

g II 720

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 0079-3701

**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**

KWARTALNIK

TOM 17 • ZESZYT 3



WARSZAWA 1979

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

531

SPIS TREŚCI

C. Goss, S. KOSAŃDA, Doświadczalny i analityczny opis własności stali o podwyższonej wytrzymałości w zakresie małej liczby cykli	339
Экспериментальные и аналитические исследования свойств высокопрочных сталей при малом числе циклов нагрузки	
Experimental and analytical studies on high-strength steels within the range of low cycle fatigue	
L. JILKÉN, J. BÄCKLUND, Pomiarы elektromagnetyczne w mechanice ciała stałego	357
Электромагнитные измерения в механике твердого тела	
Electromagnetic measurements in solid mechanics	
H. KOPESKI, M. KOPKOWICZ, J. SMYKŁA, Modelowe badania koncentracji naprężeń w węzłach ustrojów nośnych metodą pokryw optycznie czynnych	369
Модельные исследования концентрации напряжений в узлах несущих систем методом покрытий оптически деятельных	
Investigation of the stress concentrations in joints of structures by the „Modeltech” method	
M. LECH, I. MRUK, J. STURNICKI, Metoda immersyjna interferometrii holograficznej do badania kształtu i odkształceń	379
Иммерсионный метод голографической интерферометрии для исследования формы и деформаций	
Immersion method of holographic interferometry for investigation of shape and deformations	
J. LIETZ, B. MICHAŁSKI, R. WOJNAR, Zastosowanie metody kolejnych rozwiązań sprężystych do elastooptycznego badania ośrodka sprężysto-plastycznego z otworem walcowym	391
Применение метода последовательных упругих решений к поляризационно-оптическим исследованиям упруго-пластической среды с цилиндрическим отверстием	
Application of the method of successive elastic solutions to photoelastic investigations of an elasto-plastic medium with a cylindrical cavity	
S. MAZURKIEWICZ, L. KUC, M. SIKOŃ, Rozproszenie światła przy skośnym prześwietlaniu w zastosowaniu do analizy naprężeń w szkle hartowanym	405
Рассеяние света при косом просвечивании в применении к анализу напряжений в закаленном свете	
Scattering of light in oblique incidence in application for analyzing stresses in tempered glass	
J. NAUMANN, Pomiar odkształceń plastycznych metodą moiry	415
Измерение пластических деформаций методом муара	
Measurements of plastic deformations by means of moiré method	
M. NOWAK, Wytrzymałość zmęczeniowa poliamidu 6 w funkcji czasu starzenia i zawartości włókna szklanego	431
Усталостная прочность полиамида 6 в зависимости от времени старения и добавки стеклянного волокна	
Ageing time and glass fiber content in fatigue strength tests on polyamid 6	
E. DRESCHER, R. MICHAŁOWSKI, Ultradźwiękowa metoda badania gęstości ośrodków ziarnistych w procesach deformacji	441
Акустический метод исследования плотности зернистых сред в процессах деформации	
The acoustic method of measuring the density of granular media in plane deformation process	
BIULETYN INFORMACYJNY	451

7-720

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

TOM 17 · ZESZYT 3



WARSZAWA 1979  
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,  
JERZY DAŁEK—SEKRETARZ

### REDAKCJA

00-901 Warszawa, PKiN, pok. 1724, tel. 20-02-11, wewn. 2268

---

Nakład 660. Ark. wydawniczych 8,5. Ark. drukarskich 7,75. Papier druk. sat. kl. IV, 71 g. 70×100.  
Oddano do składania 23.V.1979 r. Druk ukończono w październiku 1979 r. Zam. 707/79. Cena zł 30.—

---

Drukarnia im. Rewolucji Październikowej, Warszawa

DOŚWIADCZALNY I ANALITYCZNY OPIS WŁASNOŚCI STALI  
O PODWYŻSZONEJ WYTRZYMAŁOŚCI W ZAKRESIE MAŁEJ LICZBY CYKLI<sup>1)</sup>

CZESŁAW GOSS, STANISŁAW KOCAŃDA (WARSZAWA)

1. Wstęp

Niskocykliczna wytrzymałość zmęczeniowa należy do młodszych, ale intensywnie rozwijających się działów nauki o zmęczeniu materiałów i układów konstrukcyjnych. Pierwsze zależności do praktycznych obliczeń w zakresie małej liczby cykli obciążenia sformułowano bowiem w połowie lat pięćdziesiątych. Rozwinięto je w latach sześćdziesiątych, co wiązało się przede wszystkim z zapewnieniem właściwej niezawodności statkom latającym. Badania i obliczenia w latach siedemdziesiątych objęły zbiorniki i rurociągi, składy siłowni ciepłych i statków morskich, urządzenia siłowni jądrowych, a nawet narzędzia do obróbki plastycznej. Stąd też zaistniała pilna konieczność zebrania informacji o zachowaniu się materiałów produkcji krajowej w omawianym zakresie wytrzymałości zmęczeniowej, a zwłaszcza stali o podwyższonej wytrzymałości. Taka była geneza podjęcia i przeprowadzenia przez nas badań w latach 1974 - 78, rozpoczętych od badań stali 45 [1]. Chodziło w nich głównie o ustalenie odpowiednich metodyk eksperymentalnych. Następnie wykonano badania stali o podwyższonej wytrzymałości 1862A, 2062Y, 35G2Y i 34GS. Wyniki badań stali 18G2A przy jednostronnie zmiennym rozciąganiu o współczynniku amplitudy cyklu  $R = 0$  i  $R = 0,5$  przedstawiono w pracy [2], natomiast w pracach [3] i [4] opublikowano ciekawsze wyniki badań pozostałych stali przy cyklach jednostronnych i symetrycznych.

W niniejszej pracy zostaną przedstawione przebiegi ustalonych pętli histerezy, wykresy cyklicznego odkształcenia i krzywe trwałości zmęczeniowej dla stali 35G2Y, 20G2Y i 18G2A przy symetrycznym rozciąganiu — ściskaniu w „odkształceniach”. Na podstawie wyników doświadczeń podjęto próbę analitycznego opisu związków między naprężeniem i odkształceniem w czasie cyklicznego obciążenia. Spośród wielu metod analitycznego opisu przyjęto na początek jedną z najprostszych, a mianowicie — transformacji skali. Opis ten jest opisem fenomenologicznym, modelowym, nie wiążącym się z rzeczywistą strukturą badanych stali i z fizycznym charakterem zachodzących w nich zmian. Rozważane będą zarówno stany ustalone, jak i nieustalone. Wyniki doświadczeń i opis modelowy ograniczymy do jednoosiowego stanu obciążenia. Istnieje jednak możliwość wy-

<sup>1)</sup> Praca stanowi rozszerzenie referatu przedstawionego na VIII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego

Warszawa 4-6 września 1978

Wyniki badań pochodzą z pracy wykonanej w ramach problemu węzłowego 05.12 „Wytrzymałość i optymalizacja konstrukcji budowlanych i maszynowych”, koordynowanego przez IPPT PAN.

korzystania niektórych wielkości otrzymanych w czasie tych badań do obciążeń złożonych, mimo pewnych różnic ilościowych w zachowaniu się metalu, przy obciążeniach w obydwu stanach [5]. Zaznaczmy przy okazji, że wpływ wielu czynników na cykliczne zachowanie się stali nastęrcza ogólnie znanych trudności w pełnym ujęciu analitycznego opisu własności cyklicznych, a szczególnie w opisie stanów przejściowych.

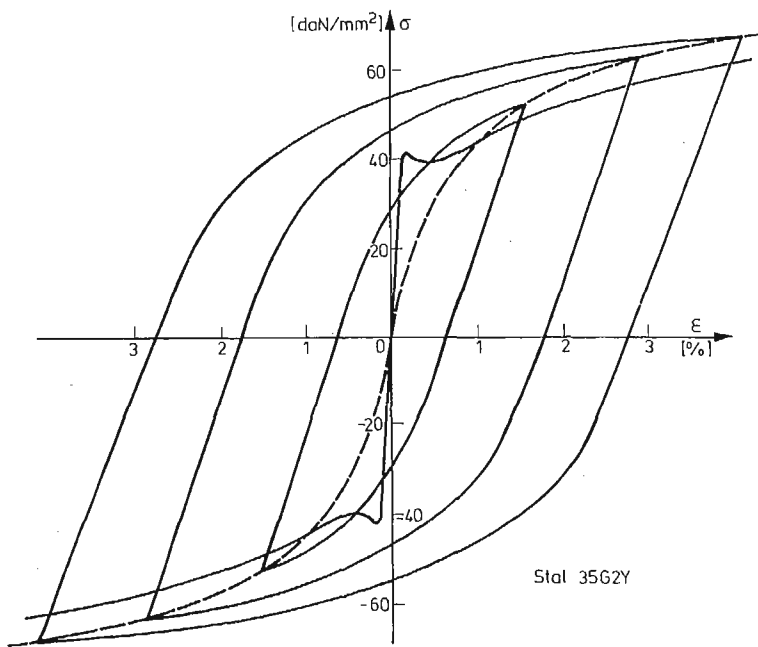
## 2. Badania doświadczalne i określenie trwałości zmęczeniowej

Badania prowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron 1251 przy częstotliwości 0,3 Hz. Tak niska częstotliwość, charakterystyczna dla badań w zakresie małej liczby cykli, umożliwia łatwe śledzenie zmian pętli histerezy ze wzrostem liczby cykli obciążenia. Stosowano metodykę badań i próbki, które omówiono w pracy [1]. Składy chemiczne badanych stali ujęto w tablicy 1.

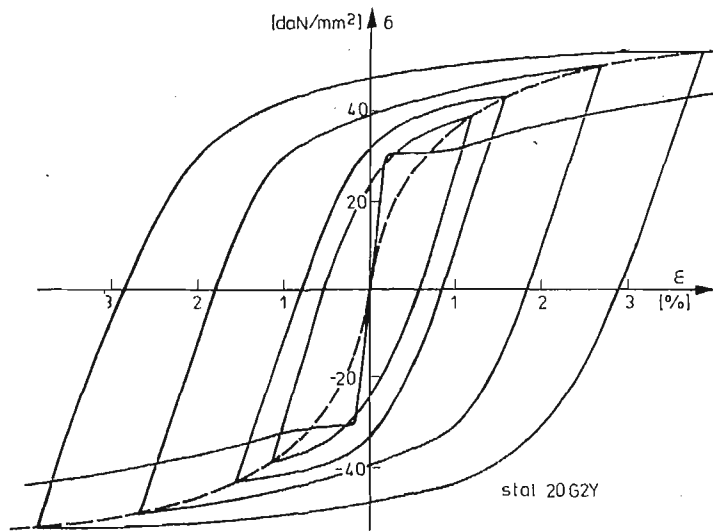
Tablica 1

Nazwa stali	C %	Mn %	P %	S %	Si %
18G2A	0,18	1,50	0,047	0,022	0,034
20G2Y	0,20	1,13	0,023	0,039	ślady
35G2Y	0,33	1,29	0,031	0,04	ślady

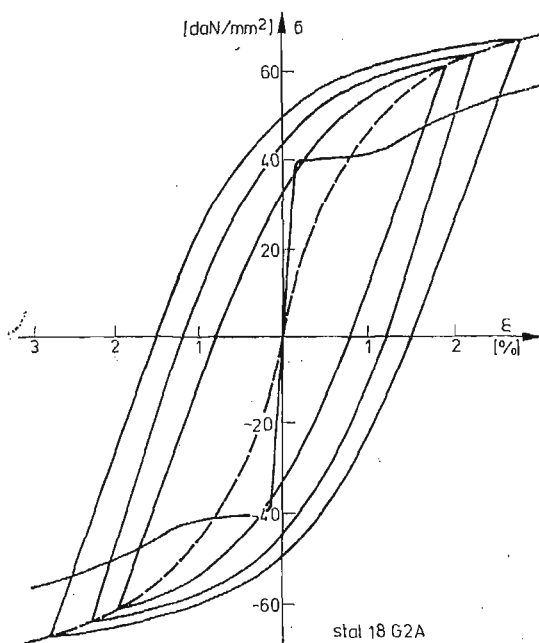
Pomiaru odkształceń dokonywano przy pomocy ekstensometru. Wstępną kontrolę wydłużenia przeprowadzano za pomocą czujnika zegarowego o dokładności pomiaru 0,01 mm. Ze względu na możliwość wybożenia próbek kontrolowano również odkształcenia poprzeczne za pomocą czujnika zegarowego. Obciążenie i wydłużenie zapisywano na papierze milimetrycznym korzystając z jednego lub dwóch rejestratorów  $x-y$ . Otrzymywano przebiegi zmian odkształcenia wraz ze zmianą liczby cykli na wykresach  $\sigma-\varepsilon$  i przebiegi zmian naprężenia na wykresach  $\sigma-t$ . Na podstawie tych wykresów możemy określić krzywe cyklicznego odkształcenia i wykresy trwałości zmęczeniowej. Krzywe cyklicznego odkształcenia oznaczono na rys. 1, 2 i 3 liniami kreskowymi, a statycznego rozciągania — liniami ciągłymi. Na rysunkach tych zaznaczono również przebiegi ustabilizowanych pętli histerezy dla kilku wybranych próbek, które były badane przy ustalonej amplitudzie odkształcenia całkowitego. Uzyskane w czasie badań przebiegi zmian pętli histerezy ze wzrostem liczby cykli dostarczają informacji o cyklicznym zachowaniu się badanych stali i umożliwiają również wykonanie wykresów zmiany odkształceń  $\varepsilon_c$ ,  $\varepsilon_{pl}$ ,  $\varepsilon_s$  (rys. 4, 5 i 6) i wykresów zmęczeniowych (rys. 7). Badane stale charakteryzują się nieznacznym osłabieniem dla  $\varepsilon_c < 1\%$  i wyraźnym umocnieniem przy wyższym odkształceniu. Świadczy o tym położenie względem siebie krzywych odkształcenia cyklicznego (krzywe kreskowe) i statycznego rozciągania (krzywe ciągłe) na rys. 1, 2 i 3. Wyniki te dla stali 18G2A różnią się nieco od wyników podanych w pracy [2] dla cykli niesymetrycznych, w której stwierdzono cykliczne umocnienie w całym zakresie odkształceń. Różnice mogły być spowodowane



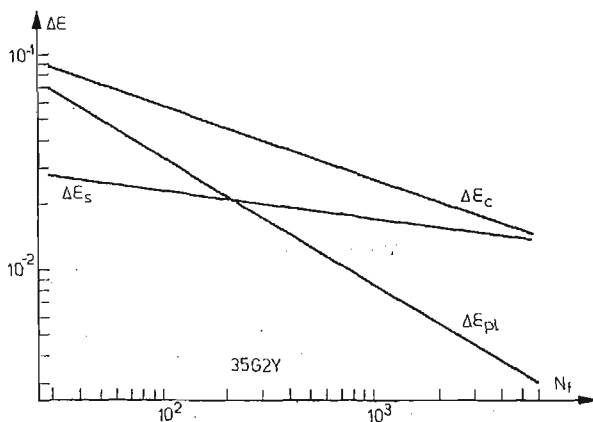
Rys. 1



Rys. 2



Rys. 3



Rys. 4

pewnymi zmianami w składzie chemicznym i innym rodzajem obróbki, o czym świadczyły również inne własności mechaniczne.

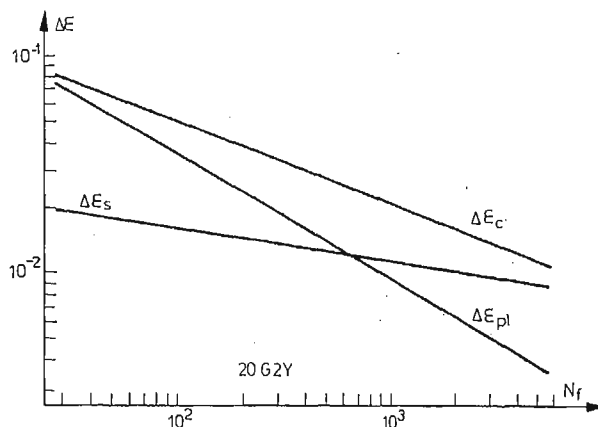
Zależności zmian odkształcenia plastycznego, sprężystego i całkowitego od liczby cykli do zniszczenia w układzie logarytmicznym, jako zbliżone do prostych, opracowano metodą korelacji liniowej. Wyniki obliczeń współczynnika korelacji  $r$  dla poszczególnych składowych odkształceń badanych stali wskazują, że przebieg najbardziej zbliżony do liniowego wykazały odkształcenia całkowite dla wszystkich trzech badanych stali (wartość współczynnika korelacji  $r$  mieściła się dla nich w zakresie od  $-0,9975$  do  $-0,9912$ ) i plastyczne dla stali 20G2Y ( $r = -0,9788$ ). Najniższa wartość współczynnika  $r$  wynosiła



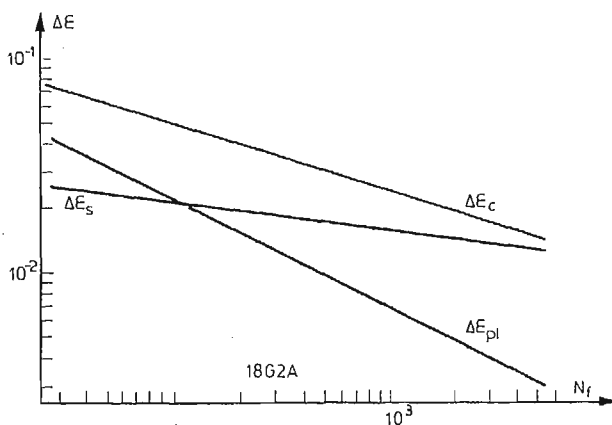
–0,8840 dla odkształceń sprężystych stali 20G2Y. Wynika stąd, że dla praktycznych obliczeń inżynierskich, można wszystkie trzy krzywe aproksymować w układzie logarytmicznym liniami prostymi. W ujęciu analitycznym proste te określa wzór Morrowa:

$$(1) \quad \frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_{pl}}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_s}{2} = \varepsilon'_f (2N_f)^c + \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b.$$

We wzorze tym  $c$  jest wykładnikiem, a  $\varepsilon'_f$  — współczynnikiem cyklicznego odkształcenia plastycznego,  $\sigma'_f$  jest współczynnikiem, a  $b$  — wykładnikiem wytrzymałości zmęczeniowej,  $2N_f$  — liczbą nawrotów obciążenia,  $\Delta \varepsilon$ ,  $\Delta \varepsilon_{pl}$ ,  $\Delta \varepsilon_s$  — są zakresami zmian odkształceń



Rys. 5



Rys. 6

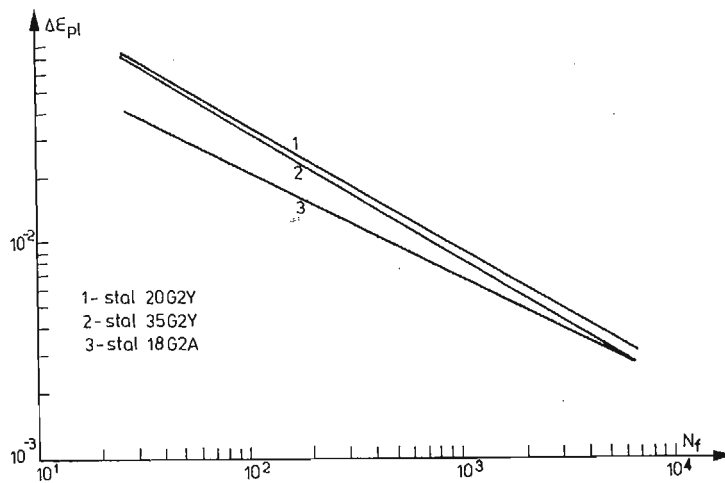
całkowitych ( $\Delta \varepsilon = 2\varepsilon_c$ ) plastycznych ( $\Delta \varepsilon_{pl} = 2\varepsilon_{a,pl}$ ) i sprężystych ( $\Delta \varepsilon_s = 2\varepsilon_s$ ), a  $E$  oznacza moduł Young'a. Współczynnik odkształcenia plastycznego  $\varepsilon'_f$  jest równy odkształceniu plastycznemu przy zerwaniu próbki w pierwszym nawrocie ( $2N_f = 1$ ). Jego wartość mieści się zwykle w przedziale od  $0,35\varepsilon_f$  do  $\varepsilon_f$ , gdzie  $\varepsilon_f$  jest odkształceniem plastycznym przy zerwaniu podczas statycznego rozciągania. Wykładnik  $b$  zmienia się dla większości metali w przedziale od  $-0,05$  do  $-0,15$ , natomiast  $c$  od  $-0,5$  do  $-0,8$ . Wykładniki

$b$  i  $c$  są równe współczynnikom kierunkowym prostych  $\Delta \varepsilon_s$  i  $\Delta \varepsilon_{pl}$  we współrzędnych logarytmicznych. Współczynnik  $\sigma'_f$  stanowi naprężenie zerwania przy jednym nawrocie. W przybliżeniu można przyjąć, że  $\sigma'_f$  jest równe naprężeniu zerwania przy jednoosiowym rozciąganiu  $\sigma_f$ .

Pierwszy człon we wzorze Morrowa może być również przedstawiony w postaci wzoru Mansona-Coffina.

$$(2) \quad N_f^k \Delta \varepsilon_{pl} = C_1,$$

gdzie  $k$  i  $C_1$  są stałymi materiałowymi. Wartość stałej  $k$  przyjmuje się wstępnie równą 0,5, a stałą  $C_1$  można w przybliżeniu określić ze statycznej próby rozciągania  $C_1 = \frac{1}{2} \ln \frac{F_0}{F_u}$ , gdzie  $F_0$  oznacza pole przekroju początkowego próbki, a  $F_u$  przekroju po zerwaniu. Wykresem zależności (2) w układzie logarytmicznym jest linia prosta ( $\Delta \varepsilon_{pl}$  na rys. 4, 5, 6 i 7). Porównawcze wykresy zmęczenia dla badanych stali przedstawiono



Rys. 7

na rys. 7. Większe różnice uwidaczniają się przy mniejszych liczbach cykli  $N_f$ . Otrzymane dla badanych stali wartości wykładników i współczynników występujące w zależnościach (1) i (2) ujęto w tabelicy 2. Mieszczą się one na ogół w przedziałach przewidywanych dla tych gatunków stali, tylko współczynniki wytrzymałości zmęzeniowej  $\sigma'_f$  różnią

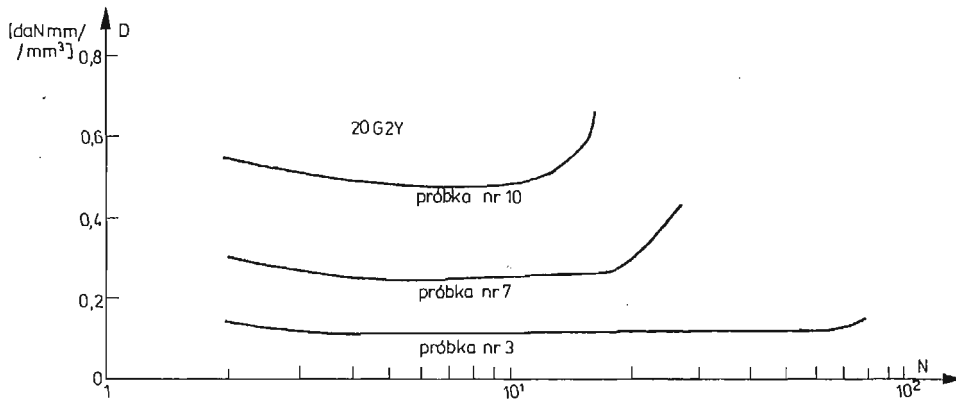
Tabela 2

Nazwa stali	$k = -c$	$C_1$		$b$	$\varepsilon'_f$ %	$\sigma'_f$ daN/mm <sup>2</sup>	$\sigma_f$ daN/mm <sup>2</sup>
		z próby statycznej	z badań cyklicznych				
18G2A	0,588	0,444	0,383	-0,125	10	600,4	149,1
20G2Y	0,615	0,569	0,567	-0,075	13	215,8	107,9
35G2Y	0,887	0,503	2,98	-0,140	6,75	325,7	137,3

się znacznie od orientacyjnie z nimi porównywalnymi rzeczywistymi naprężeniami zerwania  $\sigma_f$ . Wartości stałych  $k$  i  $C_1$  dla stali 35G2Y występujące w zależności Mansona-Coffina (2) otrzymane z badań cyklicznych bardzo istotnie odbiegają od wyników określonych ze statycznej próby rozciągania.

Z wykresów zmiany odkształceń  $\Delta\varepsilon$ ,  $\Delta\varepsilon_{pl}$ ,  $\Delta\varepsilon_s$  dla badanych stali przedstawionych na rys. 4, 5 i 6 wynika, że odporność na cykliczne zmęczenie przy tym rodzaju obciążenia zależy w znacznym stopniu od własności plastycznych. Proste  $\Delta\varepsilon$ ,  $\Delta\varepsilon_{pl}$  i  $\Delta\varepsilon_s$  dla poszczególnych stali różnią się wielkością kąta pochylenia i położeniem. Punkt przecięcia prostych  $\Delta\varepsilon_{pl}$  i  $\Delta\varepsilon_s$  wynosi odpowiednio około 600 cykli dla stali 20G2Y, 200 cykli dla stali 35G2Y i 130 dla stali 18G2A. Przesuwanie się tego punktu w kierunku mniejszych liczb cykli świadczy o zmniejszaniu się własności plastycznych materiału.

Rozpatrzono również zmiany dysypacji energii  $D$  na jeden cykl i sumaryczną dysypowaną energię w czasie wszystkich cykli do zniszczenia  $\sum_1^{N_f} D$ . Jej wartość jest uwzględniana w kryteriach niszczenia elementów przy małej liczbie cykli obciążenia [6], a ostatnio również w zakresie ograniczonej i nieograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej [7]. Z tego względu znajomość dysypacji odgrywa ważną rolę w charakterystyce stali w czasie cyklu obciążenia. Stwierdzono, że przebieg zmian dysypacji ze wzrostem liczby cykli dla jednej próbki jest

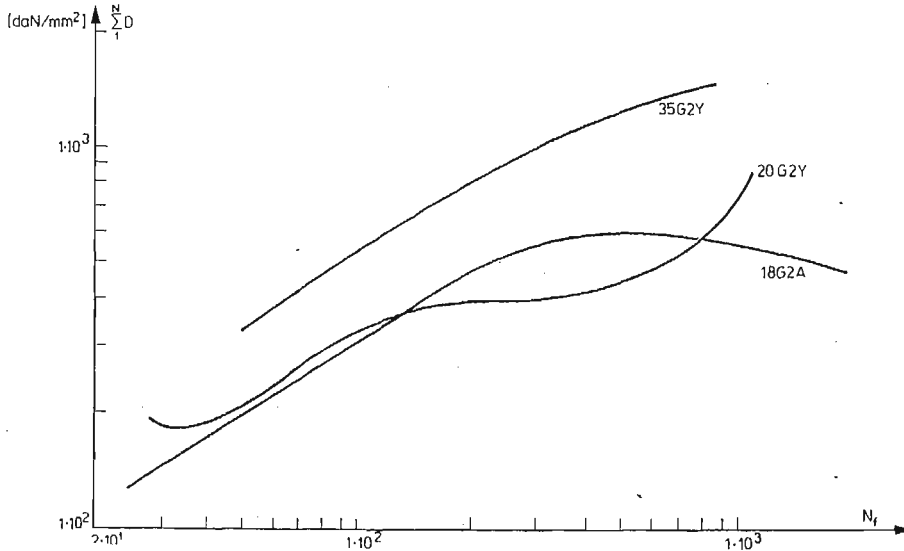


Rys. 8

podobny do przebiegu zmian odkształceń plastycznych. W pracy [7] zasygnalizowano o podobnej zależności również dla obciążeń wysokocyklicznych w zakresie od  $10^4$  do  $10^7$  cykli. Przebiegi zmian dysypacji ze wzrostem liczby cykli dla wybranych próbek ze stali 20G2Y w zakresie małej liczby cykli przedstawiono na rys. 8. Wartości dysypacji są różne dla każdej z badanych stali, nawet przy tych samych przebiegach obciążeń. Im mniejsza wartość dysypacji w jednym cyklu, tym większą liczbę cykli do zniszczenia będzie wykazywała próbka z danej stali. Sumaryczna dysypacja w czasie wszystkich cykli do zniszczenia  $N_f$  powiększa się wraz ze wzrostem  $N_f$ . Jest to widoczne z rys. 9, na którym przedstawiono jej przebiegi dla stali 35G2Y, 20G2Y i 18G2A w układzie logarymicznym. Dają się zauważyć pewne różnice dla każdej z badanych stali.

Istniejący pogląd o możliwości przewidywania kierunku zmian własności cyklicznych metali na podstawie próby statycznej znalazł potwierdzenie w naszych badaniach, o ile

pominiemy przejściowe osłabienie przy wartościach  $\varepsilon_c < 1\%$ . Według tego poglądu dla  $R_m/R_{02} > 1,4$  materiał umacnia się cyklicznie, a dla  $R_m/R_{02} < 1,2$  wykazuje cykliczne osłabienie. Pomiedzy tymi wartościami materiał może być cyklicznie stabilny. W naszym przypadku dla badanych stali stosunek ten wynosił 1,78 dla stali 18G2A, 1,70 dla stali



Rys. 9

20G2Y i 1,62 dla stali 35G2Y, a więc we wszystkich przypadkach jest większy od 1,4. Dotyczy to wyłącznie badań przy cyklach symetrycznych. Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych będą stanowić podstawę do analitycznego opisu zachowania się tych stali przy obciążeniu cyklicznym.

### 3. Analityczny opis krzywych cyklicznego odkształcenia

Jedną z najprostszych metod opisu cyklicznej deformacji jest oparta o transformację skali. Została ona zaproponowana przez G. Masinga i sprowadza się do zmiany skali układu odniesienia przy odciążeniu. Jeśli krzywa obciążenia wstępnego (OA na rys. 10) określona jest przez związek

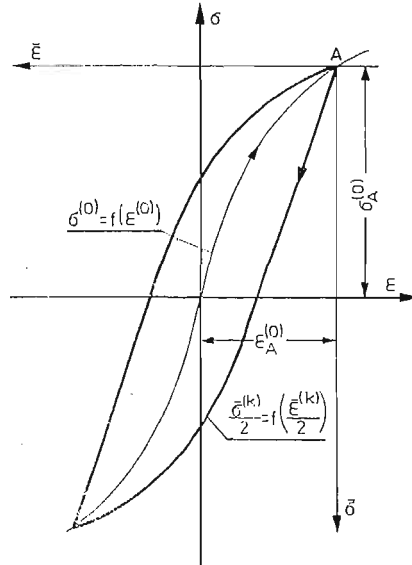
$$(3) \quad \sigma^{(0)} = f(\varepsilon^{(0)}),$$

to naprężenia  $\bar{\sigma}^{(k)}$  i odkształcenia  $\bar{\varepsilon}^{(k)}$  przy odciążaniu spełniają równanie

$$(4) \quad \frac{\bar{\sigma}^{(k)}}{2} = f\left(\frac{\bar{\varepsilon}^{(k)}}{2}\right),$$

gdzie  $\bar{\sigma}^{(k)} = \sigma_A^{(0)} - \sigma^{(k)}$  i  $\bar{\varepsilon}^{(k)} = \varepsilon_A^{(0)} - \varepsilon^{(k)}$ , a  $\sigma_A^{(0)}$  i  $\varepsilon_A^{(0)}$  oznaczają wartości naprężenia i odkształcenia w punkcie A, w którym następuje zmiana kierunku obciążenia,  $k = 1, 2, 3 \dots \dots 2N \dots 2N_f$  oznacza numer kolejnego nawrotu obciążenia i jest równocześnie numerem gałęzi pętli histerezy, natomiast  $N$  oznacza liczbę cykli obciążenia. Zależność między

naprężeniami i odkształceniami przy odciążeniu w układzie  $\bar{\sigma}$ ,  $\bar{\epsilon}$  otrzymuje się przez dwukrotne rozciągnięcie wykresu  $\sigma^{(0)} = f(\epsilon^{(0)})$  w układzie  $\sigma$ ,  $\epsilon$ . Zależność (4) określa pętlę histerezy, a (3) krzywą obciążenia wstępnego. Przez krzywą obciążenia wstępnego zwaną inaczej krzywą szkieletową rozumie się zgodnie z określeniem niektórych autorów krzywą



Rys. 10

przy obciążeniu statycznym. Wydaje się jednak, że takie określenie może obowiązywać dla materiałów bez wyraźnej granicy plastyczności i cyklicznie stabilnych. Wygodniejsze jest przyjęcie krzywej cyklicznego odkształcenia jako podstawy do konstrukcji pętli histerezy, to jest krzywej określonej zależnością (3). Z samej istoty jej konstrukcji (łączy wierzchołki ustabilizowanych pętli histerezy) wynika związek ze stanami ustalonymi, a więc i możliwość ich opisu. Potwierdzeniem tego są uzyskane wyniki przebiegów krzywych cyklicznego odkształcenia i statycznego rozciągania na rys. 1, 2 i 3 dla stali 35G2Y, 20G2Y i 18G2A.

**3.1. Aproksymacja krzywej cyklicznej.** W obliczeniach analitycznych wygodnie jest aproksymować krzywą cyklicznego odkształcenia za pomocą prostych zależności, które mogą być przydatne również w praktycznych obliczeniach inżynierskich. Na początek przyjęto postać funkcji zgodną z zależnością Ramberga-Osgooda dla opisu krzywej statycznego odkształcenia

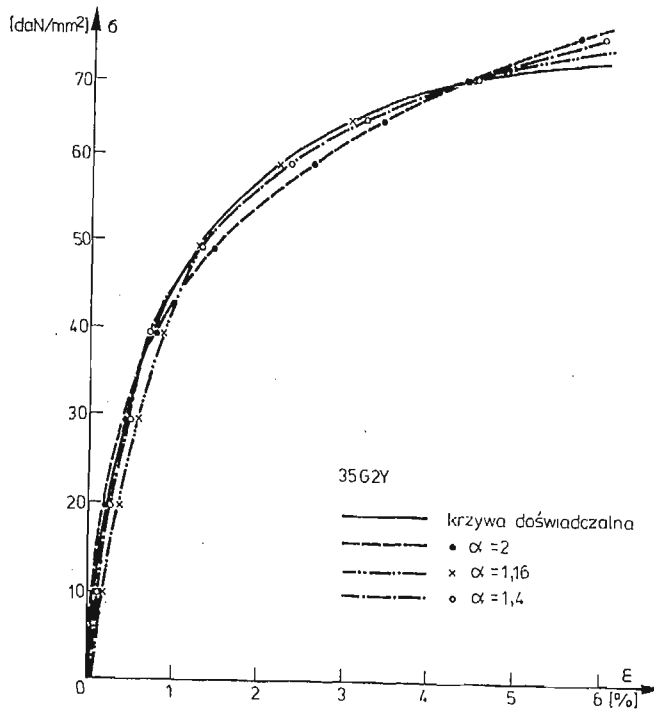
$$(5) \quad \epsilon^{(0)} = \frac{\sigma^{(0)}}{E_0} + \left( \frac{\sigma^{(0)}}{B_0} \right)^n,$$

gdzie  $E_0$ ,  $B_0$  i  $n$  są stałymi materiałowymi. Przyjęto, że  $n$  jest liczbą całkowitą nieparzystą dla umożliwienia opisu takim samym wzorem wykresu rozciągania i ściskania. W dalszych rozważaniach zrezygnowano z tego ograniczenia przyjmując  $n$  ze zbioru liczb rzeczywistych, co umożliwi dokładniejszą aproksymację krzywej cyklicznej. Sprawę znaku rozwiązano zakładając przy każdej zmianie kierunku obciążenia nowy układ współrzędnych  $\bar{\sigma}^{(l)}$ ,  $\bar{\epsilon}^{(l)}$ ,

w którym naprężenia i odkształcenia są zawsze dodatnie. Dla wyznaczenia stałych  $E_0$ ,  $B_0$  i  $n$  przyjmujemy 3 punkty  $(\sigma_{(i)}, \varepsilon_{(i)})$ ,  $i = 1, 2, 3$  na krzywej cyklicznego odkształcenia. Ze względów obliczeniowych, wynikających z postaci równania (5) wygodnie jest rozpatrywać punkty, dla których zachodzą związki  $\frac{\sigma_{(2)}}{\sigma_{(1)}} = \frac{\sigma_{(3)}}{\sigma_{(2)}} = \alpha$ , to znaczy  $\sigma_{(2)}$  jest średnią geometryczną  $\sigma_{(1)}$  i  $\sigma_{(3)}$ . Wtedy uzyskujemy następujące zależności na stałe  $E_0$ ,  $n$  i  $B_0$

$$(6) \quad E_0 = \frac{2\sigma_{(2)} \cdot \varepsilon_{(2)} - \sigma_{(1)} \cdot \varepsilon_{(3)} - \sigma_{(3)} \cdot \varepsilon_{(1)}}{\varepsilon_{(2)}^2 - \varepsilon_{(1)} \cdot \varepsilon_{(3)}}, \quad n = \frac{1}{\log \alpha} \log \frac{\varepsilon_{(2)} - \frac{\sigma_{(2)}}{E_0}}{\varepsilon_{(1)} - \frac{\sigma_{(1)}}{E_0}},$$

$$B_0 = \sigma_{(1)} \left( \varepsilon_{(1)} - \frac{\sigma_{(1)}}{E_0} \right)^{-1/n};$$



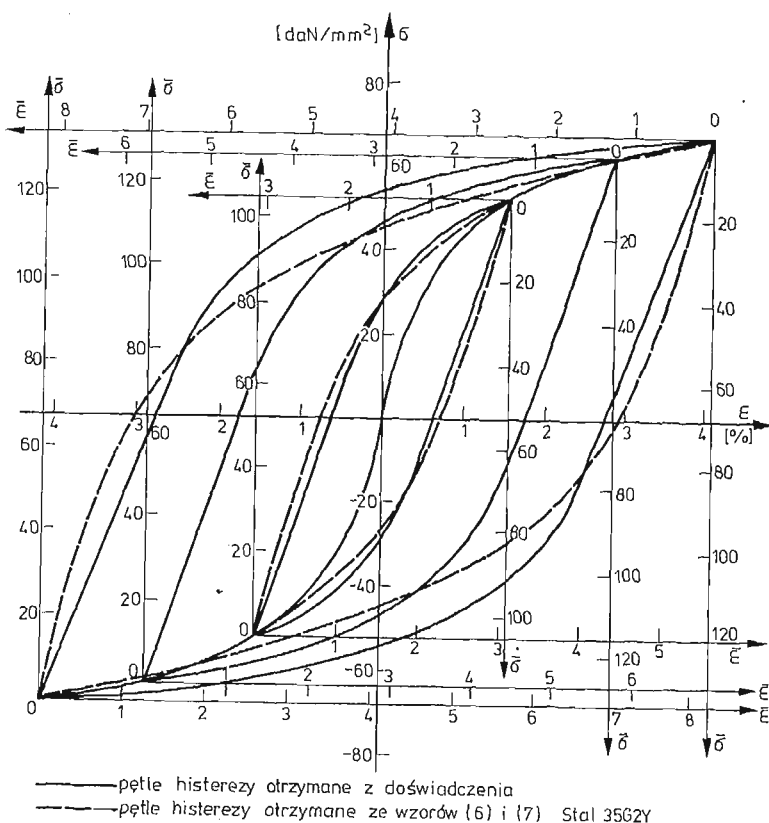
Rys. 11

Dla różnych wartości parametru  $\alpha$  otrzymujemy inne położenie punktów  $(\sigma_{(i)}, \varepsilon_{(i)})$  na krzywej cyklicznego odkształcenia i różne wartości stałych  $E_0$ ,  $n$ ,  $B_0$ . Na rys. 11 przedstawiono linią ciągłą krzywą cyklicznego odkształcenia dla stali 35G2Y, a liniami przerywanymi i punktowymi jej aproksymację dla  $\alpha = 2$ ,  $\alpha = 1,16$  i  $\alpha = 1,4$ . Względnie dobrą aproksymację otrzymano przy  $\alpha = 1,4$ . Wtedy dla  $\sigma_{(1)} = 35 \text{ daN/mm}^2$  otrzymujemy  $E_0 = 7056 \text{ daN/mm}^2$ ,  $n = 5,24$  i  $B_0 = 130 \text{ daN/mm}^2$ . Właśnie krzywa cyklicznego odkształcenia obliczona dla tej wartości parametru  $\alpha$  zostanie wykorzystana do budowy pętli histerezy.

