria ogólna,
Kinematyka punktu materialnego,
Kinematyka ciała sztywnego,
Dynamika punktu materialnego,
Dynamika ciała sztywnego,
Dynamika układów ciał o zmiennych masach,
Dynamika ciała odkształcalnego,
Stateczność ruchu,
Dynamika giroskopów,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

152 Drgania ciał (podstawy)

Teoria ogólna,
Teoria liniowa,
Kryształy,
Wzbudzenie losowe,
Wzbudzenie nieustalone (zanikanie),
Tłumienie (tarcie wewnętrzne),
Niestabilność dynamiczna,
Impedancja mechaniczna,
Magnetostrykcja,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

154 Drgania (elementów konstrukcyjnych)

Belki, słupy, pręty,
Struny, liny, łańcuchy,
Pierścienie,
Sprężyny,
Membrany,
Płyty,
Powłoki,
Płyty i powłoki (grube),
Dyski i łopatki,
Wały wirujące (prędkości krytyczne, wyważanie),
Ramy, kratownice, łuki,
Materiały sandwichowe,
Materiały kompozytowe,
Elementy konstrukcyjne i fundamenty,
Układy złożone,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

156 Drgania (konstrukcji)

Budowle i fundamenty,
Wieże i kominy,
Mosty,

Budowle hydrauliczne,
Budowle morskie,
Pojazdy (w tym lokomotywy),
Okręty (statki),
Samoloty,
Statki kosmiczne,
Elementy maszyn,
Obrabiarki,
Maszyny wirnikowe,
Tłumienie,
Izolacja,
Pochłanianie,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

158 Ruchy falowe w ciałach stałych

Teoria ogólna,
Pręty i belki sprężyste,
Płyty i powłoki sprężyste,
Ośrodki sprężyste nieograniczone i półnieograniczone,
Budowle sprężyste,
Fale powierzchniowe,
Ruchy nieliniowe,
Fale plastyczne i lepkoplastyczne,
Propagacja ultradźwiękowa,
Ośrodki anizotropowe,
Ośrodki warstwowe i niejednorodne,
Ośrodki ziarniste i porowate,
Fale lub ośrodki losowe,
Pochłanianie,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

160 Zderzenia ciał stałych

Teoria ogólna,
Dynamiczne zagadnienia kontaktowe,
Obciążenia eksplozyjne,
Obciążenia elektromagnetyczne,
Hiperprędkości,
Odpryskiwanie i pękanie,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

162 Ruch falowy w nieściślnych cieczach

Teoria ogólna,
Zagadnienia trójwymiarowe,
Teoria nieliniowa i skończonej amplitudy,
Fale grawitacyjne,
Fale kapilarne,
Cienkie warstewki,
Ciecze nie-newtonowskie,
Odbicie, załamanie, dyfrakcja i rozproszenie,
Rury i kanały, uderzenie wodne i gwałtowne falowanie,
Otwarte kanały,

Przepływy wirowe,
Przepływy warstwowe, fale wewnętrzne,
Ciecze wieloskładnikowe,
Transport masy przez fale,
Drgania w cieczech,
Stateczność ruchu ciał zawierających ciecze,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

164 Ruchy falowe w cieczech ściśniętych

Teoria ogólna,
Rozrzedzenie i zgęszczenie,
Udar,
Akustyczny „boom”,
Wybuch,
Odbicie, załamanie, ugięcie i rozproszenie,
Przepływy reagujące chemicznie,
Przepływy warstwowe,
Przepływy wirowe,
Przepływ niestacjonarny,
Wzajemne oddziaływanie dźwięku i przepływu,
Fronty kontaktowe,
Nielepkie-lepkie (udar) wzajemne oddziaływania,
Drgania cieczy ściśniętych w zbiornikach,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

166 Wzajemne oddziaływanie ciała stałego i cieczy

Teoria ogólna,
Teoria nieliniowa,
Przepływy zewnętrzne,
Przepływy wewnętrzne,
Drgania budowli w cieczech,
Wzajemne oddziaływanie fali i podatnych konstrukcji,
Przepływ wieloskładnikowy,
Podatne zbiorniki i pojemniki,
Rury z przepływającymi cieciami,
Wzbudzenie łopatek maszyn wirnikowych,
Konstrukcje (budowle) oceaniczne,
Flutter usterzenia skrzydła (ogona),
Flutter poszycia,
Flutter śmigła i wirnika,
Postacie drgań całego korpusu (kadłuba),
Sterowanie i eliminacja flutteru,
Aerosprężystość statyczna (rozbieżność),
Zjawiska trzepotania, podmuchu i turbulencji,
Wpływ aerosprężystości na obciążenia lotu i stateczność,
Aerotermosprężystość,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

168 Astronautyka (mechanika nieba i orbitalna)

Teoria ogólna,
Zaburzenia ogólne,

Zaburzenia szczególne,
 Mechanika nieba,
 Zagadnienia trzech i N-ciał,
 Ciała o zmiennej masie,
 Wyznaczanie orbit,
 Zmiana orbit,
 Sterowanie i stabilizacja położenia,
 Optymalizacja trajektorii,
 Kierowanie i sterowanie,
 Nawigacja,
 Spotkania,
 Powrót (wejście w atmosferę),
 Techniki obliczeniowe,
 Techniki doświadczalne,

170 Wybuchy i balistyka

Teoria ogólna,
 Wybuchy fizyczne,
 Detonacja,
 Deflagracja (powolne spalanie),
 Detonacja skondensowanej fazy,
 Detonacja i wybuch kurzu lub pary,
 Hydrodynamika wybuchu i implozji,
 Wybuch termiczny,
 Wybuch podwodny,
 Wybuch podziemny,
 Przewody eksplozyjne i przerwy iskrowe,
 Broń palna,
 Balistyka wewnętrzna,
 Balistyka zewnętrzna,
 Balistyka graniczna,
 Modelowanie,
 Techniki obliczeniowe,
 Techniki doświadczalne,

172 Akustyka

Teoria ogólna,
 Powstawanie dźwięku przez poruszające się powierzchnie,
 Powstawanie dźwięku na skutek przepływu,
 Fale dźwiękowe w gazach,
 Fale dźwiękowe w cieczach (akustyka podwodna),
 Fale dźwiękowe w ciałach stałych,
 Fale dźwiękowe w ośrodkach niejednorodnych, porowatych i osowych,
 Odbicie, załamanie, ugięcie i rozproszenie,
 Akustyczne własności materiałów,
 Sterowanie hałasem, przegrody i osłony,
 Techniki obliczeniowe,
 Techniki doświadczalne,

Sterowanie automatyczne

200 Teoria systemowa i projektowanie

Teoria ogólna,
 Sterowalność i obserwowalność,
 Realizowalność,

Stateczność,
Identyfikacja i oszacowywanie,
Czułość,
Techniki filtrowania,
Metody projektowania,
Symulacja,
Układy adaptacyjne i uczące,
Systemy wielkiej skali,
Rozpoznawanie wzorów,
Układy nieliniowe,
Układy dyskretne,
Parametry sterujące i układy opóźnione,
Układy decentralizowane,
Układy stochastyczne,
Techniki obliczeniowe,

202 Optymalne sterowanie układami

Teoria ogólna,
Techniki optymalizacyjne, i algorytmy,
Układy nieliniowe,
Układy dyskretne,
Parametryczne układy sterujące i układy opóźnione,
Układy stochastyczne,
Gry różniczkowe,
Układy z otwartą pętlą,
Systemy wielkiej skali,
Układy zdecentralizowane,
Techniki filtracyjne,
Techniki obliczeniowe,

204 Układy i sterowanie (zastosowania)

Kierowanie,
Statki powietrzne i kosmiczne,
Sterowanie procesami,
Układy sterowania mocą,
Hydrauliczne układy sterowania,
Cyfrowe układy sterowania,
Komponenty sterowania,
Oprzędkowanie,
Techniki doświadczalne,