**3.2. Opis stanów ustalonych.** Możliwość analitycznego opisu stanów ustalonych jest istotna z wielu powodów. Na przykład we wzorach określających trwałość zmęczeniową różnych metali występują zakresy odkształceń całkowitych, sprężystych i plastycznych określone dla stanów ustalonych [6], a stany te obejmują większą część żywotności próbek. Ponadto istnieje możliwość określenia dysypacji w czasie cyklicznego obciążenia i innych wielkości istotnych dla określenia cyklicznego zachowania się danego materiału. Wzór opisujący pętlę histerezy w stanie ustalonym uzyskujemy przez przekształcenie zależności (5) do postaci (4):

$$(7) \quad \bar{\varepsilon}^{(u)} = \frac{\bar{\sigma}^{(u)}}{E_0} + 2 \left( \frac{\bar{\sigma}^{(u)}}{2B_0} \right)^n,$$

gdzie  $\bar{\sigma}^{(u)}$ ,  $\bar{\varepsilon}^{(u)}$  oznaczają naprężenia i odkształcenia w stanie ustalonym, a stałe  $E_0$ ,  $n$  i  $B_0$  zostały określone z aproksymacji krzywej cyklicznego odkształcenia według wzorów (6). Rys. 12 przedstawia porównanie doświadczalnych przebiegów ustalonych pętli histe-



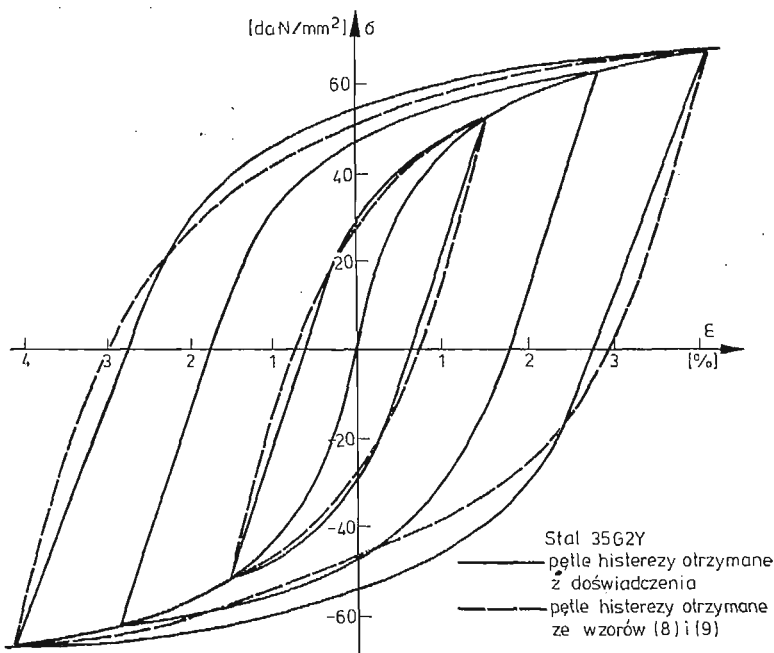
Rys. 12

rezy dla stali 35G2Y (linie ciągłe) i otrzymanych przez transformację skali krzywej cyklicznego odkształcenia (5) według wzorów (6) i (7) (linie przerywane). Dla małych i średnich zakresów odkształceń uzyskano dość dobre przybliżenie ustalonych pętli histerezy. Większe różnice uwidaczniają się w zakresie największych obciążeń. Dla poprawienia wierności odwzorowania postanowiono zmienić wartości stałych  $E_0$  i  $B_0$  przy niezmięionej wartości

wykładnika  $n$ . Na początek zmieniono tylko wartość stałej  $B_0$  na  $B_u$  obliczoną z warunku, że gałąź pętli histerezy określona ze wzoru (7) i odpowiadająca ustalonej największej pętli musi przejść przez ustalony punkt na krzywej doświadczalnej. Zmiana stałej  $B_0$  poprawia aproksymację zależnie od przyjętego punktu na krzywej doświadczalnej. W następnej próbie zmieniono również stałą  $E_0$  na  $E_u$ , przyjmując ją równą tangensowi kąta pochylenia początkowego przebiegu gałęzi pętli histerezy. Zależność (7) przyjmuje wtedy postać:

$$(8) \quad \bar{\varepsilon}^{(u)} = \frac{\bar{\sigma}^{(u)}}{E_u} + 2 \left( \frac{\bar{\sigma}^{(u)}}{2B_u} \right)^n.$$

W tym przypadku uzyskuje się zwiększenie dokładności dla początkowego przebiegu i w części, w której leży wybrany punkt na krzywej doświadczalnej. Najlepsze wyniki osiągnięto przyjmując, że krzywa określona wzorem (8) będzie przechodzić przez dwa dowolne punkty  $(\sigma_{(1)}, \varepsilon_{(1)})$  i  $(\sigma_{(2)}, \varepsilon_{(2)})$  na krzywej doświadczalnej. Wartość wykładnika  $n$



Rys. 13

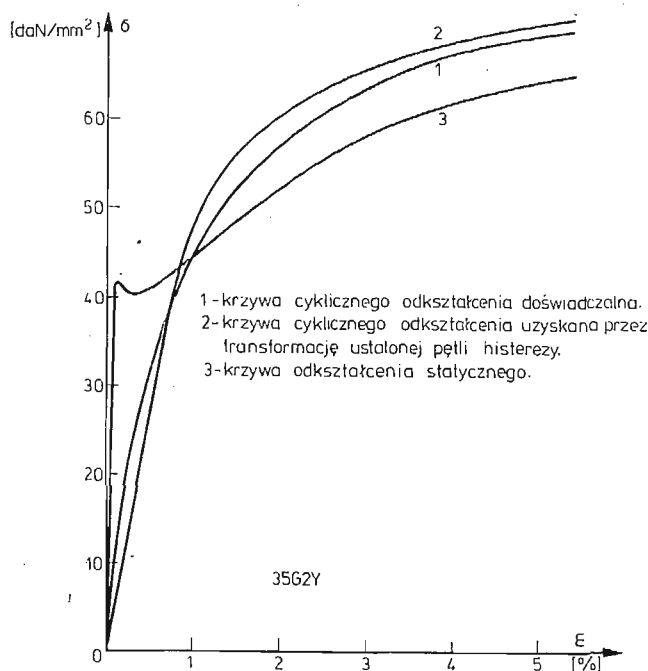
w dalszym ciągu nie zmieniono, posługując się wciąż aproksymacją krzywej cyklicznego odkształcenia. Z zależności (8) uzyskujemy wtedy:

$$(9) \quad B_u = \left[ \frac{\sigma_{(2)}^n - \alpha \sigma_{(1)}^n}{2^{n-1} (\varepsilon_{(2)} - \alpha \varepsilon_{(1)})} \right]^{1/n}, \quad E_u = \sigma_{(1)} \left[ \varepsilon_{(1)} - 2 \left( \frac{\sigma_{(1)}}{2B_u} \right)^n \right], \quad \alpha = \frac{\sigma_{(2)}}{\sigma_{(1)}},$$

Dla przyjętych  $\sigma_{(1)} = 88 \text{ daN/mm}^2$ ,  $\varepsilon_{(1)} = 0,018$ ,  $\sigma_{(2)} = 132 \text{ daN/mm}^2$ ,  $\varepsilon_{(2)} = 0,065$ ,  $\alpha = 1,5$ ,  $n = 5,24$  uzyskano  $B_u = 135,3 \text{ daN/mm}^2$ ,  $E_u = 7071,5 \text{ daN/mm}^2$ . Na rys. 13 przedstawiono linią przerywaną dwie ustalone pętli histerezy otrzymane tą metodą, na tle odpowiadających im pętli uzyskanych na podstawie doświadczeń.



Zasadniczym celem dotychczasowych rozważań był opis stanów ustalonych metodami względnie prostymi, ale jednocześnie umożliwiającymi dość wierne odwzorowanie. Dal- szym krokiem do opisu pętli histerezy może być zmiana wartości nie tylko stałych  $E_0$  i  $B_0$ , uzyskanych z aproksymacji krzywej cyklicznego odkształcenia według zależności (5), ale również wykładnika  $n$  przy zachowaniu postaci funkcji odwzorowującej. Nowe wartości stałych możemy uzyskać na przykład przez dokonanie aproksymacji gałęzi naj- większej — uzyskanej w czasie badań ustalonej pętli histerezy. Dla stali 35G2Y przyjmując



Rys. 14

$\alpha = 1,4$ ,  $\sigma_{(3)} = 132 \text{ daN/mm}^2$ ,  $\epsilon_{(3)} = 0,065$ ,  $\sigma_{(2)} = 94,3 \text{ daN/mm}^2$ ,  $\epsilon_{(2)} = 0,02$ ,  $\sigma_{(1)} = 67,4 \text{ daN/mm}^2$ ,  $\epsilon_{(1)} = 0,013$  ze wzorów (5) i (6) otrzymujemy:  $E_0 = 5225 \text{ daN/mm}^2$ ,  $n = 8,82$ ,  $B_0 = 191,44 \text{ daN/mm}^2$ . Stąd przez przekształcenie zależności (5) do postaci (8) mamy  $E_u = E_0$ ,  $n = 8,82$ ,  $B_u = \frac{B_0}{2^{1-1/n}} = 103,5 \text{ daN/mm}^2$ . Po obliczeniu stałych  $E_u$ ,  $n$  i  $B_u$  możemy wykreślić dla nich krzywą odpowiadającą zależności (5)

$$(10) \quad \epsilon^{(0)} = \frac{\sigma^{(0)}}{E_u} + \left( \frac{\sigma^{(0)}}{B_u} \right)^n,$$

to znaczy krzywą obciążenia wstępnego, która w naszym przypadku odpowiada krzywej cyklicznego odkształcenia. Ciekawe jest porównanie tej krzywej z doświadczalną, rzeczywistą krzywą cyklicznego odkształcenia. Różnice w ich przebiegu dają nam obraz o wielkości niedokładności, jakie popełniamy, stosując metodę transformacji skali dla badanej stali przy zadanej postaci funkcji odwzorowującej (5). Odpowiednie wykresy wraz z krzywą statycznego odkształcenia przedstawiono na rys. 14. Z rysunku tego wynika, że możliwe.

jest szybkie określanie przybliżonej krzywej cyklicznego odkształcenia przez transformację ustalonej pętli histerezy uzyskanej z badania jednej próbki przy kilkudziesięciu cyklach do zniszczenia. Jest to szczególnie cenne przy dużej pracochłonności badań zmęczeniowych. Porównanie tych trzech krzywych: cyklicznego odkształcenia, krzywej uzyskanej przez odwrotną transformację największej badanej pętli histerezy (a zatem akurat przeciwnie do propozycji G. Masinga) i krzywej statycznego odkształcenia świadczy o możliwości przewidywania z dość dużym prawdopodobieństwem cyklicznego zachowania się stali 35G2Y na podstawie badania dwóch próbek. Jedną z tych próbek należy obciążyć statycznie, a drugą cyklicznie o bardzo wysokiej amplitudzie obciążenia (kilka lub kilkadziesiąt cykli do zniszczenia) przy cyklu symetrycznym. Podsumowując możemy stwierdzić, że dla badanych stali metoda transformacji skali przy wykorzystaniu krzywej cyklicznego odkształcenia jako krzywej obciążenia wstępnego z przedstawionymi modyfikacjami może być przydatna dla odwzorowania ustalonych pętli histerezy przy obciążeniach cyklicznych. Ale istnieje również możliwość innego podejścia, a mianowicie krzywą cyklicznego odkształcenia można określać z pętli histerezy, a nie odwrotnie. To bardzo istotne zagadnienie wymaga dalszych badań, dla innych stali.

**3.3. Opis stanów nieustalonych.** Przedstawione metody opisu pętli histerezy po wprowadzeniu pewnych zmian mogą być wykorzystane do analitycznego ujęcia stanów nieustalonych. W stanach nieustalonych ma miejsce ciągła zmiana pętli histerezy i w związku z tym natrafia się na trudności w ich opisie. Za podstawę tego opisu przyjmujemy, podobnie jak dla stanów ustalonych, krzywą cyklicznego odkształcenia i największą, doświadczalnie wyznaczoną pętlę histerezy. Przez ich aproksymację wcześniej omówionym postępowaniem za pomocą zależności (5) i (8) określimy stałe  $E$ ,  $n$  i  $B$ . Poszczególne gałęzie pętli histerezy zostaną opisane na podstawie wzoru ujmującego ich zmianę ze wzrostem liczby nawrotów obciążenia  $k$ . W tym celu wprowadzono człon poprawkowy  $A_{(k)}$  do wzoru (8)

$$(11) \quad \bar{\epsilon}^{(k)} = \frac{\bar{\sigma}^{(k)}}{E_u} + 2 \left\{ \frac{\bar{\sigma}^{(k)}}{2[B_u + A_{(k)}]} \right\}^n,$$

gdzie  $A_{(k)} = ak^2 + bk + c$ . Stałe  $E_u$ ,  $n$  i  $B_u$  określono dla stanu ustalonego danej stali, natomiast pozostałe stałe  $a$ ,  $b$  i  $c$  obliczono czerpiąc dane z wykresów zmian pętli histerezy ze wzrostem liczby cykli i zmiany naprężeń w funkcji czasu. Z wykresów tych odczytuje się wielkości zakresów odkształceń całkowitych  $\Delta\epsilon_c = \bar{\epsilon}$ , przy których były badane różne próbki i wielkości zakresów naprężeń  $\Delta\sigma^{(k)} = \bar{\sigma}^{(k)}$  dla danej liczby  $k$  nawrotów obciążenia ( $k = 2N$ ). Sporządzono wykresy  $A_{(k)}$  w funkcji liczby nawrotów obciążenia  $k$  dla pięciu wybranych próbek i stwierdzono, że wielkości te można z dość dobrym przybliżeniem aproksymować wielomianem drugiego stopnia

$$(12) \quad A_{(k_i)} = ak_i^2 + bk_i + c,$$

gdzie  $i = 1, 2, 3$ .

Przyjmując do obliczeń więcej, niż trzy punkty, można  $A_{(k)}$  aproksymować wielomianem wyższego stopnia ogólnie znanymi metodami. Jednak z przeprowadzonej analizy wynika, że dla stali 35G2Y wystarcza trójmian kwadratowy. Wartości stałych  $a$ ,  $b$  i  $c$  wyznaczamy dla kilku próbek o różnych wielkościach zakresów odkształcenia całkowitego  $\bar{\epsilon}$ , a tym

samym również dla różnych liczb nawrotów obciążenia  $2N_f$ . W tym celu odczytujemy dla każdej próbki wielkości zakresów naprężeń  $\bar{\sigma}^{(k_i)}$   $i = 1, 2, 3$  dla trzech liczb zmian nawrotów obciążenia  $k$ : na początku przebiegu ( $k_1 \approx 2 \div 4$ ), dla cykli środkowych ( $k_2 \approx N_f$ ) i przed zniszczeniem ( $k_3 \approx 2N_f$ ). Dla tych wartości  $\bar{\sigma}^{(k_i)}$  obliczamy  $A_{(k_i)}$  ze wzoru (11) (dla  $i = 1, 2, 3$ )

$$(13) \quad A_{(k_i)} = \frac{\bar{\sigma}^{(k_i)}}{2 \left[ \frac{\bar{\varepsilon} - \frac{\bar{\sigma}^{(k_i)}}{E_u}}{2} \right]^{1/n}} - B_u.$$

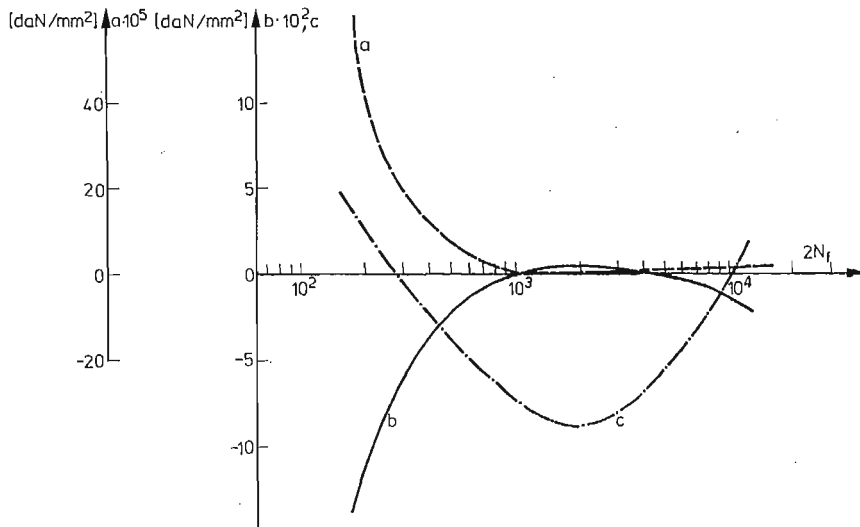
Otrzymujemy więc układ trzech równań (12) z trzema niewiadomymi ze względu na stałe  $a$ ,  $b$  i  $c$ . Przyjmując oznaczenia:

$$(14) \quad \begin{aligned} k_2 - k_1 = \beta, & \quad k_2^2 - k_1^2 = \gamma, & \quad A_{(k_2)} - A_{(k_1)} = \xi, \\ k_3 - k_1 = \lambda, & \quad k_3^2 - k_1^2 = \delta, & \quad A_{(k_3)} - A_{(k_1)} = \Delta, \end{aligned}$$

otrzymujemy następujące wzory na stałe  $b$ ,  $a$  i  $c$ :

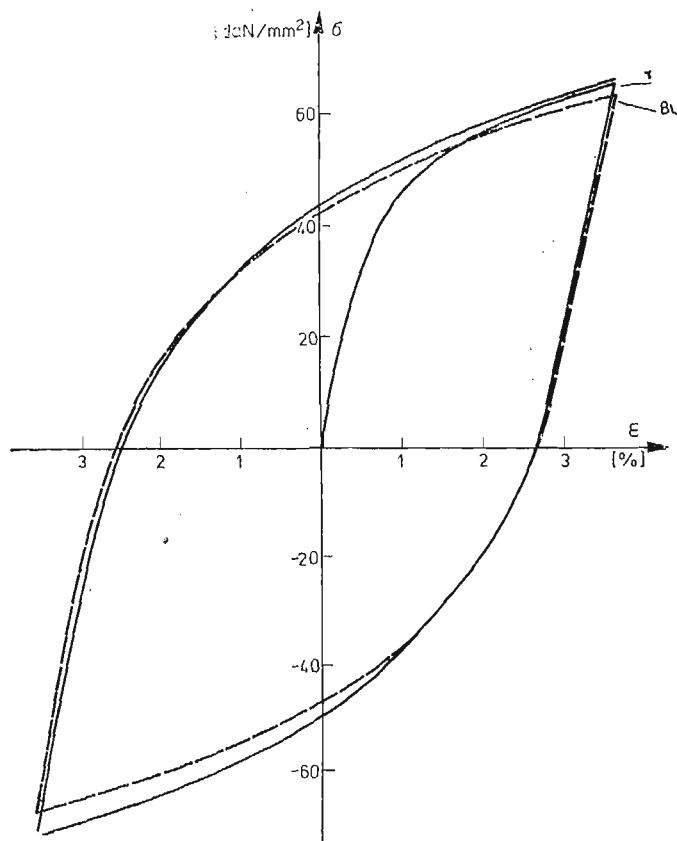
$$(15) \quad b = \frac{\Delta\gamma - \xi\delta}{\lambda\gamma - \beta\delta}, \quad a = \frac{1}{\gamma}(\xi - b\beta), \quad c = A_{(k_1)} - ak_1^2 - bk_1;$$

Po obliczeniu współczynników  $a$ ,  $b$  i  $c$  wielomianu  $A_{(k)}$  dla próbek o różnej liczbie cykli do zniszczenia  $N_f$ , sporządzamy ich wykresy w funkcji  $2N_f$  (lub  $N_f$ ) (rys. 15). Z wykresów

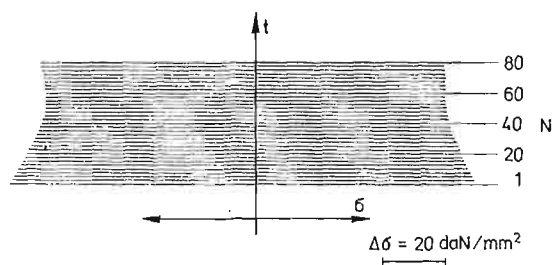


Rys. 15

możemy odczytać wartości tych współczynników dla dowolnej liczby  $2N_f$ . Możemy zatem określić przebiegi poszczególnych pętli histerezy ze wzrostem liczby cykli  $N = \frac{k}{2}$  również dla okresu przejściowego. Właśnie na rys 16 zostały przedstawione pętle początkowe i końcowe dla danych:  $E_u = 7071,5 \text{ daN/mm}^2$ ,  $n = 5,24$ ,  $B_u = 135,3 \text{ daN/mm}^2$ ,  $\bar{\varepsilon} =$



Rys. 16



Rys. 17

$= 0,073$ ,  $2N_f = 166$ ,  $a = 4,33 \cdot 10^{-4}$  daN/mm<sup>2</sup>,  $b = -0,123$  daN/mm<sup>2</sup>,  $c = 2,95$  daN/mm<sup>2</sup>. Zmiany amplitud naprężenia ze wzrostem liczby cykli  $N$  ilustruje rys. 17. Podobieństwo uzyskanych wyników obliczeniowych do przebiegów doświadczalnych jest dobre. Z przeprowadzonej próby analitycznego opisu stanów nieustalonych wynika możliwość ich dość wiernego opisu zaproponowaną metodą, zarówno przy cyklicznym osłabieniu, jak i przy umocnieniu. Efekt umocnienia lub osłabienia przy tym opisie uzyskujemy przez odpowiednią zmianę stałych  $a$ ,  $b$ ,  $c$  członu poprawkowego  $A_{(k)}$ . Przy bardziej

złożonym przebiegu własności cyklicznych materiału, np. typu osłabienie, umocnienie i ponowne osłabienie również istnieje możliwość opisu przedstawioną metodą, ale wtedy stopień wielomianu  $A_{(k)}$  musiałby być odpowiednio wyższy.

#### 4. Wnioski końcowe

W pierwszej części pracy przedstawiliśmy wyniki badań zmęczeniowych stali o podwyższonej wytrzymałości 35G2Y, 20G2Y i 18G2Y w zakresie małej liczby cykli obciążenia przy symetrycznym rozciąganiu — ściskaniu o stałej amplitudzie odkształcenia całkowitego. Zostały przedstawione przebiegi ustalonych pętli histerezy, krzywe cyklicznego odkształcenia i wykresy trwałości zmęczeniowej. Przedstawione wyniki wskazują na cykliczne umocnienie tych stali za wyjątkiem obciążeń o  $\varepsilon_c < 1\%$ .

Uzyskane wyniki eksperymentalne wykorzystano w drugiej części pracy do opisu analitycznego stanów ustalonych i nieustalonych. Przy opisie ustalonych pętli histerezy wykorzystano metodę transformacji skali opisując te pętle przez przekształcenie krzywej cyklicznego odkształcenia według zasady G. Masinga. Możliwe jest również podejście odwrotne, to znaczy jako podstawową przyjmowano jedną z największych pętli histerezy uzyskaną w czasie badań danej stali i przez jej transformację otrzymano krzywą cyklicznego odkształcenia.

Zmiany pętli histerezy w stanach przejściowych zostały ujęte przez wprowadzenie do wzoru podstawowego na transformację skali wielomianu poprawkowego zależnego od liczby nawrotów obciążenia. Przedstawiona metoda umożliwia opis pętli histerezy w stanach ustalonych na podstawie wyników badań jednej próbki z danej stali przy możliwie największym obciążeniu, natomiast dla odtworzenia stanów przejściowych konieczne jest przebadanie kilku lub kilkunastu (zależnie od wymaganej dokładności opisu) próbek przy różnej wielkości obciążenia (w zakresie małej liczby cykli).

#### Literatura cytowana w tekście

1. S. KOCANĀDA, Cz. GOSS: *O osłabieniu stali 45 przy małej liczbie cykli zmian obciążenia*. Biuletyn WAT, nr 12, 1976, s. 107 - 116.
2. S. KOCANĀDA, Cz. GOSS: *Badania zmęczeniowe stali 18G2A w zakresie małej liczby cykli obciążenia*. VII Sympozjum Badań Doświadczalnych w Mechanice Ciała Stałego. Polskie Towarzystwo Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej. Warszawa, 1976, s. 288 - 296.
3. Cz. GOSS, S. KOCANĀDA: *Porównawcze badania stali o podwyższonej wytrzymałości typu zrównoważonego w zakresie małej liczby cykli obciążenia*. II Sympozjum Zespołu Zmęczenia Materiałów i Konstrukcji, PAN, Lublin, 1977, s. 105 - 110.
4. Cz. GOSS, S. KOCANĀDA: *Badania trwałości zmęczeniowej stali o podwyższonej wytrzymałości w zakresie małej liczby cykli*. VIII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, PTMTiS, Warszawa, 1978, s. 259 - 266.
5. M. ŚLIWOWSKI: *Badania wpływu trwałych odkształceń przy obciążeniach cyklicznych na uplastycznienie metalu w złożonym stanie naprężenia*, Prace IPPT, 24, 1977.
6. BELA I. SANDOR: *Fundamentals of cyclic stress and strain*. The University of Wisconsin Press 1972.
7. В. Т. ТРОЩЕНКО: *Деформационные и энергетические критерии усталостного разрушения металлов*. VIII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, PTMTiS, Warszawa 1978, s. 369 - 385.

## Резюме

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ  
ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ МАЛОМ ЧИСЛЕ ЦИКЛОВ НАГРУЗКИ

В первой части этой работы представлено результаты исследований малоциклового усталости высокопрочных сталей 35G2Y, 20G2Y и 18G2Y. Исследования были проведены при симметрическом растяжении — сжатии с постоянной амплитудой полной деформации. Представлено стабильные петли гистерезиса, кривые циклической деформации и усталостные диаграммы. Полученные результаты показали циклическое упрочнение этих сталей, кроме малых нагрузок с амплитудой полной деформации меньше одного процента.

Результаты полученные в этих исследованиях были основой для аналитической записи петли гистерезиса и кривых циклической деформации. В этом описании был использован метод трансформации масштаба. Этот метод даёт возможность записи стабильных петель гистерезиса и кривой циклической деформации из исследований одного образца.

Эти предположения требуют дальнейших исследований.

## Summary

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDIES ON HIGH-STRENGTH STEELS  
WITHIN THE RANGE OF LOW CYCLE FATIGUE

In the first part of the paper the experimental results of low-cycle fatigue investigations on high strength steels 35G2Y, 20G2Y and 18G2A have been given. The tests were performed for symmetric tension-compression with a constant amplitude of total strain. The steady hysteresis loops, cyclic strain curves and fatigue diagrams have been developed. The results obtained have shown cyclic workhardening of the steels, except of total strain amplitude smaller than one percent.

On the basis of the experimental results an analytic description of hysteresis loops and cyclic strain has been proposed. In this description the method of transformation of scale has been used. The method makes it possible to describe the steady hysteresis loops and cyclic strain curve from the test of one specimen only. Further studies are desirable.

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA

*Praca została złożona w Redakcji dnia 10 lutego 1979 r.*

## POMIARY ELEKTROMAGNETYCZNE W MECHANICE CIAŁA STAŁEGO<sup>1</sup>

LEIF JILKÉN, JAN BÄCKLUND (LINKÖPING)

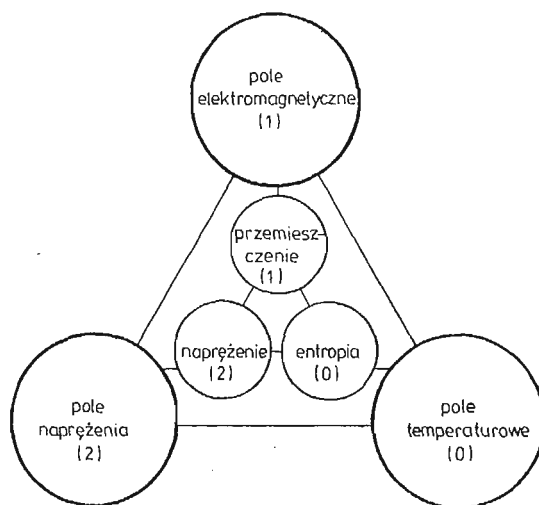
### 1. Wstęp

Pomiar i analiza odkształceń sprężystych i plastycznych, zaistniałych w ciele stałym w wyniku przyłożonego obciążenia, może być możliwa wtedy, gdy w całej objętości badanego ciała znajdują się pewnego rodzaju elementy pomiarowe, będące nośnikami poszukiwanej informacji. W **materiałach ferromagnetycznych** za elementy takie można uważać atomy, pod warunkiem, że uda się odpowiednio sterować ich zachowaniem i właściwie interpretować uzyskaną informację. W artykule pokazano, w jaki sposób „**wektory magnetyczne**” atomów mogą dostarczyć wiedzy o **stanie naprężeń**, wystąpieniu **plynięcia**, akumulacji uszkodzeń **zmęczeniowych** oraz **rozwoju pęknięć** w materiałach ferromagnetycznych. Zakres stosowalności opisywanej metody jest więc bardzo szeroki, a przedstawione techniki pomiarowe mogą mieć duże znaczenie w przyszłości badań materiałowych, w pomiarach obciążeń i momentów, w badaniach jakości oraz kontroli układów mechanicznych [1].

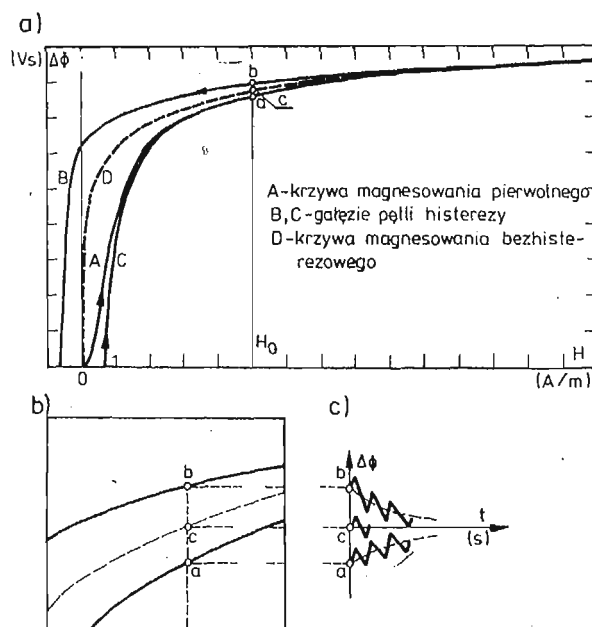
### 2. Sprzężenie magnetomechaniczne

Na rys. 1 przedstawiono w sposób schematyczny sprzężenie mechanicznego pola naprężeń z polem elektromagnetycznym i temperaturowym w stałych ciałach ferromagnetycznych. Badania referowane w niniejszym artykule dotyczą sprzężenia między pierwszą parą wymienionych pól, to znaczy koncentrują się wokół **zjawisk sprzężenia magnetomechanicznego**. Te zjawiska wykorzystywane były pierwotnie w dziedzinie odkształceń sprężystych, pod nazwą sprzężenia **magnetosprężystego**, w różnego rodzaju elementach pomiarowych, opracowanych przez firmę ASEA i przeznaczonych do pomiaru obciążenia osiowego oraz momentu skręcającego w elementach konstrukcji [2]. Zasada pomiaru w metodzie, będącej przedmiotem niniejszej pracy, różni się pryncypialnie od sposobu działania konwencjonalnych czujników elektromagnetycznych. Głębsze wniknięcie w istotę złożonego współdziałania pola elektromagnetycznego z mechanicznym polem naprężeń pozwoliło opracować element pomiarowy, który nie musi być przytwierdzony do badanego obiektu, lecz może z nim się tylko stykać tak by w miejscu kontaktu nie było żadnej szczeliny. Co więcej, element pomiarowy może być wykorzystany nie tylko do pomiaru obciążeń i momentów w obszarze sprężystym, lecz także do całego szeregu innych

<sup>1)</sup> Praca stanowi rozszerzenie referatu przedstawionego na VIII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego



Rys. 1. Sprzężenie pola elektromagnetycznego, temperaturowego i pola naprężenia mechanicznego. Liczby w nawiasach oznaczają rząd tensora opisującego odnośne pole



Rys. 2. Krzywa magnesowania pierwotnego, pętla histerezy oraz krzywa magnesowania bezhisterezygowego materiału ferromagnetycznego

a — rysunek ogólny

b — fragment

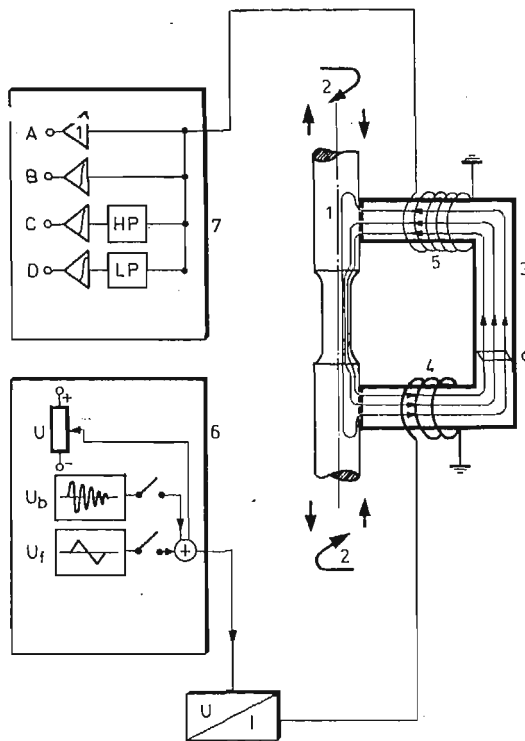
c — czasowy przebieg strumienia magnetycznego, powstałego w wyniku działania obciążenia o przebiegu trójkątnym



badani, które wymieniono wyżej. Kluczem do efektywnego wykorzystania tego urządzenia jest stałość prądu elektrycznego w uzwojeniu pierwotnym, niezmienna długość obwodu magnetycznego oraz preneutralizacja magnetyczna materiału, mająca na celu sprowadzenie do minimum efektów nieliniowych i histerezy. Każda część badanej próbki musi być sprowadzona na **krzywą magnesowania bezhisterezowego** (rys. 2a) po to, by zaistniałe naprężenia mechaniczne miały jednoznaczny przebieg (rys. 2c). Jeśli pewne części próbki nie znajdują się na tej krzywej, to otrzymany sygnał wyjściowy jest bardzo trudny w interpretacji (rys. 2c).

### 3. Układ pomiarowy

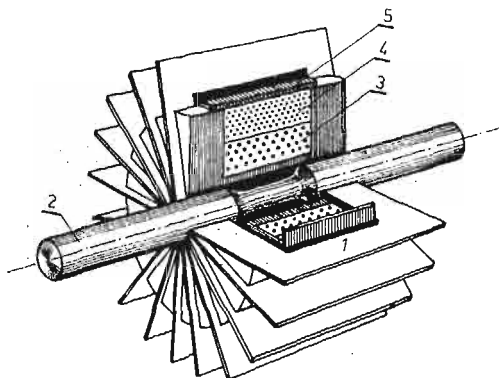
Zasadniczy schemat układu pomiarowego pokazany jest na rys. 3. Badana **próbka** (1), którą można rozciągać, ściskać lub skręcać (2), tworzy obwód magnetyczny wraz z żelaznym jarzmem (3), na którym nawinięte jest **uzwojenie** pierwotne (4) i wtórne (5). Zespół zasilający (6) jest źródłem stałego napięcia, dzięki czemu w czasie eksperymentu przez



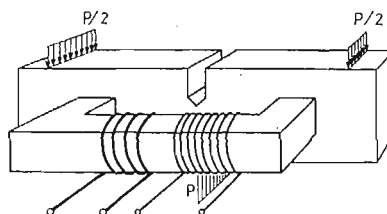
Rys. 3. Zasadniczy schemat układu pomiarowego

uzwojenie pierwotne przepływa stały (co do kierunku i wielkości) prąd elektryczny. Przed rozpoczęciem właściwego pomiaru układ ten dostarcza napięcia zmiennego gasnącego wykładniczo w celu sprowadzenia badanej próbki na krzywą magnesowania bezhisterezowego (patrz rozdział 4). **Zespół detekcyjny** (7), połączony z uzwojeniem wtórnym, odbiera

powstały sygnał i całkuje go, dając poszukiwany **strumień magnetyczny**. Jego zmiany są następnie wykorzystane do analizy zjawisk mechanicznych. W gruncie rzeczy jarzmo prostej budowy, pokazane na rys. 3, nie jest używane do badań i pomiarów prętów o przekroju kołowym. W tym przypadku, z uwagi na symetrię osiową, jest rzeczą celową użycie układu cienkich jarzm (1) rozmieszczonych na obwodzie badanej próbki (2), jak ukazuje to rys. 4. Uzwojenia pierwotne (3) oraz wtórne (4) umieszczone są w klatkach i zabezpieczone obudową (5).



Rys. 4. Układ płaskich jarzm, umieszczonych na obwodzie badanej próbki



Rys. 5. Układ obciążający wraz z jarzmem, służący do badania procesu pękania próbek

Przy badaniu pękania próbek w sposób ukazany na rys. 5, wykorzystuje się proste jarzmo przedstawione na rys. 3.

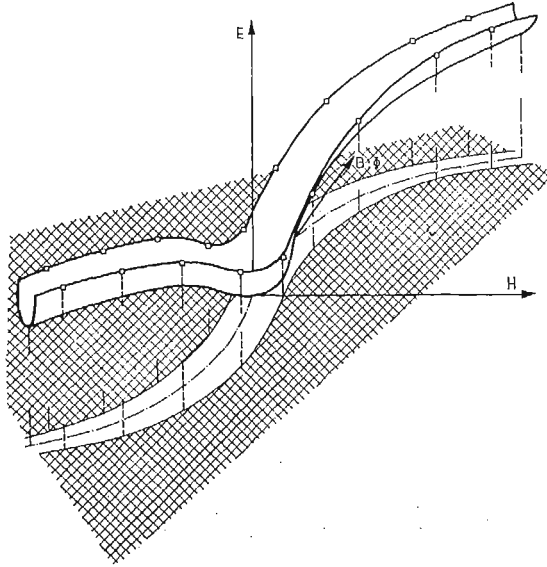
#### 4. Technika pomiarowa

Podstawowym warunkiem wykorzystania techniki pomiarowej w jej obecnej postaci jest rozpoczynanie pomiaru od **krzywej magnesowania bezhisterezyowego**. W przeciwnym przypadku próbka nie znajduje się, zdaniem autorów, w minimum energii elektromagnetycznej, w skutek czego przy cyklicznym jej obciążeniu otrzymuje się niestabilny sygnał wyjściowy (patrz rys. 2). Stabilność można uzyskać po doprowadzeniu badanej próbki do krzywej magnesowania bezhisterezyowego, jak wyjaśnia to rys. 2c, krzywa c. Zjawisko magnesowania opisuje się tradycyjnie na **plaszczyźnie  $H-\Phi$  (lub  $H-B$ )**. Dla wyjaśnienia zjawisk ukazanych na rys. 2 wprowadzono nowe pojęcie **przestrzeni  $H-\Phi-E$  (lub  $H-B-E$ )**, w której E oznacza energię elektromagnetyczną (patrz rys. 6). W tej przestrzeni możliwe stany energetyczne określają **powierzchnię energii**, charakterystyczną dla danej temperatury lub określonego stanu mechanicznego badanej próbki.

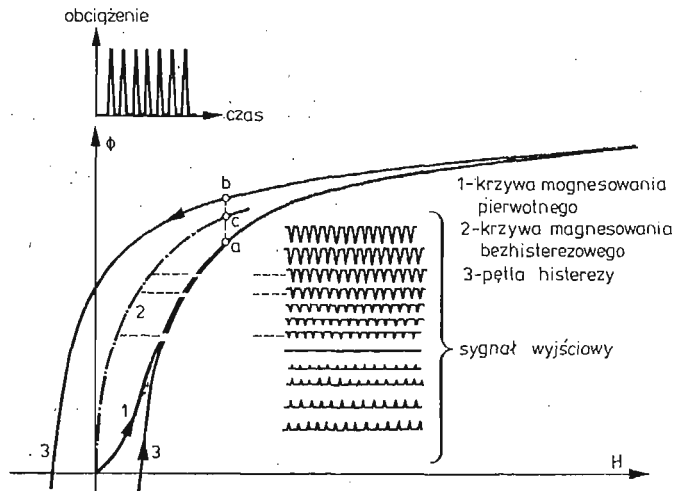
Wykres tej powierzchni przedstawiony jest na rys. 6 wraz z jej rzutem na płaszczyznę  $H-\Phi$  (lub  $H-B$ ). Brzegami rzutu są tradycyjne krzywe magnesowania, podczas gdy krzywą magnesowania bezhisterezyowego jest miejsce geometryczne lokalnych minimów tej powierzchni. Pojęcie powierzchni energii pozwala w logiczny sposób wyjaśnić przebiegi wykreślone na rys. 2c liniami a i b. Jeśli początkowy stan materiału znajduje się w punkcie

leżącym na pętli histerezy, co oznacza jego wysokie położenie na powierzchni energii, próbka ma tendencję do obniżania poziomu energii elektromagnetycznej, co można sobie wyobrazić w postaci kolejnych kroków zniżających w dół powierzchni. Rys. 6 wyjaśnia także, że do tego minimum dojść można z dwu kierunków.

Reakcja elektromagnetyczna próbki na obciążenie mechaniczne zależy następnie od wielkości czynnego pola magnetycznego  $H$ . Ilustruje to rys. 7, na którym pokazane są jej przebiegi dla różnych wartości  $H$ , a więc w różnych punktach krzywej magnesowania bezhisterezyowego.



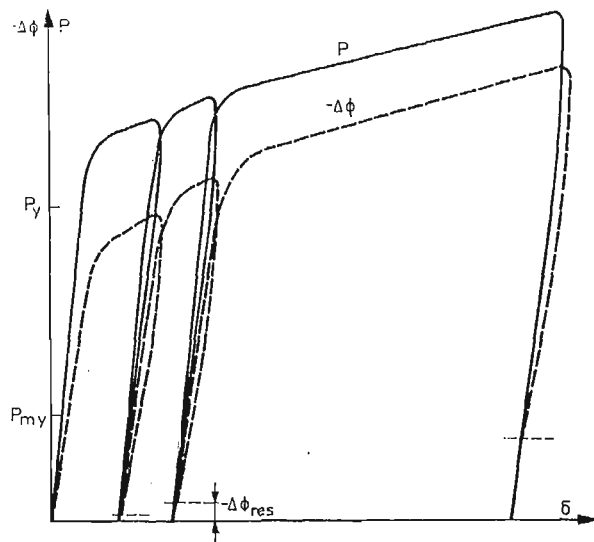
Rys. 6. Powierzchnia energii elektromagnetycznej w przestrzeni  $E-B-H$



Rys. 7. Przykłady zarejestrowanych krzywych magnesowania oraz sygnałów wyjściowych przy różnych natężeniach pola magnetycznego w żelazie dla danego przebiegu obciążenia mechanicznego

## 5. Rozciąganie

Na rys. 8 przedstawiony jest typowy zapis, otrzymany podczas próby rozciągania pręta kołowego o średnicy 10 mm, wykonanego ze stali SIS 1650. Z wykresu wynika, że liniowym zmianom obciążenia  $P$  odpowiadają jednoznacznie liniowe zmiany  $-\Delta\Phi$  strumienia magnetycznego  $\Phi$ . Wobec tego, po dokonaniu kalibracji, układ detekcyjny pozwala zmierzyć, w zakresie sprężystości, wielkość przyłożonego obciążenia. Dokładność pomiaru jest bardzo duża, a typowe odchyłki wynoszą 1%.



Rys. 8. Obciążenie  $P$  oraz ujemny przyrost strumienia magnetycznego w funkcji wydłużenia  $\delta$  pręta stalowego

Wykres przebiegu strumienia magnetycznego wykazuje ważną właściwość polegającą na tym, że jego wielkość nie wraca do zera po usunięciu przyłożonego obciążenia. Zastnięta pozostałość, oznaczona symbolem  $-\Delta\Phi_{res}$  na rys. 8 odzwierciedla fakt, że w materiale zaszły **nieodwracalne zmiany** związane z jego płynięciem i zarejestrowane przez układ detekcyjny, a raczej przez „magnetyczne wektory” atomów. Nieznikanie  $-\Delta\Phi$  po usunięciu obciążenia może być więc użyte w formie kryterium pozwalającego stwierdzić, czy materiał próbki uległ uplastycznieniu, czy nie.

## 6. Zmęczenie

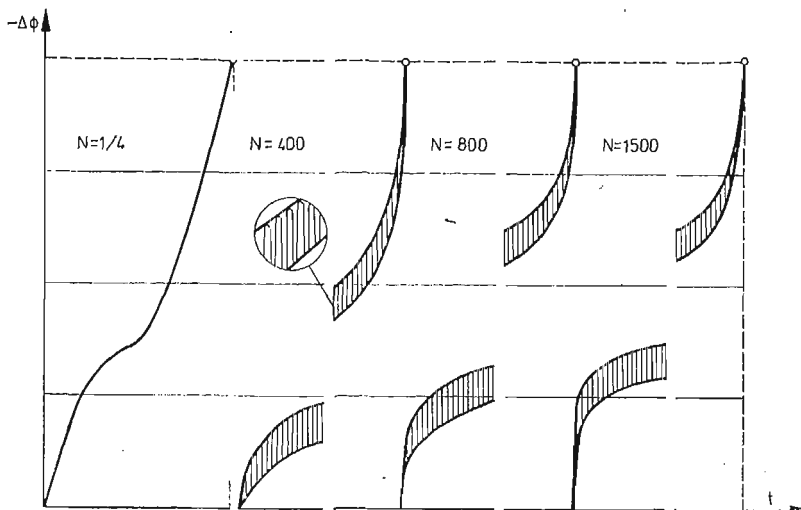
Elektromagnetyczny układ pomiarowy wykorzystany był również z powodzeniem do badań zmęczeniowych, zarówno nisko jak i wysoko cyklowych. W badaniach zmęczenia materiałów wiele wysiłku wkłada się w wyznaczenie krzywych Wöhlera [3], a szczególnie w określenie **wytrzymałości zmęczeniowej**. Przeprowadzone eksperymenty każą przypuszczać, że informacja dostarczona przez układ detekcyjny może być użyta do

określenia wytrzymałości zmęczeniowej na podstawie danych, uzyskanych z prostej próby na rozciąganie [1]. Ten wniosek nie został jeszcze w pełni potwierdzony, gdyż w tym celu należy przeprowadzić obszerne badania. Nieodwracalność strumienia magnetycznego, oznaczonego symbolem  $-\Delta\Phi_{res}$  na rys. 8, uwidacznia się nie tylko na poziomie globalnego płynięcia materiału  $P_y$ , lecz także i wtedy, gdy obciążenie osiąga wartość  $P_{my}$ , przy którym pojawia się mikropłynięcie (rys. 8). Dzięki dużej czułości układu detekcyjnego możliwa jest więc rejestracja mikropłynięć, będących lokalnymi poślizgami w płaszczyznach atomów oraz rozprzestrzenianiem się dyslokacji. Zmęczenie tłumaczy się często jako akumulację takich mikrozjawisk, a jeśli one nie występują oznacza to, że poziom naprężeń jest poniżej granicy wytrzymałości zmęczeniowej materiału. Przeprowadzone badania potwierdzają ten pogląd. Granice mikropłynięcia niektórych pospolitych stali, wyznaczone metodą elektromagnetyczną za pomocą opisywanego urządzenia, wykazują dużą zgodność z wartościami podanymi w standardowych tabelach wytrzymałości zmęczeniowej dla naprężeń pulsujących  $\sigma \pm \sigma$ , patrz Tabela 1.

Tabela 1. Porównanie granicy mikropłynięcia z wytrzymałością zmęczeniową  $\sigma \pm \sigma$  dla niektórych pospolitych stali (MPa)

Stal	Granica mikropłynięcia	Wytrzymałość zmęczeniowa
SIS 1450	128—139	135
SIS 1550	177—188	180
SIS 1650	195—208	200

Innym przykładem zastosowania elektromagnetycznego układu pomiarowego jest badanie niskocyklowego zmęczenia prętów bez karbów. Z przeprowadzonej dyskusji można wnioskować, że opisywana technika pomiarowa pozwala określić stopień uszko-

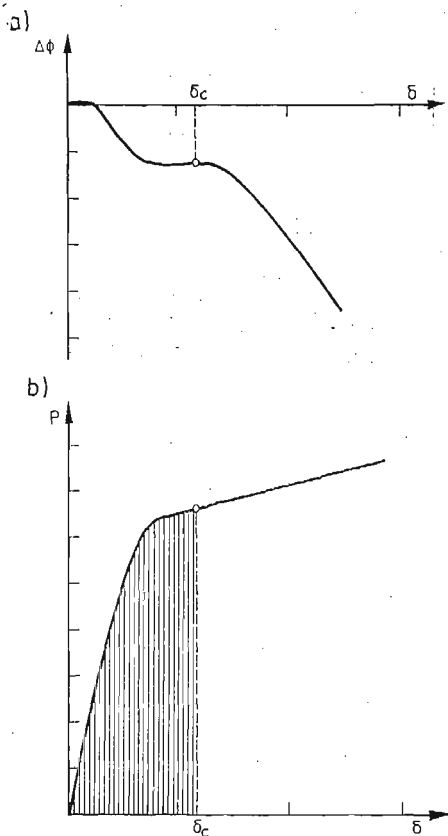


Rys. 9. Sygnał wyjściowy w zmęczeniu niskocyklowym. Na rysunku pokazane są cztery różne przebiegi czasowe strumienia magnetycznego  $-\Delta\Phi$  odpowiadające liczbom cykli od 1/4 do 1500 dla kolejno malejących amplitud obciążenia

dzenia materiału. Niektóre próby wykonywane były przy różnych amplitudach obciążenia niskocyklowego, co pozwoliło określić dla tych przypadków liczbę cykli  $N$  prowadzących do zniszczenia materiału. Elektromagnetyczny układ detekcyjny pozwala za pomocą ujemnego przyrostu  $-\Delta\Phi_F$  strumienia magnetycznego określić pęknięcia w materiale poprzez **uszkodzenia skumulowane**. Ta wielkość, to znaczy całkowity przyrost  $-\Delta\Phi_F$  strumienia magnetycznego od obciążenia zerowego do wartości powodującej pęknięcie, była w przeprowadzanych próbach praktycznie stała (z odchyleniami rzędu kilku procent), w których badana próbka uległa zniszczeniu w wyniku działania obciążenia od 1/4 cyklu (statyczne rozciąganie) do 1500 cykli (patrz rys. 9).

### 7. Pęknięcie

Problem ustalenia początku narastania pęknięć jest ważnym zagadnieniem w **nieliniowych badaniach mechaniki pęknięcia** [4]. Opisywany układ elektromagnetyczny okazał się w pełni przydatny również i w tym przypadku [5]. Krzywa pokazana na rys. 10a obra-



Rys. 10. Typowe wyniki dla próbki zginanej, podpartej w dwu punktach i obciążonej siłą skupioną  
a — strumień magnetyczny w funkcji ugięcia  
b — obciążenie w funkcji ugięcia

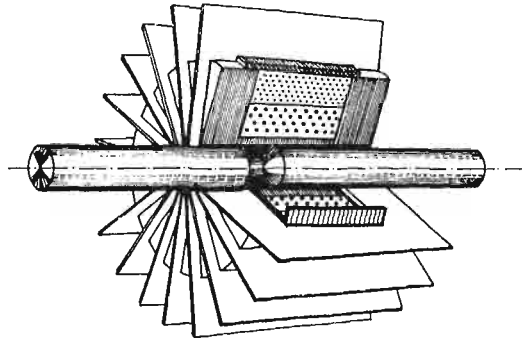
zuje zależność strumienia magnetycznego od ugięcia próbki, obciążonej w sposób uwidoczniiony na rys. 5. Moment narastania szczeliny, jak stwierdzono w szeregu prób niszczących przeprowadzonych przy różnych obciążeniach, pokrywa się z punktem zaznaczonym na rys. 10a. W tym miejscu krzywa przestaje być linią poziomą i zaczyna spadać

określając to ugięcie  $\delta_c$ , które zapoczątkowuje propagację szczeliny. Pozostaje tylko wyliczyć krytyczną wartość  $J_c$  całki  $J$  jako podwojone pole pod krzywą do punktu  $\delta_c$  (rys. 10b), podzielone przez minimalny przekrój próbki.

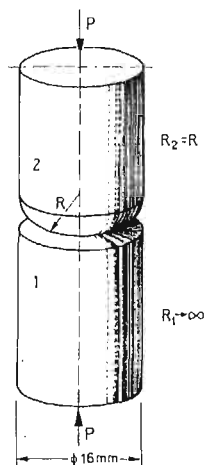
Szczegółowy opis próbek, sposobu przeprowadzania badań oraz zestawienie otrzymanych wyników znajduje się w [5].

### 8. Problemy kontaktowe

Nowa technika była także wykorzystana do badania płynięcia w miejscach kontaktu dwu ciał. Zamiast pojedynczej próbki, jak na rys. 4, w próbnik włożone zostały dwa pręty cylindryczne (rys. 11), z których jeden miał koniec płaski, a drugi sferyczny (rys. 12).



Rys. 11. Sposób umieszczenia próbki w układzie pomiarowym



Rys. 12. Próбка do badań kontaktowych

Badania polegały na obciążaniu próbki trójkątnymi (kwazistatystycznymi) impulsami o stopniowo narastających amplitudach i rejestrowaniu sygnału wyjściowego (rys. 13). W przypadku zaistnienia płynięcia materiału wystąpiły zjawiska nieodwracalne, objawiające się w postaci szczątkowego strumienia magnetycznego.

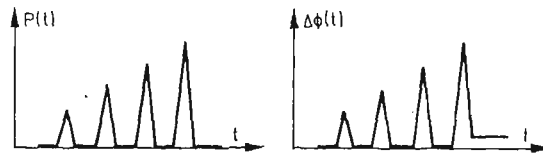
Promień zaokrąglenia ( $R$ ) wynosił w tych próbach 80 mm (rys. 12). Wykonano trzy próby dla każdego rodzaju stali, a otrzymane wyniki zestawiono na rys. 14. Wykreślone linie są krzywymi teoretycznymi określającymi moment mikro i makropłynięcia w półprzestrzeni, na którą oddziałuje kula. Podstawowe wielkości dane są wzorami

$$p_0 = \frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\frac{3E^2 P}{2R^2}},$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{3PR}{2E}},$$

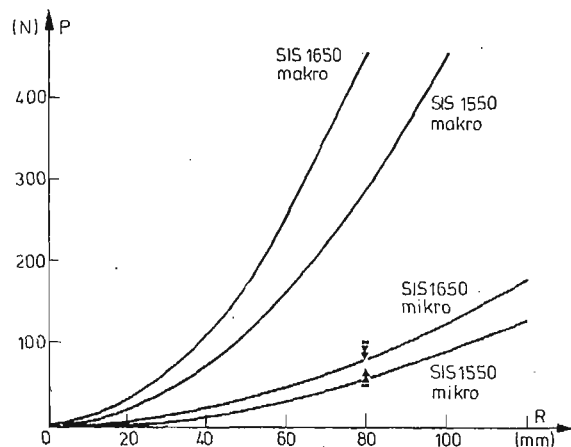
$$\sigma_{eT} = 0.62p_0,$$

w których  $E$  oznacza moduł Younga,  $P$  — obciążenie,  $R$  — promień (równy 80 mm w tych badaniach),  $p_0$  — maksymalne naciski Hertza,  $a$  — promień powierzchni zetknięcia,  $\sigma_{eT}$  — równoważne naprężenie zredukowane wg Treski w punkcie maksymalnego wy-



Rys. 13. Sygnał wyjściowy w badaniach kontaktowych  
a — obciążenie w funkcji czasu  
b — przyrost strumienia w funkcji czasu

żenia, znajdującego się w przybliżeniu na głębokości  $0,5a$  pod powierzchnią półprzestrzeni. W dziedzinie mikroplłynięcia zgodność wyników doświadczenia z teorią jest zadowalająca. Należy podkreślić, że w tym zagadnieniu naprężenie maksymalne jest silnie zlokalizowane, a objętość materiału uplastycznionego jest na początku płynięcia bardzo mała. Autorzy



Rys. 14. Wykres obciążenia  $P$  w funkcji promienia kulki stalowej  $R$  dla stali SIS 1550 i 1650, przedstawiający maksymalne naprężenia Treski  $\sigma_{eT}$  prowadzące do mikro i makropłynięcia. Wyniki otrzymane doświadczalnie przedstawione są trójkącikami



przewidują przeprowadzenie w przyszłości dalszych badań przy większych promieniach zaokrągleń i za pomocą czulszego układu pomiarowego. Następnym interesującym zagadnieniem jest gładkość powierzchni. Należy także zwiększyć liczbę prób w eksperymencie w celu ustalenia rozrzutu wyników.

## 9. Wnioski

Zreferowano w zarysie nową technikę pomiarową w mechanice ciała stałego, która opisana jest szczegółowiej w pracy doktorskiej [1]. Dotychczas przeprowadzone badania wykazują, że opracowany elektromagnetyczny układ pomiarowy cechuje się wielką wszechstronnością i pozwala badać takie zjawiska mechaniczne jak płynięcie, wysoko- i nisko-cyklowe zmęczenie oraz propagacja pęknięć, umożliwiając bezpośrednie śledzenie ich przebiegu oraz ilościową analizę. Urządzenie może być również użyte jako miernik sił rozciągających i ściskających.

## Literatura cytowana w tekście

1. L. JILKÉN, *Electromagnetic detection of mechanical phenomena*, Dissertation, Linköping Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, Linköping 1978.
2. O. DAHLE, *The Torductor and the Pressductor, two magnetic stressgauges of new type*, IVA, (Periodical published by the Royal Swedish Academy of Engineering Sciences) 1954: 5, s. 221 - 238.
3. N. E. FROST, K. J. MARSH, L. P. POOK, *Metal fatigue*, Clarendon Press, Oxford 1974.
4. A. J. CARLSSON, K. MARKSTRÖM, *Some aspects of nonlinear fracture mechanics*, Fracture 1977, Proc. Fourth Int. Conf. Fracture, Vol. 1, s. 683 - 691, Waterloo 1977.
5. L. JILKÉN, J. BÄCKLUND, *Fracture toughness of the base material, the heat affected zone and the weldment of two ship hull plate steels*, The Swedish Ship Research Foundation, Report 5610:9, Göteborg 1977.

## Резюме

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В МЕХАНИКЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Открытие Джоулем в 1842 году магнитоэлектрики и Вилларим в 1865 году обратного явления учёные занимающиеся экспериментальными методами в механике твёрдого тела пытались употребить эти явления для определения разных механических величин и состояния напряжений в твёрдом теле. Очень важным problemом в связи с этим был нелинейный характер и гистерезис явлений магнитомеханического сопряжения. Некоторые с этих трудностей сейчас уже определимы. В работе показано как магнитный поток может быть использован для получения информации о состоянии напряжения, о перехождении в состояние текучести, о аккумуляции усталостных повреждений и о восстановлении и развитии трещин в ферромагнитных материалах.

## S u m m a r y

## ELECTROMAGNETIC MEASUREMENTS IN SOLID MECHANICS

Since Joule discovered magnetostriction in 1842 and Villari reverse phenomenon in 1865, researchers working with experimental methods in solid mechanics have tried to utilize these effects for determining various quantities and states in solids. Paramount problems in this context have been the nonlinear and hysteresis behaviour of magnetomechanical coupling effects. Some of these obstacles have now been overcome. This paper explains how electromagnetic flux can be used to extract information on the state of stress, the occurrence of yielding, the accumulation of fatigue damage and the onset of crack growth in ferromagnetic solids.

INSTYTUT TECHNIKI  
WYDZIAŁ BUDOWY MASZYN  
LJNKÖPING, SZWECJA

*Z języka angielskiego  
tłumaczył Jerzy Wąsowski*

*Praca została złożona w Redakcji dnia 6 lutego 1979 r.*

MODELOWE BADANIA KONCENTRACJI NAPRĘŻEŃ W WĘZŁACH  
USTROJÓW NOŚNYCH METODĄ POKRYĆ OPTYCZNIE CZYNNYCH<sup>1</sup>

HENRYK KOPECKI, MACIEJ KOPKOWICZ, JAN SMYKLA (RZESZÓW)

1. Wstęp

Dążenie do tworzenia konstrukcji o coraz większej trwałości przy jednoczesnej tendencji zmniejszania ich ciężaru i kosztów, wymaga od współczesnego konstruktora poszukiwania optymalnych metod projektowania. Jednym z przejawów tegoż procesu optymalizacji jest bieżąca weryfikacja eksperymentalna proponowanych rozwiązań konstrukcyjnych. Problem ten nabiera szczególnego znaczenia w sytuacjach, gdy złożoność kształtów konstrukcji bądź uniemożliwia opracowanie adekwatnego modelu matematycznego, bądź daje możliwość jedynie przybliżonych obliczeń.

Weryfikacja eksperymentalna polegająca na zrealizowaniu w metalu projektowanego ustroju nośnego względnie jego podstawowych elementów, a następnie poddaniu go badaniom wytrzymałościowym może okazać się wysoce kosztowna i czasochłonna, niekiedy wręcz niemożliwa.

Poszukiwanie szybkich, dokładnych, a jednocześnie tanich metod, które mogą być stosowane w trakcie kształtowania struktury nośnej, gdy istotnych zmian konstrukcyjnych można dokonać przed kosztownym i pracochłonnym procesem wykonawczym prototypowego rozwiązania, zwracają uwagę konstruktorów na coraz szerzej rozwijane metody elastooptyki, a wśród nich na metodę modelową określaną w literaturze metodą „MODELTECH” [1] niezwykle przydatną do analizy dwuwymiarowych stanów naprężenia.

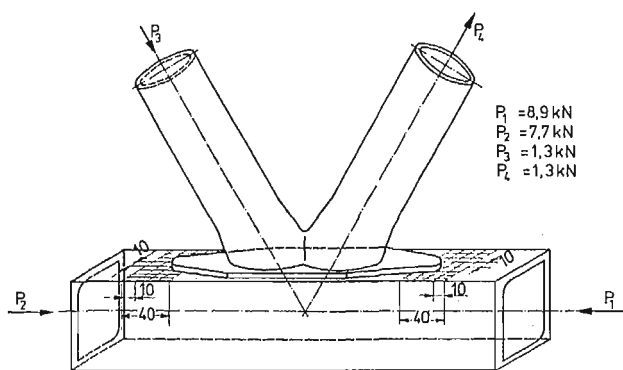
Istota tej metody polega na wykonywaniu modelu konstrukcji badanej z tworzywa sztucznego z dodatkiem pyłu aluminiowego. Kompozycja taka przy odpowiednim doborze proporcji wagowych obu składników wykazuje doskonałe własności odlewnicze w stanie niespolimeryzowanym, zaś po całkowitym spolimeryzowaniu jest łatwa do obróbki mechanicznej. Istotne znaczenie posiada tutaj fakt, że materiał ten w procesie polimeryzowania przechodzi przez fazę doskonale plastyczną. W tym stanie daje się on łatwo kształtować w sposób dowolny. Ukształtowaną pod względem geometrycznym konstrukcję (po całkowitym spolimeryzowaniu tworzywa) okleja się warstwą optycznie czynną, przy czym klejem jest tutaj materiał modelu. Ponieważ moduł sprężystości podłużnej materiału modelowego jest kilkadziesiąt razy mniejszy od modułu metali, zatem przy zach-

<sup>1</sup>) Praca stanowi rozszerzenie referatu przedstawionego na VIII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego

Warszawa 4-6 września 1978

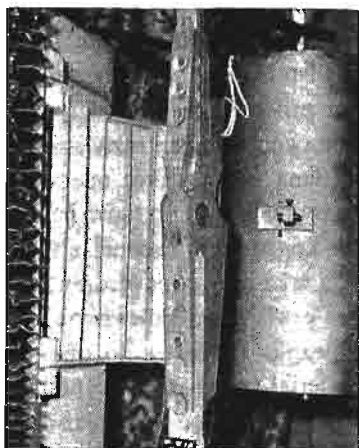
waniu podziałki 1:1 dla modelu, siły obciążające odpowiadające danemu przypadkowi obciążenia są kilkudziesięciokrotnie mniejsze od sił obciążających konstrukcję rzeczywistą.

Przygotowany w ten sposób do badań model nie jest wrażliwy na zmianę temperatury w tym sensie, że ze względu na identyczny współczynnik rozszerzalności liniowej materiału modelu i powłoki optycznie czynnej, zmiana temperatury nie wywołuje różnego od neutralnego obrazu izochrom w konstrukcji nieobciążonej.



Rys. 1. Schemat statyczny węzła kratownicy

W niniejszej pracy przedstawimy wyniki eksperymentalnych badań modelowych dwóch silnie obciążonych węzłów o złożonych kształtach geometrycznych: węzła kratownicy przestrzennej<sup>2)</sup> oraz węzła połączenia skrzydło środkowe — skrzydło doczepne sa-



Rys. 2. Węzeł mocowania skrzydła środkowego ze skrzydłem doczepnym samolotu M-18 „Dromader” w stanie zmontowanym

molotu M-18 „Dromader”.

Modele badanych konstrukcji wykonano w podziałce 1:1, w oparciu o krajowe tworzywa sztuczne. Przedstawimy również zagadnienie multiplikacji izochrom, dokonane za pomocą EMC.

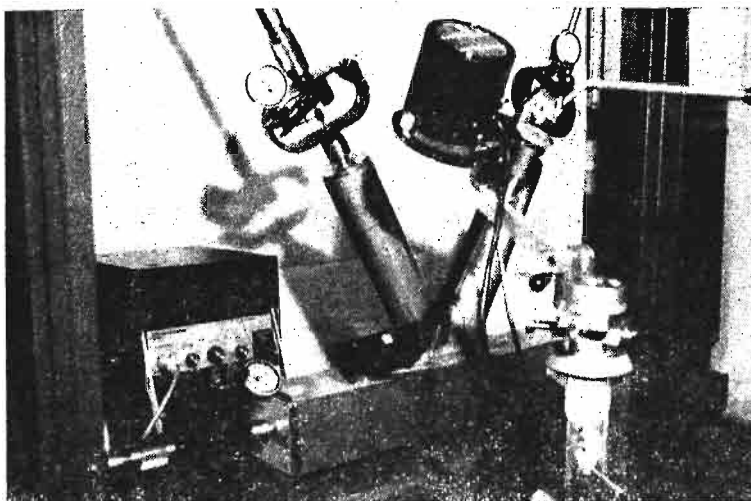
<sup>2)</sup> Geometria oraz obciążenia zewnętrzne odpowiadają węzłowi ramownicy przestrzennej rzeczywistej konstrukcji.

## 2. Przygotowanie modeli do badań

Modele wykonano metodą odlewania z kompozycji epidian 53 z dodatkiem 3% pyłu aluminiowego (wagowo) oraz 12% utwardzacza Z1. Formy odlewnicze ukształtowano w ten sposób, by wymiary nominalne uzyskać po naklejeniu warstwy optycznie czynnej, której grubość w rozważanym przypadku wynosiła 1,5 mm.

Odtwarzając geometrię węzła kratownicy uwzględniono fakt, że element poziomy węzła (rura o przekroju zbliżonym do kwadratowego) w konstrukcji rzeczywistej uzyskiwana jest z dwóch kątowników połączonych w narożach spoiną.

Jak wykazały badania, fakt ten posiada istotne znaczenie bowiem konstrukcja nie posiadając płaszczyzny symetrii, wykazuje w obszarach newralgicznych zróżnicowane rozkłady naprężeń. Geometrię obu modeli odtworzono w szczególach, łącznie z wymodelowaniem spoin, występujących w węźle kratownicy.



Rys. 3. Węzeł kratownicy przestrzennej po zamontowaniu na stanowisku badawczym

Ze względu na zachowanie wspomnianej podziałki 1:1, ustalenia obciążeń dla modeli dokonano na podstawie znajomości modułów sprężystości podłużnej materiału modelu oraz materiału konstrukcji rzeczywistych (stal).

$$\text{Iloraz mdułów wynosił}$$

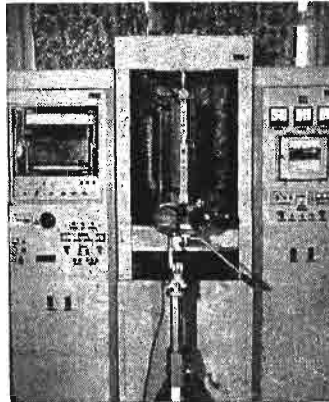
$$E = \frac{E \text{ stali}}{E \text{ mat.mod.}} = 75$$

Przyjęto zatem 75-krotnie mniejsze siły obciążające modele, w stosunku do sił obciążających węzły konstrukcji rzeczywistych. Charakter obciążeń zewnętrznych węzłów odpowiadał przypadkom wymiarującym, przy czym pomiarów dokonywano przy obciążeniach odpowiadających około 50% obciążeń dopuszczalnych jeśli chodzi o węzeł kratownicy, zaś w przypadku badania modelu węzła samolotu M-18, badania przeprowadzono dla dwóch poziomów obciążenia: 4,6 kN oraz 6 kN.<sup>3)</sup>

<sup>3)</sup> Przeprowadzone badania miały na celu opracowanie takiej wersji węzła, która charakteryzowałaby się równomiernym rozkładem naprężeń w okolicy sworzni śrubowych. Z tego względu, nie dokonywano rozdzielenia składowych stanu naprężenia, ograniczając się do oceny poprawności pracy złącza na podstawie rozkładu izochrom. Sworznie w badanym złączu wykonane były również z materiału modelowego.

Rysunki 3 i 4 przedstawiają fotografie modeli węzła kratownicy oraz węzła połączenia skrzydeł przygotowanych do badań.

Badania przeprowadzono przy użyciu polaryskopu refleksyjnego firmy „Photolastic” (model 131) wyposażonego w kompensator Soleil-Babinet’a (model 532) oraz przystawkę do skośnego prześwietlania (model 033 wg oznaczeń firmy „Photolastic”).



Rys. 4. Węzeł mocowania skrzydeł samolotu M-18 „Dromader” zamocowany w szczękach maszyny wytrzymałościowej 1231-U-10

### 3. Wyniki badań

Ze względu na to, że metodyka badań elastoptycznych z wykorzystaniem światła odbitego była wielokrotnie omawiana w szeregu pracach (np. [2], [3]), dlatego też omawiając wyniki badań ograniczymy się do zwrócenia uwagi na niektóre szczegóły metodyczne — związane z dokładnością pomiarów, a ściślej, z formą prezentowania wyników pomiarów. Mamy tu na uwadze problem kompensacji naprężeń, który nabiera szczególnego znaczenia w tych przypadkach, w których wartości rzędu izochromy w obszarze badanym nie przewyższają pierwszego rzędu. W takich sytuacjach dokumentowanie rozkładu izochrom metodą fotograficzną jest zupełnie nieskuteczne.

Skuteczną natomiast wydaje się forma przedstawiania wyników zaprezentowana w niniejszej pracy, polegająca na sporządzaniu map obrazujących obszary stałych poziomów izochrom, izoklin, składowych stanu naprężenia, czy też naprężeń zredukowanych. Mapy te mogą być drukowane z dowolną dokładnością, bowiem można wzmiankowane poziomy drukować dowolną ilością znaków (cyframi lub literami). Mając wczytane wyniki pomiarów (zarówno z prześwietlania normalnego jak i skośnego) maszyna cyfrowa samoczynnie dokonuje podziału zakresu pomiarowego na żądaną liczbę drukowanych poziomów. Istnieje ponadto możliwość dalszego lokalnego multiplikowania wyników badań. W ten sposób można wyniki badań w obszarach o silnych gradientach naprężeń a jednocześnie niskich poziomach rzędu izochromy przedstawić bardziej przejrzyste.

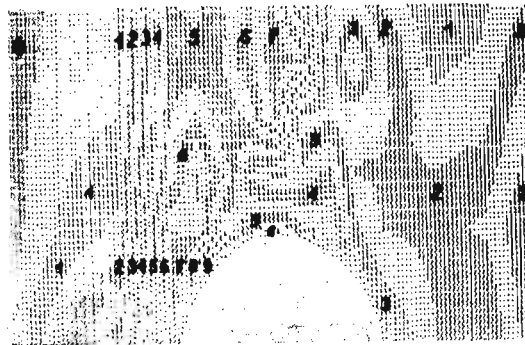
Zaprezentowany sposób przedstawiania wyników pomiarów odpowiada znanej, stosowanej w świetle przechodzącym, multiplikacji izochrom. Dokładność prezentowanej

formy zapisu wyników pomiarów uzależniona jest od dokładności odczytów w procesie kompensacji. Drugim czynnikiem wpływającym na zgodność graficzną obrazu rzeczywistego izochrom i wydruku sporządzonego przez EMC jest liczba punktów pomiarowych, które należy zagęszczać w obszarach koncentracji naprężeń.



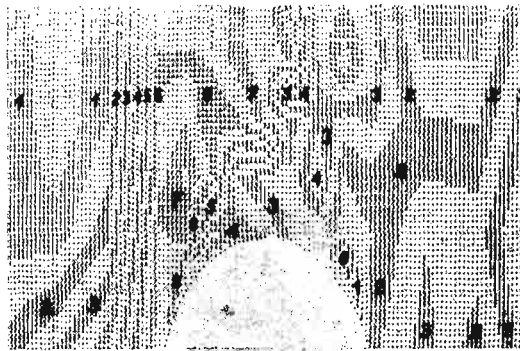
Rys. 5. Mapa rozkładu składowej stanu naprężenia  $\sigma_1$  w obszarze newralgicznym węzła kratownicy

0	1,48 ÷ 1,65	MPa
1	2,00 ÷ 2,35	„
2	2,69 ÷ 3,04	„
3	3,38 ÷ 3,73	„
4	4,07 ÷ 4,42	„
5	4,80 ÷ 5,11	„
6	5,45 ÷ 5,80	„
7	6,15 ÷ 6,50	„
8	6,90 ÷ 7,20	„
9	7,53 ÷ 7,70	„



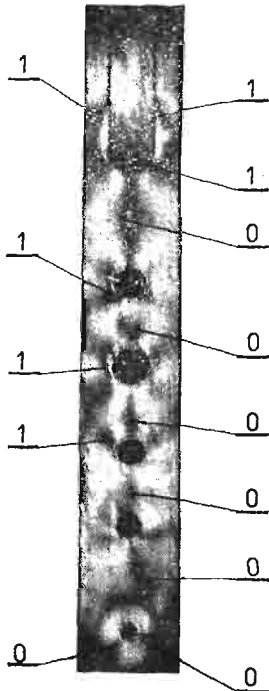
Rys. 6. Mapa rozkładu składowej stanu naprężenia  $\sigma_2$  w obszarze newralgicznym węzła kratownicy

0	-1,96 ÷ -1,75	MPa
1	-1,33 ÷ -0,913	„
2	-0,495 ÷ -0,077	„
3	0,341 ÷ 0,758	„
4	1,18 ÷ 1,60	„
5	2,01 ÷ 2,43	„
6	2,85 ÷ 3,26	„
7	3,68 ÷ 4,10	„
8	4,52 ÷ 4,94	„
9	5,35 ÷ 5,56	„

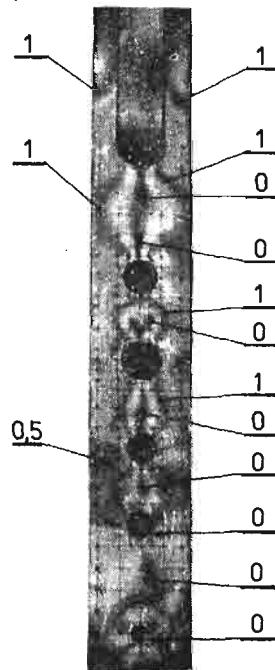


Rys. 7. Mapa rozkładu naprężeń zredukowanych wg hipotezy H—M—H w obszarze newralgicznym węzła kratownicy

- 0 1,98 ÷ 2,11 MPa
- 1 2,39 ÷ 2,66 „
- 2 2,93 ÷ 3,21 „
- 3 3,48 ÷ 3,75 „
- 4 4,02 ÷ 4,30 „
- 5 4,56 ÷ 4,84 „
- 6 5,11 ÷ 5,40 „
- 7 5,66 ÷ 5,96 „
- 8 6,20 ÷ 6,50 „
- 9 6,75 ÷ 6,88 „



Rys. 8. Obraz izochrom w obszarze sworzni węzła mocowania skrzydeł samolotu M-18, przy obciążeniu siłą osiową 4,6 kN



Rys. 9. Obraz izochrom w obszarze sworzni węzła mocowania skrzydeł samolotu M-18, przy obciążeniu siłą 6 kN



W obu rozważanych konstrukcjach, najwyższa wartość rzędu izochromy (w świetle normalnym) nie przewyższała 1,5.

Na rysunkach 5, 6, 7 przedstawiono wyniki badań w obszarze newralgicznym (zaznaczonym na rys. 1 w formie siatki) węzła kratownicy przestrzennej. Rys. 5 i 6 przedstawiają odpowiednio mapy składowych  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$ , zaś na rys. 7 podane są poziomy wyteżenia wg hipotezy H—M—H.<sup>4)</sup>



Rys. 10. Mapa rozkładu izochrom w obszarze węzła samolotu M-18 identycznym jak na rys. 8 przy obciążeniu siłą 4,6 kN

- 0 — 0 ÷ 0,042
- 1 — 0,125 ÷ 0,208
- 2 — 0,291 ÷ 0,375
- 3 — 0,458 ÷ 0,542
- 4 — 0,62 ÷ 0,71
- 5 — 0,79 ÷ 0,87
- 6 — 0,96 ÷ 1,04
- 7 — 1,12 ÷ 1,21
- 8 — 1,29 ÷ 1,37
- 9 — 1,46 ÷ 1,5

Rysunki 8 i 9 przedstawiają obrazy izochrom w obszarze newralgicznym węzła skrzydeł samolotu M-18 „Dromader”. Rys. 8 ukazuje rozkład izochrom w obszarze sworzni śrubowych, przy obciążeniu węzła siłą osiową równą 4,6 kN. W tym stanie obciążenia dokonano pomiaru ułamkowych rzędów izochrom.

<sup>4)</sup> Przedstawione rezultaty, stanowią niewielki fragment obszernych badań, którymi objęte były 4 różne pod względem geometrycznym wersje rozwiązań konstrukcyjnych rozważanego węzła kratownicy. Przedstawiona wersja jest oryginalnym rozwiązaniem autorów.

Zwielokrotnione metodą komputerową wyniki pomiarów izochrom przedstawiono na rys. 10. (Cyframi od 0÷9 oznaczono poziomy ułamkowych wartości rzędów izochrom).

Na rysunku 9 przedstawiono obraz izochrom dla okucia obciążonego siłą osiową 6 kN.

#### 4. Wnioski ~

W pracy przedstawiliśmy wyniki oraz omówiliśmy niektóre zagadnienia związane z przygotowaniem do badań modelowych węzłów ustrojów nośnych o złożonych kształtach, wykonanych w skali 1:1.

Wskazaliśmy na pełną przydatność krajowych żywic epoksydowych jako materiałów do wykonywania modeli do badań. Wyniki (będące fragmentem rezultatów obszerniejszych badań) potwierdzają przydatność zaprezentowanego sposobu badań, jako skutecznego narzędzia do ujawniania nieprawidłowości konstrukcyjnych.

Zaprezentowaliśmy komputerową metodę multiplikacji izochrom. Podobieństwo obrazu izochrom (por. np. rys. 8 i 10) pozwala stwierdzić, że nawet przy niskich wartościach rzędów izochrom (poniżej 0,5) istnieje możliwość ilościowej analizy stanu naprężenia.

#### Literatura cytowana w tekście

1. *Modeltech, a new technique in stress and design analysis with aluminium filled epoxy models*. Photoelastic Inc. Bulletin MT-011-1.
2. J. STUPIŃSKI, *Pomiary naprężeń metodą elastoptycznej warstwy powierzchniowej*, Archiwum Budowy Maszyn, 16, 3 (1969).
3. Z. ORŁOŚ i inni — *Doświadczalna analiza odkształceń i naprężeń*, PWN Warszawa 1977.

#### Резюме

#### МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В УЗЛАХ НЕСУЩИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ПОКРЫТИЙ ОПТИЧЕСКИ ДЕЯТЕЛЬНЫХ

В настоящей работе представлены результаты модельных исследований высоконагруженных узлов несущих систем.

Исследования проводились методом фотоупругости, имеющим названием „Модельтех”. Действительная конструкция заменена моделью в масштабе 1:1, изготовленной из пластмассового состава с примесью алюминиевой пыли, оклеенной слоем оптически деятельным.

Результаты исследований демонстрируются в виде карт иллюстрирующих распределение составляющих состояния напряжения и натяжения в чувствительных зонах.

## S u m m a r y

INVESTIGATION OF THE STRESS CONCENTRATIONS IN JOINTS OF STRUCTURES  
BY THE „MODELTECH” METHOD

Results of the investigation of the stress concentrations in joints of structures using „Modeltech” method are presented in the paper. The method consists in stress and design analysis by means of full scale models made of epoxy with aluminium powder. Photoelastic coatings methods is used to analyse the stress field. Distributions of the stress components are given in the form of the maps.

POLITECHNIKA RZESZOWSKA

*Praca została złożona w Redakcji dnia 9 marca 1979 r.*

---



## METODA IMERSYJNA INTERFEROMETRII HOLOGRAFICZNEJ DO BADANIA KSZTAŁTU I ODKSZTAŁCEN<sup>1</sup>

MAREK LECH, IRENA MRUK, JACEK STUPNICKI (Warszawa)

### 1. Wstęp

Budowa precyzyjnych maszyn i urządzeń wymaga metod bardzo dokładnego pomiaru kształtu elementów, oraz oceny zmiany tych kształtów wskutek zużycia lub odkształceń. Efektem końcowego procesu obróbki jest tekstura powierzchni, mająca zasadnicze znaczenie z punktu widzenia własności tribologicznych, wytrzymałości zmęczeniowej, przewodnictwa cieplnego lub elektrycznego powierzchni ciał we wzajemnym kontakcie.

Dla jednoznacznego opisu złożonych konfiguracji powierzchni najlepsze wyniki dają trójwymiarowe mapy warstwiczne. Stosowane obecnie metody tworzenia takich map na podstawie dwuwymiarowych profilogramów są bardzo pracochłonne i mogą mieć ograniczone zastosowanie.

Konieczne jest opracowanie szybkich metod sporządzania takich map, mających określoną dokładność, mogących służyć do analiz liczbowych lub do szybkich badań porównawczych. Do metod tych należy prezentowana metoda imersyjna interferometrii holograficznej [1]. Została ona zastosowana przez autorów artykułu do badania topografii powierzchni między innymi łopatek turbin i sprężarek, narzędzi tnących [3], [4], [5] oraz do badania ugięć powierzchni pod wpływem sił skupionych rozłożonych w sposób dyskretny [6].

### 2. Podstawy metody

Metoda imersyjna badania powierzchni wykorzystuje zjawisko powstawania warstw interferencyjnych. Powstają one wskutek różnicy długości dróg optycznych przebywanych przez promień światła w różnych ośrodkach otaczających przedmiot przy stałej drodze geometrycznej [1, 2]. Badany przedmiot umieszcza się w kuwecie umożliwiającej zmianę cieczy imersyjnej. Stosując technikę podwójnej ekspozycji dokonuje się rejestracji hologramów przedmiotu umieszczonego w kuwecie napełnionej kolejno dwiema cieczami imersyjnymi o różnych współczynnikach załamania światła. W efekcie obraz holograficzny przedmiotu pokryty jest siecią prążków interferencyjnych, będących miejscem geometrycznym punktów powierzchni równoodległych od płaszczyzny odniesienia  $(x, y)$ .

<sup>1)</sup> Praca stanowi rozszerzenie referatu przedstawionego na VIII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego



Uwzględniając (3) można (6) przedstawić następująco;

$$(7) \quad z(x, y) = \frac{I_g(x, y)(n_1 - n_2)}{n_1 - n_2 + \sqrt{n_1^2 - \sin^2\theta} - \sqrt{n_2^2 - \sin^2\theta}}$$

Z warunku (5) i zależności (7) otrzymujemy ostatecznie;

$$(8) \quad z(x, y) = \frac{(2k+1)\lambda}{2(n_1 - n_2 + \sqrt{n_1^2 - \sin^2\theta} - \sqrt{n_2^2 - \sin^2\theta})}$$

Analizując zależność (8) stwierdzamy, że  $z(x, y)$  odpowiada punktom powierzchni przedmiotu położonym na  $k$ -tej warstwie względem płaszczyzny odniesienia:

$$z(x, y) = z_k,$$

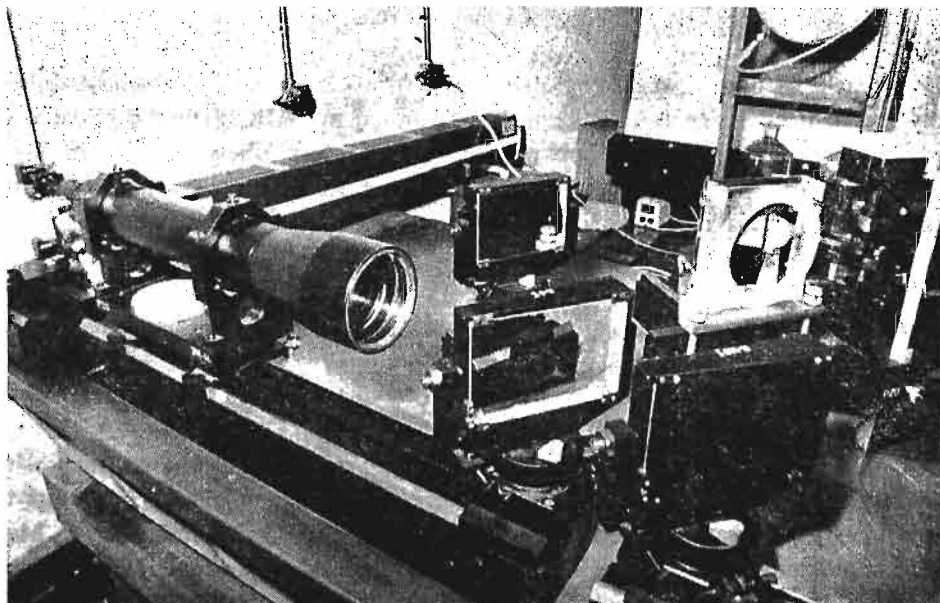
a odległość między dwiema kolejnymi warstwicami:

$$(9) \quad \Delta z = z_{k+1} - z_k = \frac{\lambda}{n_1 - n_2 + \sqrt{n_1^2 - \sin^2\theta} - \sqrt{n_2^2 - \sin^2\theta}}$$

Zakładając  $\theta = \text{const}$ , żadaną gęstość prążków interferencyjnych, zależną od  $\Delta z$  otrzymujemy przez odpowiedni dobór różnicy współczynników załamania obu płynów imersyjnych.