206 Robotyka

Urządzenia wykonawcze,
Serwomotory nastawiające (źródła napędu),
Lokomocja (ruchliwość),
Kinematyka,
Czujniki i lub układy sterowania,
Zastosowania do ustalania położenia,
Zastosowania przy montażu,
Zastosowania różne,

Mechanika ciała stałego**250 Sprężystość**

Teoria ogólna,
Teoria liniowa,

Teoria nieliniowa i skończonego odkształcenia,
Zagadnienia trójwymiarowe,
Koncentracja naprężeń i osobliwości,
Sprężyste niedoskonałości (dyslokacje itp.),
Metody wariacji energii,
Zagadnienia kontaktowe i inkluzje,
Ośrodki anizotropowe,
Ośrodki niejednorodne,
Naprężenia szczątkowe,
Techniki obliczeniowe,

252 Lepkosprężystość

Teoria ogólna,
Teoria liniowa,
Teoria nieliniowa i skończonych odkształceń,
Materiały nieliniowe,
Zagadnienia trójwymiarowe,
Pełzanie,
Relaksacja naprężeń,
Zagadnienia kontaktowe i inkluzje,
Charakteryzacja materiałowa,
Ośrodki anizotropowe,
Ośrodki niejednorodne,
Teoria fizyczna i mechanizmy,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

254 Plastyczność i lepkoplastyczność

Teoria ogólna,
Teoria nieliniowa i skończonych odkształceń,
Zagadnienia trójwymiarowe,
Koncentracja naprężeń i osobliwości,
Zagadnienia kontaktowe i inkluzje,
Charakteryzacja materiałowa,
Wzmocnienie,
Obciążenia cykliczne i zmienne,
Ośrodki lepkoplastyczne,
Ośrodki anizotropowe,
Ośrodki niejednorodne,
Naprężenia szczątkowe,
Teoria fizyczna (dyslokacje itp.),
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

256 Mechanika materiałów kompozytowych

Ośrodki granulkowe,
Ośrodki wzmocnione włóknami,
Ośrodki warstwowe,
Mikromechanika,
Charakteryzacja makroskopowa,
Zachowanie się dynamiczne
Zastosowania strukturalne,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

258 Liny, belki itp.

Teoria ogólna,
Teoria nieliniowa i skończonych odkształceń,
Struny i druty,
Łańcuchy,
Liny, kable, pasy,
Belki (zginanie i skręcanie),
Belki na podłożach,
Belki cienkościenne,
Belki anizotropowe,
Belki niejednorodne,
Belki o zmiennym przekroju,
Pręty zakrzywione i pierścienie,
Waly wirujące,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

260 Dźwigary powierzchniowe i membrany

Teoria ogólna,
Teoria nieliniowa i skończonych odkształceń,
Płyty (zginanie i skręcanie),
Powłoki (teoria błonowa),
Powłoki (teoria zgięciowa),
Anizotropowe dźwigary powierzchniowe i membrany,
Płyty i powłoki ze wzmocnieniami i sandwiczowe,
Dźwigary powierzchniowe na podłożach,
Płyty i powłoki grube,
Nadmuchiwane błony,
Wirujące dyski, łopatki i powłoki,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

262 Stateczność strukturalna (wyboczenie, stan powyboczeniowy)

Teoria ogólna,
Teoria nieliniowa i skończonych odkształceń,
Teoria powyboczeniowa,
Czułość na niedokładności,
Słupy i belki,
Pierścienie i łuki,
Konstrukcje ramowe,
Płyty,
Powłoki,
Rury i naczynia ciśnieniowe,
Konstrukcje wzmocnione i anizotropowe,
Stateczność dynamiczna,
Wyboczenie lepkosprężyste i wyboczenie przy pełzaniu,
Wyboczenie plastyczne i sprężystoplastyczne,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

264 Elektro-magneto mechanika ciała stałego

Teoria ośrodków ciągłych,
Magnetosprężystość,
Elektrosprężystość,

Piezoelektryczność,
Stateczność sprężysta w polach elektromagnetycznych,
Mechanika materiałów nadprzewodzących,
Analiza naprężeń magnesów,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

266 Mechanika gruntów (podstawy)

Struktura i klasyfikacja,
Związki konstytutywne i modele,
Ciśnienie w porach, ruch fazy,
Własności mechaniczne,
Rozprężające się gliny,
Konsolidacja, osiadanie i zagęszczanie,
Skraplanie gleby i piasku,
Własności reologiczne,
Plastyczność, lepkosprężystość i lepkoplastyczność,
Dynamika,
Przemarzanie i wieczna zmarzlina,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

268 Mechanika gruntu (stosowana)

Płytkie fundamenty,
Głębokie fundamenty, pale,
Fundamenty pod maszyny,
Kotwienie,
Stateczność,
Zapory ziemne, obwałowania,
Boczne ciśnienie ziemi,
Wykopy, tunelowanie,
Drogi, pasy startowe, tory kolejowe,
Przejezdność,
Stabilizacja mechaniczna i chemiczna,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

270 Mechanika skał

Własności mechaniczne,
Sprężystość,
Lepkosprężystość,
Plastyczność,
Anizotropia i niejednorodność,
Mechanizmy zniszczenia,
Naprężenia szczątkowe,
Wzmacnianie skał (sworznie itp.)
Wiercenie,
Rozdrabnianie (wybuchowe, kruszenie, itp.),
Wykopy (tunelowanie, itp.),
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

272 Przetwarzanie materiałów

Zastosowania teorii plastyczności,
Kucie,

Wyciskanie,
Walcowanie,
Przeciąganie,
Tłoczenie metalu,
Obróbka skrawaniem,
Kruszenie,
Odlwanie,
Tłoczenie przy dużej prędkości odkształcenia,
Naprężenia szczątkowe,
Zawijanie i skręcanie,
Metalurgia proszków,

274 Procesy pękania

Inicjacja,
Podkrytyczne rozprzestrzenianie się szczeliny,
Procesy dynamiczne,
Zmęczenie,
Korozja naprężeniowa,
Powstawanie spękań pod działaniem środowiska,
Zmęczenie korozyjne,
Korozja cierna, zużycie i erozja,
Pelzanie,
Ablacja,
Łuszczenie się,
Mikromechanizmy,
Techniki doświadczalne,

276 Mechanika pękania

Teoria ogólna,
Liniiowa sprężysta mechanika pękania (LEFM),
Nieliniowa sprężysta teoria pękania,
Nieliniowo sprężyste ośrodki,
Ośrodki lepkosprężyste,
Efekty plastyczne,
Ośrodki kompozytowe i niejednorodne,
Stateczność i rozgałęzianie się szczelin,
Obciążenia impulsowe i uderzenie,
Dynamiczne rozprzestrzenianie się szczeliny,
Zatrzymywanie się i spowolnianie biegu szczeliny,
Mikromechanizmy,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

278 Doświadczalna analiza naprężeń

Studia modelowe (podobieństwo, modele w skali),
Analogie (błony mydlanej, itp.),
Fotosprężystość,
Fotosprężystość, dynamiczna,
Fotoplastyczność i fotolepkoplastyczność,
Metody mory i techniki interferometryczne,
Techniki holograficzne,
Techniki promieni Röntgena,
Inne techniki optyczne,
Techniki mechaniczne,