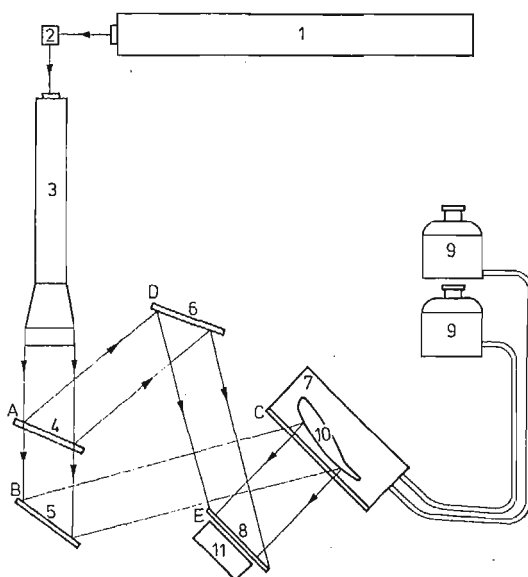
### 3. Opis stanowiska

Układ badawczy (rys. 2) składa się z elementów zestawu holograficznego produkcji PZO. Schemat układu w skład którego wchodzi: laser o działaniu ciągłym, kierowacz wiązki laserowej, luneta rozszerzająca tę wiązkę i zwierciadła o różnym stopniu odbicia światła, przedstawiono na rys. 3. W badaniach posłużono się kuetwą imersyjną wykonaną



Rys. 2. Widok ogólny układu badawczego

we własnym zakresie. Do mocowania płyty holograficznej przystosowano uchwyt umożliwiający wywoływanie i fotografowanie obrazu holograficznego w miejscu rejestracji. Obraz był oglądany i fotografowany za pomocą mikroskopu stereoskopowego MSt produkcji PZO z przystawką do aparatu małoobrazkowego. Mikroskop stereoskopowy ma możliwość powiększeń obrazu od  $4 \div 100$  razy przy odległości obiektywu od obrazu około 100 mm. Ogranicza to maksymalną odległość płyty holograficznej od badanego przedmiotu.



Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego

Ze względu na ograniczoną drogę koherencji światła zapewniono równość dróg optycznych wiązki odniesienia ADE i wiązki przedmiotowej ABCE. Płytkę szklaną, tzw. zwierciadło 0%, ustawioną względem wiązki wychodzącej z lunety pod kątem  $30 \div 45^\circ$  odbijała około 10% światła tworząc wiązkę odniesienia. Zapewniało to właściwy stosunek natężenia światła wiązki odniesienia i wiązki przedmiotowej.

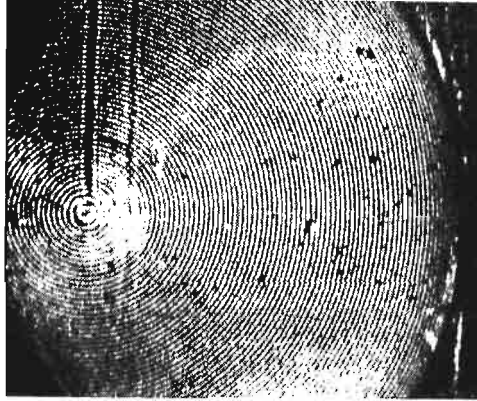
#### 4. Przykłady zastosowania metody immersyjnej do badania kształtu powierzchni metalowych

Przedstawiona powyżej metoda pozwala na otrzymanie map warstwicowych z dużą dokładnością opisujących konfigurację powierzchni [2].

Dla określenia różnicy głębokości między kolejnymi warstwicami można posłużyć się wyrażeniem (9), jeśli dana jest wartość współczynników załamania  $n_1$  i  $n_2$  obu użytych płynów immersyjnych oraz wartość kąta padania promieni wiązki przedmiotowej  $\theta$ . Można uniknąć konieczności pomiarów  $n_1$  i  $n_2$ , stosując odpowiedni wzorec o znanym kształcie powierzchni. W naszych badaniach posłużono się bardzo dokładnie wykonanym stożkiem o wysokości  $h = 3 \pm 0,01$  mm i średnicy podstawy  $d = 40$  mm. Układ prążków warstwi-



cowych na wycinku powierzchni stożka ukazuje rys. 4. Liczba warstwic pojawiających się na planie powierzchni stożka, pozwala natychmiast wyznaczyć różnicę głębokości warstwic  $\Delta z$ . W badaniu, którego wynik pokazano na rys. 4,  $\Delta z \cong 0,04$  mm.

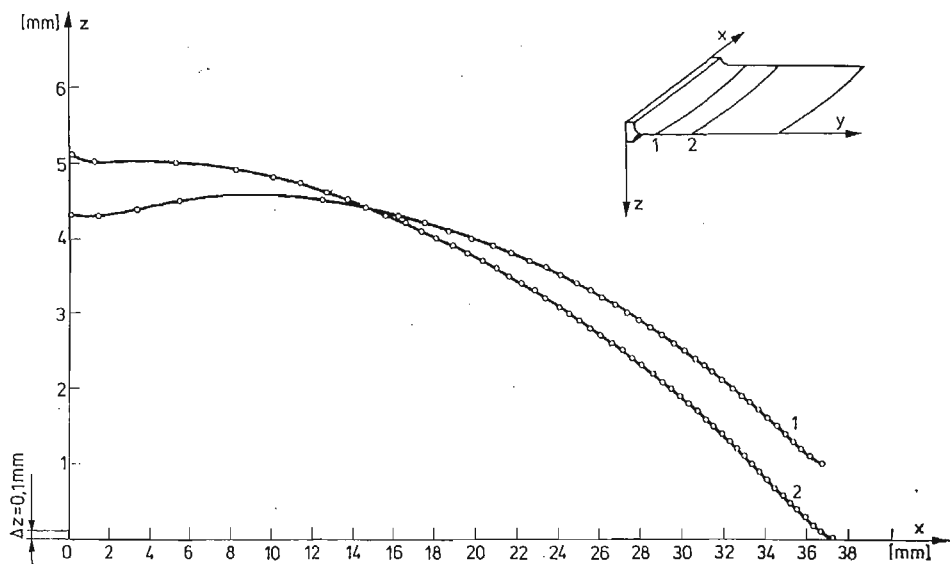


Rys. 4. Stożek wzorcowy z układem prążków warstwicznych

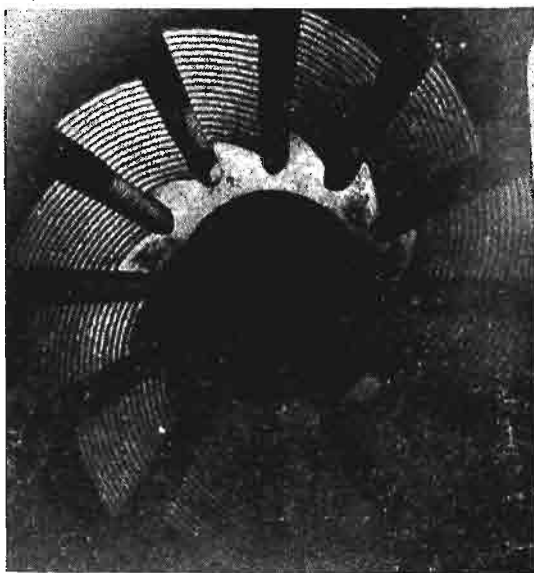
Rys. 5 przedstawia zdjęcie obrazu holograficznego łopatki sprężarki silnika odrzutowego z widoczną na łopatkę, charakterystyczną dla jej kształtu, siecią warstwic o głębokości pomiędzy warstwicami  $\Delta z \cong 0,1$  mm, a rys. 6 przedstawia zarys kształtu powierzchni w dwóch przekrojach.



Rys. 5. Powierzchnia łopatki turbiny pokryta prążkami warstwicznymi



Rys. 6. Analiza kształtu fragmentu łopatki w przekrojach 1 i 2

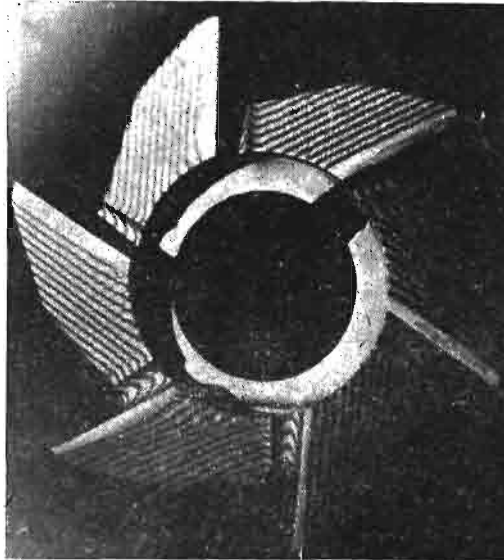


Rys. 7. Sieć warstwic na powierzchniach freza

Rys. 7 przedstawia obraz holograficzny powierzchni freza wraz z siecią warstwic o głębokości pomiędzy warstwicami  $\Delta z \cong 0,3$  mm. Widoczna jest niewielka odchyłka od płaszczyzny powierzchni czołowej freza oraz niewielkie różnice w ustawieniu krawędzi tnących.

Rys. 8 przedstawia obraz holograficzny powierzchni innego freza wraz z siecią warstwic o głębokości pomiędzy warstwicami  $\Delta z \cong 0,3$  mm. Wyraźne różnice w przebiegu warstwic na powierzchniach krawędzi tnących świadczą o błędach wykonania i ukazują ślady zużycia.

Jako jedną z cieczy imersyjnych we wszystkich przypadkach stosowano wodę destylowaną o współczynniku załamania światła  $n_1 = 1,3318$ , a druga ciecz była mieszaniną wody i alkoholu o współczynniku załamania zależnym od stężenia roztworu. Jakościowe



Rys. 8. Sieć warstwic na powierzchni freza ukazująca ślady zużycia

wnioski o błędach kształtu oraz o zużyciu powierzchni badanych elementów można wysnuć od razu poprzez porównanie sieci warstwic na poszczególnych częściach elementu, lub poprzez porównanie z siecią warstwic na elemencie wzorcowym. Ilościowe wnioski można wysnuć na podstawie przekrojów powierzchni płaszczyznami biegnącymi pod dowolnym kątem lub przez obliczenia różnic objętości elementu w różnych fazach eksploatacji.

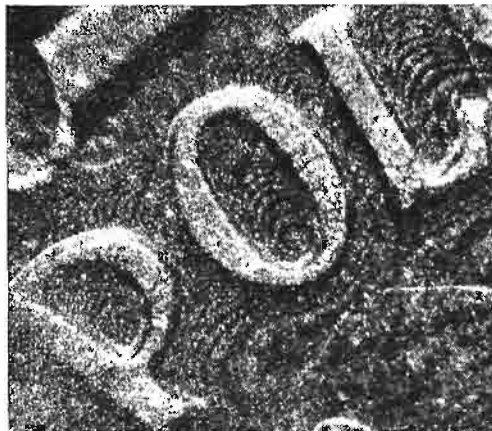
##### 5. Badania mikronierówności dla powierzchni metalowych

Obiektem badanym były powierzchnie elementów tłoczonych. Rys. 9 przedstawia obraz warstwic na powierzchni monety. Jako cieczy imersyjnych użyto w tym przypadku alkoholu etylowego i wody destylowanej, uzyskując różnicę głębokości pomiędzy warstwicami  $\Delta z \cong 10 \mu\text{m}$ . Przebieg warstwic jest w tym przypadku wyraźny na obszarach o małych gradientach powierzchni. Jeszcze bardziej zwiększając różnicę współczynników załamania np. stosując jako ośrodki imersyjne powietrze i alkohol można uzyskać różnicę głębokości warstwic  $\Delta z \cong 1 \mu\text{m}$ . Przykład warstwic o takim  $\Delta z$  pokazano na rysunku 10.

Obraz przedstawiający fragment monety, pomiędzy literami napisu POLSKA, był fotografowany przy pomocy mikroskopu o powiększeniu około  $\sim 25$  razy. Na czytelność warstwic wpłynęła ziarnistość obrazu holograficznego i mała głębia ostrości układu mikroskopowego.



Rys. 9. Układ warstwic na powierzchni monety



Rys. 10. Układ warstwic na wycinku powierzchni monety przy odległości warstwic  $\Delta z \cong 1 \mu\text{m}$

#### 6. Badanie ugięć powierzchni modelu półprzestrzeni sprężystej obciążonej siłami skupionymi

Metodę immersyjnego konturowania zastosowano również do badania zmian kształtu [6]. W pracy [5] dowodząco, że chropowatość powierzchni w sposób istotny zmniejsza sztywność kontaktu. Zmniejszenie sztywności kontaktu w małym stopniu wynika z odkształceń samych nierówności powierzchni, a jest efektem odkształceń silnie obciążonego materiału leżącego pod nierównością.

Dla poparcia tej hipotezy na drodze eksperymentalnej wykonano badania ugięć płaskiej powierzchni półprzestrzeni obciążonej lokalnie na równomiernie rozstawionych występach. Model był wykonany z gumy silikonowej o powierzchni pokrytej warstwą pyłu aluminiowego dla zwiększenia intensywności odbijania światła oraz zapobiegania depolaryzacji światła przy odbiciu od powierzchni gumy silikonowej.



Rys. 11. Warstwyce na powierzchni modelu z gumy silikonowej dociskanego do płyty bazowej małą siłą

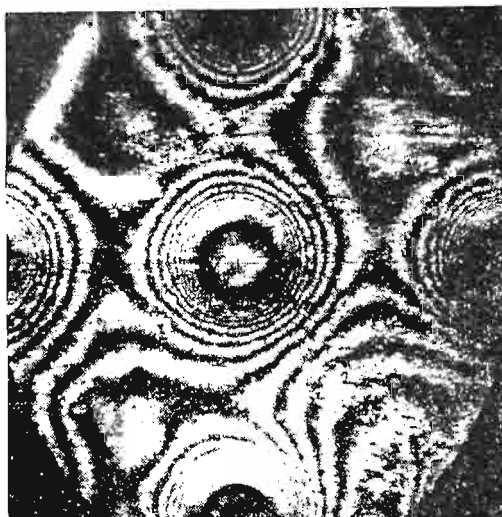


Rys. 12. Układ warstwic na powierzchni tego samego modelu, przy docisku większą siłą

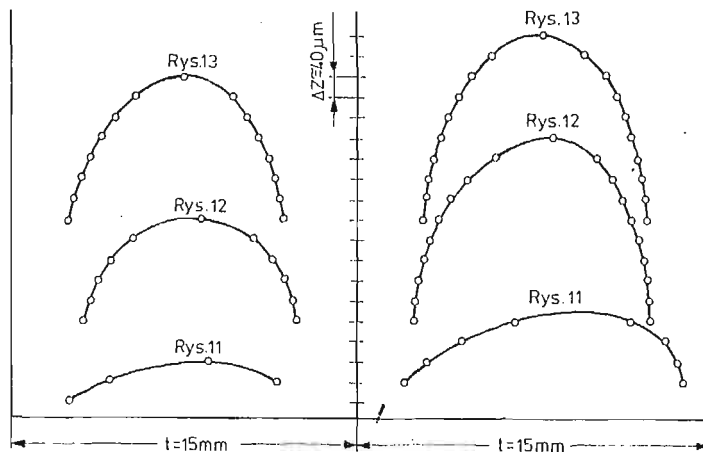
Rys. 11 przedstawia obraz warstwic powierzchni modelu dociskanego niewielką siłą do szklanej ściany kuwety. Odległość warstwic wynosi  $\Delta z \cong 40 \mu\text{m}$ . Widać, że powierzchnia modelu nie była gładka, ma liczne wady, oraz, że jest nieco nachylona do płaszczyzny bazy.

Rys. 12 i 13 przedstawiają warstwyce tej samej powierzchni gdy zwiększano siłę obciążającą model. Liczba warstwic wzrasta, obszary przyległe do występów, przez które prze-

noszone jest obciążenie, głęboko wciskają się w powierzchnię. Początkowo prawie płaska powierzchnia modelu pomiędzy występami zostaje lokalnie wybrzuszona, co jest wyraźnie widoczne na wykresie rys. 14 przedstawiającym przekrój powierzchni płaszczyzną A—A — przechodzącą przez środki występów.



Rys. 13. Układ warstwic na powierzchni tego samego modelu po dalszym wzroście siły docisku



Rys. 14. Przekrój powierzchni modelu płaszczyzną przechodzącą przez środki występów

#### Wnioski

Metoda immersyjna badania kształtu i odkształceń ma wiele zalet, które wyróżniają ją z pośród innych metod badań. Jest to metoda badań polowych, o szerokich możliwościach doboru dokładności pomiarów. Jak wykazano na przykładach, różnica głębokości pomiędzy warstwicami może być zmieniana w zakresie od  $1 \mu\text{m}$  do kilku mi-

limetrów. Metoda, w pierwszej swojej postaci dostosowana do badań kształtu, może być z powodzeniem stosowana do badania odkształceń, płyt, powłok, może być także z powodzeniem zastosowana do badań odkształceń plastycznych elementów, do wyznaczania stałych materiałowych, np. współczynnika Poissona, poprzez analizę ugięć płyty zginanej czystym momentem.

Metoda w opisywanej postaci nadaje się szczególnie do badania powierzchni o małych wyniosłościach i łagodnych zmianach kształtu, jak np. wizerunki na monetach, medalach i innych precyzyjnych elementach tłoczonych. W tym przypadku wystarczające jest powiększenie, jakie daje użyty mikroskop stereoskopowy. Natomiast trudności wynikły przy stosowaniu metody bezpośrednio do badania mikronierówności typu przełomów lub powierzchni o gwałtownych zmianach kształtu.

Nie jest możliwe zbyt duże powiększenie obrazu holograficznego pod mikroskopem ze względu na ziarnistość rekonstruowanego obrazu. Ograniczenia te można ominąć poprzez odpowiednią modyfikację układu badawczego.

Dokładność pomiaru zależy od gęstości i jakości obrazu prążków. Konieczne jest wyeliminowanie drgań układu optycznego i zapewnienie możliwie małego kąta padania wiązki odniesienia na płytę holograficzną, dobranie właściwego czasu ekspozycji, stosunku natężenia wiązki przedmiotowej do wiązki odniesienia i zapewnienie równości dróg optycznych obydwu wiązek.

Metoda okazała się przydatna do badań odkształceń powierzchni. Stosunkowo nieregularne przebiegi warstwic i mała czytelność warstwic w okolicach obszarów obciążonych są efektem struktury powierzchni modelu pokrytej proszkiem aluminiowym. Lepsze przygotowanie powierzchni napewno umożliwi uzyskanie bardziej czytelnych obrazów. Na uwagę zasługuje łatwość zastosowania metody imersyjnej warstwicowania powierzchni w laboratoriach przemysłowych, np. do kontroli poprawności wykonania odpowiedzialnych elementów maszyn produkowanych seryjnie jak również do badania zużycia warstwy wierzchniej elementów. Proces wykonywania hologramów można zautomatyzować, a dokument w postaci hologramu może być dowolnie długo przechowywany. Rekonstrukcja obrazu i analiza po wykonaniu zdjęcia może być wykonana na osobnym stanowisku w dowolnym czasie jeżeli będzie zachowana geometria układu służącego do rejestracji hologramu. Cechą metody imersyjnej jest stałość odległości  $\Delta z$  dla całego badanego obszaru. Pewne ograniczenia w stosowaniu metody narzuca konieczność użycia kuwety imersyjnej oraz zanurzania w cieczach elementów badanych.

*Przedstawione wyniki badań pochodzą z prac wykonanych w ramach problemu węzłowego 05.12 „Wytrzymałość i optymalizacja konstrukcji maszynowych i budowlanych” koordynowanego przez IPPT PAN.*

#### Literatura cytowana w tekście

1. T. TSURUTA et al, *Holographic generation of contour map of diffusely reflecting surface by using immersion method*, Jap. Journal Applied Physics, 6, 5 (1967).
2. T. FEUER, M. KOPICA, M. J. MATCZAK, *Holograficzna topografia obiektów przy użyciu metody imersyjnej*, Biul. Wojsk. Akad. Techn., ZAM (165), 1973.
3. M. LECH, I. MRUK, J. STUPNICKI, *Metoda imersyjna badania topografii powierzchni lopatek turbin*, III. Sympozjum Mechaniki Stosowanej, Warszawa, 1977.

4. M. LECH, I. MRUK, J. STUPNICKI, *Badanie kształtu mikronierówności powierzchni metodą interferometrii holograficznej*, VIII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa, 1978.
5. W. M. MIRSKI, *Effects of surface roughness on the load distribution in contact*, Proceedings of EURO-MECH Colloquium No. 110, 1978, Linköping, Sweden.
6. M. LECH, I. MRUK, J. STUPNICKI, *Holographic contouring of the surface topography and study of contact rigidity of rough surfaces*, International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Leicester, England, 18 - 20 April 1979.

## Резюме

ИММЕРСИОННЫЙ МЕТОД ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ФОРМЫ И ДЕФОРМАЦИЙ

Представленный иммерсионный метод голографической интерферометрии делает возможным быстрые составления топографических карт исследованных поверхностей объектов, с определенной точностью. Карты могут быть применены в численном анализе и в быстрых сравнительных (качественных) исследованиях. Получено расстояние между изогипсами от  $\Delta z = 1 \mu\text{m}$  до нескольких миллиметров. Вышеуказанный метод был применен авторами в исследованиях топографии поверхностей таких деталей как лопатки турбин, режущих инструментов, монет а также в исследованиях моделей шероховатостей поверхности выполненных из силиконовой резины.

## Summary

IMMERSION METHOD OF HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY FOR INVESTIGATION OF  
SHAPE AND DEFORMATIONS

The paper presents an investigation carried out with the aide of holographic contouring immersion method. The method, properly adjusted, allows to obtain contour maps of the surfaces of machine details with contour interval from  $\Delta z = 1 \mu\text{m}$  to several millimeters. These maps, having definite accuracy, are suitable for quantitative analysis of shape and deformations as well as for qualitative comparison of surfaces of details. The measurements were carried out on metal surfaces, for example on turbine blades, cutting tools and coins, and on the models of structures made of silicon-rubber.

POLITECHNIKA  
WARSZAWSKA

Praca została złożona w Redakcji dnia 9 stycznia 1979 r.



## ZASTOSOWANIE METODY KOLEJNYCH ROZWIĄZAŃ SPRĘŻYSTYCH DO ELASTOOPTYCZNEGO BADANIA OŚRODKA SPRĘŻYSTO-PLASTYCZNEGO Z OTWOREM WALCOWYM<sup>1</sup>

JERZY LIETZ, BOGDAN MICHAŁSKI, RYSZARD WOJNAR (WARSZAWA)

### 1. Analiza zagadnienia i wybór metody

Rozpatrywany jest stan naprężenia i odkształcenia w otoczeniu otworu walcowego o dowolnej tworzącej w nieograniczonym ośrodku sprężysto-plastycznym. W ośrodku tym w oddaleniu od otworu panuje jednorodny stan naprężenia, taki że na konturze otworu przekroczona jest granica plastyczności. Sformułowanie to wywodzi się z zagadnienia mechaniki górotworu, w którym chodzi o wyznaczenie naprężeń i odkształceń wokół wyrobiska górniczego.

To trójwymiarowe zadanie przy znacznej długości otworu w stosunku do jego przekroju daje się sprowadzić do zagadnienia płaskiego stanu odkształcenia. Autorzy podejmują próbę doświadczalnego rozwiązania tego zadania metodą elastooptyczną.

W zakresie liniowej sprężystości problemy płaskiego stanu odkształcenia modeluje się elastooptycznie za pomocą modelu tarczowego, a więc w płaskim stanie naprężenia. Obraz elastooptyczny jest, jak wiadomo, w obu wypadkach taki sam.

W zakresie odkształceń plastycznych nie można natomiast modelem tarczowym wykonanym z materiału sprężysto-plastycznego odwzorować płaskiego stanu odkształcenia, zwłaszcza gdy oba naprężenia główne są tego samego znaku. Nie będą bowiem spełnione warunki w odniesieniu do kryteriów uplastycznienia.

Wobec tego, że stosowane dotychczas polaryzacyjno-optyczne sposoby badania ciał sprężysto-plastycznych nie nadają się do analizy płaskiego stanu odkształcenia postanowiono użyć tzw. metody kolejnych rozwiązań sprężystych, która, jak wykazemy w następnym rozdziale, stwarza takie możliwości. Metodę tę podali Aleksandrow i Achmetzjanow [1], [3], stosując ją do rozwiązania zadania jednowymiarowego (czyste zginanie belki). W niniejszej pracy rozwinięto tę metodę na problemy dwuwymiarowe, podając zarówno teorię jak i technikę prowadzenia badań.

Metoda kolejnych rozwiązań sprężystych, której istotą jest zastąpienie ośrodka sprężysto-plastycznego przez ośrodek liniowo-sprężysty niejednorodny, umożliwia użycie dwuwymiarowego modelu tarczowego do odwzorowania płaskiego stanu odkształcenia w zakresie sprężysto-plastycznym. Ponadto uniezależnia ona badacza od charakterystyki

<sup>1)</sup> Praca stanowi rozszerzenie referatu przedstawionego na VIII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego

mechanicznej materiału modelowego, pozwalając przyjmować dowolną (ale monotoniczną) zależność naprężeń od odkształceń w obiekcie.

Ujemną stroną metody jest znaczna pracochłonność oraz to, że realizowany ciąg rozwiązań sprężystych odnosi się do jednej wybranej wartości stosunku obciążenia do granicy plastyczności. Można zatem określić granicę strefy uplastycznienia oraz pole odkształceń sprężysto-plastycznych dla danych warunków obciążenia. Trudniej natomiast jest analizować propagację granic strefy uplastycznienia przy zmieniającym się obciążeniu.

## 2. Metoda rozwiązań sprężystych

Rozwiązanie zadania plastyczności możemy sprowadzić do rozwiązania ciągu zadań liniowej sprężystości w ośrodku niejednorodnym, w którym niejednorodność jest zmieniana w kolejnych rozwiązaniach.

W wersji zaproponowanej przez Birgera [2], wykorzystuje się spostrzeżenie, iż w ramach deformacyjnej teorii plastyczności związek konstytutywny dla ośrodka odkształconego w zakresie plastycznym daje się formalnie zapisać w postaci analogicznej do prawa Hooke'a

$$(1) \quad e_{ij} = \frac{1}{2G^*} s_{ij}, \quad \varepsilon_{kk} = \frac{1}{\kappa} \sigma_{kk},$$

gdzie  $e_{ij}$  oraz  $s_{ij}$  są odpowiednio dewiatorami tensora odkształceń  $\varepsilon_{ij}$ ,  $e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon_{kk} \delta_{ij}/3$  oraz tensora naprężeń  $\sigma_{ij}$ ,  $s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_{kk} \delta_{ij}/3$ .  $\kappa$  jest modułem ściśliwości a nieliniowość związku zawiera się we współczynniku

$$(2) \quad G^* = G_0/\psi,$$

gdzie  $G_0$  jest modułem ścinania w zakresie liniowo-sprężystym. Wielkość

$$(3) \quad \psi = G_0 \gamma_i / \tau_i$$

wyraża się przez stałą  $G_0$  oraz niezmienniki dewiatorów  $e_{ij}$ ,  $s_{ij}$  tzw. intensywności odkształceń

$$(4) \quad \gamma_i = \sqrt{2e_{ij}e_{ij}},$$

i naprężeń

$$(5) \quad \tau_i = \sqrt{\frac{1}{2}s_{ij}s_{ij}}.$$

Dla określonego zadania brzegowego w ośrodku sprężysto-plastycznym  $\psi$  jest w ogólności funkcją położenia  $X_i(x, y, z)$  posiadającą tę własność, że  $\psi = 1$  ( $G^* = G_0$ ) w obszarze odkształceń liniowo sprężystych a  $\psi > 1$  ( $G^* < G_0$ ) poza tym obszarem. Funkcja

$$(6) \quad G^*(x, y, z) = G_0/\psi$$

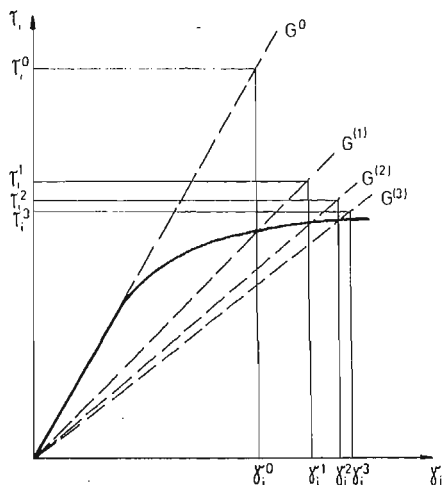
określa zatem rozkład modułu ścinania w niejednorodnym ośrodku liniowo sprężystym, w którym dla określonego zadania brzegowego pola naprężeń i odkształceń są takie same, jak w ośrodku sprężysto-plastycznym.

Związki (1 - 6) umożliwiają rozwiązanie zadania nieliniowego (plastyczności) drogą iteracji rozwiązań liniowych (sprężystości). Otóż zakłada się, że znana jest charakterystyka ośrodka

$$(7) \quad \tau_i = \tau_i(\gamma_i).$$

Wtedy proces kolejnych przybliżeń może być następujący:

Kładąc w zerowym przybliżeniu  $\psi = 1$  rozwiązujemy zadanie teorii sprężystości, znajdując pole naprężeń  $\sigma_{ij}^0$  i odkształceń  $\varepsilon_{ij}^0$ . Na podstawie pola  $\varepsilon_{ij}^0$  znajdujemy niezmiennik  $\gamma_i^0$ , skąd na podstawie krzywej  $\tau_i(\gamma_i)$  określamy moduł sprężystości  $G^{(1)} = G^{(1)}(x, y, z)$ , potrzebny do następnego przybliżenia, jako tangens pochylenia siecznej (rys. 1).



Rys. 1

W następnym przybliżeniu rozwiązujemy liniowe zadanie sprężystości dla ośrodka niejednorodnego z modułem sprężystości  $G^{(1)}$ , określonym w pierwszym przybliżeniu. Znajdujemy pole naprężeń  $\sigma_{ij}^{(1)}$  i odkształceń  $\varepsilon_{ij}^{(1)}$ , następnie analogicznie  $\gamma_i^{(1)}$  i nowy moduł  $G^{(2)}$  do następnego przybliżenia itd. Procedurę kończymy z chwilą uzyskania zadowalającego przybliżenia tzn., gdy dalsze przyrosty  $\gamma_i$  są już dostatecznie małe.

Istotą metody jest więc analogia między rozkładem naprężenia w ośrodku plastycznym a stanem naprężenia w niejednorodnym ośrodku sprężystym. Rysunek 1 pokazuje schematycznie sposób określenia modułu sprężystości w danym punkcie ośrodka w kolejnych iteracjach.

Problem zbieżności metody rozwiązań sprężystych był rozważany w pracach (4) i (5).

Znajdowanie kolejnych rozwiązań może odbywać się oczywiście w różny sposób, analityczny, numeryczny bądź analogowy. W tym ostatnim wypadku możemy zastosować, jak na to zwrócił uwagę Achmetzjanow, metodę elastooptyczną.

W płaskim stanie odkształcenia, jaki rozpatrujemy w niniejszej pracy, przy  $\nu = 1/2$  wyrażenia (4 i 5) upraszczają się do postaci

$$(7) \quad \gamma_i = 2(\varepsilon_x^2 + \varepsilon_{xy}^2)^{\frac{1}{2}},$$

$$(8) \quad \tau_i = \frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}]^{\frac{1}{2}}.$$

Wyrażając (8) za pomocą naprężeń głównych  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  otrzymujemy

$$(9) \quad \tau_i = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) = \tau_{\max}.$$

Z równania (9) wynika, że ponieważ  $\tau_i = \tau_{\max}$ , kryteria plastyczności Hubera, Misesa i Treski pokrywają się. Przy  $\nu < \frac{1}{2}$  równanie (9) jest przybliżone.

Ponieważ zadanie opisane w rozdziale 1 modelujemy za pomocą tarczy z materiału elastoosprężystego, widzimy, że izochromy można traktować jako linie  $\tau_i = \text{const}$ , gdyż z prawa Wertheima

$$(10) \quad Km = (\sigma_1 - \sigma_2)h,$$

gdzie  $m$  jest rzędem izochromy,  $K$  — stałą elastoosprężystą,  $h$  — grubością modelu.

Warto zaznaczyć, że obraz elastoosprężysty w modelu nie zależy tu od współczynnika Poissona, ani od tego, że płaski stan odkształcenia zastąpiliśmy płaskim stanem naprężenia.

Ze względu na technologię wykonania modelu, niejednorodny ośrodek sprężysty o ciągłym rozkładzie modułu  $G$ , o jakim była mowa powyżej, zastępujemy przez ośrodek niejednorodny skokowo, samą zaś niejednorodność ośrodka modelujemy przez odpowiednią zmianę jego grubości. Im większa jest liczba stopni i im są one mniejsze, tym lepiej ośrodek niejednorodny w sposób ciągły przybliżony jest przez ośrodek niejednorodny skokowo.

Badając tarczowy model elastoosprężysty o zmiennej grubości  $h$  (symetryczny względem płaszczyzny środkowej  $z = 0$ ) bierzemy pod uwagę, że rząd izochromy wynika z naprężeń scałkowanych po grubości, które oznaczamy przez  $\bar{\sigma}$

$$(11) \quad \bar{\sigma} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma dz = \sigma_{sr} \cdot h \left[ \frac{\text{N}}{\text{cm}} \right].$$

Równanie (10) można teraz wyrazić w postaci nie zawierającej zmiennej  $h$

$$(12) \quad Km = \bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2.$$

Korzystając z równania (12) analizujemy elastoosprężystie pole naprężeń  $\bar{\sigma}$  tak, jak gdyby model miał stałą grubość  $h_0$ . Zmiany grubości modelują zmienny moduł  $G$ , który wyraża się jako

$$(13) \quad G = G_0 \frac{h}{h_0}.$$

W dalszym ciągu rozpatrywać będziemy ośrodek sprężysto-idealnie plastyczny. Wynikają z tego pewne uproszczenia w badaniu elastoosprężystym, gdyż w końcowym etapie kolejnych przybliżeń:

1. Granicę strefy uplastycznienia wyznacza izochroma określonego rzędu odpowiadająca  $\tau_{\max} = k$ , gdzie  $k$  jest granicą plastyczności na ścinanie.
2. Wewnątrz strefy uplastycznienia rząd izochromy powinien być stały, co daje łatwą kontrolę poprawności wyniku.

3. W obszarze uplastycznienia zmienna grubość modelu  $h$  określa pole odkształceń postaciowych  $\gamma_i$  gdyż

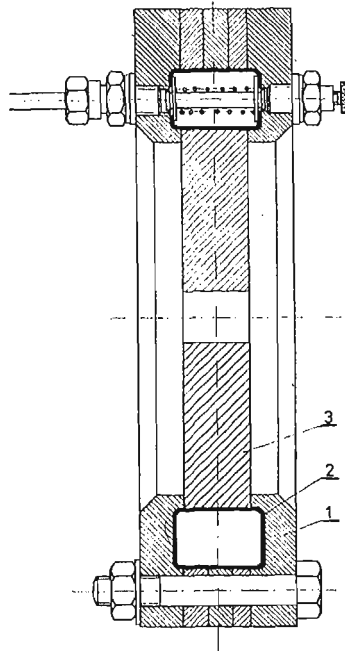
$$(14) \quad \gamma_i = \frac{\tau_i}{G} = \frac{k}{G_0} \frac{h_0}{h} = \gamma_{is} \frac{h_0}{h},$$

gdzie  $\gamma_{is}$  jest wartością  $\gamma_i$  na granicy plastyczności. Składowa plastyczna odkształcenia wyniesie

$$(15) \quad \gamma_{ip} = \gamma_i - \gamma_{is} = \gamma_{is} \left( \frac{h_0}{h} - 1 \right).$$

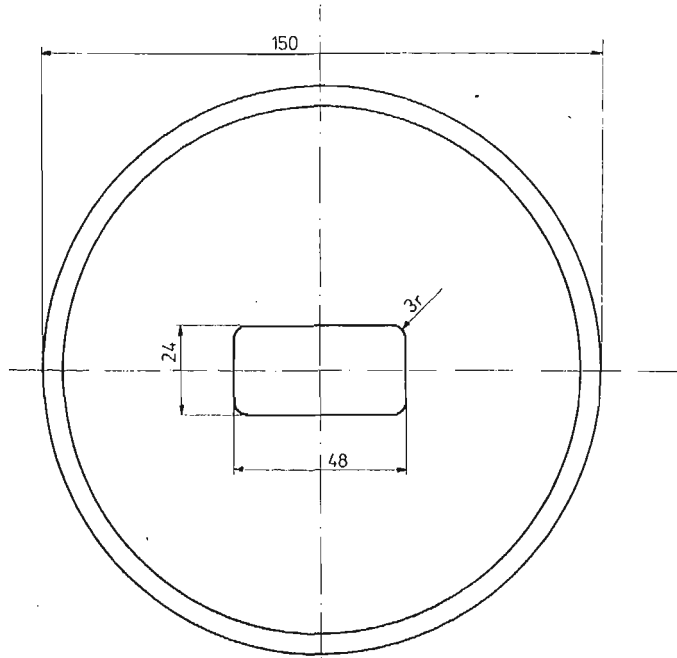
### 3. Przeprowadzenie badania

Realizując założenia podane w rozdziale 1 tarczę modelu trzeba było obciążyć na obwodzie w taki sposób, aby przed wykonaniem otworu w modelu wystąpił jednorodny stan naprężenia. Przyjęto dla uproszczenia wszechstronne ściskanie a więc  $\sigma_1 = \sigma_2$ . Można wówczas wykonać model w kształcie tarczy kołowej i obciążyć go na obwodzie

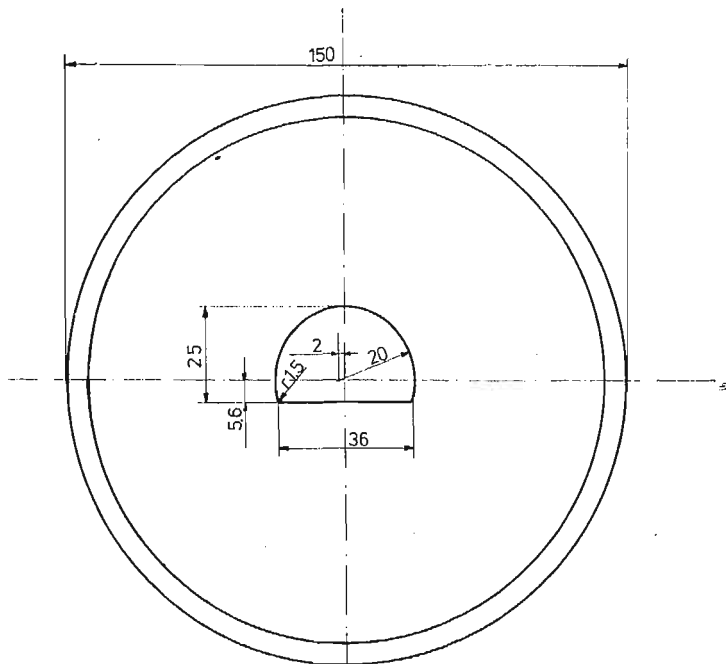


Rys. 2

równomiernym ciśnieniem za pomocą urządzenia hydraulicznego przedstawionego na rys. 2. W stalowej pierścieniowej obudowie 1 znajduje się gumowa dętka 2 przekazująca ciśnienie cieczy na model 3.



Rys. 3

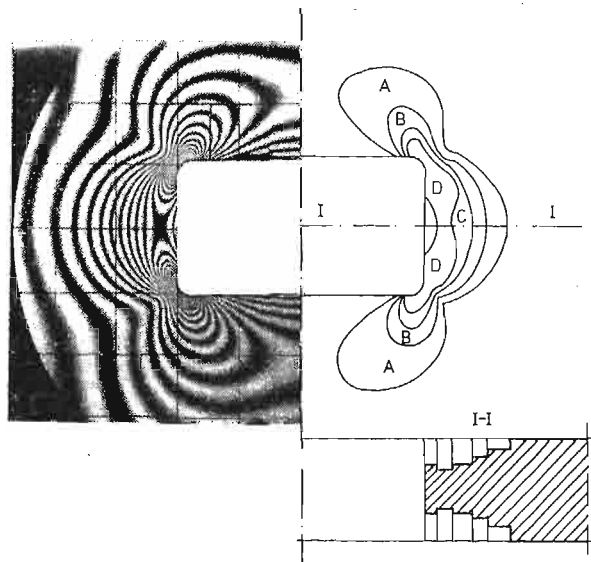


Rys. 4

Kolejność czynności przy badaniu modelu z otworem była następująca. Sporządzono modele w postaci dość grubej (20 mm) tarczy kołowej z otworem o rozpatrywanym kształcie, wyznaczając uprzednio elastoptyczną stałą modelową.

Zbadano dwa modele: z otworem prostokątnym o stosunku boków 2:1 (rys. 3) i z otworem w kształcie typowej obudowy górniczej ŁP-9 (rys. 4).<sup>2</sup> Założono, że ośrodek jest sprężysto-idealnie plastyczny.

Za pomocą urządzenia hydraulicznego obciążono model ciśnieniem na obwodzie i badano w polaryskopie. Otrzymano wyniki elastoptyczne (izochromy i izokliny) odnoszące się do pola naprężeń przy liniowo-sprężystej charakterystyce ośrodka. Przyjęto je jako „zerowe” przybliżenie rozwiązania.



Rys. 5

Określono rząd izochromy, która stanowi pierwsze przybliżenie granicy strefy uplastycznienia.

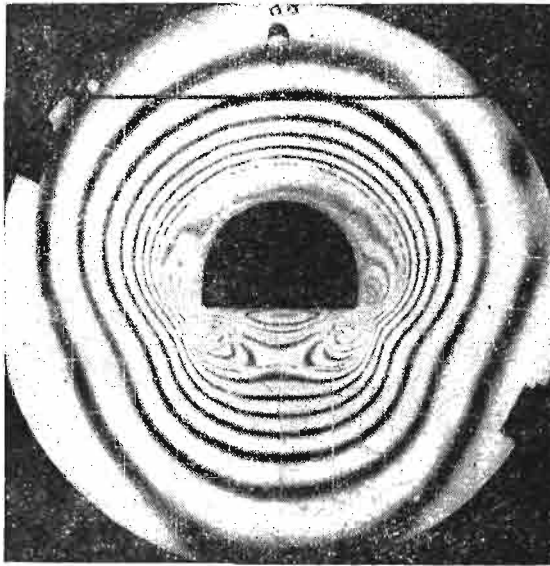
Przyjęto, że ciśnienie obciążające, które wynosi 5 MPa jest równe granicy plastyczności na ścisłaniu  $2k$ . Uwzględniając zmierzoną stałą modelową 0,75 MPa/rz.iz. otrzymano w obu modelach granicę strefy uplastycznienia odpowiadającą izochromie rzędu 6,7. Wewnątrz tej strefy na podstawie rzędu izochromy określającego  $\tau_i^{(0)}$  i  $\gamma_i^{(0)}$  i danej krzywej  $\tau_i(\gamma_i)$  wyznaczono rozkład wielkości  $G_i/G_0$ , który wskazuje w jakim stosunku należy zmniejszyć grubość modelu do następnego badania.

Następnie opracowano program podcinania, uwzględniając warunki technologiczne tak, aby jak najlepiej zrealizować wymagany rozkład grubości. Stosowano obustronne frezowanie frezem palcowym dające warstwicowe (schodkowe) ścienianie modelu (rys. 5).

<sup>1)</sup> Autorzy zbadali także model z otworem o przekroju kołowym i porównali wyniki z rozwiązaniem teoretycznym (6).

W pewnych przypadkach można zrealizować skośną obróbkę modelu, co daje ciągłą niejednorodność modułu i na ogół lepsze przybliżenie.

Tak przygotowany model powtórnie badamy w polaryskopie, a otrzymane pole naprężeń  $\tau_i$  i odkształceń  $\gamma_i$  stanowi pierwsze przybliżenie rozwiązania. Na jego podstawie opracowujemy program dalszego podcinania modelu, którego badanie elastoptyczne daje drugie przybliżenie rozwiązania. Powtarzamy tę procedurę kilkakrotnie aż do uzyskania zadowalającej dokładności. Obraz izochrom w modelu z otworem ŁP-9 w pierwszym przybliżeniu przedstawia rys. 6.



Rys. 6

Sporządzono specjalne stanowisko obróbcze z szybkoobrotowym frezem palcowym. Model przytwierdzony do specjalnej płyty był ręcznie przesuwany według wytrasowanych na nim linii. Głębokość frezowania można było dokładnie nastawiać.

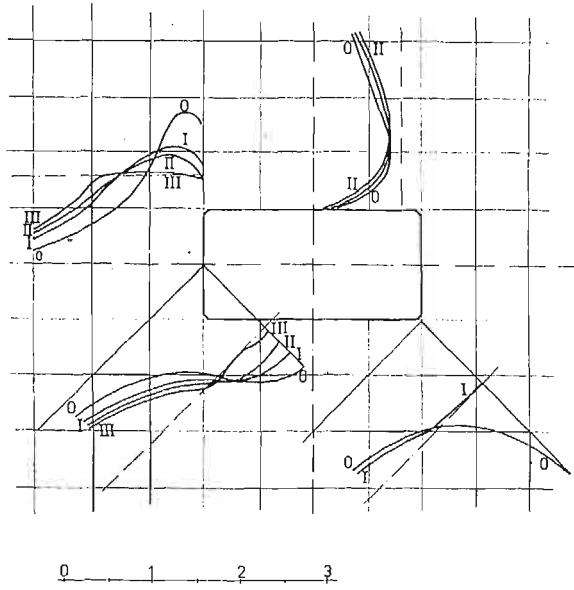
Przy badaniach elastoptycznych, w przypadku skośnie obrobionych powierzchni prześwietlonego modelu, w celu wyeliminowania załamania światła, stosowano pogrążenie modelu w odpowiednio dobranej cieczy immersyjnej. Ciecz znajdowała się pomiędzy okładzinami ze szkła organicznego uszczelnionymi względem modelu.

#### 4. Wyniki badań i wnioski

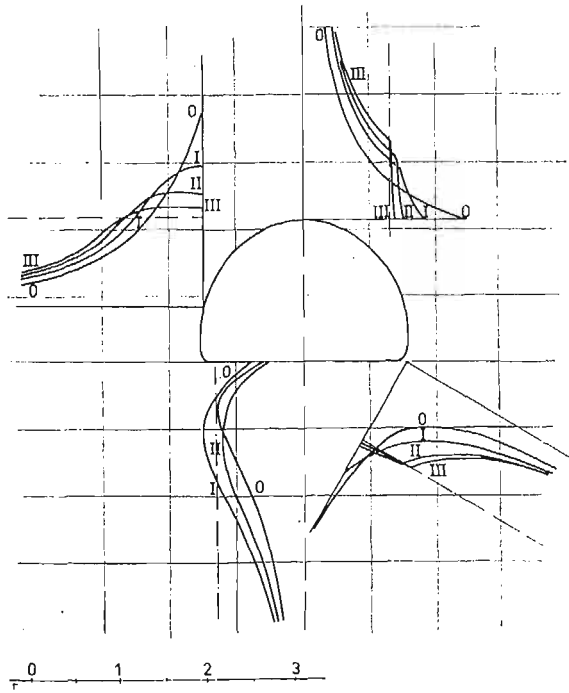
W modelu z otworem prostokątnym zastosowano schodkowe podcinanie o dość znacznej liczbie schodków; 5 w pierwszym przybliżeniu i 6 w następnych przybliżeniach. W modelu z otworem ŁP-9 stosowano schodkowe podcinanie w pobliżu płaskiego spągu i skośne podcinanie w otoczeniu przesklepionego stropu, dające lepsze przybliżenie do rzeczywistego stanu odkształcenia w strefie uplastycznienia.

Na rysunku 5 widoczne są granice schodkowych odsadzek w modelu z otworem prostokątnym w pierwszym przybliżeniu.

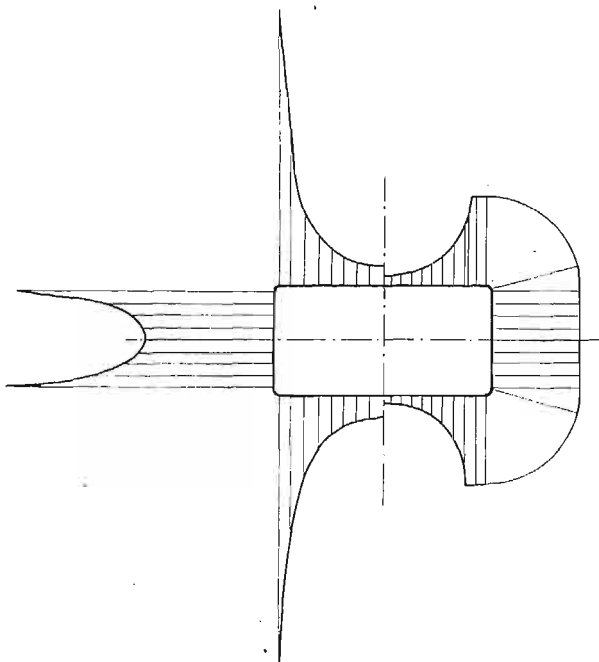




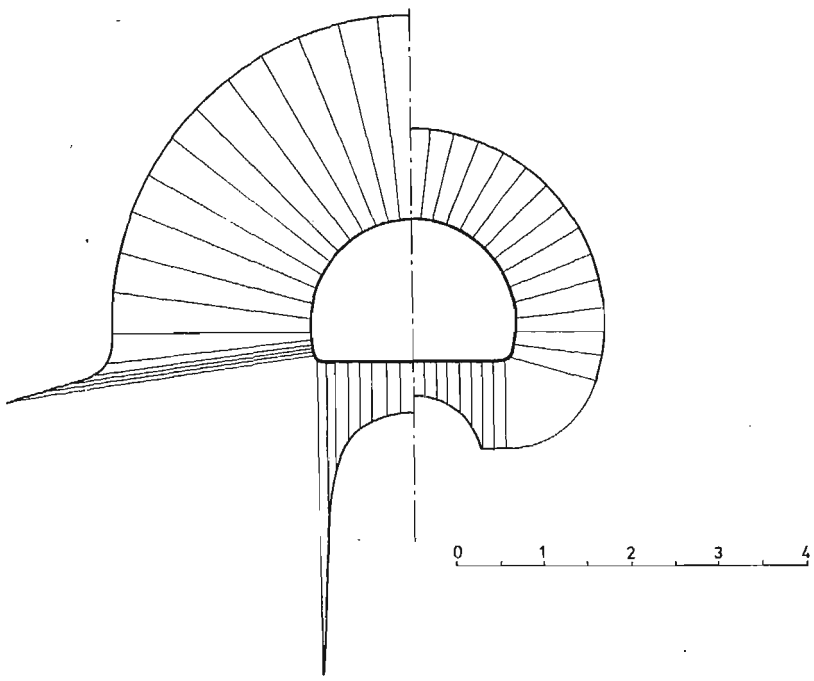
Rys. 7 .



Rys. 8

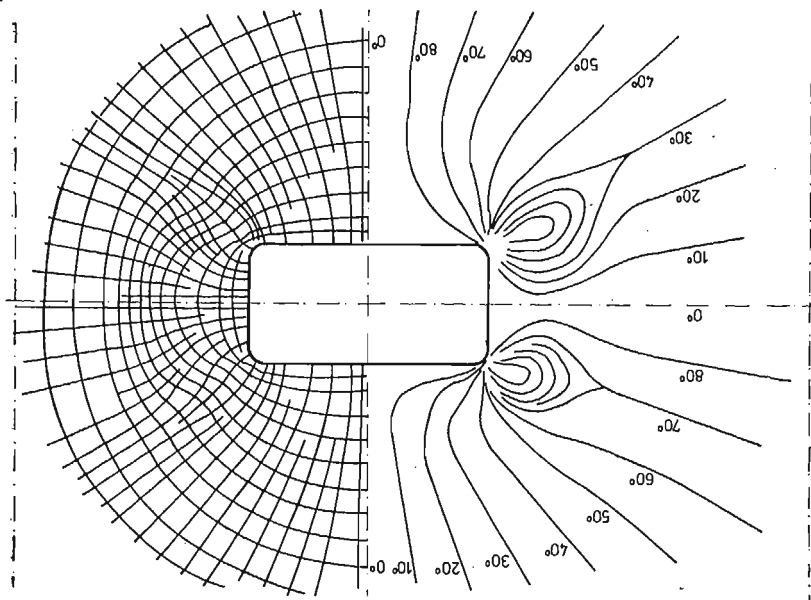


Rys. 9

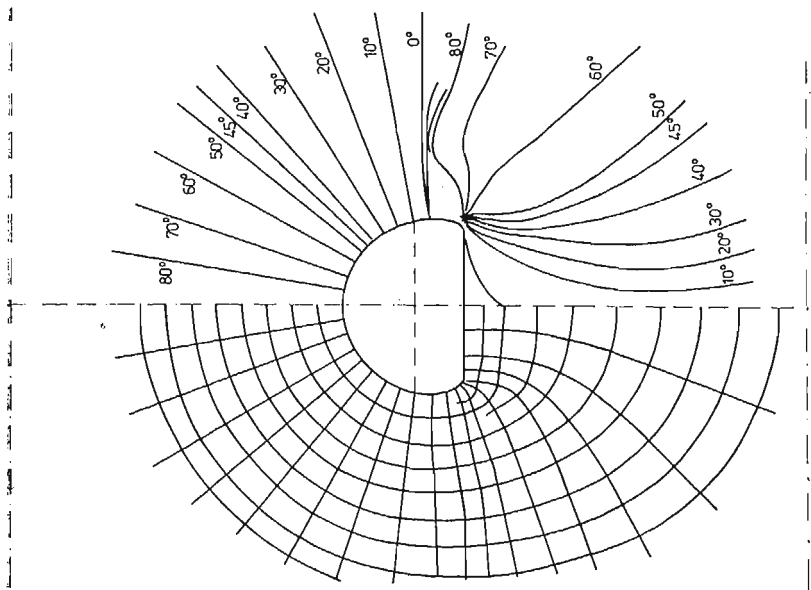


Rys. 10

[400]

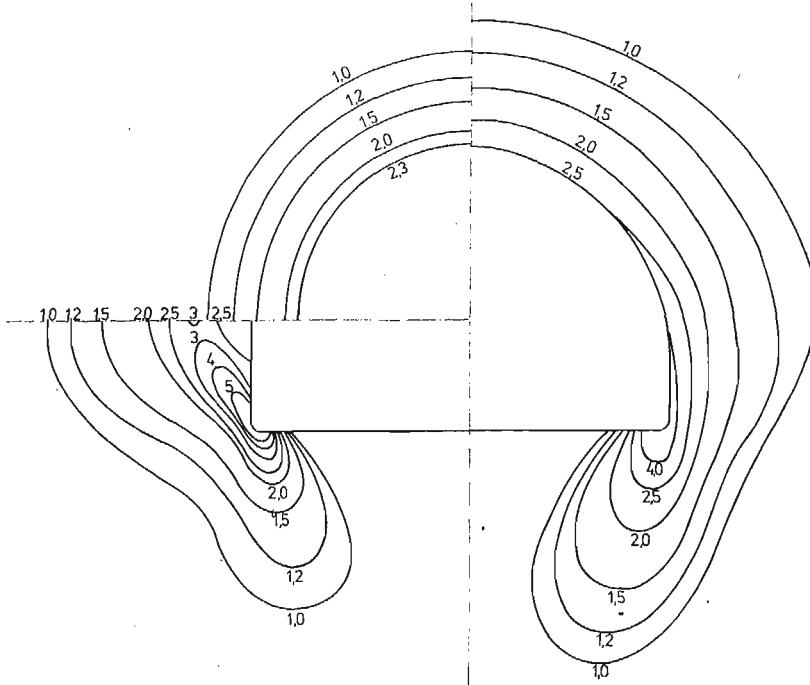


Rys. 11



Rys. 12

Dla kolejnych przybliżeń sporządzono dla obu modeli wykresy różnic naprężeń głównych w przekrojach charakterystycznych (rys. 7 i 8). Pozwalają one na ocenę stopnia zbieżności metody. Jak widać, iterację można zakończyć na trzecim przybliżeniu, w którym rozkład różnic naprężeń głównych jest już zbliżony do rozkładu dla ciała sprężysto-idealnie plastycznego. Rys. 9 i 10 przedstawiają porównanie rozkładu naprężeń brzegowych dla ciała sprężysto-plastycznego i sprężystego. Obraz izoklin i trajektorii naprężeń głównych (rys. 11 i 12) potwierdza, że na całym obwodzie otworu występują naprężenia ściskające.



Rys. 13

Wykorzystując wyniki ostatecznego przybliżenia dla modelu z otworem prostokątnym i w kształcie ŁP-9 oraz teoretyczne wyniki obliczeniowe dla otworu kołowego sporządzono zbiorczy wykres, przedstawiający w poszczególnych ćwiartkach porównanie pól odkształceń sprężysto-plastycznych w tych trzech przypadkach (rys. 13). Wymiary otworów przyjęto na rysunku takie, aby pola ich przekrojów poprzecznych była sobie równe. Rozkład odkształceń w obszarze uplastycznienia przedstawiono za pomocą linii  $\gamma_i/\gamma_{is} = \text{const}$ . Granicą strefy uplastycznienia jest linia oznaczona parametrem 1.

Przeprowadzone badania wykazały przydatność metody rozwiązań sprężystych do analizy stanu naprężenia i odkształcenia w ciałach sprężysto-plastycznych w zagadnieniach płaskiego stanu odkształcenia. Lepsze rezultaty uzyskuje się w przypadku elementów o płynnie zmieniającej się krzywiźnie konturów pozbawionych wklęsłych załamań. Metodę warto stosować do porównawczych badań elementów o zbliżonych kształtach. Wykorzystując znajomość rozkładu naprężeń dla podobnych kształtów można bowiem zmniejszyć liczbę iteracji, przyjmując za punkt wyjścia nie sprężysty stan naprężenia, lecz stan sprę-

żysto-plastyczny zbliżony do stanu poszukiwanego. Korzystną stroną metody jest to, że na podstawie ostatecznego grubościowego ukształtowania modelu można bezpośrednio wyznaczyć pole odkształceń sprężysto-plastycznych.

#### Literatura cytowana w tekście

1. A. J. ALEKSANDROW, M. CH. ACHMETZJANOV, *Polarozacjonno-optičeskie metody mechaniki deformirujemogo tela*, Izd. „Nauka”, Moskwa (1973).
2. I. A. BIRGER, *Nekotorye obščije metody rešenija zadač teorii plastičnosti*, P.M.M., 15, (1951), 765 - 770.
3. M. CH. ACHMETZJANOV, w wydawnictwie „Polariz.-opt. metody issled. napriazhenij”, *Trudy V Vsesojuznoj konferencji*, Izd. WGU, Leningrad 1966.
4. D. L. BYKOV, V. A. SACNEV, *Prikl. Mech. i Mat.*, 33, nr. 2, (1969), 290 - 298.
5. B. E. POBEDRIA, *O schodimosti metoda uprugich resenij v nelinejnoj viazkoprugosti*, D.A.N. SSSR. 195, (1970), 307 - 310.
6. J. LIETZ, R. WOJNAR, B. MICHALSKI, *Elastooptyczne badanie ośrodka plastycznego z otworem walcowym, metodą kolejnych rozwiązań sprężystych*, VIII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego, Warszawa (1978).

#### Резюме

#### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ УПРУГИХ РЕШЕНИЙ К ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКИМ ИССЛЕДОВАНИЯМ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ОТВЕРСТИЕМ

В статье представлено применение метода последовательных упругих решений до фотоупругих исследований пластических сред. Изложены теоретические основы и лабораторная техника излагаемого метода. В случае плоского напряженного состояния полосы отвечают линиям интенсивности касательных напряжений.

В работе представлен метод определения напряженного состояния вокруг цилиндрической пустоты нерегулярного контура предложенным способом с использованием фотоупругих моделей. Определено напряженное состояние в характеристических сечениях вокруг пустоты в виде прямоугольника и в виде типичной горной разработки.

Результаты исследований доказывают, что метод упругих решений может быть успешно использован для определения напряженного состояния в упруго-пластических средах в условиях плоского деформированного состояния.

#### Summary

#### APPLICATION OF THE METHOD OF SUCCESSIVE ELASTIC SOLUTIONS TO PHOTOELASTIC INVESTIGATIONS OF AN ELASTO-PLASTIC MEDIUM WITH A CYLINDRICAL CAVITY

Paper presents an application of a method of elastic successive solutions to photoelastic investigation of a plastic medium. Theoretical foundations and experimental procedure of the proposed method are presented. In the case of the plane state of strain fringes correspond to the stress intensity lines. An attempt

to determine the state of stress around a generally irregular cylindrical cavity by means of the method of successive elastic solutions with the use of photoelastic models has been made. Stress distributions in characteristic sections around a rectangular cavity and a typical arched mining excavation have been determined. Test results prove that the method may be successfully used for the determination of the state of stress in two dimensional elastic-plastic media under plane strain conditions.

IPPT PAN  
ZMOC

*Praca została złożona w Redakcji dnia 6 kwietnia 1979 r.*

---

ROZPRASZANIE ŚWIATŁA PRZY SKOŚNYM PRZEŚWIETLANIU  
W ZASTOSOWANIU DO ANALIZY NAPRĘŻEŃ W SZKLE HARTOWANYM<sup>1)</sup>

STANISŁAW MAZURKIEWICZ, LESZEK KUC, MAREK SIKOŃ (KRAKÓW)

Prawa fizyczne i warunki skośnego prześwietlania

Pole naprężeń własnych powstałe w płytkach szklanych w wyniku obróbki cieplnej ma wzdłuż grubości rozkład paraboliczny. Warstwy zewnętrzne posiadają wysoką wartość naprężeń ściskających zaś warstwa środkowa poddana jest naprężeniom rozciągającym [1], [12], [4], [3], [2]. Stan naprężeń w dowolnym punkcie badanej płytki szklanej można opisać tensorem naprężeń  $\sigma_{ij}$ , stan optyczny zaś tensorem współczynników przenikalności dielektrycznej  $n_{ij}$ . Składowe obydwu tensorów wiąże prawo Maxwella.

$$(1) \quad \begin{aligned} n_1 &= n_0 + C_1 \sigma_1 + C_2 (\sigma_2 + \sigma_3), \\ n_2 &= n_0 + C_1 \sigma_2 + C_2 (\sigma_1 + \sigma_3), \\ n_3 &= n_0 + C_1 \sigma_3 + C_2 (\sigma_1 + \sigma_2), \end{aligned}$$

gdzie:

$n_1, n_2, n_3$ , współczynniki przenikalności dielektrycznej wzdłuż kierunków głównych.

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , naprężenia główne.

$n_0$ , współczynnik przenikalności dielektrycznej w ciele wolnym od naprężeń.

$C_1, C_2$ , stałe optyczne.

Przyjęty model rozpraszania Rayleigha [13] opisują następujące równania:

$$(2) \quad \eta = \frac{8\pi}{3} |\alpha|^2 \left( \frac{\omega}{C} \right)^4,$$

$\eta$  wielkość energii wiązki światła zabierana przez światło rozproszone

$\alpha$  zdolności do polaryzacji światła drobin lub atomu ośrodka rozpraszającego

$\omega$  częstość kołowa światła padającego i rozproszonego

$C$  prędkość światła w próżni

$$(3) \quad I = I_0 \Omega_0 \left( \frac{\eta}{4\pi} \right) \frac{3}{4} (1 + \cos^2 \zeta),$$

<sup>1)</sup> Praca stanowi rozszerzenie referatu przedstawionego na VIII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego

$I$  natężenie światła rozproszonego (dipol oświetlany światłem niespolaryzowanym).

$I_0$  natężenie oświetlającej wiązki światła.

$\Omega_0$  kąt rozbieżności oświetlającej wiązki światła.

$\zeta$  kąt rozpraszania.

$$(4) \quad P(\zeta) = \frac{\sin^2 \zeta}{1 + \cos^2 \zeta},$$

$P$  stopień polaryzacji światła rozproszonego

Ze wzorów (2), (3), (4), wynika:  $\eta \sim \frac{1}{\lambda^4}$ ,  $I = I_{\max}$  dla  $\zeta = 0^\circ$ ,  $P = 1$  dla  $\zeta = 90^\circ$ .

Dalszą analizę będziemy przeprowadzać w płaszczyźnie światła rozproszonego tworzącej kąt  $\zeta = 90^\circ$  z kierunkiem padającej wiązki światła.

Jeżeli wiązkę światła spolaryzowanego przepuścimy wzdłuż kierunku głównego (3) [wzór (1)] to na elementarnej drodze  $dz$  pokrywającej się z kierunkiem (3) powstanie różnica faz  $d\psi_1$  promieni drgających w kierunkach głównych (1) i (2) spowodowana anizotropią optyczną ( $\kappa_1 \neq \kappa_2$ ).

Uwzględniając obrót  $d\Phi$  kierunków (1) i (2) na drodze  $dz$  wielkość powstałej różnicy faz  $d\psi$  podaje wzór Maxwella-Neumanna [6].

$$(5) \quad d\psi = d\psi_1 + \left( \frac{a}{b} - \frac{b}{a} \right) \sin \psi d\Phi,$$

gdzie:

$a, b$  amplitudy promieni drgających wzdłuż kierunków (1) i (2)

$\psi$  różnica faz promieni drgających w kierunkach (1) i (2) w punkcie  $dz = 0$

Licząc  $d\psi_1$  według wzoru:

$$(6) \quad d\psi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{\kappa_1} - \sqrt{\kappa_2}) dz$$

oraz wykorzystując równania (1), (5) otrzymujemy ostatecznie:

$$(7) \quad \sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\lambda}{2\pi C_\sigma} \left[ \frac{d\psi}{dz} - \left( \frac{a}{b} - \frac{b}{a} \right) \sin \psi \frac{d\Phi}{dz} \right],$$

gdzie:

$$C_\sigma = \frac{C_1 - C_2}{2\sqrt{\kappa_0}}.$$

Wzór (7) zaniedbuje zmianę w fazie wspólną dla rozpatrywanych promieni.

Do dalszych rozważań przyjmujemy trzy układy współrzędnych: układ  $(p, q)$  związany z płaszczyzną polaryzacji światła padającego, układ  $[(1), (2)]$  związany z kierunkami głównymi oraz układ  $(m, n)$  związany z kierunkiem obserwacji. Wówczas w płaszczyźnie rozpraszania  $\zeta = 90^\circ$  natężenie światła rozproszonego wynika ze wzoru [11]:

$$(8) \quad I = K [\sin^2 \beta + \sin 2\alpha \sin 2(\alpha - \beta)(1 - \cos \psi)],$$



$K$  stała zależna od natężenia światła i własności rozpraszających ośrodka (wzór 3)

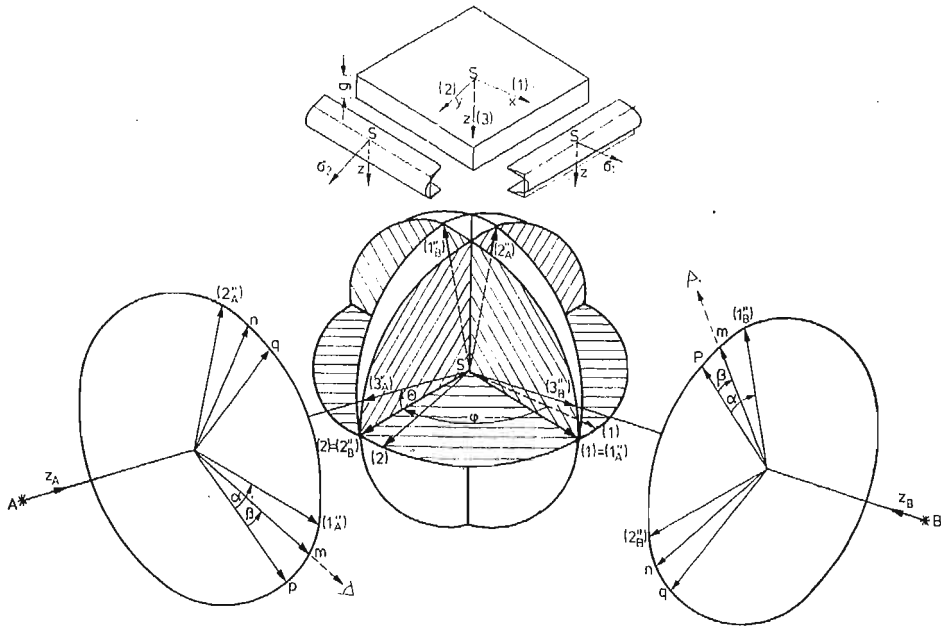
$\alpha$  kąt między układami  $(p, q)$  a  $[(1), (2)]$

$\beta$  kąt między układem  $(p, q)$  a układem  $(m, n)$

Dla kąta  $\beta = 0^\circ$  i  $\alpha = 45^\circ$  wzór (8) upraszcza się do równania:

$$(9) \quad I = K(1 - \cos \psi)$$

i wówczas  $I = 0$  dla  $\psi = 2\pi m$ ,  $I = I_{\max}$  dla  $\psi = (2m-1)\pi$ . Znajdując punkty ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ) na drodze  $z$  w których  $I = 0$ . Sporządzany wykres  $m = m(z)$ .



Rys. 1

Jeżeli amplitudy  $a$  i  $b$  (wzór 7) są sobie równe lub  $\psi$  jest całkowitą wielokrotnością długości fali, lub  $\frac{d\Phi}{dz}$  jest bardzo małe to wspólnie z zależnością  $\frac{d\psi}{dz} = 2\pi \frac{dm}{dz}$  wzór (7) przyjmuje postać

$$(10) \quad \sigma_1 - \sigma_2 = S_\sigma \frac{dm}{dz},$$

gdzie:

$$S_\sigma = \frac{\lambda}{C_\sigma}.$$

W przypadku gdy kierunek padania promienia nie pokrywa się z kierunkiem głównym (3) (rys. 1) powyższe równania obowiązują dla kierunków wtórnych (1'') (2'') (3'').<sup>2)</sup> Należy zaznaczyć, że obserwacja światła w płaszczyźnie rozpraszania pozwala na wyzna-

<sup>2)</sup> Kierunki wtórne określa padająca wiązka światła. Jeden z nich pokrywa się z kierunkiem padającej wiązki światła pozostałe dwa są do niej prostopadłe. Naprężenia w kierunkach wtórnych otrzymujemy z transformacji naprężeń głównych na kierunki wtórne.

czenie kierunków wtórnych. W punktach ( $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ ) w których  $I = 0$  [wzór (8), (9)] kierunki te tworzą kąt  $45^\circ$  z kierunkiem obserwacji.

Analizując naprężenia w hartowanych płytkach szklanych przyjmujemy:

$$(11) \quad \begin{aligned} \sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{zx} &= 0, \\ \int_0^g \sigma_x dz &= \int_0^g \sigma_y dz = 0. \end{aligned}$$

Zakładamy stałość kierunków głównych w całym polu naprężeń czyli

$$(12) \quad \frac{d\Phi}{dz} = 0.$$

Przykład skośnego przeswietlania (tzw. „podwójny ukos”) przedstawia rys. 1. Kierunki główne (1), (2), (3) pokrywają się z przyjętym układem współrzędnych  $x, y, z$ .

Wiązka światła liniowo spolaryzowana pada na model pod kątem  $\Theta$  w pierwszym przypadku z kierunku  $A$  którego rzut na płaszczyznę  $(xy)$  tworzy kąt  $\varphi$  z kierunkiem głównym (1) zaś w drugim przypadku z kierunkiem  $B$  tworzącym odpowiednio kąt  $\varphi - 90^\circ$ . Kierunek wtórny ( $3'_A$ ) lub ( $3'_B$ ) pokrywa się z kierunkiem padającej wiązki światła odpowiednio  $A$  lub  $B$ , płaszczyzna kierunków wtórnych [(1' $_A$ ), (2' $_A$ )] lub [(1' $_B$ ), (2' $_B$ )] pokrywa się z odpowiednią płaszczyzną rozpraszania  $\zeta = 90^\circ$ .

W płaszczyźnie kierunków wtórnych [(1' $_A$ ), (2' $_A$ )] lub [(1' $_B$ ), (2' $_B$ )] odmierzamy kąty  $\alpha = 45^\circ$  i  $\beta = 0^\circ$  [rys. 1, wzory (8) i (9)] względem polaryzacji padającej wiązki światła.

Celem określenia wtórnych naprężeń głównych  $\sigma'_j$  ( $j = 1, 2, 3$ ), dokonujemy transformacji z kierunków głównych (1), (2), (3) na kierunki wtórne (1' $_A$ ), (2' $_A$ ), (3' $_A$ ) i (1' $_B$ ), (2' $_B$ ), (3' $_B$ ) poprzez kierunki (1'), (2'), (3') (rys. 1) według wzoru

$$(13) \quad \sigma'_j = \sum_{i=1}^3 \sigma_i a_i^2$$

Współczynniki  $a_i$  obliczamy mnożąc wyznaczniki macierzy transformacji.

$$(14) \quad \begin{aligned} (1) \begin{bmatrix} (1'_A) \\ (2'_A) \\ (3'_A) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin\Theta & \cos\Theta \\ 0 & -\cos\Theta & -\sin\Theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ -\cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ (1) \begin{bmatrix} (1'_B) \\ (2'_B) \\ (3'_B) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\sin\Theta & 0 & \cos\Theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\cos\Theta & 0 & -\sin\Theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ -\cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Wzór (13) łącznie z zależnościami (10) i (14) pozwala zapisać

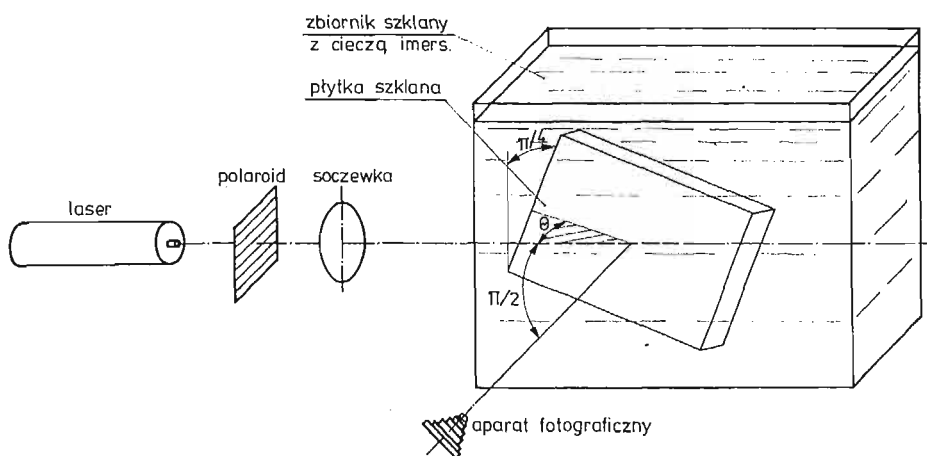
$$(15) \quad \begin{aligned} \sigma'_{1A} - \sigma'_{2A} &= [\sigma_2 \cos^2\varphi + \sigma_1 \sin^2\varphi] - [\sigma_3 \cos^2\Theta + (\sigma_1 \cos^2\varphi + \\ &+ \sigma_2 \sin^2\varphi) \sin^2\Theta] = S_\sigma \frac{dm_A}{dz_A}, \\ \sigma'_{1B} - \sigma'_{2B} &= [\sigma_3 \cos^2\Theta + (\sigma_2 \cos^2\varphi + \sigma_1 \sin^2\varphi) \sin^2\Theta] - [\sigma_1 \cos^2\varphi + \\ &+ \sigma_2 \sin^2\varphi] = S_\sigma \frac{dm_B}{dz_B}. \end{aligned}$$

Oznaczając  $\frac{dm_A}{dz_A} = m'_A$ ,  $\frac{dm_B}{dz_B} = m'_B$  oraz uwzględniając założenia (11) otrzymujemy po przekształceniu równania (15):

$$(16) \quad \sigma_{1,2} = S_\sigma \left[ \pm \frac{m'_A + m'_B}{2(1 + \sin^2\theta)(1 - 2\sin^2\varphi)} + \frac{m'_A - m'_B}{2\cos^2\theta} \right].$$

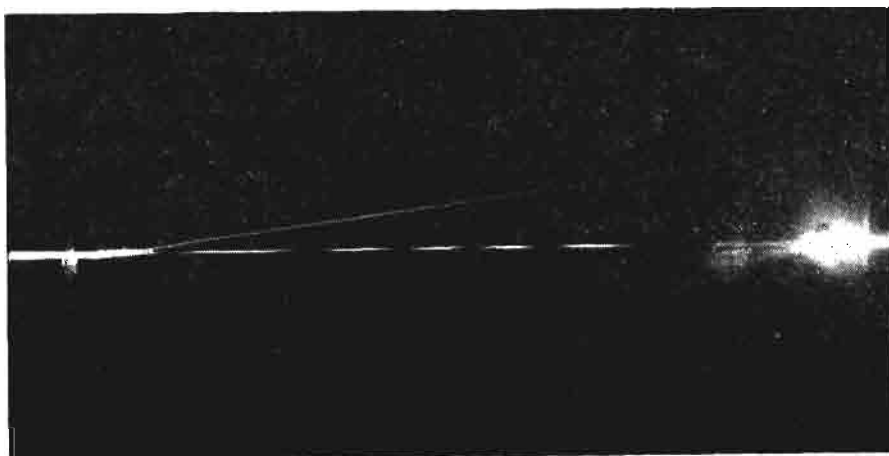
#### Stanowisko do badań

Przedmiotem badań były płytki szkła hartowanego sodowo-wapniowego produkcji krajowej o wymiarach  $0,08 \times 0,08 \times 0,006$  [m]. Jako źródło światła zastosowano laser He—Ne o mocy około  $5 \cdot 10^{-3}$  [W] i długości fali  $\lambda = 6328 \times 10^{-10}$  [m].

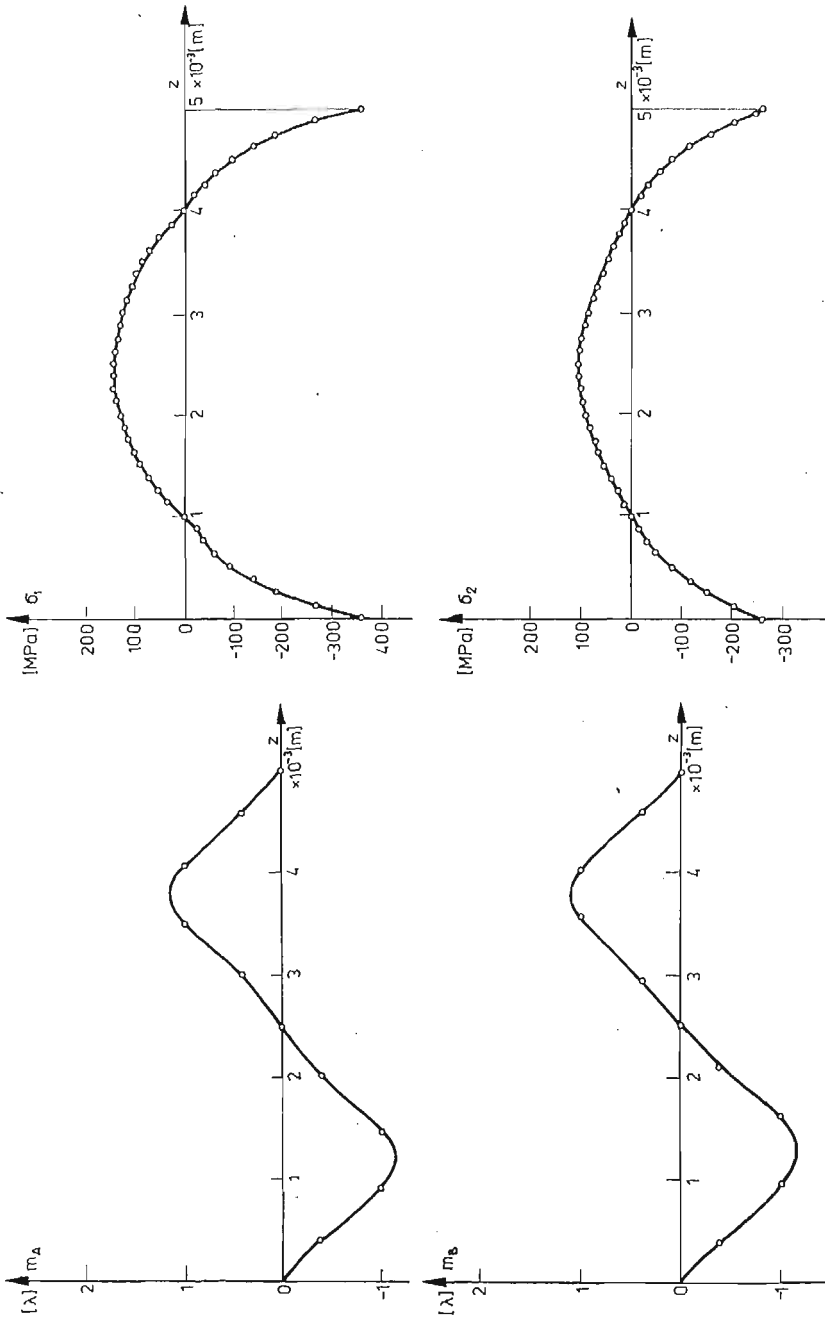


Rys. 2

Rejestrację prążków światła rozpraszanego dokonano aparatem Exakta z obiektywem Tessar o ogniskowej 0,05 [m] i jasności 2,8 na błonie fotograficznej Forter o czułości 23 DIN. Czas naświetlania — około 60 [s] dla zastosowanej przysłony 5,6. Schemat stanowiska przedstawia rys. 2.



Rys. 3



Rys. 4

Na okrągłych tarczach tego samego gatunku szkła wyznaczono elastoptyczny współczynnik materiałowy  $S_e$ , który dla użytej długości fali światła wynosi  $S_e = 260,5 \cdot 10^3 \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$ .

#### Wyniki badań

Obraz otrzymanych prążków światła rozpraszanego przedstawia rys. 3. W oparciu o uzyskany w dwóch prostopadłych kierunkach obraz prążków światła rozpraszanego sporządzono wykres względnego opóźnienia obu składowych wektora świetlnego w długościach fali wzdłuż grubości płytki (rys. 4a).

Znajdując konwencjonalną metodą obraz izoklin wyznaczono kierunek naprężenia  $\sigma_1$ . Kierunek ten tworzy kąt  $\varphi = 30^\circ$  z rzutem kierunku padającej wiązki światła na płaszczyznę  $(x, y)$  (rys. 1). Dla kąta  $\varphi = 30^\circ$  i  $\Theta = 11^\circ$  otrzymujemy według zależności (16):

$$(17) \quad \sigma_{1,2} = 135500(m'_A - m'_B) \pm 250900(m'_A + m'_B).$$

Wyrażenia  $m'_A$ ,  $m'_B$  wyznaczamy różniczkując wykresy z rys. 4a. Zależności naprężeń głównych  $\sigma_1, \sigma_2$  w funkcji grubości płytki przedstawiono na rys. 4b.

#### Dyskusja otrzymanych wyników i ocena błędów

Większą dokładność wykresów względnego opóźnienia obu składowych wektora świetlnego w funkcji drogi uzyskać można stosując kompensator na wejściu wiązki światła w badany element [8], [11]. Wówczas względne opóźnienie promieni w danym punkcie modelu mierzone rzędem prążka  $m$  winno być pomniejszone o  $\Delta m$  prążków wywołanych działaniem kompensatora.

W opracowaniu wyników przyjęto założenie, iż kierunki naprężeń głównych wzdłuż drogi światła przechodzącego przez model nie zmieniają się. Błąd wynikający z takiego założenia można zmniejszyć zwiększając kąt padania  $\Theta$  przez co jednak uzyskuje się zagęszczenie prążków i ich obserwacja wymaga zastosowania mikrofotometru.

W technice ukośnego prześwietlania zakładamy, że rozkład naprężeń wzdłuż drogi światła (tzw. drogi pozornej) jest taki sam, jak wzdłuż grubości płytki. Rzeczywista droga światła zależna jest od współczynnika załamania, który nie jest stały i zmienia się w materiale w zależności od poziomu naprężeń [10], [7]. Rejestracja za pomocą aparatu fotograficznego powoduje pozorne skrócenie długości drogi światła [3]. Błąd względny tym spowodowany można wyznaczyć ze wzoru

$$(18) \quad \frac{\Delta b}{b} = \sin^2 \Theta \left[ \frac{n \cdot \cos \Theta}{(1 - n^2 \sin^2 \Theta)^{\frac{1}{2}}} - 1 \right],$$

gdzie:

$b$  długość drogi w szkle

$\Delta b$  skrócenie pozorne

$n$  współczynnik załamania w szkle.

## Wnioski

Przedstawione rezultaty mają charakter badań rozpoznawczych. Niemniej wydaje się, że w wyniku udoskonalenia techniki pomiarów metoda ta może być interesująca jeśli idzie o laboratoryjne a w przyszłości i techniczne określenie jakości szkła hartowanego.

Praca została zrealizowana w ramach prac badawczych wykonywanych z inicjatywy i pod kontrolą Komitetu Mechaniki Wydziału IV PAN.