- Techniki akustyczne,
 - Techniki elektryczne (tensometry, itp.),
 - Kruche pokrycia i inne techniki powierzchniowe,
 - Pomiar naprężeń szczałkowych,
 - Pomiar naprężeń dynamicznych,
- 280 Techniki prób materiałowych**
- Obciążenie osiowe,
 - Obciążenie dwu- i trzy-osiowe,
 - Obciążenie zginające,
 - Obciążenie ścinające i skręcające,
 - Obciążenia złożone,
 - Wyznaczanie stałych sprężystości,
 - Obciążenia powtarzalne (zmęczenie),
 - Obciążenia dynamiczne (uderzenie),
 - Obciążenia cieplne,
 - Pełzanie i relaksacja naprężeń,
 - Płynięcie plastyczne,
 - Odporność na pękanie,
 - Twardość,
 - Ścieranie i zużycie,
 - Wysokie ciśnienia,
 - Próżnia,
 - Inne warunki ekstremalne,
 - Techniki nieniszczące,
 - Oprządkowanie,
- 282 Mechanika budowli (podstawy)**
- Teoria ogólna,
 - Konstrukcje statycznie niewyznaczalne,
 - Projektowanie na nośność graniczną,
 - Optymalizacja strukturalna,
 - Projektowanie probabilistyczne,
 - Teoria nieliniowa,
 - Projektowanie na niezawodność (działania),
 - Żelbet (zbrojony),
 - Beton (sprężony),
 - Konstrukcje sandwichowe,
 - Konstrukcje piankowe i plastru miodu (ulowe),
 - Obciążenia dynamiczne i przypadkowe,
 - Obciążenia termiczne,
 - Techniki obliczeniowe,
 - Techniki doświadczalne,
- 284 Budowle naziemne**
- Mosty,
 - Zapory i jazy,
 - Tunele,
 - Ramy kratownice i łuki,
 - Budynki
 - Budynki (różne),
 - Kominy i wieże,
 - Dachy, podłogi, ruszty,
 - Konstrukcje nadmuchiwane,

- Budowle podziemne,
 - Techniki obliczeniowe,
 - Techniki doświadczalne,
- 286 Budowle (oceaniczne i nadbrzeżne)**
- Budowle nadbrzeżne,
 - Zastosowania morskie,
 - Budowle zdala od brzegu (platformy umiejscowione itp.),
 - Budowle zdala od brzegu, ruchome,
 - Budowle podwodne, mieszkalne,
 - Techniki obliczeniowe,
 - Techniki doświadczalne,
- 288 Konstrukcje ruchome**
- Pojazdy naziemne (w tym opony),
 - Okręty i statki,
 - Statki podwodne,
 - Samoloty,
 - Helikoptery,
 - Urządzenia lżejsze od powietrza,
 - Systemy opóźniające (spadochrony, itp.),
 - Statki kosmiczne, satelity,
 - Konstrukcje rozwijalne,
 - Techniki obliczeniowe,
 - Techniki doświadczalne,
- 290 Konstrukcje zbiornikowe**
- Zbiorniki ciśnieniowe (zbiorniki reaktorowe, itp.),
 - Boilery,
 - Wymienniki ciepła,
 - Zbiorniki kompozytowe,
 - Zbiorniki nawijane,
 - Zbiorniki z betonu zbrojonego,
 - Zbiorniki pod ciśnieniem zewnętrznym,
 - Rurociągi,
 - Komponenty sprężone,
 - Pojemniki (cysterny, silosy, skrzyniowe, bunkry, itp.),
 - Techniki obliczeniowe,
 - Techniki doświadczalne,
- 292 Tarcie i zużycie**
- Teoria ogólna,
 - Tarcie,
 - Adhezja,
 - Zużycie (niezamierzone),
 - Zmęczenie kontaktowe,
 - Zjawiska termomechaniczne,
 - Materiały ściernie,
 - Powierzchniowe zjawiska i topografia,
 - Kontrola zużycia,
 - Techniki obliczeniowe,
 - Techniki doświadczalne,
- 234 Elementy maszyn**
- Pasy, łańcuchy, liny,
 - Krzywki,

Sprężyny, tłumiki,
 Sprzęgła,
 Hamulce,
 Koła zębate, przekładnie zębate, napędy,
 Łożyska,
 Uszczelki, uszczelnienia, itp.,
 Połączenia dźwigniowe,
 Inne mechanizmy,
 Mechanizmy hydrauliczne i pneumatyczne,
 Urządzenia podnośnikowe i wyciągowe,
 Techniki obliczeniowe,

296 Projektowanie maszyn

Synteza i projektowanie,
 Wyważanie,
 Projektowanie wspomagane komputerem,
 Projektowanie optymalne,
 Kinematyka mechanizmów,
 Dynamika mechanizmów,
 Elastodynamika mechanizmów,
 Analiza i projektowanie na niezawodność,
 Techniki obliczeniowe,

298 Złącza i łączenie

Złącza mechaniczne,
 Spawanie, lutowanie twarde i miękkie,
 Połączenia współpracujących powierzchni,

Mechanika płynów**350 Reologia**

Teoria ośrodków ciągłych,
 Teoria kinetyczna i statystyczna,
 Ciecze nie-newtonowskie,
 Własności dynamiczne (odrzut i relaksacja naprężeń),
 Lepkość objętościowa,
 Naprężenia normalne (drugiego rzędu),
 Przepływ, podwójne załamanie,
 Koloidy i zawiesiny,
 Kryształy ciekłe,
 Ośrodki ze strukturą,
 Przepływy chemiczne reagujące,
 Charakteryzacja materiałowa i modele,
 Techniki obliczeniowe,
 Techniki doświadczalne,

352 Hydraulika

Przepływ w zamkniętych przewodach,
 Przepływ w otwartych kanałach,
 Straty w rurach (tarcie i geometria),
 Przepływ nieustalony,
 Przepływ rozwarstwiony,
 Przeszkody,
 Kryzy, dysze, zawory i zastawki,
 Siły działające na budowle hydrauliczne,

Obciążenia falowe na konstrukcje,
Uspokajające baseny i inne rozpraszacze energii,
Kawitacja,
Erozja, podmywanie i transport osadu,
Drogi wodne,
Ujścia rzek,
Brzegi, porty,
Własności cieczy,
Transport lodu,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

354 Przepływ nieściśły

Przepływ niewirowy,
Przepływ wirowy (nielepki),
Przepływ lepki,
Przepływ trójwymiarowy,
Mała liczba Reynoldsa (włącznie z przepływem pełzającym);
Przepływ nieustalony,
Przepływ poboczny,
Przepływ cieplnej konwekcji,
Przepływ rozwarstwiony,
Przepływ i powierzchnie,
Przepływ wieloskładnikowy,
Reakcje chemiczne,
Przepływ z wtryskiem lub zassaniem masy,
Przepływ wokół ciał,
Przepływ z napięciem powierzchniowym,
Technika obliczeniowa,
Techniki doświadczalne,

356 Przepływ ściśły

Przepływ poddźwiękowy,
Przepływ przydźwiękowy,
Przepływ naddźwiękowy,
Przepływ hipersoniczny,
Zjawiska ustalone,
Zjawiska lepkie,
Zagadnienia przepływu wewnętrznego,
Przepływ wokół ciał,
Przepływ wieloskładnikowy,
Reakcje chemiczne, jonizacja, zjawiska w stanie braku równowagi termodynamicznej,
Zjawiska cieplne,
Wirujące ciecze i powierzchnie,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

358 Przepływ rozrzedzony

Teoria kinetyczna,
Strefa przejścia (z włączeniem poślizgu),
Przepływ swobodnie molekularny,
Wzajemne oddziaływanie gaz — powierzchnia,
Przepływ w rurach i przewodach (przepływ Knudsen),

Wieloskładniki (mieszanki gazów),
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

360 Przepływy wielofazowe

Teoria ogólna,
Mieszanka cieczy i cząstek ciała stałego,
Mieszanka cieczy i gazu,
Mieszanka cieczy i pary,
Powstawanie kropli cieczy,
Dynamika pęcherzyków,
Przepływ piany, przepływ rozpylonej cieczy,
Mieszanka cieczy, gazu i cząstek ciała stałego,
Filtrowanie,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