## Literatura cytowana w tekście

1. A. ACLOGUE, C. GUILLEMET, *Method for the Photoelastic Measurement of Stresses in Equilibrium in the Thickness of a Plate* — Proc. Stress Analysis Conf., Inst. of Phys., Delft 1956, 71 - 76.
2. A. S. ARGON, *A New Method for the Measurement of Residual Stresses in Tempered Glass* — MIT Masters Thesis, 1953.
3. S. BATESON, J. W. HUNT, D. A. DALBY, N. K. SINHA, *Stress Measurements in Tempered Glass Plates by Scattered Light Method with a Laser Source* — Bull. Am. Ceram. Soc. 45 (1), (1966).
4. Y. F. CHENG, *A Scattered Light Photoelastic Method of the Determination of Tempered Stresses in Aircraft Windshields* — Boeing Sci. Res. Lab., Scattle, Washington, April 1967.
5. M. M. FROCHT, *Photoelasticity*, John Wiley and Sons., 1948.
6. H. T. JESSOP, *The scattered Light method of exploration of stresses in two — and three-dimensional models* — Vol. 2 september 1951 British Journal of Applied Physics.
7. A. A. LEBEDER, *Bul. Acad., Sci, USSR Phys. Ser.* 5 (4) (1940).
8. S. MAZURKIEWICZ, *O metodzie światła rozproszonego w elastooptyce*, Czas. Techn. Z 2M 1977 r.
9. S. MAZURKIEWICZ, J. T. PINDER, *Photoelastic Isodynes: A New Type of Stress Modulated Light Intensity Distribution*. Mech. Res. Com. 4 (4), 1977.
10. J. T. PINDER, N. K. SINHA, *On the Studies of Residual Stresses in Glass Plates*. Experim. Mech. March 1971.
11. J. T. PINDER, P. STRAKA, *Response of the Integrated Polariscopes*. Journ. of Strain Anal. 8 No. 1. 1973.
12. N. K. SINHA — *Stress State in Tempered Glass Plate and Determination of Heat — transfer Rate*. Experim. Mech. January 1978.
13. ENCYKLOPEDIA FIZYKI — Państwowe Wydawnictwo Naukowe rok 1979.

## Резюме

РАССЕЯНИЕ СВЕТА ПРИ КОСОМ ПРОСВЕЧИВАНИИ В ПРИМЕНЕНИИ  
К АНАЛИЗУ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗАКАЛЕННОМ СВЕТУ

В работе представлены физические законы, а также геометрические зависимости описывающие явление рассеяния в случае косоугольного просвечивания. Применяя косоугольное просвечивание в двух перпендикулярных направлениях и используя законы вынужденного двупреломления, можно определить перераспределение главных напряжений вдоль толщины пластинки закаленного стекла.

Приведена схема установки и результаты эксперимента, а также описание найденных погрешностей.

## S u m m a r y

SCATTERING OF LIGHT IN OBLIQUE INCIDENCE IN APPLICATION FOR  
ANALYZING STRESSES IN TEMPERED GLASS

In the work have been shown physical laws and geometrical dependences describing the phenomenon of oblique incidence scattering. Using oblique incidence in two perpendicular directions and applying the birefringence laws, principal stresses along the thickness of the tempered glass were found.

The scheme of device, results of the experiment and discussion of errors are given.

POLITECHNIKA KRAKOWSKA  
INSTYTUT MECHANIKI  
I PODSTAW KONSTRUKCJI  
MASZYN

*Praca została złożona w Redakcji dnia 22 lutego 1979 r.*

---





## POMIAR ODKSZTAŁCEŃ PLASTYCZNYCH METODĄ MORY<sup>1)</sup>

JOCHEN NAUMANN (KARL-MARKS-STADT)

Przedstawione opracowanie daje przegląd prac, przeprowadzonych w NRD od 1966 roku, głównie na Politechnice w Karl-Marx-Stadt, poświęconych badaniom pól odkształceń plastycznych przy zastosowaniu metody mory.

### 1. Podstawy metody mory

Metoda mory jest jedną z kilku polowych metod badania odkształceń szczególnie nadającą się do badania pól odkształceń plastycznych. Metoda ta polega na nakładaniu obrazu siatki odkształconej (siatki SO<sup>2)</sup>) na obraz siatki wzorcowej SW<sup>3)</sup> [2]. W pracy [3] wyprowadzono najogólniejsze związki pomiędzy parametrami siatek, położeniem prążków mory i gradientami przemieszczeń dla dowolnego pola odkształceń. Obecnie zajmiemy się tylko, praktycznie najważniejszym, szczególnym przypadkiem jakim jest metoda izotet, gdzie w nieznieskształconym stanie, siatka przedmiotowa i wzorcowa są jednakowe pod względem położenia i geometrii.

W metodzie izotet, prostopadła, do linii siatki, składowa wektora przemieszczeń jest stała wzdłuż prążka mory. Szczególnie proste zależności otrzymuje się wtedy, jeśli do pełnego określenia stanu odkształcenia zostanie użyta jako siatka przedmiotowa SO siatka kratowa, której linie zorientowane są równoległe do osi współrzędnych.

Dla składowych przemieszczeń  $u_1$  i  $u_2$  odnośnie ustalonego w przestrzeni, kartezjańskiego, prawoskrętnego układu  $x_1, x_2$  w sensie Eulera wynikają znane związki

$$(1) \quad u_1 = n_1 \cdot p \quad u_2 = n_2 \cdot p$$

gdzie  $n_1$  i  $n_2$  oznaczają rzędy obu rodzin prążków mory. Z równania (1) wynika dla gradientu przemieszczeń  $u_{ij}$ :

$$(2) \quad \begin{aligned} u_{1,1} &= p \frac{\partial n_1}{\partial x_1}, & u_{1,2} &= p \frac{\partial n_1}{\partial x_2}, \\ u_{2,1} &= p \frac{\partial n_2}{\partial x_1}, & u_{2,2} &= p \frac{\partial n_2}{\partial x_2}. \end{aligned}$$

<sup>1)</sup> Praca stanowi rozszerzenie referatu przedstawionego na VIII Sympozjum Doświadczalnych Badań w Mechanice Ciała Stałego.

Warszawa 4-6 września 1978

<sup>2)</sup> Siatka SO — siatka naniesiona na obiekt, która ulega odkształceniu.

<sup>3)</sup> Siatka SW — siatka wzorcowa.

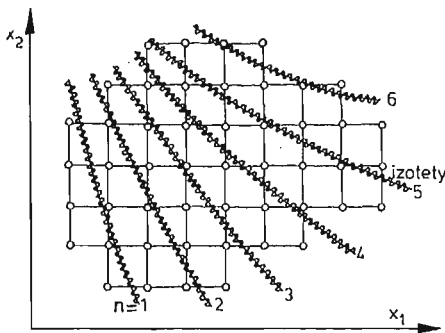
Dla skończonych deformacji miarą jest tensor odkształcenia Almansiego:

$$(3) \quad a_{ij} = \frac{1}{2} (u_{ij} + u_{ji} - u_{k,i} \cdot u_{k,j}),$$

który dla małych gradientów przemieszczeń przechodzi w ogólnie znany tensor przemieszczenia  $\varepsilon_{i,j}$

$$(4) \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}), \quad \text{dla} \quad |u_{i,j}| \ll 1.$$

Metoda mory daje pełne informacje o polu przemieszczeń jednakże wymaga dokładnej metody obliczeniowej. Dla prowadzenia analizy wyników badań korzystne jest przeprowadzenie dyskretyzacji obszaru odkształconego za pomocą siatki kwadratowej (Rys. 1), gdzie jedynie w punktach przecięcia (węzłach) obliczane są wszystkie interesujące wielkości jak naprężenia, odkształcenia itp. Jako wartości mierzone muszą przy tym być dane punkty przecięcia izotet z płaszczyznami  $x_1 = \text{const}$  i  $x_2 = \text{const}$ . Według doświadczeń autora ta metoda dyskretyzacji okazała się przydatna do numerycznego różniczkowania krzywych przemieszczeń typu  $u_1(x_1, x_2 = \text{const})$  ich lokalnej aproksymacji w otoczeniu



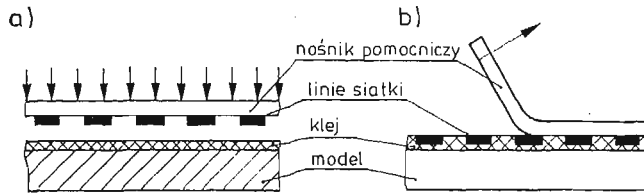
Rys. 1. Dyskretyzacja odkształconego obszaru za pomocą siatki kwadratowej

węzła przez wyrażenie analityczne (parabolę kwadratową i sześcienną funkcję Splina), przy czym krzywa łącząca punkty o znanym rzędzie izotet musi posiadać koniecznie charakter wyrównujący, ale nie może być krzywą interpolowaną. Ponieważ istnieje zazwyczaj duża liczba punktów pomiarowych jak również stosuje się tu technikę dyskretyzacji, zaleca się przetwarzanie wartości mierzonych przeprowadzić z pomocą komputerów.

## 2. Technika doświadczalna

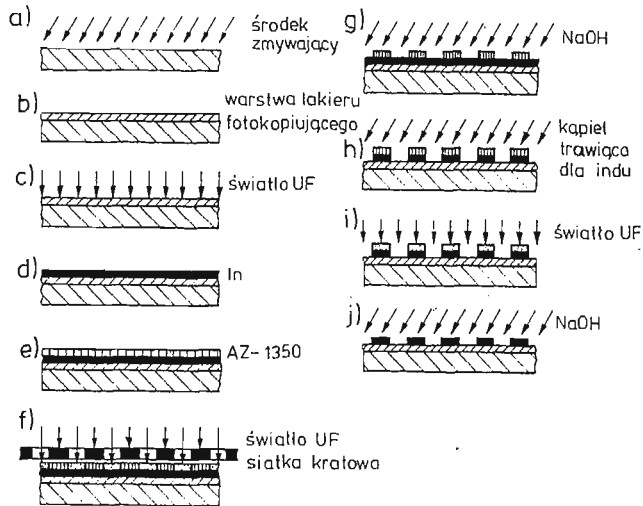
Procedura nanoszenia na obiekt badany siatki przedmiotowej SO, która ulega odkształceniu razem z modelem (elementem konstrukcyjnym) nastęrcza największej kłopotów. Poniżej podano opis metody, która bazuje na uprzednio przedstawionej przez Zandmana technice nanoszenia siatki (rys. 2). Oddzielnie przygotowane siatki są następnie naklejane na powierzchnię modelu. Zdecydowanymi zaletami tej metody są: oddzielenie techniki kopiowania siatek od procesu nanoszenia siatek i nieduże wymagania odnośnie przygotowania powierzchni modelu lub konstrukcji.

Siatki SO mogą być wykonane na drodze procesu fotolitograficznego. Główna zasada polega na trawieniu metalicznych warstw napylnych w próżni, przy czym osłony z emulsji fotograficznej zapewniają selektywne działanie kąpieli trawiącej (Rys. 3). Do wykonywania tych prac potrzebne jest specjalne laboratorium. Pokazaną na rys. 3 techniką



Rys. 2. Technika nanoszenia siatki

- a) proces klejenia
- b) zdejmowanie nośnika pomocniczego po utwardzeniu kleju

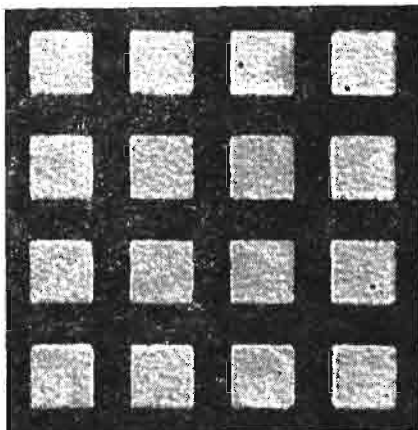


Rys. 3. Tok postępowania w celu wytworzenia siatki SO (nanoszonej na obiekt)

- a) Oczyszczenie nośnika pomocniczego (folia poliestrowa, podłoże-film ORWO 180  $\mu\text{m}$ , hostaphan 125, melinex 100  $\mu\text{m}$ ) w roztworze alkilosulfonianu, oplukanie wodą destylowaną.
- b) Powlekanie warstwą ujemnego lakieru fotokopiującego na grubości 0,3  $\mu\text{m}$ .
- c) Naświetlanie wszystkich warstw.  
Cienka warstwa lakieru bezpośrednio na nośniku pomocniczym gwarantująca dokładne przeniesienie siatki (6).
- d) Napylenie próżniowe indem (grubość 200  $\mu\text{m}$ ) przedtem oczyszczenie powierzchni przez wyżarcie
- e) Powlekanie 0,5  $\mu\text{m}$  grubą warstwą pozytywnego lakieru fotokopiującego (Shipley AZ-1350).
- f) Naświetlanie lampą rtęciową wysokociśnieniową, błony fotograficznej przy użyciu siatki kratowej w próżniowej kopioramie.
- g) Wywoływanie w 0,5% ługu sodowym, 10s.
- h) Częściowe wytrawianie warstwy indu:  
kąpiel trawiąca dla indu:  
siarczan amonowy 0,75 g  
kwas azotowy (konc.) 15 ml  
woda destylowana 250 ml
- i) Naświetlanie osłony.
- j) Usunięcie osłony przez wywołanie.

można bez trudności wykonać siatki do 100 linii/mm. Dalsze, dokładniejsze wskazówki o wytwarzaniu i kopiowaniu siatek dla doświadczalnej analizy odkształceń metodą mory podano w pracy [7].

Rys. 4 pokazuje przeniesioną siatkę kratową. Jako kleje stosowane są nierozpuszczalne tworzywa wieloskładnikowe jak: żywice epoksydowe, poliestry, polimetakrylany, poliuretany. Jeśli mają być mierzone duże odkształcenia, wymaga się aby kleje posiadały



Rys. 4. Nanoszona na obiekt siatka kratowa (50 linii/mm). Długość krawędzi kwadratu siatki wynosi około 15  $\mu\text{m}$

konsystencję od lepko-sprężystej do gumopodobnej. W badaniach w świetle odbitym należy ponadto zabarwić na czarno klej w celu absorpcji światła pomiędzy punktami siatek. Poniżej zostanie przytoczonych kilka przykładów wypróbowanych klejów:

Klej o konsystencji twardej, sprężystej  $|\epsilon| < 3\%$

Pomocniczy nośnik siatki może być usuwany w temperaturze pokojowej

Żywice epoksydowe Epilox np. Epilox EGK 19

(VEB Leuna-Werke) EGK 106

Klej polimeryzujący do szkła organicznego (PMMA) Kalloplast R

(VEB Spezialchemie Leipzig)

Klej o konsystencji ciągliwej  $|\epsilon| < 50\%$

Nośnik pomocniczy powinien być usuwany dopiero po ochłodzeniu próbki do  $-30^\circ\text{C}$

Żywica epoksydowa Epilox EGK 106 100 m.cz.

Plastyfikator Thioplast G3

(VEB Chemiewerk Greiz-Dörlau) 225 m.cz.

Utwardzacz DMP 30 Trój-2,4,6-  
(dwumetyloaminometylo) fenol 11 m.cz.

Barwnik czerń arabska B

(VEB fabryka farb Wolfen) 8 m.cz.

Rys. 5 pokazuje siatkę, która może być bez uszkodzenia poddana dużym odkształceniom postaciowym.

Dla obserwacji efektów mory należy na odkształconą wraz z podłożem siatkę SO nałożyć siatkę wzorcową SW. Siatka SW powinna być siatką liniową, aby powstała tylko

jedna rodzina prążków mory. Znakomicie nadają się jako siatki wzorcowe kopie o osnowie z drobnoziarnistego fotograficznego materiału srebro-żelatynowego. Poniżej podano kilka przykładów materiałów fotograficznych przydatnych do kopiowania siatek:

Płyty: Płyta holograficzna LP2 (8)

Płyta holograficzna LP3

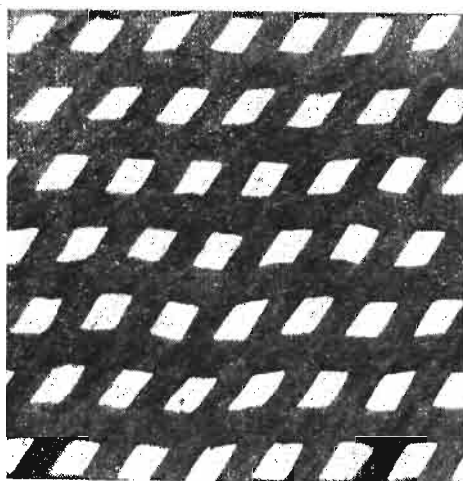
Płyta ORWO LO2

Fototechniczna płyta FU5

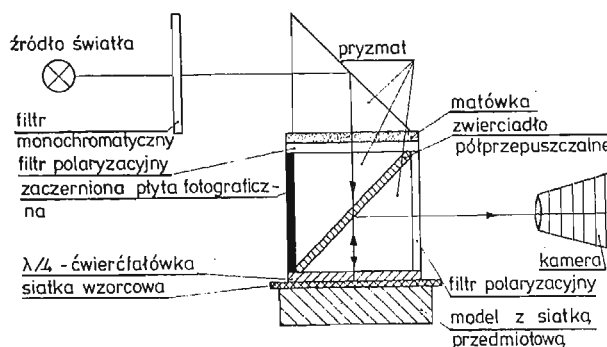
Filmy: Kreskowe i siatkowe filmy reprodukcyjne na stałym podłożu poliestrowym (0,10 mm lub 0,18 mm grubości)

np.: Film dokumentacyjny DK5

Film fototechniczny FU 5



Rys. 5. Powiększenie odkształconej kratowej siatki indowej (25 l/mm) poddanej odkształceniu postaciowemu



Rys. 6. Stanowisko doświadczalne do fotografowania obrazów mory w świetle odbitym.

Wszystkie elementy układu są uszczelnione. Między siatką SO i siatką SW znajduje się ciecz imersyjna (olej silikonowy)

Obydwa filtry polaryzacyjne są skrzyżowane, ćwierćfalówka jest ustawiona pod kątem  $45^\circ$  do płaszczyzny polaryzacji. Do kamery przechodzą tylko te promienie, które dwukrotnie biegną przez ćwierćfalówkę i których płaszczyzna drgań w następstwie tego została obrócona o  $90^\circ$

Przy badaniach w świetle odbitym refleksy na powierzchniach granicznych zmniejszają kontrast obrazu mory, zapobiec temu może zastosowanie specjalnego układu optycznego, którego schemat pokazano na rys. 6.

Do wykonywania fotografii obrazów mory są przydatne aparaty fotograficzne, lustrzanki jednoobiektywowe, małego i średniego formatu i filmy ORWO NP 15.

Do odczytania wartości mierzonych nadają się szczególnie układy do pomiaru dwu współrzędnych np. produkcji (VEB Carl Zeiss Jena) układ z cyfrowym wskaźnikiem położenia i dziurkarką.

### 3. Przykłady zastosowania metody mory do badań pól odkształceń

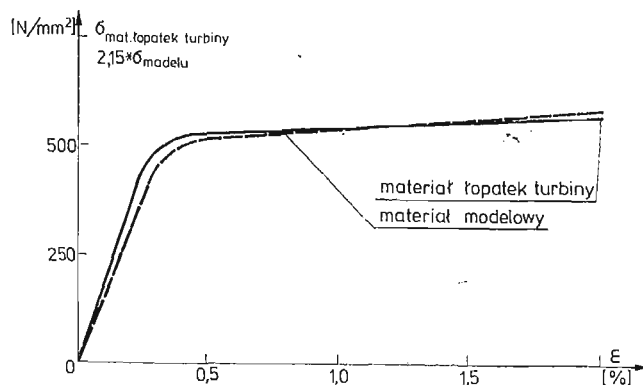
Przy pomiarze odkształceń plastycznych można rozróżnić trzy zasadnicze grupy zagadnień.

- Badanie nośności elementów konstrukcyjnych lub konstrukcji w zakresie sprężysto-plastycznym lub plastycznym.
- Analiza plastycznego płynięcia materiału w procesach kształtowania lub przecinania.
- Badanie szczególnych efektów materiałowych w zakresie plastycznym przy prostym obciążeniu zewnętrznym.

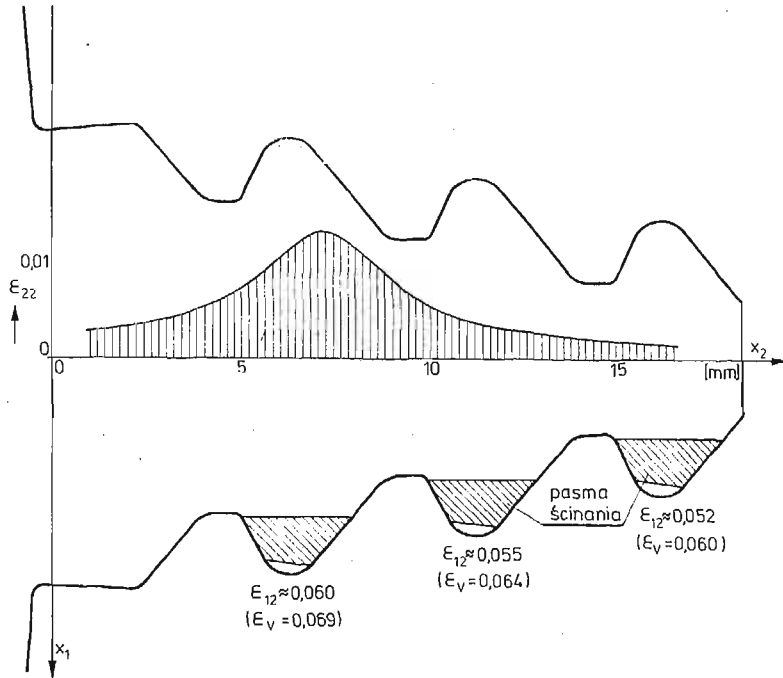
Poniżej zostaną przedstawione pojedyncze przykłady wyników badań dla wymienionych grup zagadnień.

3.1. Nośność tarczy turbiny. Łopatki turbiny są połączone z tarczą turbiny zamkiem jodełkowym. Obciążenie siłą masową oraz wysoka temperatura w czasie pracy (od 500 do 600°C) stawiają tym połączeniu wysokie wymagania wytrzymałościowe. Doświadczalna analiza nośności zamka jodełkowego przy zastosowaniu metody mory została przeprowadzona przy następujących założeniach upraszczających:

- Zastąpiono obciążenie siłą masową poprzez statyczne obciążenie czterech sąsiadujących łopatek.
- Symulowano odkształcenia tarczy turbiny w podwyższonej temperaturze, prowadząc badania modelu w temperaturze pokojowej.

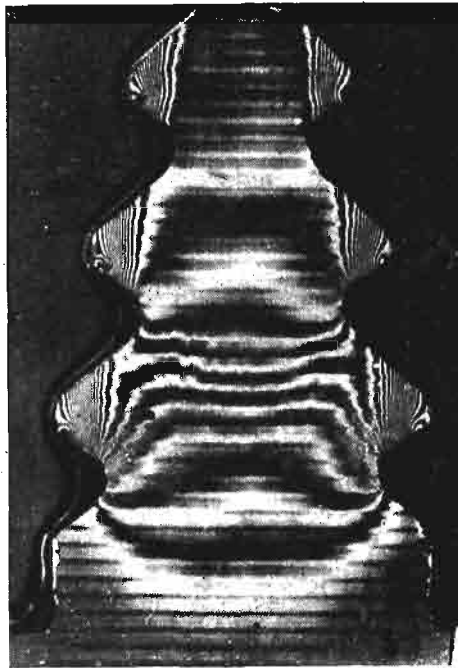


Rys. 7. Wykres  $\sigma - \epsilon$  materiału łopatek turbiny i materiału modelu. Materiał łopatek: żaroodporny stop niklowy EI 437B (60 ST 5632-61),  $\dot{\epsilon} = 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,  $T = 500 - 600^\circ\text{C}$  Materiał modelowy: Al Zn Mg 1F26  $\dot{\epsilon} = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$



Rys. 8. Pole izotet po odciążeniu

Rysunek przedstawia zamek jodełkowy tarczy turbiny, sąsiednie łopatki są usunięte. Wyniki pomiarów wskazuje rys. 9. Siatka SO: indowa liniowa siatka o gęstości 100 linii/m naklejona na model przy użyciu kleju z plastyfikowanej żywicy epoksydowej (patrz rys. 2). Siatka wzorcowa: płyta holograficzna LP2 100 linii/mm

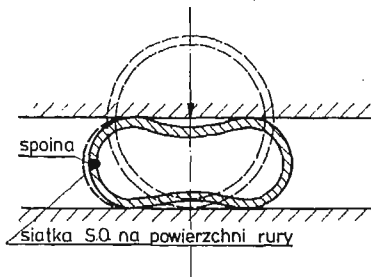


Rys. 9. Plastikzne odkształcenia zamka łopatki (opracowanie rysunku 8)

Charakterystyki sprężyste materiałów modelu i materiału turbiny przedstawiono na rys. 7.

Aby móc obserwować rozwój stref plastycznych wymagane jest stopniowe obciążenie modelu. Rys. 8 pokazuje typowe pole izotet u podnóża zamka jodełkowego tarczy turbiny przy wysokim obciążeniu. Ilościowe dane pola przemieszczeń przedstawiono na rys. 9. W zakresie sprężystym maksymalne naprężenia występują w dnach karbów między gałęziami jodełki zamka. Nośność graniczna połączenia jest jednak ograniczona przez ścięcie gałęzi.

**3.2. Pomiar wydłużeń względnych spawanych rur stalowych.** Dla cienkościennych rur spawanych próba ich rozplaszczania jest ważną i łatwą do przeprowadzenia próbą kontroli (rys. 10). Za pomocą metody mory może być określony rozkład odkształcenia  $\epsilon$ , w otoczeniu spoiny.



Rys. 10. Próba rozplaszczania rur

Sprężystość nośnika pomocniczego siatki pozwala bez trudności (odpowiednio do rys. 2) nanieść siatkę SO na powierzchnię walcową rury. Jako siatka SW służy ta sama siatka utrwalona na filmie.

Dla tego zadania metoda mory okazała się szczególnie przydatna ze względu na swoje unikalne właściwości rejestracji dużych odkształceń dla bardzo małych długości pomiarowych (rys. 11).

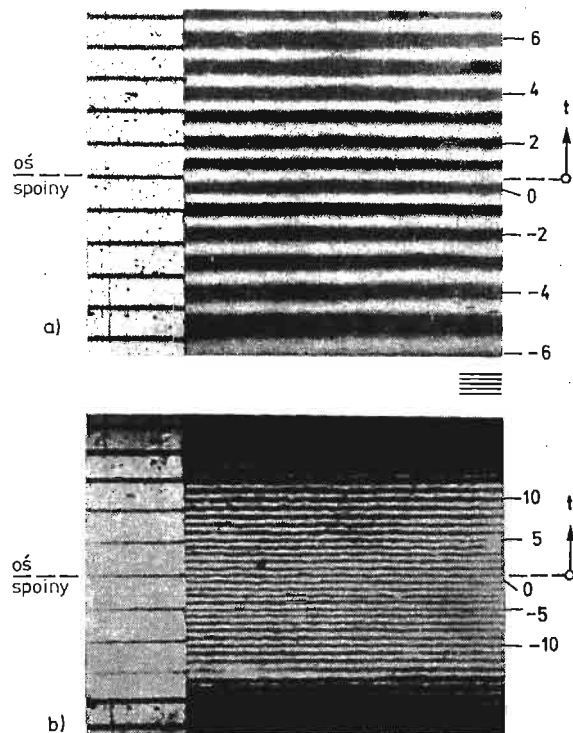
**3.3. Czujnik tensometryczny.** Bardzo przydatne np. do pomiaru odkształceń plastycznych w ramach prób pęknięcia zbiorników ciśnieniowych są czujniki tensometryczne oparte na technice mory. Tego rodzaju czujniki składają się z folii o grubości 1 mm wykonanej z plastyfikowanej żywicy epoksydowej, na którą nanoszona jest siatka. Bezpośrednio potem folie te mogą być naklejone na obiekt nawet w trudnych warunkach polowych bez kosztownego przygotowania powierzchni. Siatka wzorcowa SW przy zakrzywionych powierzchniach może być naniesiona na błonie filmowej (rys. 12).

**3.4. Wyciskanie za pomocą matrycy stożkowej.** Jedną z wielu możliwości stosowania metody mory jest pomiar dużych odkształceń plastycznych zachodzących w trakcie procesów tłoczenia. Doświadczalnie-teoretyczna metoda dostosowana do tego celu pozwala na określenie pól odkształceń i naprężeń wewnątrz materiału (11, 12, 13). Brak miejsca nie pozwala na podanie dokładniejszych danych. Niemożliwe jest badanie przestrzennych stanów naprężeń i odkształceń, w przekroju analizowanym muszą być spełnione następujące warunki odnośnie pola prędkości i tensora naprężeń.

(5)

$$v_i = (v_1 v_2 0)$$





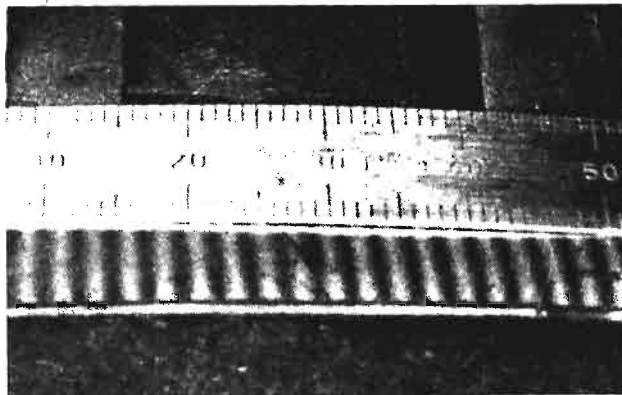
Rys. 11. Prążki mory w otoczeniu spoiny. Rura  $40\text{ mm} \times 2,5\text{ mm}$  (ze stali St. 35), indowa siatka liniowa o gęstości 25 linii/mm;

— — — oś spoiny

Odległość między dwiema kreskami podziałki wynosi 1 mm

a) odległość płyt obciążających przed spłaszczeniem

b) odległość płyt obciążających po spłaszczeniu



Rys. 12. Wskazania czujnika rastrowego na autoklawie po odciążeniu. Siatka — 6 linii/mm, odkształcenie około 7%

$$(6) \quad \dot{\epsilon}_{ij} = \begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_{11} & \dot{\epsilon}_{12} & 0 \\ \dot{\epsilon}_{12} & \dot{\epsilon}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\epsilon}_{33} \end{Bmatrix}$$

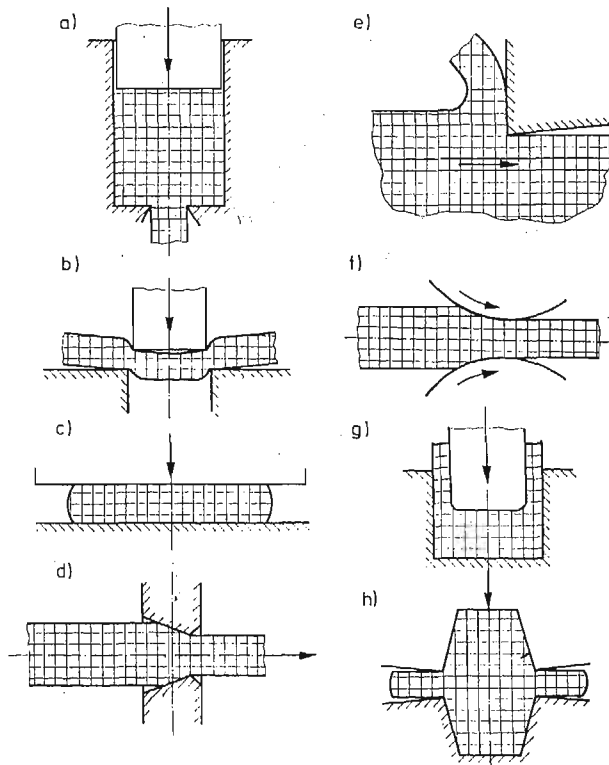
$$(7) \quad \dot{\sigma}_{33} \leq 0, \quad \sigma_{13} = \sigma_{23} = 0$$

gdzie  $v_1$  oznacza wektor prędkości

$\dot{\epsilon}_{ij}$  tensor prędkości odkształcenia

$\sigma_{ij}$  tensor naprężeń.

Możliwe jest użycie w pewnych przypadkach dzielonych próbek do badania procesu płynięcia. Płaszczyznami podziału są płaszczyzny  $x_1 - x_2$ . Równania (5) do (7) obejmują szereg technicznie ważnych i teoretycznie interesujących przypadków osiowosymetrycz-

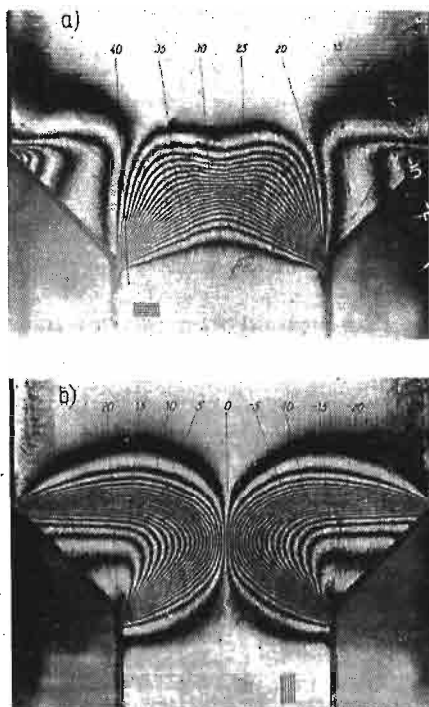


Rys. 13. Przykłady procesów kształtowania, które mogą być analizowane opisaną tu metodą:

- a) tłoczenie
- b) cięcie
- c) spęczanie
- d) ciągnienie
- e) proces obróbki skrawaniem
- f) walcowanie
- g) wyciskanie przeciwbieżne
- h) formowanie matrycowe

nego płaskiego płynięcia. Przykłady takich badań podano na rys. 13. Metodyka doświadczalna wymaga podjęcia następujących kroków:

1. Wstawienia podzielonego półfabrykatu do matrycy prasy. Doprowadzenie procesu płynięcia aż to takiego stanu, który ma podlegać badaniu.
2. Demontaż odkształconych połówek półfabrykatu. Naniesienie siatki kratowej na płaszczyznę podziału.
3. Ponowne umieszczenie półfabrykatu w matrycy prasy. Kontynuacja procesu tłoczenia wg założonego programu z możliwością przerywania procesu co określony odcinek czasu  $\Delta t$ .



Rys. 14. Pole izotet przy płaskim wyciskaniu współbieżnym

Materiał modelowy: eutektyczny stop cynowo-olowiowy (wysokoplastyczny)

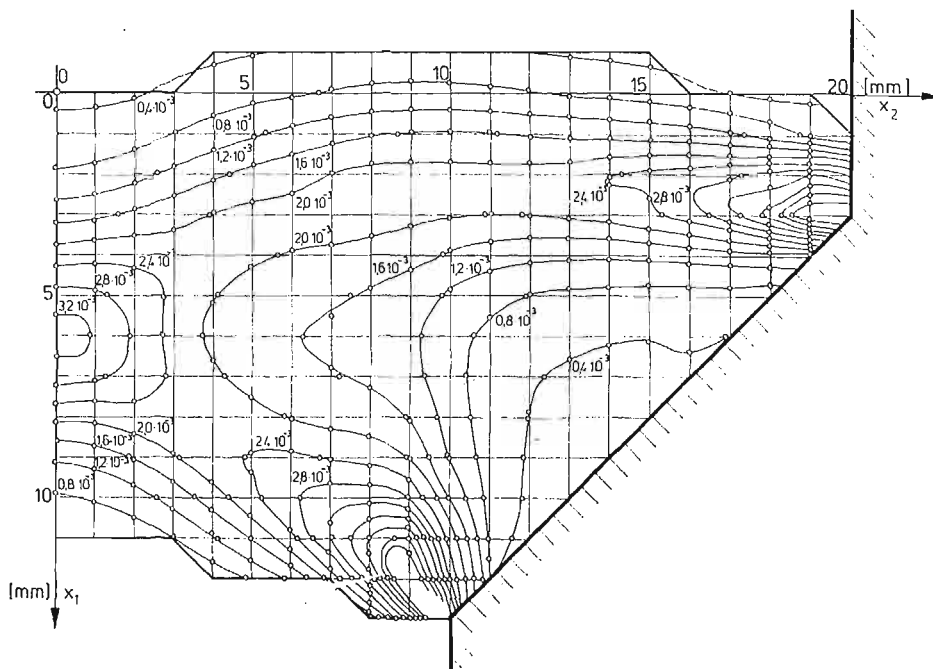
Siatka SO: kratowa siatka indowa o 25 liniach/mm naklejana przy użyciu plastyfikowanej żywicy epoksydowej, siatka wzorcowa: LP2,

szerokość bloku: 40 mm, szerokość pasma: 20 mm, przedział drogi stempla: 0,8 mm

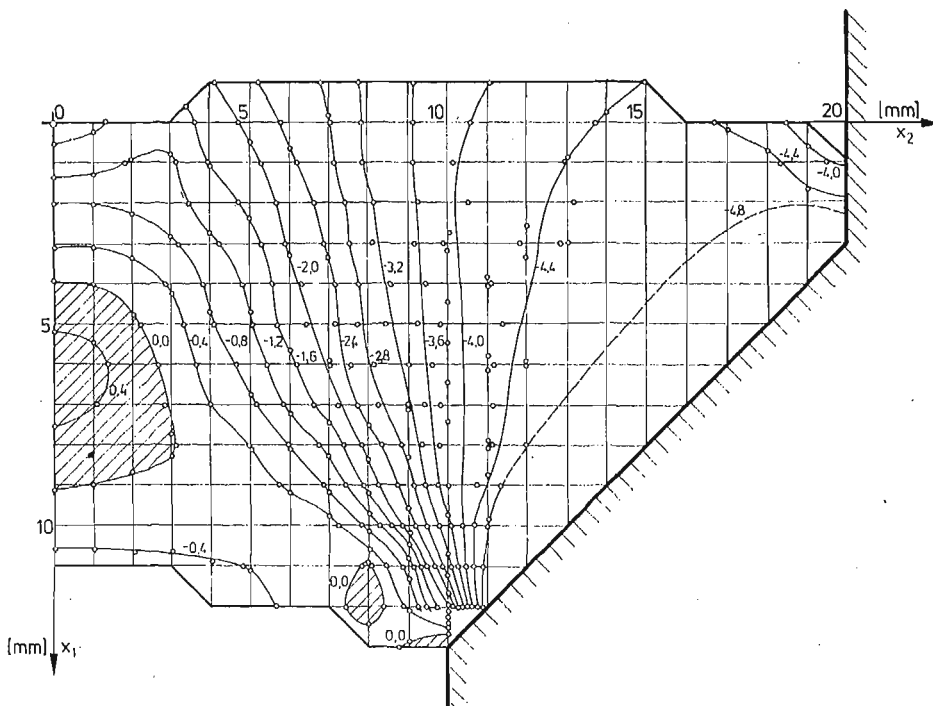
a) przemieszczenia w kierunku tłoczenia

b) przemieszczenia w kierunku poprzecznym

4. Wyjęcie wytłoczki z odkształconą siatką SO i pomiar pól przemieszczeń dla tych przedziałów czasowych  $\Delta t$  za pomocą metody izotet. Tego sposobu postępowania można użyć dla zadań stacjonarnych jak również dla procesów niestacjonarnych. Analiza tak otrzymanych pól izotet (rys. 14) dostarcza wszystkich danych o stanie odkształceń i naprężeń w strefie plastycznej. Przykłady pokazują rys. 15 i 16, na których również jak na rys. 1 daje się wyodrębnić obszar plastyczny. W oblicze-



Rys. 15. Pole zmian prędkości przemieszczeń (parametr w  $s^{-1}$ )



Rys. 16. Pole składowej naprężenia  $\sigma_{11}$  (parametr w  $kp/mm^2$ ). W środku pasma i na końcu matrycy występują naprężenia rozciągające

niach naprężenia posłużono się następującą zależnością materiału lepkosprężystego

$$S_{ij} = \frac{1}{3} \sqrt{3} \cdot \sigma \left( \sqrt{\frac{4}{3} I_2} \right) \cdot \frac{\dot{\epsilon}_{ij}}{\sqrt{I_2}},$$

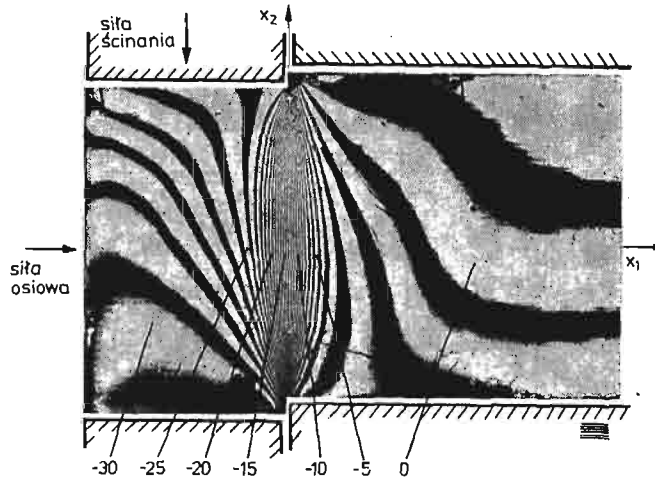
gdzie

$S_{ij}$  — dewiator naprężenia

$$I_2 = \frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \text{ przy czym } \sigma \left( \sqrt{\frac{4}{3} I_2} \right) = \sigma(\dot{\epsilon}),$$

przedstawia związek między naprężeniem  $\sigma$  i prędkością odkształcenia  $\dot{\epsilon}$  w jednoosiowym stanie naprężeń [12].

3.5. Ciętle. Proces przygotowania dokładnych półfabrykatów do wyciskania przeciwbieżnego na zimno wymaga jednoczesnego działania siły osiowej w czasie cięcia prętów. Pole izotet podane na rys. 17 powstało w trakcie ścinania dzielonej cylindrycznej próbki,



Rys. 17. Pole izotet plastycznego odkształcenia podczas cięcia

Materiał: 100 Cr 6 (ciągniony na zimno).