362 Warstwy graniczne (w tym warstwy przyścienne)

Teoria wyższego rzędu,
Warstwy laminarne,
Warstwy burzliwe,
Strefa przejściowa i relaminaryzacja,
Warstwy ściśliwe i hipersoniczne,
Wzajemne oddziaływanie fali uderzeniowej i warstwy przyściennej,
Warstwy trójwymiarowe,
Warstwy nieustalone,
Termiczne warstwy przyścienne,
Warstwy nie-newtonowskie,
Warstwy wieloskładnikowe,
Oddzielenie i ponowne połączenie,
Zasysanie i wtrysk,
Chropowatość powierzchni,
Wirujące ciecze i lub powierzchnie,
Dopływ ciepła lub chłodzenia,
Podatna ściana,
Redukcja oporu,
Zjawiska w stanie braku równowagi termodynamicznej i reakcje chemiczne,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

364 Przepływ wewnętrzny (rury, kanały i Couette'a)

Przepływ laminarny,
Przepływ burzliwy,
Strefa przejściowa i relaminaryzacja,
Przepływ nieustalony,
Przepływ wieloskładnikowy,
Zjawiska w stanie braku równowagi termodynamicznej i reakcje chemiczne,
Przepływ pelzający,
Przepływ z zawirowaniem,
Przepływ rozwarstwiony,
Wirujące ciecze i/ lub powierzchnie,
Wpływ ciepła,
Przepływ nie-newtonowski,
Wpływ chropowatości,

- Porowate ściany,
 - Przeszkody,
 - Techniki obliczeniowe,
 - Techniki doświadczalne,
- 366 Przepływ wewnętrzny (dyfuzory, dysze, dyfuzory i kaskady)**
- Przepływ ustalony,
 - Przepływ nieustalony,
 - Przepływ wieloskładnikowy,
 - Zjawiska w stanie braku równowagi termodynamicznej i reakcje chemiczne,
 - Przepływ z zawirowaniem,
 - Przepływ wtórny,
 - Przepływ nie-newtonowski,
 - Przepływ trójwymiarowy,
 - Oddzielenie i ponowne połączenie,
 - Wpływ ciepła,
 - Zassanie i wtrysk,
 - Przeszkody,
 - Działanie i optymalizacja,
 - Techniki obliczeniowe,
 - Techniki doświadczalne,
- 368 Warstwy swobodnego ścinania (warstwy mieszające się, strumienie, ślady, pustki, „pióropusze”)**
- Laminarne nieściśliwe,
 - Laminarne ściśliwe,
 - Burzliwe nieściśliwe,
 - Burzliwe ściśliwe,
 - Rozwarstwianie,
 - Wieloskładnikowe,
 - Wirujące ciecze i/lub powierzchnie,
 - Powierzchniowe wzajemne oddziaływanie strumienia i ciała stałego,
 - Wzajemne oddziaływanie strumienia i przepływu,
 - Wpływ dodatku ciepła i masy,
 - Reakcje chemiczne,
 - Techniki obliczeniowe,
 - Techniki doświadczalne,
- 370 Stateczność przepływu**
- Brzeg ciała stałego (przepływ wewnętrzny),
 - Brzeg ciała stałego (przepływ zewnętrzny),
 - Teoria nieliniowa,
 - Teoria trójwymiarowa,
 - Przepływ wieloskładnikowy,
 - Przepływy nie-newtonowski,
 - Zjawiska w stanie braku równowagi termodynamicznej i reakcje chemiczne,
 - Spadające krople,
 - Przepływ rozwarstwiony,
 - Przepływ wirowy,
 - Techniki obliczeniowe,
 - Techniki doświadczalne,
- 372 Turbulencja**
- Turbulencja jednorodnie izotropowa,
 - Turbulencja jednorodna nieizotropowa,
 - Turbulencja anizotropowa,

Zjawiska ściśliwości,
Warstwy swobodnego ścinania,
Warstwy przyścienne,
Przepływ w rurach i kanałach,
Przepływy rozwarstwione,
Wirujące ciecze i/lub powierzchnie,
Przepływ nie-newtonowski,
Transport ciepła i masy,
Turbulencja wieloskładnikowa,
Turbulencja geofizyczna,
Reakcje chemiczne,
Przepływ przerywany i przepływy o innej strukturze,
Modelowanie,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

374 Płyny elektromagnetyczne i mechanika plazmy

Teoria kontynualna (ośrodka ciągłego),
Teoria plazmy,
Przepływ w polach magnetycznych,
Przepływ w polach elektrycznych,
Fale,
Niestateczności,
Aspekty związane z transportem ciepła,
Przepływ ciekłego metalu,
Turbulencja,
Napęd,
Przepływ wokół ciał,
Konwersja energii typu MHD,
Konwersja energii typu EHD,
Wzajemne oddziaływanie lasera i plazmy,
Termojądrowa konwersja energii,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

376 Hydromechanika okrętu

Statyczne i kwazi-statyczne reagowanie kadłuba statku,
Ruchy statku,
Osiągi statku,
Wydolność statku,
Dynamika statku (uderzenie, itp.),
Sterowanie i manewrowanie statkiem,
Stateczność statku,
Napęd statku,
Hydrosprężystość,
Rozkład ciśnienia na kadłubie,
Dynamika powierzchni sterowych,
Interferencja wielu ciał,
Dynamika cieczy hydroplątów,
Efekty powierzchniowe w dynamice cieczy,
Podwodna dynamika cieczy,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

378 Aerodynamika

Skrzydła i płyty,
Ciała nośne,
Układy skrzydło-kadłub,
Powierzchnie sterowe,
Metody hipernośne,
Siła nośna i opór aerodynamiczny,
Interferencja,
Osiągi,
Tor lotu i trajektorie,
Stateczność i sterowanie,
Zjawiska nieustalone,
Obciążenia aerodynamiczne,
Oblodzenie,
Badanie lotu i przyrządy pokładowe,
Hiperprędkościowe wyrzutnie i oprzyrządowanie,
Technika obliczeniowa,

380 Dynamika cieczy maszyn

Podstawy,
Przepływ nieustalony i stateczność układów
Turbiny gazowe i parowe,
Turbiny hydrauliczne,
Śruby napędowe,
Efekty kawitacji,
Odśrodkowe wentylatory, pompy i kompresory,
Osiowe wentylatory, pompy i kompresory,
Efekty ściśliwości,
Wentylatory, pompy i kompresory o mieszanym przepływie,
Wirniki i łopatki kierownicy,
Łopatki statora, wlotowe i dyfuzora,
Pompy i kompresory strumieniowe,
Maszyny falowe,
Maszyny o ruchu posuwistym,
Kompresory i pompy wirnikowe, (nasady, przekładnie, śruby, itp.),
Śmigła i wirniki helikopterów,
Turbiny regeneratywne,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

382 Smarowanie

Smarowanie półsuche,
Smarowanie hydrodynamiczne i hydrostatyczne,
Smarowanie elasto-hydrodynamiczne,
Smary ciekłe,
Smary gazowe,
Smary stałe i suchej cienkiej warstewki (filmu),
Ciecze chłodząco smarujące,
Smary do obróbki plastycznej,
Efekty cieplne i termosprężyste,
Smary wielofazowe, kawitacja, napięcie powierzchniowe,
Układy smarowania,
Smarowanie sprzężone,
Smarowanie przekładni,

Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

324 Pomiary przepływu i wizualizacja

Prędkość,
Przyspieszenie,
Siły tarcia i tarcie powierzchniowe,
Ciśnienie,
Gęstość,
Koncentracja,
Przepływ masy,
Lepkość,
Kierunek przepływu,
Techniki śledzenia (traserowe),
Wizualizacja przepływu,
Lasery,
Inne techniki optyczne,
Studia modelowe (podobieństwo i modele w skali),
Tunele wodne,
Poddźwiękowe tunele aerodynamiczne,
Trans-, super- i hiperdźwiękowe tunele aerodynamiczne,
Technika tunelowa,
Rury uderzeniowe i tunele,
Tunele środowiskowe,

Nauka o ciepłe

400 Termodynamika

Podstawy termodynamiki klasycznej,
Mechanika statystyczna,
Termodynamika procesów nieodwracalnych (stanów nierównowagowych),
Jednorodne zarodkowanie (nukleacja),
Zjawisko stanu krytycznego,
Zjawiska powierzchniowe,
Równania stanu, włącznie z mieszaninami,
Prawo odpowiadających stanów,
Cykle cieplne i złożone,
Bezpośrednia konwersja energii,
Własności gazów i mieszanin gazowych,
Własności cieczy i mieszanin cieczy,
Własności ciał stałych i mieszanin ciał stałych,
Własności mieszanin wielofazowych,
Własności metastabilnych gazów i cieczy,
Własności materii w wysokich temperaturach i ciśnieniach,
Własności materii przy bardzo niskich temperaturach,
Pomiar temperatury,
Kalorymetria,

402 Transport ciepła (konwekcja jednofazowa)

Wymuszona konwekcja (zewnątrzna),
Wymuszona konwekcja (wewnętrzna),
Konwekcja naturalna (zewnątrzna),
Konwekcja naturalna (osłony),
Konfiguracje termicznie niestateczne,
Przepływy rozseparowane,

Wirujące ciecze lub powierzchnie,
 Przepływy o małej gęstości,
 Przepływy o dużej prędkości,
 Przepływy nie-newtonowskie,
 Przepływ ciekłego metalu,
 Reakcje chemiczne,
 Przepływy nieustalone,
 Mechanizmy transportu,
 Techniki obliczeniowe,
 Techniki doświadczalne,

404 Transport ciepła (konwekcja dwufazowa)

Wrzenie basenu w stanie nukleacji,
 Wrzenie basenu (szczytowy strumień ciepła),
 Wrzenie basenu (minimalny strumień ciepła),
 Nukleacja wrzenia przepływu (zewnątrzny),
 Wrzący przepływ (wewnętrzny),
 Wrzący przepływ, szczytowy strumień ciepła (wewnętrzny),
 Wrzący przepływ, szczytowy strumień ciepła (zewnątrzny),
 Wrząca cienka warstwa (film, w basenie),
 Wrząca cienka warstwa (przepływ),
 Przepływ mgły,
 Wrzenie, przemiana,
 Kondensacja (para statyczna),
 Kondensacja (przepluwająca para),
 Parowanie,
 Efekty napięcia powierzchniowego,
 Efekty przejściowe,
 Przepływy ciała stałe- ciecz,
 Efekty pola elektrycznego,
 Techniki obliczeniowe,
 Techniki doświadczalne,

406 Transport ciepła (przewodnictwo)

Teoria ogólna,
 Zagadnienia ustalone,
 Zagadnienia przejściowe,
 Teoria nieliniowa,
 Oporność cieplna kontaktowa,
 Ośrodki anizotropowe,
 Materiały porowate i ziarniste,
 Ośrodki wielofazowe,
 Zmiana fazy (marznięcie, topnienie),
 Techniki obliczeniowe,
 Techniki doświadczalne,

408 Transport ciepła (promieniowanie i postacie kombinowane)

Czynniki wizualne,
 Teoria własności promieniowania,
 Wymiana pomiędzy powierzchniami,
 Zaangażowanie uczestniczących ośrodków,
 Promieniowanie i konwekcja łącznie,
 Promieniowanie i przewodnictwo łącznie,
 Promieniowanie, konwekcja i przewodnictwo łącznie,

Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

410 Transport ciepła (urządzenia i układy)

Wymienniki ciepła (rekuperatory),
Wymienniki ciepła (regeneratory),
Rozpęte powierzchnie,
Inne techniki augmentacyjne,
Rurociągi ciepłne,
Suszenie i zamrażanie,
Izolacja,
Klimatyczne warunki i sterowanie,
Wieże chłodnicze,
Boilery,
Systemy termicznego magazynowania energii,

412 Termomechanika ciał stałych

Termosprężystość (stacjonarna i kwazi-stacjonarna),
Termosprężystość (nieustalona),
Termosprężystość (nieliniowa),
Termomechanika niesprężysta,
Zjawiska termomagnetyczne i termoelektryczne,
Udar cieplny,
Zmęczenie i stateczność termiczna,
Rozprzestrzenianie się fal cieplnych,
Termomechanika pękania,
Naprężenia termiczne w ciałach stałych przy zmianie fazy,
Materiały kompozytowe,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

414 Transport masy (z transportem ciepła lub bez)

Transport zdominowany konwekcją,
Sublimacja, lub ablacja,
Dyfuzja,
Konwekcja z dyfuzją,
Dyfuzja dwukierunkowa i inne połączone zjawiska,
Reakcje chemiczne,
Wtrysk lub ssanie,
Ośrodki porowate,
Zjawiska nieustalone,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

416 Spalanie

Podstawy teorii,
Zapłon (cieplny i heterogeny),
Laminarne rozprzestrzenianie się płomienia,
Turbulentne rozprzestrzenianie się płomienia, zapalność,
Stateczność i stabilizacja płomienia,
Jonizacja i produkty spalania,
Wzajemne oddziaływanie płomieni i powierzchni,
Kinetyka i mechanizmy,
Spalanie nieustalone i akustyka spalania,
Spalanie naddźwiękowe,

Spalanie niejednorodne i wielofazowe,
 Promieniowanie płomienia,
 Piece,
 Komory spalania i dopalacze,
 Paliwa stałe,
 Paliwa ciekłe,
 Utlenianie i utleniacze,
 Płomień i ogień (rozprzestrzenianie się i gaszenie),
 Modelowanie spalania, płomienia i ognia,
 Techniki obliczeniowe,
 Techniki doświadczalne,

418 Źródła napędu i napędy (systemy i zastosowania)

Podstawy teorii,
 Osiągi,
 Maszyny parowe i turbiny,
 Spalanie wewnętrzne, silniki o ruchu posuwistym,
 Silniki wolnotłokowe i falowe
 Turbiny gazowe,
 Silniki rakietowe,
 Silniki odrzutowe i turbo-odrzutowe,
 Silniki odrzutowe strumieniowe,
 Energetyczne systemy atomowe,
 Napędy jonowe, elektryczne i fotonowe,
 Ciecze robocze,
 Inne urządzenia,

Nauka o ziemi

450 Mikromerytyka

Geometryczne własności cząstek ciała stałego,
 Mechaniczne i fizyczne własności cząstek ciała stałego,
 Proszkowanie ciał stałych,
 Statyka cząstek ciała stałego,
 Dynamika cząstek ciała stałego,
 Ruch śniegu,
 Charakterystyki upakowania (cząstki pod ciśnieniem),
 Mechaniczne i fizyczne własności rozpylonych cieczy,
 Techniki doświadczalne,

452 Ośrodki porowate

Podstawy teorii przepływu cieczy,
 Przesączanie (z uwzględnieniem zanieczyszczeń),
 Przepływ wielofazowy w porowatych ciałach,
 Przepływ nieustalony,
 Uplynnianie pokładów,
 Sprężyste zachowanie się ciał wypełnionych cieczą,
 Dynamika ciał wypełnionych cieczą,
 Termodynamika, transport ciepły, spalanie,
 Technika zbiornikowa (stan ustalony),
 Technika zbiornikowa (stan nieustalony),
 Stateczność przepływu,
 Ciecze nie-newtonowskie,
 Techniki obliczeniowe,
 Techniki doświadczalne,

454 Geomechanika

Geomorfologia,
Tektonika,
Sejsmologia,
Przewidywanie trzęsień ziemi,
Aspekty transportu ciepła,
Wulkanologia,
Glacjologia,
Ciężkość,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