Średnica pręta 21 mm;

Siatka SO: kratowa indowa siatka liniowa o gęstości 25 linii/mm;

Siatka wzorcowa: LP2; głębokość nacięcia  $\approx 1,2$  mm;

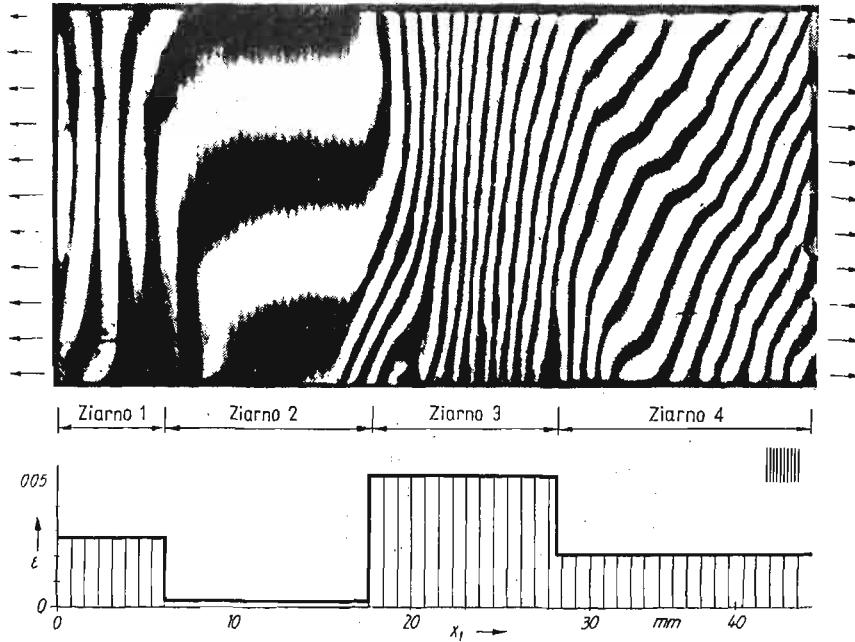
Siła osiowa: 353 N; siła tnąca: niemożliwa do określenia

w której stan naprężenia w strefie ścinania został wywołany przez jednocześnie działającą siłę ściskającą o kierunku osiowym. Użycie stali w miejsce podatnego materiału modelowego stawia siatce przedmiotowej SO bardzo wysokie wymagania. Przede wszystkim należy dobrać względnie twardy klej, aby zdołał wytrzymać wysokie naciski występujące w płaszczyźnie podziału symetrii badanego elementu.

3.6. Odkształcenie polikrystalicznej próbki rozciąganej. Plastyczne odkształcanie metalu polikrystalicznego przedstawia proces bardzo skomplikowany fizycznie, który nie jest dostatecznie opisany przez rozwiązania równań różniczkowych mechaniki kontinuum.

Metoda mory umożliwia pomiar niejednorodnych pól przemieszczeń, które powstają już przy prostym obciążeniu zewnętrznym w materiale o takiej strukturze.

Jako przykład pokazano na rys. 18 odkształcenie pręta rozciąganego wykonanego z czystego aluminium, w którym w obszarze badań znajdują się cztery kolejne ziarna. Tą skrajnie gruboziarnistą strukturę otrzymano na drodze rekrytalizacji. Pole izotet uwidacznia, że pojedyncze ziarna na skutek różnej orientacji odkształcają się odmiennie. Częściowo zauważalne jest kształtowanie się pasm poślizgu i grup pasm poślizgu.



Rys. 18. Odkształcenie gruboziarnistej próbki rozciąganej.

Materiał: czyste aluminium Al 99,7; szerokość: 20 mm, grubość: 1 mm; siatka przedmiotowa: indowa siatka kratowa o gęstości 25 linii/mm, siatka wzorcowa SW: LP2; średnie naprężenie rozciągające:  $22 \text{ N/mm}^2$



Rys. 19. Pole izotet zginanej próbki po odciążeniu

Materiał: Stal H60-3 (St 45/60); odległość podpór 80 mm, wysokość: 20 mm, grubość: 10 mm; Siatka przedmiotowa: kratowa siatka indowa o gęstości 50 linii/mm, siatka wzorcowa: LP2; trwale ugięcie po odciążeniu: około 0,2 mm

3.7. **Plastyczne odkształcenie w otoczeniu pęknięcia.** Badania procesów mechaniki ośrodków ciągłych w otoczeniu wierzchołka pęknięcia stawiają metodom pomiarowym doświadczalnej mechaniki ciała stałego szczególnie wysokie wymagania. Dotyczy to również metody mory.

Metoda izotet daje użyteczne wyniki dla próbek z karbami, przy użyciu siatek SO o gęstości linii 100 l/mm. Jeśli ma być analizowane interesujące z punktu widzenia mechaniki pęknięcia powstawanie stref plastycznych i początek rozwoju pęknięcia, zbyt mała czułość klasycznej metody izotet sprawia trudności. Ten stan rzeczy pokazany jest na rys. 19, który przedstawia pole przemieszczeń po odciążeniu próbki zginanej z karbem i pęknięciem (15). Przekrój poniżej pęknięcia jest już w pełni uplastyczniony. Lokalne odkształcenia tej strefy powodują przemieszczenia sztywnych połówek próbki względem podpór. Ilościowa analiza tego rodzaju badań, przy już względnie dużych odkształceniach przedstawiona jest w pracach [16] i [17].

#### 4. Perspektywy rozwoju metody mory.

Przedstawiona technika badawcza — metoda izotet, przystosowana jest do rozwiązywania różnych zadań. Szczególnie szerokie jej stosowanie umożliwia opracowana, łatwa w użyciu, metoda nanoszenia siatek. Dalszy rozwój metody będzie przebiegał w kierunku zwielokrotnienia liczby prążków mory, co pozwoli na podwyższenie czułości metody.

#### Literatura cytowana w tekście

1. J. HEYMANN, *Stand und Entwicklung der experimentellen Festkörpermechanik an der Sektion Maschinen-Bauelemente*. Wiss. Z. d. Techn. Hochsch. Karl-Marx-Stadt **20** (1978) 5, 641 - 650.
2. W. VOCKE, K. ULLMANN, *Experimentelle Dehnungsanalyse (Dehngitter- und Moiréverfahren)*. VEB Fachbuchverlag Leipzig 1974.
3. J. NAUMANN, *Anwendung des Moiréverfahrens zur experimentellen Analyse von Umformvorgängen*. In: R. KREISSIG, K.-D. DREY, J. NAUMANN, *Methoden der Plastizität — Anwendung auf Umformprobleme*. VEB Fachbuchverlag Leipzig 1980.
4. W. PRAGER, *Einführung in die Kontinuumsmechanik*. Birkhäuser Verlag Basel und Stuttgart 1961.
5. F. ZANDMAN, *The Transfer-Grid Method, a Practical Moiré Stress Analysis Tool*. *Experimental Mechanics* **7** (1967) 7, 19A - 22A.
6. W. GEHMLICH, *Verfahren zur Herstellung übertragbarer metallischer Raster, insbesondere für die Dehnungsmeßtechnik*, DDR-Patentschrift Nr. 92640, WP G 03 f, 5/22.
7. J. NAUMANN, *Herstellen und Kopieren von Rastern für die experimentelle Dehnungsanalyse mit dem Moiréverfahren*. Wiss. Z. d. Techn. Hochsch. Karl-Marx-Stadt **18** (1976) 3, 273 - 285.
8. J. HEYMANN, R. MEYER, *Beitrag zur Herstellung von Phasenrastern für Dehnungsmessungen mit dem Moiréverfahren*. Wiss. Z. d. Techn. Hochsch. Karl-Marx-Stadt **14** (1972) 5, 647 - 568.
9. J. NAUMANN, B. JANTSCHKE, F. PELZ, *Deformationsmessungen mit dem Moiréverfahren an widerstandsgeschweißten Stahlrohren*. *Schweißtechnik* **26** (1976) 11, 514 - 516.
10. K. ULLMANN, *Anwendung des Moiréeffektes zur experimentellen Dehnungsanalyse*. In: *Beiträge zur Spannungs- und Dehnungsanalyse VI*. Akademie-Verlag Berlin 1970, 59 - 112.
11. J. NAUMANN, *Experimentelle Untersuchung eines starr-plastischen Deformationszustandes mittels des Moiré-Verfahrens*. Wiss. Z. d. Techn. Univers. Dresden **21** (1972) 1, 196 - 200.

12. J. NAUMANN, *O primenenii metoda muara dlja issledovanija vjazkoplastičeskogo tečenija*. Vestnik Moskovskogo Universiteta. Serija I. Matematika, mehanika 1976, No. 5, 88 - 96
13. R. KUMMER, *Untersuchung zur Weiterentwicklung des Verfahrens Fließscheren von Stahl*. Dissertation A. Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt 1978.
14. J. HEYMANN, W. TOTZAUER, *Issledovanie plastičeskich deformacij v polikristallach metodom muara*. Izv. vysš. učebn. zavedenij. Mašinstroenie 1977, No. 4, 18 - 22.
15. R. BAUER, *unveröffentlichtes Manuskript*.
16. E. SCHICK, *Untersuchungen zur Dehnungsverteilung in belasteten Dreipunktbiegeproben*. Wiss. Z. d. Techn. Hochsch. Magdeburg 20 (1976) 4, 429 - 433.
17. E. SCHICK, *Untersuchungen zur Dehnungsverteilung in CT-Proben*. Wiss. Z. d. Techn. Hochsch. Magdeburg 21 (1977) 8, 887 - 890.
18. B. JANTSCHKE, *Optische Grundlagen und Versuchstechnik der Moiréstreifenmultiplikation im Durchlicht*. Wiss. Z. d. Techn. Hochsch. Karl-Marx-Stadt 18 (1976) 3, 265 - 271.
19. J. HEYMANN, B. JANTSCHKE, *Kombination der Moiréstreifenmultiplikation mit dem spannungsoptischen Erstarrungsverfahren*. In: Tagung Festkörpermechanik. Festigkeitslehre und Materialverhalten. Dresden 1976. VEB Fachbuchverlag Leipzig 1976, Band A, 1 - 12.
20. J. NAUMANN, B. JANTSCHKE, *Eine Theorie zur Moiréstreifenmultiplikation bei zwei überlagerten Gittern*. Wiss. Z. d. Techn. Hochsch. Karl-Marx-Stadt 19 (1977) 3, 305 - 316.
21. B. JANTSCHKE, R. MEYER, *Dehnungsmessung an undurchsichtigen Bauteilen durch Kopplung der Moiréstreifenmultiplikation und Gitterabformverfahren*. Wiss. Beiträge d. Ingenieurhochschule Zwickau 4 (1978) 1, 62 - 66.
22. B. JANTSCHKE, J. NAUMANN, *Intensitätsverteilung bei der Beugung an Gittern für die Moiréstreifenmultiplikation*. Wiss. Z. d. Techn. Hochsch. Karl-Marx-Stadt 21 (1979) 3.

## Р з з ю м е

## ИЗМЕРЕНИЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ МЕТОДОМ МУАРА

Представлен обзор работ сделанных в ГДР от 1966 года, главным образом в Техническом Институте в Карл-Маркс-Штат, посвященных исследованиям полей пластических деформаций методом муара.

## S u m m a r y

## MEASUREMENTS OF PLASTIC DEFORMATIONS BY MEANS OF MOIRE METHOD

A survey of investigations conducted in the German Democratic Republic since 1966, mainly in the Institute of Technology in Karl-Marx-Stadt, devoted to examination of plastic deformation fields by means of moirè method.

POLITECHNIKA  
KARL-MARKS-STADT  
NRD

Z języka niemieckiego  
tłumaczyła  
Joanna Kruszyńska

Praca została złożona w Redakcji dnia 9 marca 1979 r.



WYTRZYMAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA POLIAMIDU 6  
W FUNKCJI CZASU STARZENIA I ZAWARTOŚCI WŁÓKNA SZKLANEGO

MARIAN NOWAK (WROCLAW)

1. Wstęp

Badania zmęczeniowe tworzyw sztucznych, a zwłaszcza na dużej bazie (np.  $10^7$  cykli) są, nawet przy znacznej częstotliwości — bardzo czasochłonne, a minimalna seria pomiarów trwa z reguły 3÷4 miesiące. Zmiana własności mechanicznych tworzyw sztucznych zależy od czasu i sposobu składowania [1] należy więc uznać za konieczne posiadanie informacji jak zmienia się wytrzymałość zmęczeniowa w funkcji czasu. Miarą zmian

Tablica 1. Własności fizyczne i mechaniczne badanych tworzyw [1, 3, 4]

Wskaźniki	T-27	Itamid	
		I-25	I-35
Zawartość włókna szklanego, %	0	25	35
Gęstość, kg/m <sup>3</sup>	$1,13 \cdot 10^3$	$1,32 \cdot 10^3$	$1,41 \cdot 10^3$
Wytrzymałość na rozciąganie $\sigma_r$ , MPa (naprężenie zrywające)	1	72	150
	2	52	100
	3	40	51
Wytrzymałość na zginanie $R_g$ , MPa	1	92	200
	2	35	110
	3	30	65
Moduł sprężystości podłużnej E, MPa	1	2450	6830
	2	720	4030
	3	560	2400
Dopuszczalna temp. pracy ciągłej (max), K	353	358	358
Chłonność wilgoci (65,298), %	3,5	2,3	2,1
Granica zmęczenia $Z_{90}$ , MPa	12,9	24	25

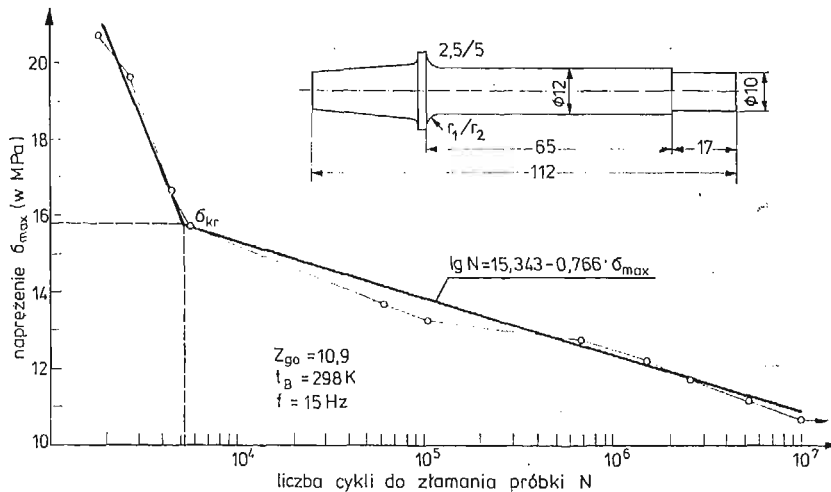
1 — poliamid suchy; 2 — klimatyzowany (65%, 298 K); 3 — mokry (zanurzony w wodzie do nasycenia, 3 mies.); czas starzenia dla  $Z_{90}$  — 10 miesięcy.

własności mechanicznych mogą być różne wskaźniki ( $R_m$ ,  $R_g$ ,  $E$ ), natomiast w zagadnieniach dekohezji zmęczeniowej najbardziej miarodajną będzie granica zmęczenia i wielkości towarzyszące (np. próg czułości  $N_{os}$ , naprężenie krytyczne  $\sigma_{kr}$ ). W literaturze naukowej ocenę własności mechanicznych z uwzględnieniem parametru czasu przeprowadzono dla różnych wskaźników i szerokiej klasy tworzyw. Jednak eksperymenty tego typu dotyczyły obciążeń statycznych [2].

W pracy przedstawiono wyniki badań efektów starzenia wytrzymałości zmęczeniowej dla trzech gatunków poliamidu 6: Tarnamidu T-27 oraz Tarnamidu T-27 wzmocnionego włóknem szklanym w ilości 25% i 35% wagowych (tabl. 1). Określono rolę włókien szklanych w procesie zmęczenia w dwóch aspektach — wytrzymałościowym i czasowym, tzn. wpływ wzmocnienia i czasu starzenia (5÷7 lat) na granicę zmęczenia. Badanie zjawisk starzeniowych, z uwzględnieniem aktualnych tendencji rozwojowych, na przykładzie poliamidu 6 ma wielostronne znaczenie. Po pierwsze poliamid 6 jest szczególnie czuły na warunki przechowywania i klimatyzowania, po drugie — jest szeroko stosowany jako tworzywo konstrukcyjne i po trzecie — szczególnych walorów nabiera jako tworzywo wzmocnione włóknem szklanym [3, 4].

## 2. Metoda oznaczania

Oznaczanie granicy zmęczenia  $Z_{go}$  przeprowadzono sposobem analityczno-wykresnym stosując do konstrukcji wykresów zmęczenia zasadę przegrupowania wyników (rys. 1), metodę statystyczną i metodę statystyczną z ograniczoną bazą oraz metodę mieszaną



Rys. 1. Wykres zmęczenia Tarnamidu T-27 zbudowany metodą przegrupowania (czas starzenia  $\tau_s = 78$  miesięcy;  $t_B$  — temperatura badania, otoczenia)

[5, 6, 7]. Użycie w pomiarach czterech metod ma z jednej strony zapewnić dużą dokładność w oznaczaniu  $Z_{go}$ , a z drugiej — ekonomiczne prowadzenie badań, bez nadmiernego zużycia próbek. Na 12 skonstruowanych wykresach zmęczenia w oparciu o równania

prostych regresji (stąd nazwa sposobu analityczno-wykreślony) cztery z nich wykonano metodą statystyczną, pięć — metodą przegrupowania i trzy — metodą mieszaną (dla dużych naprężeń badano pojedyncze próbki, dla mniejszych,  $\sigma_{\max} < \sigma_{kr}$ , po 3÷4 na danym poziomie naprężenia). Ponadto dla sześciu poziomów naprężeń  $\sigma_{\max}$  stosowano do obliczenia średniej arytmetycznej liczby cykli metodę z ograniczoną bazą [7].

W badaniach przyjęto stosunkowo dużą bazę —  $10^7$  cykli. Rozszerzono w ten sposób pogląd na praktyczne aspekty wytrzymałości zmęczeniowej badanych poliamidów. W pomiarach stosowano cykl wahadłowy, scharakteryzowany przez  $\sigma_a = \sigma_{\max}$ ,  $\sigma_m = 0$  i  $\nu = \sigma_m/\sigma_a = 0$ , o częstotliwości nominalnej  $f = 15$  Hz. Obciążenie próbki — wspornikowe, a wykonanie próbek — metodą wtrysku.

### 3. Starzenie się Tarnamidu T-27

Wśród odmian poliamidu 6 wytwarzanych przez Zakłady Azotowe w Tarnowie (ZAT), Tarnamid T-27 należy do najlepszych ze względu na własności mechaniczne doraźne i może konkurować z produktami zagranicznymi tej klasy do Durethan BK, Ultramid BM, Grilon, Silon, Miramid itp. Niemniej badania własności wytrzymałościowych, zwłaszcza długotrwałych nie są w takim stopniu rozwinięte, jak wymagałaby tego produkcja licznych elementów maszyn z Tarnamidu T-27. Dlatego też określenie efektów starzenia, na bazie wytrzymałości zmęczeniowej, stanowi ważną pozycję w katalogowaniu jego własności użytkowych.

Efekty starzenia zbadano w dwóch etapach. Pierwszy etap — zrealizowany w ciągu roku — obejmował określenie trwałości zmęczeniowej próbek surowych, surowych i klimatyzowanych oraz stabilizowanych w oleju. Wyniki tych pomiarów przedstawiono szczegółowo w pracy [1]. Charakterystycznym zjawiskiem tego etapu starzenia się Tarnamidu T-27 jest gwałtowny spadek trwałości zmęczeniowej (rys. 2).

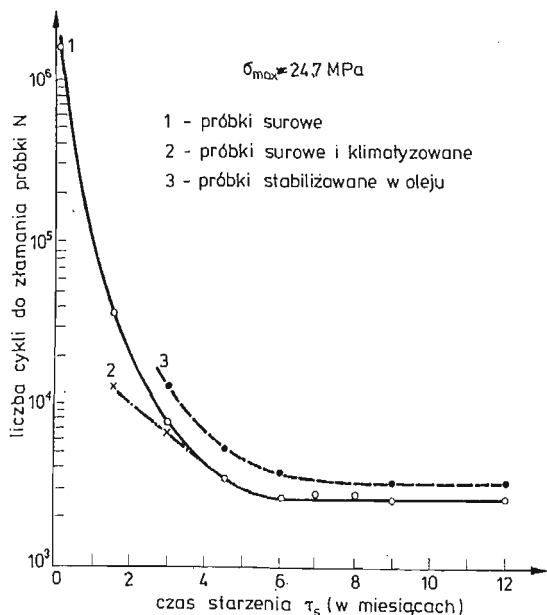
Drugi etap badań realizowano metodą wytrzymałości, tzn. konstruowano wykresy zmęczenia (rys. 1) i w oparciu o założoną bazę ( $10^7$  cykli) określano z równania prostej regresji granicę zmęczenia  $Z_{90}$ . Wyznaczono ją dla czasów starzenia  $\tau_s = 7,48, 78$  i  $84$  miesiące. Z otrzymanych wyników sporządzono wykres „umowna wytrzymałość zmęczeniowa  $Z_{90}$  — czas starzenia  $\tau_s''$  (rys. 3). Wynika z niego że w poliamidzie 6 zachodzą następujące, charakterystyczne zjawiska:

— procesy starzenia Tarnamidu T-27, mierzone wytrzymałością zmęczeniową, nie zatrzymują się po 6 miesiącach, jak to wynika z wykresu trwałości (rys. 2) lecz postępują dalej;

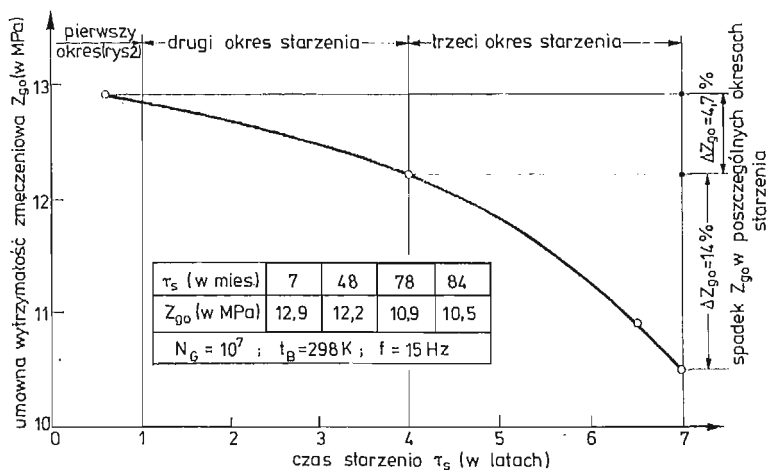
— w okresie 7 lat starzenia Tarnamid T-27 zmniejsza wytrzymałość zmęczeniową  $Z_{90}$  z 12,9 na 10,5 MPa, tj. około 18%;

— starzenie Tarnamidu T-27 przebiega nierównomiernie i zmienia się w trzech okresach:

- a) pierwszy okres — starzenie bardzo intensywne do 6 miesięcy (rys. 2),
- b) drugi okres — starzenie powolne do 4 lat, ze średnią prędkością około 1,6%  $Z_{90}$  rocznie,



Rys. 2. Wpływ starzenia na trwałość zmęczeniową Tarnamidu T-27 [1]



Rys. 3. Umowna wytrzymałość zmęczeniowa Tarnamidu T-27 w funkcji czasu starzenia

c) trzeci okres — starzenie ze zwiększoną prędkością w następnych 3 latach, tj. z prędkością  $4,7\%$   $Z_{gp}$  rocznie,

— optymalnym przedziałem czasu, dla szczegółowych badań wytrzymałości zmęczeniowej Tarnamidu T-27 (np. dotyczących wpływu różnych czynników na  $Z_{go}$ ), z minimalnymi efektami starzenia, jest okres między 6 i 50 miesiącem składowania próbek w warunkach laboratoryjnych.

W literaturze naukowej w zasadzie w sposób wystarczający wyjaśniono mechanizm starzenia się poliamidu 6. Polega on na tym, że w atmosferze otoczenia, zawierającej

agresywne dla poliamidu 6 składniki, tj. wodę i tlen, następuje destrukcja, degradacja i depolimeryzacja makrocząsteczek [8, 9, 10]. Aktywny udział w tych zjawiskach biorą naprężenia wewnętrzne (ich istnienie stwierdzono przez częściowe rozcięcie próbki wzdłuż osi), które mogą bądź osłabić bądź też doprowadzić do zerwania wiązań chemicznych. Pojawienie się wolnych makrorodników sprzyja w większym stopniu rozwojowi procesów utleniania, niż sieciowania. Rola monomeru i frakcji niskocząsteczkowej polegałaby — moim zdaniem — na neutralizacji wolnych, agresywnych makrorodników, a szczególnie intensywnie w okresie indukcyjnym, przypadającym na drugi okres starzenia się Tarnamidu T-27. I dlatego zmiana własności zmęczeniowych w tym okresie przebiega z małą prędkością w porównaniu z okresem trzecim.

Tablica 2. Granica zmęczenia Tarlonu XB i Tarnamidu T-27 na tle zawartości monomeru [1]

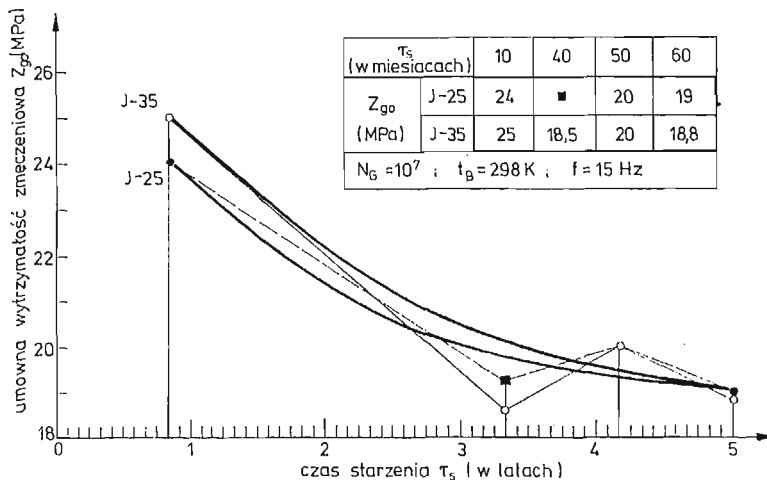
Odmiana poliamidu 6	Zawartość monomeru (%)	Umowna wytrzymałość zmęczeniowa w MPa określona metodą:		
		statystyczną		Probit
		baza $10^6$	$10^7$	$10^6$
Tarlon XB	$\leq 5$	15,6	14,1	15,4
Tarnamid T-27	$\leq 2$	14,2	12,9	14,4
Względna zmiana parametrów, %	-60	-9	-9	-6,5

$t_B = 298 \text{ K}$ ;  $f = 15 \text{ Hz}$ ;  $\tau_s = 7 \text{ miesięcy}$

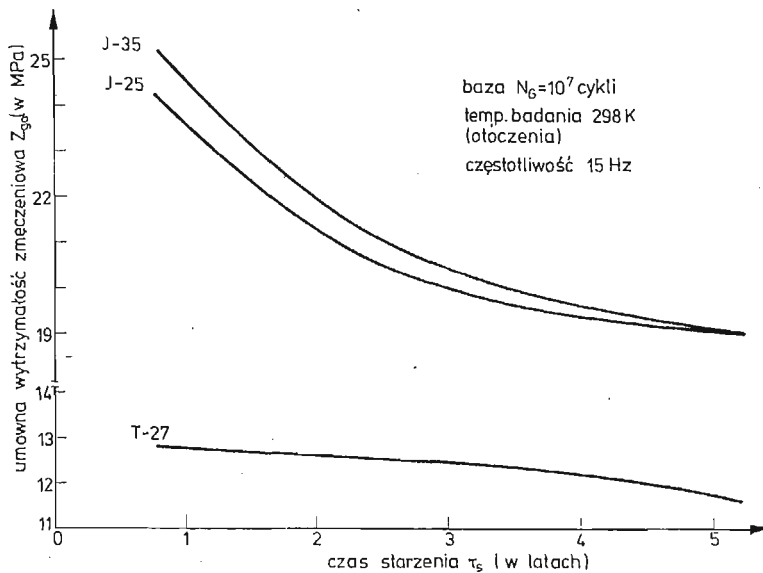
W okresie trzecim zdolności monomeru i frakcji niskocząsteczkowej jako inhibitorów zanikają (wyczerpują się) i wtedy Tarnamid przejawia duże skłonności do przyspieszonego starzenia się. Hipotezę o roli monomeru i frakcji niskocząsteczkowej sformułowano już wcześniej [1], w związku z większą wytrzymałością na zmęczenie Tarlonu XB od Tarnamidu T-27 (tabl. 2), mimo, że Tarlon XB posiada gorsze wskaźniki mechaniczne.

#### 4. Starzenie się Itamidu I-25 oraz I-35

Starzenie Itamidu badano przez 5 lat w następujących okresach — 10, 40, 50 i 60 miesięcy. Próbki, analogicznie jak dla Tarnamidu, przechowywano w warunkach laboratoryjnych (temperatura  $293 \pm 2 \text{ K}$ , wilgotność względna  $30 \div 98\%$ ). W oparciu o wykresy zmęczenia określono  $Z_{g0}$  i zbudowano wykres we współrzędnych „umowna wytrzymałość zmęczeniowa — czas starzenia” (rys. 4). Wynika z niego, że starzenie się Itamidu I-25 i I-35 wyraźnie odbiega od starzenia się Tarnamidu T-27. Różnice te polegają na tym, że po pierwsze — w drugim okresie starzenia (rys. 3 i 4) Itamid I-25 oraz I-35 nie jest jeszcze tworzywem uspokojonym i na ten okres przypada maksimum prędkości starzenia, a więc odwrotnie niż dla Tarnamidu T-27. Prędkość starzenia wynosi  $6\%$   $Z_{g0}$  rocznie



Rys. 4. Umowna wytrzymałość zmęczeniowa Itamidu I-25 oraz I-35 w funkcji czasu starzenia (■ — próba częściowo nieudana — położenie punktu przybliżone)

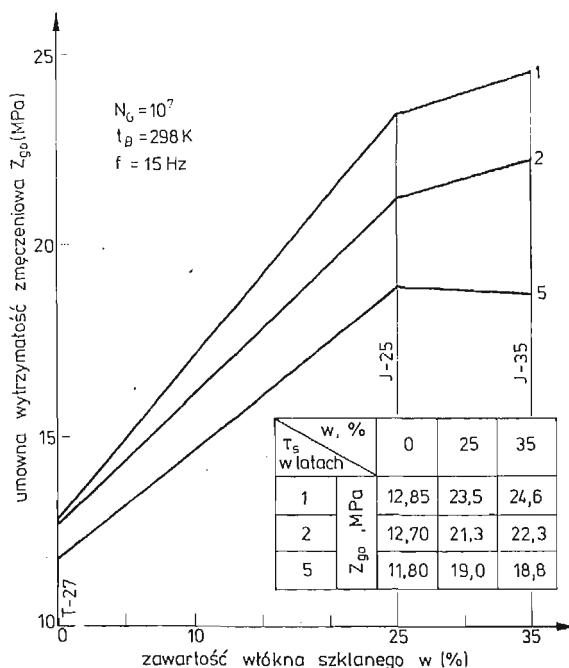


Rys. 5. Umowna wytrzymałość zmęczeniowa Tarnamidu T-27, Itamidu I-25 i I-35 w funkcji czasu starzenia

(w przedziale czasu 1 ÷ 4 lat). I po drugie — podczas gdy po 4 latach Itamid I-25 i I-35 osiąga pewną stabilność pod względem procesów starzenia, to w Tarnamidzie T-27 zjawiska te zachodzą w sposób przyspieszony. Dodatek włókna szklanego bardzo istotnie zmienia kierunek procesów starzenia. Ogólnie wpływa na wzrost prędkości pochłaniania wilgoci z atmosfery, ponieważ włókna szklane działają jak elementy włoskowate. Zbiorcze zestawienie wykresów  $Z_{go} = f(\tau)$  dla badanych poliamidów przedstawiono na rys. 5. Daje on ilościowy i jakościowy pogląd na skalę procesów starzeniowych, zachodzących w ciągu 5 lat, w Tarnamidzie niewzmocnionym i wzmocnionym.

## 5. Wpływ zawartości włókna szklanego na granicę zmęczenia

Technologię produkcji Tarnamidu T-27 wzmocnionego ciętymi, krótkimi włóknami szklanymi opracował Instytut Chemii Przemysłowej w Warszawie [3, 4]. Tam też wykonano próbki do badań zmęczeniowych. W wyniku udanych poszukiwań powstał patent i produkt pod nazwą Itamid I-25 i I-35. Własności mechaniczne wyprodukowanych Itamidów zawiera tablica 1.



Rys. 6. Poglądowe przedstawienie umownej wytrzymałości zmęczeniowej w funkcji zawartości włókna szklanego

Wykres umownej wytrzymałości zmęczeniowej  $Z_{go}$  w funkcji zawartości włókna szklanego (rys. 6) skonstruowano w oparciu o przekroje wykresów  $Z_{go} = f(\tau_s)$  dla  $\tau_s = 1$ ; 2 i 5 lat. Połączenie odpowiednich punktów prostymi ma oczywiście charakter poglądowy. Zasadniczym wnioskiem wynikającym z tego wykresu jest stwierdzenie, że wzmocnianie Tarnamidu T-27 włóknem szklanym jest z punktu widzenia własności zmęczeniowych bardzo korzystne. Powoduje bowiem wzrost granicy zmęczenia  $Z_{go}$ , po pierwszym roku starzenia, o około 80%. Ponadto wykres ten informuje, że dalszy wzrost zawartości włókna szklanego do 35% nie jest już tak korzystny jak w Itamidzie I-25, a po 5 latach starzenia różnice pomiędzy I-25 oraz I-35 zanikają. Biorąc zatem pod uwagę większe zużycie włókien, a częściowo i wtryskarek przy 35% zawartości szkła, należy więc preferować w masowych zastosowaniach Itamid I-25 jako produkt tak samo pełnowartościowy jak Itamid I-35, lecz łatwiejszy w przetwórstwie.

Należy także podkreślić, że wytrzymałość zmęczeniowa Itamidów zależy nie tylko w linii prostej od procentowej zawartości krótkich włókien szklanych, lecz także od zmian

w fizycznej mikrostrukturze tworzywa, wywołanych ich obecnością. Część z ogólnego przyrostu granicy zmęczenia uzyskano w wyniku 12 procentowego wzrostu masowego stopnia krystaliczności  $X_m$  oraz ponad 100 procentowego wzrostu szerokości  $\Delta_{(200)}$  i około 11 procentowego wzrostu grubości  $\Delta_{(020)}$  krystalitu (tabl. 3). Dezintegracja obszaru krystalicznego o wysokiej preferencji szerokości krystalitu nad jego grubością, a więc i dużego udziału w siłach kohezji mostków wodorowych, wymaga doprowadzenia do badanego obiektu większej niż w innych przypadkach ilości energii typu potencjalnego.

Tablica 3. Parametry fizycznej mikrostruktury Tarnamidu T-27 i Itamidu I-35 [11, 12]

Wskaźniki	$X_m$ (%)	$\Delta_{(200)}$ (Å) (szerokość)	$\Delta_{(020)+(220)}$ (Å) (grubość)
Tarnamid T-27	43,3	36,9	41,6
Itamid I-35	48,4	75,4	46,3
Względna zmiana parametrów (%)	12	104	11

$X_m$  — określono metodą Hermansa i Weidingera;  
 $\Delta_{(hkl)}$  — obliczono według wzoru Ruschera na podstawie rentgenogramów Debye'a-Scherrera.

## 6. Wnioski

1. Wytrzymałość zmęczeniowa  $Z_{g0}$  poliamidu niewzmocnionego (Tarnamidu T-27) i wzmocnionego włóknem szklanym (Itamid I-25 i I-35) zależy od czasu naturalnego starzenia.

2. Starzenie się Tarnamidu T-27 można podzielić, w zależności od prędkości przebiegu zjawiska na trzy okresy: I okres do 1 roku, II okres 1 ÷ 4 lat i III okres — powyżej 4 lat.

3. Dodatek włókna szklanego do poliamidu 6 wyraźnie wpływa na procesy starzenia i zmienia kierunek ich przebiegu. W drugim okresie starzenia (1 ÷ 4 lat) spadek granicy zmęczenia  $Z_{g0}$  Tarnamidu T-27 jest bardzo mały, natomiast Itamidu I-25 i I-35 około 4 razy większy. I odwrotnie — w trzecim okresie starzenia (> 4 lat) prędkość starzenia się Tarnamidu wzrasta, a Itamidu maleje.

4. Efekty wzrostu wytrzymałości zmęczeniowej Itamidu I-25 i I-35 związane z ich wzmocnieniem włóknem szklanym, zmniejszyły się po 5 latach starzenia o około 20% w stosunku do stanu odniesienia ( $\tau_s = 10$  miesięcy).

5. Stabilność charakterystyki wytrzymałości zmęczeniowej Itamidu I-25 i I-35, rozumiana jako niezależność  $Z_{g0}$  od czasu składowania, osiąga się dopiero pod koniec drugiego okresu starzenia, tj. po około 3 latach.

6. Starzenie się poliamidu 6 wzmocnionego i niewzmocnionego, mierzone wytrzymałością zmęczeniową, jest procesem ciągłym w zakresie czasu składowania (Tarnamidu T-27 do 7 lat oraz Itamidu do 5 lat).



7. Włókno szklane, dodane do Tarnamidu T-27 w ilości 25%, spowodowało po pierwszym roku starzenia wzrost granicy zmęczenia  $Z_{go}$  o około 80%, natomiast dodane w ilości 35% — o około 90%. A więc względne efekty wzmocnienia wyraźnie zmalały.

8. Po 5 latach starzenia różnice w wytrzymałości zmęczeniowej  $Z_{go}$  pomiędzy Itamidem I-25 a I-35 są już nieistotne. Zatem ze względu na granicę zmęczenia wyrobów w trakcie starzenia oraz warunki przetwórstwa korzystniej jest stosować Itamid I-25.

9. W badaniach zmęczeniowych poliamidu wzmocnionego i niewzmocnionego, w eksploatacji wyrobów z nich wykonanych oraz w porównywaniu wyników pomiarów należy uwzględnić efekty czasu starzenia i ich rolę w procesie dekohezji zmęczeniowej.

#### Literatura cytowana w tekście

1. M. NOWAK, *Wybrane zagadnienia wytrzymałości zmęczeniowej poliamidu stabilizowanego*, Prace Naukowe Instytutu Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, Nr 11 seria — Monografie, 3 (1972), s. 112 - 135.
2. H. HAERKAMP, *Glasfaserverstärkte Kunststoffe*. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1970.
3. W. ZIELIŃSKI, *Itamid — nowe tworzywo konstrukcyjne*, Przegląd Mechaniczny, 4, 32 (1973), s. 114.
4. W. ZIELIŃSKI, *Poliamid 6 wzmocniony włóknem szklanym*, Polimery — Tworzywa Wielkocząsteczkowe 8, 16 (1971) s. 386.
5. M. NOWAK, J. ZAWADZKI, *Wybrane zagadnienia metodyki badań na zmęczenie poliamidów*, VII Sympozjum doświadczalnych badań w mechanice ciała stałego, Warszawa 28 - 29.IX (1976), s. 368.
6. F. GATTO, *L'interpretazione statistica delle prove di fatica*, Alluminio, 6, 24 (1955), s. 543.
7. В. Я. СЕНЦК, *Статистическая обработка результатов усталостных испытаний при ограниченной базе*, Заводская Лаборатория, 3, 33 (1967), стр. 336.
8. W. ALBRECHT, S. CHRZCZONOWICZ, W. CZTERNASTEK, M. WŁODARCZYK, A. ZIABICKI, *Poliamidy*, WNT, Warszawa 1964.
9. M. B. NEJMAN, *Starzenie i stabilizacja polimerów* (tłum. z ros.), WNT, Warszawa 1966.
10. D. EBNETH, *Die Feuchtigkeitsaufnahme von Polyamid*, Der Plastverarbeiter, 3, 15 (1964), s. 149.
11. A. WŁOCHOWICZ, M. NOWAK, J. ZAWADZKI, *Badania strukturalne poliamidu zbrojonego włóknem szklanym*, VI Konferencja NT — Rentgenowska analiza strukturalna w metalurgii i metaloznawstwie Gliwice 1972, s. 132.
12. M. NOWAK, A. WŁOCHOWICZ, *Wpływ stanu cieplnego formy i próbki na trwałość zmęczeniową i strukturę submikroskopową poliamidu — Tarnamidu T-27*, Raport Nr 43. Inst. Materiałoznawstwa i Mech. Technicznej Politechniki Wrocławskiej, 1975.

#### Резюме

#### УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ ПОЛИАМИДА 6 В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВРЕМЕНИ СТАРЕНИЯ И ДОБАВКИ СТЕКЛЯННОГО ВОЛОКНА

Представлены результаты испытания на механическую усталость трёх сортов полиамида 6 — тарнамид Т-27 и тарнамид Т-27, армированный стеклянным волокном в количестве 25% и 35% (итаמיד I-25 и итаמיד I-35). Характерной чертой проведенных экспериментов является определение эффектов старения итамидов в течение пятилетнего периода и тарнамид Т-27 в течение семилетнего периода.

Кроме того, было исследовано влияние содержания стеклянного волокна на усталостную прочность при базе  $10^7$  циклов. Произведён анализ полученных результатов с учётом физической микроструктуры, а также с учётом влияния мономера и макрорадикалов на старение полиамидов.

## Summary

AGEING TIME AND GLASS FIBER CONTENT IN FATIGUE STRENGTH TESTS  
ON POLYAMID 6

In the paper are presented results of fatigue tests performed on three kinds of polyamid 6 ie: Tarnamid T-27, glass reinforced Tarnamid T-27 with 25 and 35 per cent of glass content (Itamid I-25 and Itamid I-35). The determination of ageing effects of Itamids in the period of five years, and Tarnamid T-27 in seven years is the characteristic feature of performed experiments. Besides, the influence of glass content on fatigue limits at  $10^7$  cycles was investigated. The analysis of results taking into account the physical microstructure, and the role of monomer and macroradicals in the process of ageing and fatigue decohesion was carried out.

POLITECHNIKA WROCLAWSKA  
INSTYTUT MATERIAŁOZNAWSTWA  
I MECHANIKI TECHNICZNEJ

*Praca została złożona w Redakcji dnia 29 maja 1978 r.*

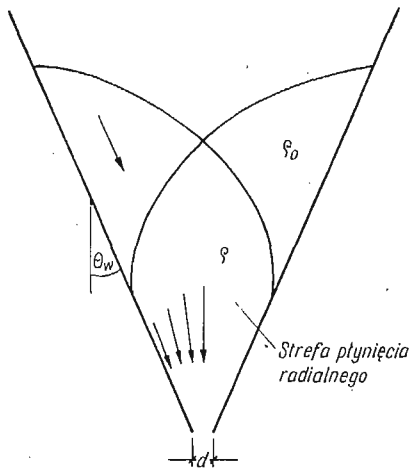
---

## ULTRADŹWIĘKOWA METODA BADANIA GĘSTOŚCI OŚRODKÓW ZIARNISTYCH W PROCESACH DEFORMACJI

EWA DRESCHER, RADOSŁAW MICHAŁOWSKI (WARSZAWA, POZNAŃ)

### 1. Wstęp

Wśród koncepcji praw fizycznych dla ośrodków ziarnistych istnieją związki zakładające występowanie zmian objętości w procesach deformacji [1, 2, 3]. Doświadczalna weryfikacja tych praw wymaga ciągłego pomiaru zmian gęstości ośrodka podczas trwania eksperymentu. Stosowane metody pomiaru gęstości przez pobieranie próbek o nienaruszonej strukturze zawodzą w przypadku badań modelowych gdyż prowadzą do zniszczenia modelu. Metody radiograficzne, jak dotąd, pozwalają na uzyskiwanie wyników wyłącznie o charakterze jakościowym [4, 5, 6].



Rys. 1. Schemat modelu płaskiego kanału klinowego

Wśród problemów rozwiązanych teoretycznie, oczekujących na doświadczalną weryfikację znajduje się przepływ ośrodka ziarnistego przez kanały (zbiorniki, silosy) [7]. Zagadnienie to, ważne z punktu widzenia praktyki składowania ośrodków sypkich takich jak zboże, nawozy sztuczne, cement itp., było punktem wyjścia i powodem opracowania ultradźwiękowej metody pomiaru gęstości ośrodków ziarnistych w dowolnym momencie procesu deformacji.

Metodę ultradźwiękowego pomiaru gęstości zastosowano w doświadczeniach modelowych przepływu piasku przez płaski kanał klinowy (rys. 1). Otrzymane wyniki zmian gęstości w procesie porównano z rozwiązaniem teoretycznym problemu [7].

## 2. Rozchodzenie się fal ultradźwiękowych w ośrodkach ziarnistych

Prędkość propagacji podłużnych fal ultradźwiękowych w ośrodku ziarnistym można przedstawić jako pierwiastek sumy modułu sprężystości ośrodka nieobciążonego  $\kappa_0$ , oraz modułu sprężystości kontaktowej  $\kappa_k$  [8] odniesionych do gęstości ośrodka  $\rho$ :

$$(2.1) \quad c_L = \left( \frac{\kappa_0 + \kappa_k}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}},$$

Szczegółowe omówienie tej zależności w odniesieniu do parametrów fizyko-mechanicznych ośrodków ziarnistych jest zawarte w pracy BIELINSKIEGO, MORINA i NOZDRIEWA [8], dotyczącej prędkości rozprzestrzeniania się fal ultradźwiękowych w tych ośrodkach. Wcześniejsze prace rozważające to zagadnienie to publikacje WHITE'A i SENGBUSCHA [9], CAREWEJ [10] o rozchodzeniu się fal sprężystych w piasku, oraz prace E. MATSUKAWY, A. N. HUNTERA [11], B. O. HARDINA, F. E. RICHARTA [12] i H. BRANDTA [13]. W Polsce badania nad zastosowaniem fal ultradźwiękowych do badań fizyko-mechanicznych własności gruntów prowadzili J. PAŁKA [14], oraz H. GAWDA [15].

Objętościowy moduł sprężystości ośrodka ziarnistego przedstawić można [8, 9] jako sumę objętościowego modułu sprężystości nieobciążonego ośrodka ziarnistego, oraz modułu sprężystości uwzględniającego sprężystość kontaktów pomiędzy ziarnami. Objętościowy moduł sprężystości nieobciążonego ośrodka ziarnistego wyraża się zgodnie z [8, 9] wzorem:

$$(2.2) \quad \kappa_0 = \left( \frac{1-n}{K_s} + \frac{n}{K_f} \right)^{-1},$$

gdzie:

$K_s, K_f$  — moduł sprężystości fazy stałej i ośrodka wypełniającego przestrzeń porów,  
 $n$  — porowatość ośrodka.

W tym ujęciu moduł  $\kappa_0$  określa się jako addytywną wartość sprężystych faz składowych. Gęstość ośrodka ziarnistego wyraża się wzorem:

$$(2.3) \quad \rho = (1-n)\rho_s + n\rho_f,$$

gdzie  $\rho_s$  i  $\rho_f$  oznaczają odpowiednio gęstość fazy stałej i gęstość ośrodka wypełniającego przestrzeń porów. W przypadku gdy ośrodkiem wypełniającym przestrzeń porów jest powietrze wartość  $\kappa_0$  jest znacznie mniejsza w porównaniu z wartością  $\kappa_k$ . BIELINSKI, MORIN, NOZDRIEW [8] podają dla suchego piasku o porowatości 25%  $\kappa_0 = 2 \cdot 10^2$  MN/m<sup>2</sup> podczas gdy wartość  $\kappa_k$  wynosi  $5 \cdot 10^3$  MN/m<sup>2</sup>. W ośrodkach wilgotnych wartości  $\kappa_0$  są większe niż dla ośrodka suchego. Kontaktowa sprężystość wyrażona przez  $\kappa_k$  zależy od wielu parametrów takich jak: porowatość, ciśnienie, sprężyste własności faz składowych, liczba kontaktów między ziarnami.

Warunkiem stosowania teorii zaproponowanej w pracy [8] do obliczania prędkości propagacji fal ultradźwiękowych w suchym piasku i innych ośrodkach ziarnistych jest spełnienie założenia, że wielkość akustycznego ciśnienia propagującej się fali jest mała w stosunku do statycznego ciśnienia w ośrodku. Warunek ten jest spełniony w opisanych niżej badaniach doświadczalnych.

Zakładane mechanizmy propagacji fali akustycznej w ośrodku ziarnistym [8, 9] polegają na przenoszeniu się składowych sił akustycznego ciśnienia od cząsteczki do cząsteczki przez fazę stałą (ziarna piasku), przez fazę wypełniającą przestrzeń porów (w naszym przypadku powietrze) i przez kontakty między cząsteczkami. Wzajemny udział wymienionych mechanizmów propagacji wyrażają pośrednio wartości  $\kappa_k$  i  $\kappa_0$ .

Ponieważ tematem niniejszej pracy jest przedstawienie ultradźwiękowej metody pomiaru gęstości ośrodków ziarnistych poddanych deformacji, bardziej szczegółowe rozważania na temat propagacji fali przez ośrodki ziarniste o różnym stopniu rozrzedzenia, oraz porównanie wyników doświadczeń otrzymanych w pracy z teoretycznymi badaniami BIELINSKIEGO, MORINA i NOZDRIEWA będą przedmiotem osobnej pracy. Ponieważ jednak model i mechanizm propagacji fal ultradźwiękowych przedstawiony w pracy [8] z pewnymi modyfikacjami opisuje otrzymane wyniki doświadczeń przedstawione na rys. 4, 5, autorzy uważają za stosowne podać sposób wyznaczania wartości modułu sprężystości kontaktowej  $\kappa_k$ .

Z rozwiązania zagadnienia kontaktowego Hertza dla zbliżenia dwóch sprężystych kul pod działaniem siły  $P$  i przy założeniu, że zmiany ciśnienia akustycznego w danym momencie wywołują działanie na ośrodek takie jak gdyby działał nieskończenie mały przyrost ciśnienia statycznego, można określić  $\kappa_k$  jako zmianę  $\frac{dP}{dv}$ . Uwzględniając

liczbę kontaktów  $\beta_k$  przypadającą na jedną cząsteczkę, oraz odpowiadającą tej liczbie gęstość  $\Theta$  (wartości statystyczne, por. [8]), a także własności konkretnego ośrodka  $C$ , moduł sprężystości kontaktowej  $\kappa_k$  wyrazi się wzorem:

$$(2.4) \quad \kappa_k = C \left[ \frac{3}{8} \frac{\Theta^2 \beta_k^2 E^2 p}{(1-\mu^2)^2} \right]^{\frac{1}{3}}.$$

Wstawiając (2.2), (2.3) i (2.4) do (2.1) otrzymujemy za [8] wyrażenie na prędkość rozchodzenia się podłużnych fal ultradźwiękowych w ośrodku ziarnistym:

$$(2.5) \quad c_L = \left\{ \frac{\left( \frac{1-n}{K_s} + \frac{n}{K_f} \right)^{-1} + C \left[ \frac{3}{8} \frac{\Theta^2 \beta_k^2 E^2 p}{(1-\mu^2)^2} \right]^{\frac{1}{3}}}{(1-n)\rho_s + n\rho_f} \right\}^{\frac{1}{2}},$$

gdzie:  $\mu$  współczynnik Poissona fazy stałej,

$E$  moduł Younga fazy stałej,

$p$  ciśnienie hydrostatyczne,

$C$  współczynnik zależny od kształtu ziarn i kąta tarcia wewnętrznego.

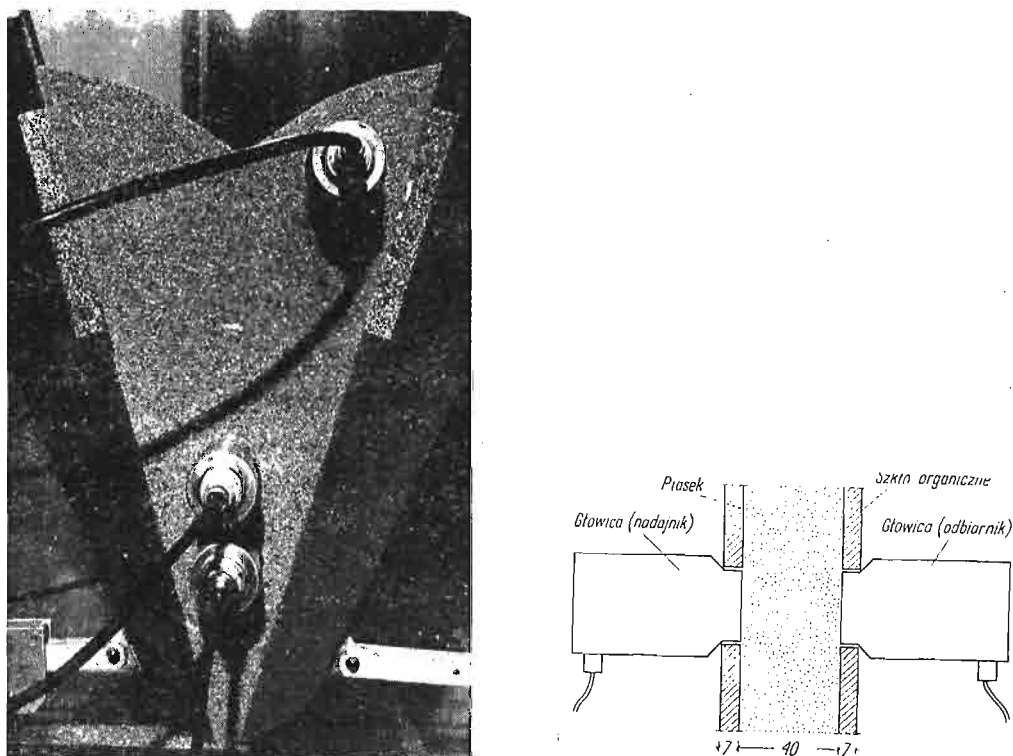
Wyrażenie (2.5) wydaje się być nieznaczoną modyfikacją wzoru na prędkość propagacji fali podłużnej w ośrodku ziarnistym podanego przez I. E. WHITE'A i R. L. SENGBUSCHA [9].

### 3. Opis doświadczeń

Istniejące ultradźwiękowe pomiary własności fizyko-mechanicznych piasków i gruntów prowadzono głównie w ośrodkach ziarnistych nawilgoconych [8, 12, 14, 15]. Wybór wilgotnego ośrodka ziarnistego na ogół jest spowodowany możliwościami energetycz-

nymi używanej aparatury ultradźwiękowej. Wysoka oporność akustyczna powietrza utrudnia i komplikuje pomiary propagacji fal ultradźwiękowych w suchych ośrodkach ziarnistych, a stosowana dotychczas do badań tych ośrodków aparatura (prod. polskiej betonoskopy BI6 [14], BI-8R-M66 [15], czy DUG, MARMOR, UZP-64, produkowane w Związku Radzieckim) charakteryzuje się niezbyt dużą dokładnością pomiaru czasu przejścia fal ultradźwiękowych (około  $2 \mu\text{s}$ ).

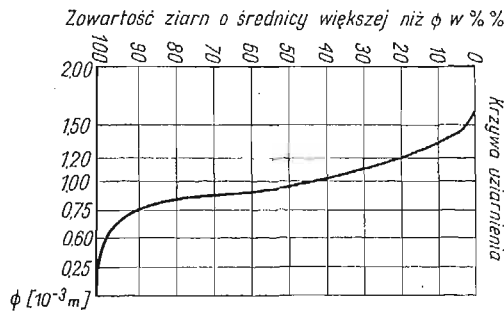
W piśmiennictwie nie napotkano badań ultradźwiękowych piasku suchego wyznaczających zmiany gęstości w procesach deformacji. W przeprowadzonych doświadczeniach zastosowano nową polską aparaturę ultradźwiękową: próbniki materiałów Unipan 541, i prototyp próbnika materiałów Unipan 542. Próbnik materiałów Unipan 541 umożliwia cyfrowy odczyt czasu przejścia fal ultradźwiękowych przez badany ośrodek z dokładnością do  $0,1 \mu\text{s}$ . Próbnik Unipan 542 pozwala na cyfrowy odczyt czasu przejścia fal ultradźwiękowych przez badaną warstwę suchego piasku z dokładnością o rząd wyższą, tj.  $0,01 \mu\text{s}$ ,



Rys. 2. Widok (a) i przekrój (b) modelu przygotowanego do badań

lecz zbyt wysoka częstotliwość i związana z tym propagacja krótkiej fali w badanym ośrodku wyeliminowały możliwość stosowania próbnika Unipan 542 dla piasku o krzywej uziarnienia przedstawionej na rys. 3. Badania wstępne oraz wyniki skalowania sprawdzono przy użyciu aparatów ultradźwiękowych Unipan 510 i 520 dla częst. 500 kHz, oraz przy użyciu betonoskopu BI-8R dla częstotliwości 40 kHz, w celu obserwacji kształtu impulsu przechodzącego przez badaną warstwę ośrodka ziarnistego. Nie stwierdzono przebudowy

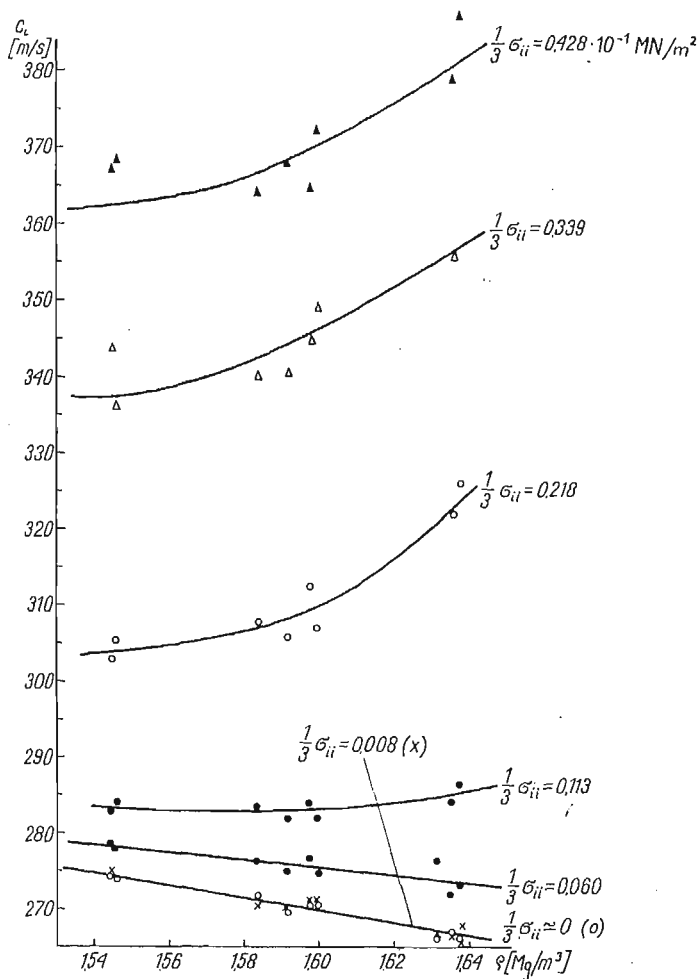
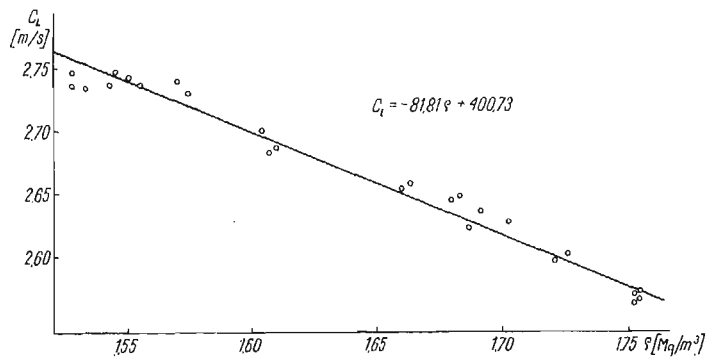
i zmiany kształtu impulsu przechodzącego przez badany suchy piasek, a jedynie zależność prędkości propagacji fal ultradźwiękowych w warunkach nieobciążonych od zmian gęstości. W tej sytuacji zdecydowano się na cyfrowy odczyt zmian czasu przejścia fal ultradźwiękowych podczas badań modelowych. Długość fal ultradźwiękowych propagujących się w badanym suchym piasku o różnej gęstości zmieniała się w prowadzonych doświadczeniach od  $6,4 \cdot 10^{-3}$ – $7,0 \cdot 10^{-3}$  m dla największych gęstości. Autorzy uważają, że badany suchy piasek o krzywej uziarnienia przedstawionej na rys. 3 może być dla rozchodzącej się fali podłużnej o częstotliwości 40 kHz traktowany jako ośrodek ciągły.



Rys. 3. Krzywa uziarnienia piasku użytego do badań

Ultradźwiękową metodę pomiaru gęstości zastosowano do badań nad przepływem piasku przez płaski kanał (rys. 1). Istniejące wyniki badań radiograficznych i przewidywania teoretyczne [4, 5, 6, 7] wskazują na zróżnicowanie gęstości strefy płynięcia radialnego w stosunku do pozostałego obszaru. Do badań wykorzystano model kanału z drewnianymi ścianami bocznymi umieszczonymi między dwoma płytami ze szkła organicznego. Dla uniknięcia rezonansowych drgań płyt wykonano naprzeciwległe otwory, w których umieszczono głowice (rys. 2b). Sposób usytuowania głowic był zgodny z przewidywanymi strefami różnej gęstości (rys. 2a). W przeprowadzonych doświadczeniach nie stosowano żadnych substancji sprzęgających głowice nadajnika i odbiornika z badanym ośrodkiem.

W celu wyznaczenia funkcji  $c_K = c_L(\rho)$  przy  $\frac{1}{3}\sigma_{ii} = \text{const}$  ( $\frac{1}{3}\sigma_{ii}$  — ciśnienie hydrostatyczne w ośrodku) dokonano pomiarów prędkości propagacji fal ultradźwiękowych w suchym piasku (zbadana laboratoryjnie wilgotność wynosiła 0,03%) dla różnych gęstości  $\rho$ . Krzywą uziarnienia piasku pokazano na rys. 3. Dla każdej wartości gęstości dokonywano 20 odczytów czasu przejścia fal ultradźwiękowych przez ośrodek, a uzyskane wyniki uśredniano. Rys. 4a przedstawia funkcję  $c_L = c_L(\rho)$  dla  $\frac{1}{3}\sigma_{ii} \simeq 0$ , rys. 4b pokazuje uzyskane zależności dla różnych wartości ciśnienia hydrostatycznego, a rys. 5 zależności prędkości od  $\frac{1}{3}\sigma_{ii}$  dla różnych gęstości. Rozrzut punktów widoczny na rysunkach był spowodowany niejednorodnością gęstości ręcznie usypywanego piasku. Dla danej stałej gęstości uzyskiwano powtarzalność odczytów czasu przejścia fali w granicach 0,5% (0,3%).



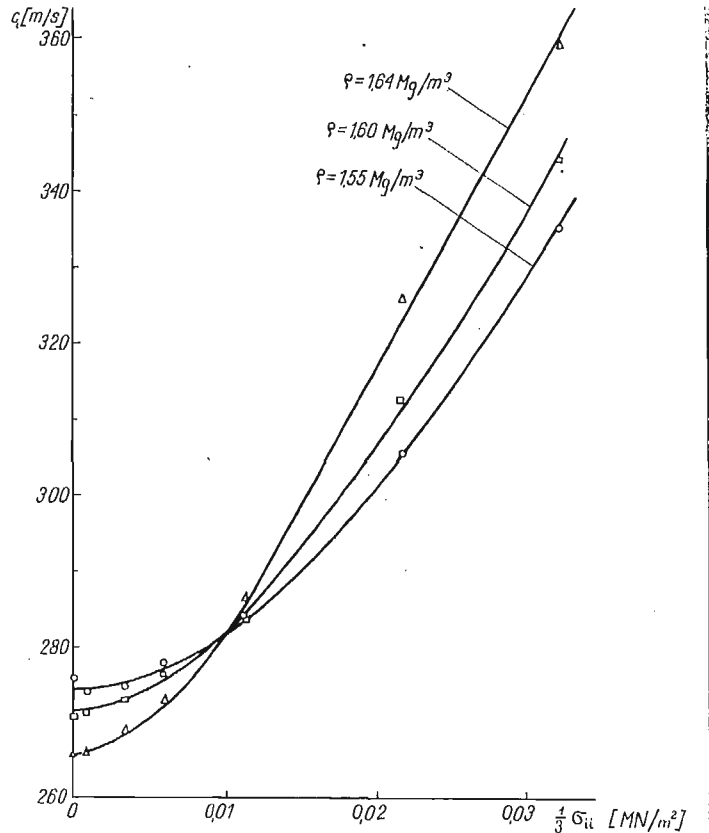
Rys. 4. Wykres funkcji  $c_L = c_L(\rho)$ .

a) dla  $\frac{1}{3} \sigma_{ii} \approx 0$

b) dla różnych wartości ciśnienia hydrostatycznego



Model przygotowany do badań pokazano na rys. 2a. Badania przeprowadzono dla różnych kątów rozwarcia kanału  $\theta_w$ , oraz szerokości otworu wylotowego  $d$ . Uzyskane wyniki wykazały wyraźną różnicę gęstości między obszarami zaznaczonymi na rys. 1, ponadto stwierdzono nieściśliwość strefy płynięcia radialnego. Obliczenia wartości  $\frac{1}{3} \sigma_{ii}$  wykonane metodą Janssena wykazały, że wielkość ta zmienia się dla modelu o grubości 40 mm bardzo nieznacznie tj. do wartości  $8,2 \cdot 10^{-4} \text{ MN/m}^2$  (obliczenia wykonano dla



Rys. 5. Wykres zależności prędkości fal podłużnych od ciśnienia hydrostatycznego dla różnych wartości gęstości

wyznaczonych laboratoryjnie wartości kąta tarcia wewnętrznego piasku  $\varphi = 38^\circ$ , kąta tarcia piasku o płyty  $\varphi_w = 15^\circ$  i średniego ciężaru objętościowego piasku  $\gamma = 1,7 \cdot 10^{-2} \text{ MN/m}^3$ ). Ponieważ tak małe zmiany ciśnienia hydrostatycznego nie powodują istotnych zmian w prędkości fali  $c_L$  (por. rys. 4b), wartości gęstości w czasie procesu przepływu obliczano wykorzystując funkcję skalowania dla  $\frac{1}{3} \sigma_{ii} \simeq 0$  (rys. 4a). Porównanie uzyskanych wartości gęstości z rozwiązaniem teoretycznym problemu przepływu ośrodka sypkiego przez płaski kanał [7] potwierdziło słuszność przyjętego założenia nieściśliwości strefy wypływu radialnego. Uzyskane wyniki przemawiają za przyjęciem niestowarzyszonego z warunkiem Coulomba prawa płynięcia dla modelowanego zadania brzegowego.

## 4. Wnioski

- 4.1. Przedstawiona metoda pomiaru gęstości ciał ziarnistych wykorzystuje zależność prędkości propagacji podłużnych fal ultradźwiękowych od gęstości ośrodka. Metoda nadaje się do zastosowania we wszelkich badaniach modelowych związanych z deformacją ośrodka sypkiego. Dotychczas stosowana metoda radiograficzna [4, 5, 6] pozwalała na wnioski o charakterze jakościowym, a użycie metody ultradźwiękowej ograniczało się do badania gruntów wilgotnych i ich zachowania się pod obciążeniem. Zaletą zaproponowanej metody jest łatwość skalowania, natychmiastowy cyfrowy odczyt czasu przejścia fal ultradźwiękowych przez badaną warstwę ośrodka oraz duża powtarzalność wyników (pkt. 3).  
Pewnym ograniczeniem metody w przypadku ośrodków suchych jest konieczność stosowania modeli o niewielkich grubościach (rzędu kilku centymetrów) ze względu na dużą oporność akustyczną powietrza.
- 4.2. Osiągnięciem autorów jest uzyskanie zależności  $c_L = c_L(\rho)$  przy małych ciśnieniach (0-0,01 MN/m<sup>2</sup>, rys. 5). Problem ten dla suchego ośrodka ziarnistego ze względu na trudności eksperymentalne nie był dotąd zbadany. Zagadnienie propagacji fal ultradźwiękowych w ośrodku silnie rozrzedzonym przy małych ciśnieniach będzie tematem osobnej pracy.
- 4.3. Zastosowanie metody do problemu przepływu ośrodka ziarnistego przez płaski kanał klinowy potwierdziło słuszność przyjętych w rozwiązaniu teoretycznym [7] założeń. Uzyskane wyniki mają zastosowanie w praktyce składowania ośrodków sypkich (np. zbóż, nawozów sztucznych, cementu) w zasobnikach i silosach.

## Literatura cytowana w tekście

1. A. W. JENIKE, R. T. SHIELD, *On the Plastic Flow of Coulomb Solids Beyond Original Failure*, J. Appl. Mech., Trans. ASME, **4**, 1959.
2. Z. MRÓZ, K. KWASZCZYŃSKA, *Pewne problemy brzegowe dla ciał rozdrobnionych o wzmocnieniu gęstościowym*, Rozprawy Inżynierskie, **19**, 1, 1971.
3. A. DRESCHER, Z. MRÓZ, *Podstawy mechaniki ośrodków rozdrobnionych*, Ossolineum, 1972.
4. J. O. CUTRESS, R. F. PULFER, *X-ray investigations of flowing powders*, Powder Technol., **1**, 1967.
5. P. L. BRANSBY, P. M. BLAIR-FISH, R. G. JAMES, *An investigation of the flow of granular materials*, Powder Technol., **8**, 1973.
6. P. L. BRANSBY, P. M. BLAIR-FISH, *Initial deformations during mass flow from a bunker*, Powder Technol., **11**, 1975.
7. A. DRESCHER, T. W. COUSENS, P. L. BRANSBY, *Kinematics of granular material during mass flow through a plane hopper*, University of Cambridge, Dep. Eng., **35**, 1976.
8. B. A. BIELINSKI, D. W. MORIN, W. F. NOZDRIEW, *O prędkości rozprzestrzeniania się ultradźwiękowych fal w ośrodku ziarnistym (ros.)*, Naucznyje Trudy, **47**, 28, Moskwa, 1975.
9. I. E. WHITE, R. L. SENGBUSCH, *Velocity measurements in nearsurface formations*, Geophysics, **18**, 1, 1953.
10. N. W. CAREWA, *Rozprzestrzenianie się fal sprężystych w piasku (ros.)*, wyd. AN ZSRR, ser. geofiz., **9**, 1956.
11. E. MATSUKAWA, A. N. HUNTER, *The variation of sound velocity with stress in sand*, Proc. Phys. Soc., London, B69, 1956.

12. B. O. HARDIN, F. E. RICHART Jr.: *Elastic wave velocities in granular soils*, Proc. ASCE, 89, SM1, 1963.
13. H. BRANDT, *A study of the speed of sound in porous granular media*, J. Appl. Mech., 22, 1955.
14. J. PAŁKA, *Zastosowanie fal ultradźwiękowych do badania właściwości fizyko-mechanicznych gruntów* TNB, Warszawa 1961.
15. H. GAWDA, *Badanie fizyko-mechanicznych własności gruntu metodami akustycznymi*, praca doktorska, Lublin 1973.

## Р е з ю м е

АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОТНОСТИ ЗЕРНИСТЫХ СРЕД  
В ПРОЦЕССАХ ДЕФОРМАЦИИ

В работе предложен акустический метод измерений плотности зернистых сред в процессе деформации. Представлен метод, в котором использована зависимость между скоростями распространения продольных ультразвуковых волн а плотностью и гидростатическим давлением среды. Метод может быть использован в экспериментальных исследованиях связанных с деформацией зернистой среды.

Приложение метода показано на примере исследования течения сухого песка в плоским клинообразным канале.

## S u m m a r y

THE ACOUSTIC METHOD OF MEASURING THE DENSITY OF GRANULAR  
MEDIA IN PLANE DEFORMATION PROCESS

The acoustic method of measuring the density of granular media in plane strain condition is proposed. The method is based on the relation between the velocity of acoustic longitudinal wave density and hydrostatic pressure, and can be used in experimental study of deformation of granular media.

The application of the method is shown in investigation of flow of dry sand through the plane hopper.

IPPT PAN  
POLITECHNIKA POZNAŃSKA

*Praca została złożona w Redakcji dnia 8 kwietnia 1978 r.*

---



# BIULETYN INFORMACYJNY

## KOŁOKWIUM EUROMECH 110 ZAGADNIENIA KONTAKTU I PRZEKAZYWANIA OBCIĄŻEŃ W UKŁADACH MECHANICZNYCH (CONTACT PROBLEMS AND LOAD TRANSFER IN MECHANICAL ASSEMBLAGES)

Rimforsa (Szwecja), 27 - 29 września 1978 r.

Kołokwium Euromech 110 zostało zorganizowane przez Linköping Institute of Technology w Linköping (Szwecja). Komitet organizacyjny konferencji tworzyli prof. prof. B. G. A. Person, B. B. E. Fredriksson oraz L. Bolin (sekretarz naukowy). Obrady odbywały się w ośrodku Saabgarden w Rimforsa (30 km na południe od Linköping) w dniach 17 - 29 września 1978 r. Przewodniczącymi obrad w kolejnych sesjach byli prof. prof. B. B. E. Fredriksson (Szwecja), J. J. Kalker (Holandia), J. Dundurs (USA), D. A. Spence (Wielka Brytania), J. Rasmussen (Dania), S. Łukaszewicz (Polska), L. E. Jarfall (Szwecja), J. E. Backlund (Szwecja), D. Fischer (Austria), J. Stupnicki (Polska), B. G. A. Person (Szwecja) i A. Johnsson (Szwecja). W kolokwium wzięło udział 49 uczestników z następujących krajów (w nawiasach liczba wygłoszonych referatów): Austria — 2 (1), CSRS — 1 (1), Dania — 1 (1), Francja — 1 (0), Holandia — 2 (1), Japonia — 1 (1), Polska — 8 (6), RFN — 3 (2), Szwecja — 18 (6), USA — 1 (1), Węgry — 1 (0), Wielka Brytania — 7 (8), Włochy — 3 (2).

Gościnni organizatorzy zapewнили bardzo dobre warunki pobytu. Zakwaterowanie w miejscu obrad stworzyło możliwości szerokiej wymiany poglądów i kontaktów osobistych współuczestników konferencji.

Obrady toczyły się przy pełnej frekwencji, szerokiej dyskusji i żywym zainteresowaniu uczestników przedstawianymi referatami.

Tematem kolokwium były następujące grupy zagadnień:

a) metody analityczne i numeryczne

J. J. KALKER, Numeryczna elastostatyka kontaktu,

J. WITKOWSKI, Numeryczna analiza i synteza w zagadnieniach kontaktu,

K. WALTON, Ukośne ściskanie dwu sprężystych kul,

P. G. MOLARI, A. STROZZI, Koncepcja rozwiązania zagadnień jednostronnego kontaktu elementów gumowych,

D. A. SPENCE, Model matematyczny kontaktu ciernego,

J. R. TURNER, Tarciony kontakt przy odciążaniu,

B. B. E. FREDRIKSSON, B. TORSTENFELDT, Redukcja trójwymiarowych zagadnień kontaktu do problemów płaskich;

b) zagadnienia kontaktu w warunkach dynamicznych

N. MAW, J. N. FAWCETT, Ukośne uderzenie i odbicie ciał sprężystych,

K. KAWATATE, Naciski powierzchniowe przy uderzeniowym kontakcie ówierńieskończonego sztywnego stempla z półnieskończoną tarczą sprężystą,

J. DUNDURS, M. COMNINOU, Poślizg na powierzchni kontaktu po przypadkowym uderzeniu,

H. P. ROSSMANITH, T. KOBAYASHI, Fale sprężyste przy ukośnym zderzeniu wirujących ciał;

c) zagadnienia przekazywania obciążeń w połączeniach

M. DIETRICH, B. KRASNOWSKI, Przekazywanie momentu obrotowego w połączeniach wielowypustowych,

H. BUFLER, Teoria ciągłego i nieciągłego przekazywania obciążeń, w sprężystych połączeniach z zastosowaniami,

- M. BACZYŃSKA, Rozkład obciążeń gwintu w połączeniu śruby z nakrętką o różnych skokach gwintu i jego optymalizacja,
- J. NEMEC, Istota akumulacji uszkodzeń przy zmęczeniowym obciążeniu kontaktu,
- B. A. DOESER, R. B. WATERHOUSE, Analiza kontaktu w warunkach frettingu metodą elementów skończonych,
- J. E. BACKLUND, H. ANSELL, Rozwój pęknięcia obciążonych otworów,
- M. CASTAGNA, P. FERRERO, Wpływ obróbki powierzchni na wytrzymałość zmęczeniową ulepszanych stali,
- H. A. JERGENS, Wytrzymałość zmęczeniowa i efekt karbu w zamkach łopatek sprężarki,
- J. RASMUSSEN, I. B. NORGAARD, O. HAASTRUP, J. HAASTRUP, Połączenia śrubowe. Zagadnienie kontaktu dwu ciał z uwzględnieniem tarcia,
- D. SCHUTZ, J. FRANZ, J. J. GERHARZ, Wpływ dystrybucji obciążenia na trwałość zmęczeniową połączeń śrubowych;
- d) zagadnienia adaptacji konstrukcji
- W. KRZYŚ, O zjawisku adaptacji w połączeniach ciernych,
- G. RYDHOLM, B. B. E. FREDRIKSSON, Badanie zjawiska adaptacji w warunkach kontaktu przy toczeniu,
- S. ŁUKASIEWICZ, Optymalne projektowanie połączeń i zagadnienia kontaktu;
- e) metody doświadczalne
- K. L. WOO, T. R. THOMAS, Kontakt chropowatych powierzchni — przegląd prac doświadczalnych,
- J. JILKEN, J. E. BACKLUND, Elektromagnetyczne wykrywanie uplastycznienia materiału w warunkach kontaktu,
- S. ANDERSSON, Wpływ mikropoślizgów na zjawisko kontaktu przy toczeniu się z względnym poślizgiem;
- f) zagadnienia różne
- J. R. BARBER, Ciepłne zagadnienie kontaktu stempla,
- W. MIRSKI, Wpływ chropowatości powierzchni na rozkład obciążeń w kontakcie,
- K. L. WOO, T. R. THOMAS, Zastrzeżenia do prawa Amontonsa.

Przedstawiona na kolokwium tematyka stała się przeglądem stanu oraz kierunków rozwoju szeroko pojętego zagadnienia kontaktu. Objęła zarówno stosowane metody teoretycznej i doświadczalnej analizy kontaktu, jak również propozycje praktycznych zastosowań przy racjonalnym projektowaniu konstrukcji. Zwracały uwagę i wywołały żywe zainteresowanie uczestników referaty m.in. grupy szwedzkiej i angielskiej, zwłaszcza dotyczące nowych metod doświadczalnych czy nowych zagadnień (np. prace J. JILKENA, J. E. BACKLUNDA, B. B. E. FREDRIKSSONA, H. A. JERGENSA ze Szwecji, prace T. R. THOMASA, D. A. SPENCA, J. R. TURNERA, R. B. WATERHOUSA z Wielkiej Brytanii). Z przyjemnością należy podkreślić dobry wkład grupy polskiej, co wyrażono w dyskusjach i w podsumowaniu konferencji.

Referaty wygłoszone w trakcie kolokwium opublikowano w materiałach konferencyjnych, zaś przebieg dyskusji będzie opublikowany w odpowiednim suplemencie. Publikacje te zainteresowani będą mogli spotkać np. w bibliotece Instytutu Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej Politechniki Warszawskiej.

*Jan Witkowski*

### III KRAJOWA KONFERENCJA MECHANIKI CIECZY I GAZÓW Częstochowa-Kokotek

W dniach 4 - 8 września 1978 r. w Kokotku k/Lublińca odbyła się III Krajowa Konferencja Mechaniki Cieczy i Gazów zorganizowana przez Instytut Maszyn Ciepłych Politechniki Częstochowskiej oraz Sekcję Mechaniki Cieczy i Gazów Komitetu Mechaniki PAN. W obradach Konferencji uczestniczyło 201 pracowników nauki z 50-u specjalistycznych instytucji badawczych.

Idea tego typu spotkań narodziła się w łonie Sekcji Mechaniki Cieczy i Gazów PAN jako odpowiedź na stwierdzoną w czasie II Kongresu Nauki Polskiej konieczność intensyfikacji badań naukowych w dzie-

dzinie mechaniki płynów. Idea ta znalazła podatny klimat w środowisku polskich aeromechaników zaś praktyka i doświadczenia poprzednich dwóch Konferencji wykazały niezbędną potrzebę tego typu kontaktów. Najlepszym dowodem rosnącego znaczenia tych spotkań jest coraz większa liczba uczestników biorących udział w obradach i prezentujących wyniki własnych prac badawczych. O ile w I Konferencji w Jaszowcu (1974 r.) wzięło udział 167 osób, w II Konferencji (1976 r.) w Jastrzębiej Górze — 157, o tyle w relacjonowanym tu spotkaniu uczestniczyło przeszło 200 pracowników nauki. Znamiennej progresję wykazuje również liczba zgłoszeń referatowych od 92 w Jaszowcu do 152 w Częstochowie-Kokotku.

Ostatni fakt zdezaktualizował jeden z postulatów Sekcji MCiG PAN zalecających zachowanie plenarnej formy obrad. Ze względów programowo-czasowych, poza inauguracyjną sesją plenarną zawierającą referaty o przeglądowo-informacyjnym charakterze, obrady Konferencji zorganizowane zostały w dwóch równoległych grupach tematycznych. W ich ramach wydzielono następujące sekcje problemowe:

- turbulencja
- maszyny przepływové
- metody analityczne i numeryczne w mechanice płynów
- przepływy w ośrodkach i kanałach porowatych
- przepływy wielofazowe
- przepływy pulsujące
- aerodynamika płatów; opływy ciał
- metrologia w mechanice płynów
- fale uderzeniowe
- hydrodynamika geofizyczna
- wentylacja i ochrona środowiska
- różne zagadnienia mechaniki cieczy i gazów: plazma, kawitacja itp.

Mimo iż w ramach Konferencji znalazły swe odbicie wszystkie działy współczesnej mechaniki płynów, szczególnie wyeksponowana została jednak tematyka turbulencji, stanowiącej naukową specjalność ośrodka częstochowskiego. Tematyce tej poświęcono dodatkową dyskusję plenarną, na której oceniano między innymi stan badań krajowych, podkreślając potrzebę intensyfikacji prac teoretycznych oraz konieczność doinwestowania i unowocześnienia bazy laboratoryjno-aparaturowej, warunkujących zakres i poziom badań eksperymentalnych.

Z okazji Konferencji zorganizowana została również jako impreza towarzysząca krajowa wystawa aparatury naukowej stosowanej w aerodynamice doświadczalnej. W wystawie wzięło udział pięć instytucji krajowych oraz (gościnnie) znana na rynku polskim duńska firma DISA Elektronik. Szczególnie zainteresowanie wzbudziła ekspozycja Instytutu Mechaniki Górotworu w Krakowie oraz zestaw laserowej aparatury anemometrycznej, oferowanej przez firmę DISA do pomiaru przepływów turbulentnych.

Uczestnicy obrad mieli również możliwość zapoznania się z wystawą polskiej książki naukowej z mechaniki płynów oraz dziedzin pokrewnych, na której zgromadzono około 120 tytułów.

Materiały wydawnicze Konferencji obejmują zbiór streszczeń wszystkich referatów oraz pełne materiały sesji poświęconych zagadnieniu turbulencji przepływów.

Przy okazji III KKMCIg Oddział Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej w Częstochowie zorganizował po raz pierwszy w kraju konkurs na najlepszą pracę z Mechaniki Płynów. Na konkurs wpłynęło 12 prac, które zostały zaopiniowane przez recenzentów powołanych w trakcie Konferencji. Sąd Konkursowy w składzie:

- |  |   |
|--|---|
| Prof. dr hab. inż. R. PUZYREWSKI IMP PAN | — przewodniczący                        |
| Prof. dr hab. inż. K. BIERNATOWSKI       | — przedstawiciel Zarządu Głównego PTMTS |
| Doc. dr hab. inż. J. OSTROWSKI           | — ITLiMSł PW                            |
| Doc. dr inż. R. WOLAŃSKI                 | — IMC PCz                               |

po zapoznaniu się ze zgłoszonymi pracami oraz ich recenzjami przyznał:

I nagrodę (12.000 zł.) — dr inż. P. WIEWIÓRSKIEMU za pracę pt. „Efekt przejściowy przy przenikaniu słabej fali uderzeniowej przez rozgałęzienie przewodów”,

II nagrodę (8.000 zł.) — dr inż. J. LEBRECHTOWI za pracę pt. „Naddźwiękowy przepływ w obszarze wylotowym dośrodkowego wieńca kierującego”,

III nagrodę (5.000 zł.) — mgr inż. Z. POPIÓŁKOWI i mgr inż. W. ŚLĘZAKOWI za pracę pt. „Interpretacja sygnału termooanemometru w silnie burzliwych przepływach o małych prędkościach”.

Wszystkie nagrody dotowane były przez Zarząd Główny PTMITS.

W ostatnim dniu trwania obrad odbyła się sterowana dyskusja plenarna na temat form organizacyjnych przyszłych spotkań. Sformułowane w trakcie dyskusji dezyderaty wzięte zostaną niewątpliwie pod uwagę przez Gospodarzy następnej IV Krajowej Konferencji, która zorganizowana zostanie w 1980 r. staraniem Instytutu Maszyn Przepływowych Politechniki Łódzkiej.

*Janusz Elsner*

## VII SYMPOZJON POŚWIĘCONY REOLOGII

W dniach 25 - 26 września 1978 r. odbył się we Wrocławiu VII sympozion PTMITS poświęcony reologii. Z powodu kłopotów poligraficznych materiały sympozionu, zawierające pełny tekst 34 referatów przyjętych przez Komitet Organizacyjny Sympozionu i dyskutowanych w czasie jego trwania, ukazały się dopiero w końcu listopada 1978 r. Zostały one wydane staraniem