456 Mechanika trzęsienia ziemi

Sejsmiczność (częstość występowania),
Charakterystyki ruchu silnego podłoża,
Kryteria geologiczne,
Oddziaływanie grunt — budowla,
Reagowanie strukturalne,
Kryteria projektowania,
Hydrodynamika sejsmiczna,
Tsunamis,
Symulacja,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

458 Hydrologia, oceanografia i meteorologia

Hydrologia,
Oceanografia fizyczna (prądy, fale itp.),
Transport ciepła w H. i O.,
Techniki obliczeniowe w H. i O.,
Techniki doświadczalne w H. i O.,
Meteorologia fizyczna,
Tornado,
Huragany,
Burze,
Turbulencja atmosferyczna,
Transport ciepła w atmosferze,
Atmosferyczna warstwa przyścienna,
Wzajemne oddziaływanie powietrza i morza,
Energia słoneczna i jej wykorzystanie,
Meteorologia stosowana (zastosowania inżynierskie, itp.),
Techniki obliczeniowe w meteorologii,
Techniki doświadczalne w meteorologii,

Układy energetyczne i środowisko**500 Paliwa kopalne**

Aspekty geofizyczne,
Mechanika górnicza,
Mechanika wiertnicza ropy i gazu,
Technika zbiorników na ropę i gaz,
Rozdrabnianie paliw stałych,

Przetwarzanie paliw stałych na paliwa ciekłe /gazowe,
Transport ciepła i zanieczyszczenia spalania,

502 Systemy nuklearne

Aspekty dynamiczne i drgań,
Aspekty mechaniki budowli,
Zanieczyszczenia mechaniki pęknięcia,
Zanieczyszczenia mechaniki cieczy,
Oddziaływanie cieczy i konstrukcji,
Zachowanie się nieustalone (utrata czynnika chłodzącego, wypadki, itp.),
Oddziaływanie promieniowania na materiały,

504 Systemy geotermiczne

Charakteryzacja zasobów,
Aspekty geofizyczne,
Aspekty mechaniki górotworu,
Reagowanie materiału (korozja, itp.),
Aspekty przepływu cieczy,
Zanieczyszczenia transportu ciepła,
Wykorzystanie energii,
Metody doświadczalne,

506 Systemy słoneczne

Promieniowanie i inne dane meteorologiczne,
Kolektory,
Aspekty transportu ciepła,
Magazynowanie energii,
Materiały,
Ogrzewanie (przestrzeni i wody),
Chłodzenie,
Zastosowanie wysokich temperatur (IPH i termo-elektryczne),
Inne zastosowania termiczne (stawy słoneczne, dystalacja, itp.),

508 Systemy energii wiatru

Modelowanie fizyczne,
Maszyny napędzane wiatrem,
Techniki obliczeniowe,
Techniki doświadczalne,

510 Energia oceanów

Wykorzystanie energii fal,
Wykorzystanie przepływów,
Wykorzystanie gradientu termicznego,
Aspekty zasolenia,

512 Rozmieszczenie energii i systemy składowania

Technika rurociągów,
Technika transportu skroplonego gazu naturalnego,
Przesyłowe linie elektryczne i maszyny,
Pompowe zbiorniki wodne,
Ciśnieniowe magazynowanie gazu,
Magazynowanie energii kinetycznej,
Magazynowanie energii cieplnej,

514 Środowiskowa mechanika cieczy

Aerodynamika architektoniczna,

Dynamiczne reagowanie budowli (trzępotanie, powstawanie wirów, itp.),
 Dyspersja powietrza,
 Dyspersja wody,
 Mechanika śniegu i lodu,
 Erozja gleby, osadzanie, itp.,
 Techniki obliczeniowe,
 Techniki doświadczalne,

- 516 Mechanika przechowywania i usuwania niebezpiecznych odpadów**
 Koncepcje magazynowania/usuwania,
 Nienaruszalność przechowywania,
 Pakowanie i transport,
 Techniki doświadczalne,

Bionauki

- 550 Biomechanika**
 Układy szkieletowe, stawy, więzadła, itp.,
 Mechanizmy mięśniowe,
 Kinesjologia,
 Mechaniczne własności tkanki i krwi,
 Narządy,
 Mikrobiomechanika,
 Zjawiska transportu (dyfuzja),
 Mechanika cieczy układu krążenia i inne ciecze w organizmach
 Urazy mózgu i stosu pancerzowego,
 Zjawiska udaru i drgań,
 Zjawiska transportu ciepła,
 Bionapędy,
 Techniki obliczeniowe,
 Techniki doświadczalne,
- 552 Technika czynników ludzkich**
 Wystawy,
 Urządzenia sterujące,
 Powierzchnia styku człowiek — maszyna,
 Działania użytkownika,
- 554 Technika rehabilitacyjna**
 Prostetyka zewnętrzna,
 Ortotyka,
 Adaptacja funkcjonalna,
 Urządzenia sensorowe i ruchowe,
- 556 Mechanika sportu**
 Siły i momenty w ciele,
 Dynamika ruchu ciała,
 Aktywny sprzęt i narzędzia,
 Pasywny sprzęt (urządzenia zabezpieczające, itp.),
 Systemy powierzchni do gier,
 Balistyka kul, itp.,
 Ulepszanie działania,
 Techniki obliczeniowe,
 Techniki doświadczalne.

Objaśnienia

mikromerytyka — nauka o własnościach i zachowaniu się materii podzielonej na cząstki o skończonej wielkości, z zastosowaniami w mechanice gruntów, metalurgii itp.,

tsunamis — zbiorowe fale oceaniczne,

MHD — magneto-hydro-dynamika,

EHD — elektro-hydro-dynamika,

Praca została złożona w Redakcji dnia pierwszego lipca 1983 roku.

BIULETYN INFORMACYJNY

Z Zebrań Plenarnych Zarządu Głównego Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej

Pierwsze zebranie plenarne XX kadencji odbyło się 17 grudnia 1982 roku. Relacjonujemy tylko najważniejsze sprawy poruszone na zebraniu.

Z powodu zwrócenia nam uwagi przez Wydział Spraw Wewnętrznych Urzędu m.st. Warszawy, że Statut nie przewiduje łączenia funkcji zebranie plenarne zatwierdziło objęcie przez doc. W. Walczaka funkcji Sekretarza Generalnego, prof. J. Wojnarowski zachował stanowisko Wiceprzewodniczącego.

Przyjęto do wiadomości sprawozdanie z dwóch zebrań Prezydium Zarządu Głównego (22.X. i 17.XI. 1982 r.) oraz informację o stanie wydawnictwa MTiS.

Krótkie sprawozdanie z Sympozjum „Metod doświadczalnych w mechanice ciała stałego” przedstawił prof. S. Dubiel.

Zarząd Główny wydelegował na posiedzenie Sądu Konkursowego (mechanika płynów) w Częstochowie docenta E. Walickiego.

Omówiono plany pracy Oddziałów w 1983 roku. Zorganizowane zostaną 3 sympozja (Częstochowa, Gliwice, Warszawa) oraz dwa konkursy i konkurs na najlepszą pracę dyplomową z mechaniki (Gliwice).

Zdecydowano, że ze względu na małą ilość wpływających na konkursy prac, jak również w celu uniknięcia ich wzajemnego dublowania się, celowe jest organizowanie w roku tylko jednego konkursu na najlepszą pracę doświadczalną i jednego na najlepszą pracę teoretyczną.

W wyniku tego wniosku ustalono dalej, że w roku 1983 Oddział Częstochowa zorganizuje konkurs na prace doświadczalne, a Łódź na prace teoretyczne. Oba te oddziały zadbają o podniesienie rangi konkursów Towarzystwa. Zatwierdzono preliminarz budżetowy i podwyżkę dla pracowników administracyjnych.

Po dłuższej dyskusji na propozycję Przewodniczącego Zarządu Głównego powołano 5 Komisji:

1. Komisja do opracowania wniosków zgłoszonych przez Kolegów na XX Zjeździe Delegatów PTMTiS. W skład tej Komisji weszli: doc. W. Bachmacz i doc. W. Walczak.

2. Komisja do opracowania memoriału o nauczaniu mechaniki, a może i o kształceniu szkolnictwa. W jej skład weszli: prof. S. Dubiel, prof. R. Gutowski, prof. R. Rutkowski, doc. K. Szabelski, doc. W. Szuścik, doc. W. Trombski.

3. Komisja 25-lecia PTMTiS
W skład jej weszli: doc. W. Bachmacz, prof. E. Brzuchowski, prof. S. Gduła, doc. Z. Sulimowski, prof. J. Wojnarowski.

4. Komisja do oceny stanu mechaniki w Polsce i utworzenia mapy kierunków mechaniki.
W skład jej weszli: doc. S. Kasprzyk, doc. W. Pietraszkiewicz, doc. W. Walczak, doc. A. Wilczyński, prof. J. Wojnarowski.

5. Komisja historii mechaniki — powoła się taką przy każdym Oddziale. Pieczę nad nimi będzie sprawował prof. J. Kruszewski.

Komisja nr 2 skontaktuje się z podobnymi komisjami działającymi przy Ministerstwie Szkolnictwa Wyższego i Techniki i przy Komitecie Mechaniki PAN. Doc. K. Szabelski pracując w zespole dydaktycznym „Mechaniki” porozumie się z prof. Zakrzewskim i prof. J. Giergielem.

W bieżącej kadencji podział zadań między członków Zarządu Głównego będzie następujący:
Prof. Z. Olesiak — Przewodniczący — ogólny nadzór nad pracą Towarzystwa, zewnętrzna reprezentacja PTMTiS, redaktor naczelny MTiS.

Prof. R. Gutowski — Wiceprzewodniczący — nadzór nad prawidłową pracą Oddziałów, zastępowanie prof. Olesiaka.

Prof. J. Wojnarowski — Wiceprzewodniczący — nadzór nad prawidłową pracą Oddziałów Towarzystwa.

Doc. W. Walczak — Sekretarz Generalny

Doc. W. Bachmacz — Z-ca Sekretarza Generalnego

Doc. A. Wilczyński — Skarbnik

Doc. Z. Sulimowski — Z-ca Skarbnika

Prof. M. Dietrich — Przewodniczący Rady Rdeakcyjnej MTiS.

Doc. W. Szuścik złożył wniosek, by Zarząd Główny co 2 miesiące rozsyłał do Oddziałów biuletyn informujący o konferencjach, sympozjach oraz by protokół z zebrania został dostarczony Oddziałom do końca stycznia.

Drugie zebranie plenarne Zarządu Głównego (XX/2) odbyło się 8 czerwca 1983 r. Przewodniczący złożył relację z pracy Zarządu Głównego w okresie od poprzedniego zebrania. Odbyło się Sympozjum Oddziału Gliwickiego w Wiśle, na którym miało miejsce nieformalne spotkanie członków Zarządu Głównego i Przewodniczącego. Prof. Z. Olesiak przebywał dwukrotnie w Gliwicach i w Gdańsku. Zarząd wysłał listy gratulacyjne nowo mianowanym profesorom, członkom Towarzystwa, wznowiono starania o nadanie imienia M. T. Hubera jednej z ulic Warszawy.

Przedstawiono sprawy nadawania godności członków zagranicznych, wydawnicze, informacji o PTMTiS w wydawnictwach typu „Who is who”.

Podjęto uchwały o powołaniu nowego Oddziału Towarzystwa w Kielcach i o przyjęcie kolegów z Kielc.

Relację z prac Komisji powołanej do opracowania wniosków z XX-go Zjazdu Delegatów PTMTiS złożył doc. Wł. Walczak podając, że wnioski te można podzielić na trzy grupy dotyczące spraw: merytorycznych, informacyjnych i organizacyjnych. Odnośnie działalności merytorycznej należy uznać, że wypracowane dotychczas formy działalności Oddziałów (zebrania naukowe, kursy sympozja, konkursy itp.) są prawidłowe i należy je rozwijać. Szczególnie cenne jest wytworzenie się już pewnej tradycji organizowania sympozjów monotematycznych w określonych Oddziałach:

Słusznym jest postulat uatrakcyjnienia działalności Towarzystwa przez organizowanie kursów interdyscyplinarnych czy naukowych zebrań międzyoddziałowych w celu wymiany doświadczeń naukowych, a także zwiększenia integracji środowiska naukowego mechaników. Jednakże inicjatywa w tym zakresie, wynikająca z autentycznych potrzeb regionu, powinna wychodzić z Oddziału w formie zgłoszenia odpowiedniego zapotrzebowania. Zarząd Główny deklaruje natomiast wszelką pomoc.

W odniesieniu do postulatu zwiększenia oddziaływania Towarzystwa na rozwój młodej kadry w mechanice — w Komisji dyskutowano sprawę ew. zorganizowania konkursu na najlepszą pracę dyplomową w dziedzinie mechaniki.

Zgłoszony na XX Zjeździe Delegatów wniosek zintensyfikowania działalności informacyjnej Zarządu Głównego PTMTiS zostanie zrealizowany przez:

a) — opracowanie i wydanie zeszytu informacyjnego „Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej” o 25-letniej działalności Towarzystwa,

b) — rozważenia możliwości zamieszczania w kwartalniku MTiS bieżącej informacji o pracach Towarzystwa.

W zakresie spraw organizacyjnych — zdaniem Komisji — należy więcej uwagi poświęcić Oddziałom nowoutworzonym, a w szczególności słabszym organizacyjnie i kadrowo. W dyskusji zabrał głos prof. Z. Olesiak podkreślając służebną rolę Zarządu Głównego w realizacji potrzeb Oddziałów.

Wyniki prac Komisji, powołanej do opracowania memoriału w sprawie nauczania mechaniki zrelacjonował prof. R. Gutowski: obiecał, że Komisja opracuje ten memoriał przed końcem 1983 r. Celem, jaki przyswieca temu opracowaniu jest publikacja treści memoriału, dla wyrażenia stanowiska PTMTiS w przedmiotowej sprawie oraz skierowania go do Ministerstwa Nauki Szkolnictwa Wyższego i Techniki, do Rady Głównej i Uczelni.

Do tej pory odbyły się w związku z tym tematem dwa zebrania, zorganizowane przez Oddział Warszawski.

Na poruszony temat wywiązała się ożywiona dyskusja.

Prof. J. Wojnarowski przedstawił zebrany dotychczasowe ustalenia Komisji d/s XXV-lecia PTMTiS:

1) XXI Zjazd Delegatów PTMTiS i jednocześnie Zjazd 25-lecia odbędą się w dniach 9 - 11 maja 1984 r. w Bielsku-Białej.

2) Zjazd zrealizuje dwa cele: zadania robocze Zjazdu Delegatów Towarzystwa i uczczenie 25-lecia istnienia Towarzystwa.

3) Odbędzie się towarzysząca Zjazdowi sesja naukowa — około 6 referatów.

4) W związku z jubileuszem Towarzystwa odlany zostanie medal okolicznościowy, rozprowadzany między członków w drodze subskrypcji.

Wydany będzie znaczek PTMTiS i krawat z emblematem.

Wyniki prac komisji do oceny stanu mechaniki przedstawił doc. W. Walczak przypominając, że prace na ten temat zostały rozpoczęte jeszcze w okresie ubiegłej kadencji. Prace te dotyczyły nie tyle oceny stanu mechaniki, ile stworzenia pewnej „mapy” dającej informacje o:

- jednostkach, w których prowadzona jest działalność naukowa w zakresie mechaniki,
- liczbie samodzielnych pracowników naukowych, pracujących w dziedzinie mechaniki,
- rozwijanej tematyce i prowadzonej specjalizacji,
- istniejących laboratoriach specjalistycznych.

W dalszej części zabrał głos prof. J. Wojnarowski, który przedstawił opracowany obraz graficzny „mapy mechaniki”. Podał, że dla uaktualnienia tej „mapy” przesał pisma do Zarządów Oddziałów z prośbą o nadesłanie odpowiednich informacji. Brak tych informacji m.in. z Oddziałów: Warszawskiego, Wrocławskiego, Krakowskiego, Gdańskiego i innych, uniemożliwia kontynuowanie pracy.

Sprawozdanie z działalności rzeczowej w roku 1982 złożył doc. W. Walczak, a finansowe prof. A. Wilczyński.

Wniosek o nadanie profesorowi zwyczajnemu doktorowi habilitowanemu, inżynierowi, doktorowi honoris causa Oktavianowi POPOWICZOWI godności członka honorowego PTMTiS przedstawił doc. W. Szuścik. Odczytał on treść pisma Oddziału Gliwickiego PTMTiS, zawierającego uzasadnienie wniosku i omówił zasługi prof. O. Popowicza dla rozwoju mechaniki w Polsce.

W dyskusji — z poparciem wniosku — zabrał głos prof. M. Dietrich podkreślając zasługi prof. O. Popowicza.

Wniosek zaakceptowano i postanowiono przedstawić na Zjeździe Delegatów.

CENTRALNY KATALOG ZAGRANICZNYCH CZASOPISM I WYDAWNICTW CIĄGŁYCH

Centralny katalog zagranicznych czasopism i wydawnictw ciągłych znajdujących się w bibliotekach Polskiej Akademii Nauk i towarzystw naukowych dotowanych przez PAN dostarcza informacji bibliograficznych o ponad 18 000 tytułów wydawnictw z różnych dziedzin i dyscyplin naukowych.

Katalog jest prowadzony przez Bibliotekę Polskiej Akademii Nauk w Warszawie w formie kartoteki od 1961 roku. Biblioteka udziela informacji na podstawie katalogu na miejscu (Pałac Kultury i Nauki, VI piętro, pokój 607), telefonicznie (20-02-11 wew. 26) lub za pośrednictwem teleksu 815360.

Katalog jest aktualizowany bieżąco na podstawie opisów bibliograficznych nadsyłanych z ok. 120 bibliotek Akademii.

Opis katalogowy zawiera dane o tytule (ewentualnie i podtytule) wydawnictwa, miejscu wydawania, częstotliwości, zasobach w obrębie tytułu (rocznik, zeszyty, numery), sposobie nabycia (prenumerata, kupno, wymiana, dar), jego lokalizacji w danej placówce (bibliotece), a także informuje, czy wydawnictwo zostało zmikrofiszowane.

Pewna liczba czasopism zagranicznych posiadanych przez biblioteki PAN jest dostępna również w postaci mikrofisz znajdujących się w Ośrodku Informacji Naukowej PAN, który publikuje wykazy czasopism zmikrofiszowanych oraz udostępnia kopie mikrofisz, a także odbitki czytelne gołym okiem na życzenie użytkowników.

Centralny katalog zagranicznych czasopism i wydawnictw ciągłych jest źródłem informacji o bieżących wpływach oraz informacji retrospektywnej za okres ponad 20 lat.

G. RAKOWSKI, Komputeryzacja mechaniki konstrukcji w Polsce w ostatniej dekadzie działalności PTMTiS	569
Компьютеризация строительной механики в Польше в последнем десятилетии	
The computerization of structural mechanics in Poland during the latest decade	
M. KLEIBER, Metoda elementów skończonych w mechanice kontinuum: aktualne kierunki badań	585
Метод конечного элемента в механике континуума, современные направления исследований	
Finite element method in continuum mechanics: contemporary trends in research	
S. DROBNIAK, Przegląd osiągnięć krajowych badań doświadczalnych turbulencji w okresie minionego dziesięciolecia	599
Обзор достижений экспериментальных исследований в Польше в области турбулентности в последнем десятилетии	
Review of achievements in experimental research in Poland in turbulence during the latest decade	
W. KANIA, Aerodynamika doświadczalna w zakresie dużych prędkości	611
Экспериментальная аэродинамика в области больших скоростей	
Experimental aerodynamics at high speeds	
J. S. OSTROWSKI, Ocena krajowych badań doświadczalnych z zakresu turbulencji oraz aerodynamiki dużych prędkości	645
О экспериментальных работах в Польше по турбулентности и аэродинамике больших скоростей	
On Polish experimental research in turbulence and high speed aerodynamics	
K. WILMAŃSKI, Termodynamika fenomenologiczna — stan badań i perspektywę	655
Феноменологическая термодинамика, состояние исследований и перспективы	
Fenomenological thermodynamics — state of research and perspectives	
M. WIĄK-ZOCHOWSKI, J. KARKOWSKI, Współczesne metody badań doświadczalnych w mechanice ciała stałego	679
Современные экспериментальные методы в механике твердого тела	
On Polish experimental research in turbulence and high speed aerodynamics	
Contemporary experimental methods in solid body mechanics	
Z. OLESIAK, Nowa lista haseł w Applied Mechanics Reviews	717
Новый список заглавий в Аплайд Механик Ревьюс	
New subject lista in Applied Mechanics Reviews	
Biuletyn informacyjny	745

Cena zł 80.—

Warunki prenumeraty
Cena prenumeraty krajowej
rocznie zł 320.—
półrocznie zł 160.—

Prenumeratę na kraj przyjmują Oddziały RSW „Prasa-Książka-Ruch”, oraz urzędy pocztowe i doręczyciele w terminach:

- do 25 listopada na I półrocze roku następnego i na cały rok następny,
- do 10 czerwca na I półrocze roku bieżącego.

Jednostki gospodarki społecznej, instytucje, organizacje i wszelkiego rodzaju zakłady pracy zamawiają prenumeratę w miejscowych Oddziałach RSW „Prasa-Książka-Ruch”, w miejscowościach zaś, w których nie ma Oddziałów RSW w urzędach pocztowych.

Czytelnicy indywidualni opłacają prenumeratę wyłącznie w urzędach pocztowych i u doręczycieli.

Prenumeratę ze zleceniem wysyłki za granicę przyjmuje RSW „Prasa-Książka-Ruch”, Centrala Kolportażu Prasy i Wydawnictw, ul. Towarowa 28, 00-958 Warszawa, konto NBP XV Oddział w Warszawie Nr 1153-201045-139-11 w terminach podanych dla prenumeraty krajowej.

Prenumerata ze zleceniem wysyłki za granicę jest droższa od prenumeraty krajowej o 50% dla zleceniodawców indywidualnych i o 100% dla zleceniodawców instytucji i zakładów pracy.

Bieżące i archiwalne numery można nabyć lub zamówić we Wzorcowni Wydawnictw Naukowych PAN-Ossolineum-PWN, Pałac Kultury i Nauki (wysoki parter) 00-901 Warszawa oraz w księgarniach naukowych „Domu Książki”.

A subscription order stating the period of time, along with the subscriber's name and address can be sent to your subscription agent or directly to Foreign Trade Enterprise Ars Polona-Ruch, 00-068 Warszawa, 7 Krakowskie Przedmieście, P.O. Box 1001, Poland. Please send payments to the account of Ars Polona-Ruch in Bank Handlowy S.A., 7 Traugutt Street, 00-067 Warszawa, Poland.

MECHANIKA TEORETYCZNA I STOSOWANA jest organem Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej; ukazuje się poczynając od 1 stycznia 1967 r. jako kwartalnik. Zeszyty z lat poprzednich można nabywać w sekretariacie Zarządu Głównego PTMTS (Warszawa, Pałac Kultury i Nauki, piętro 3, pokój 309)
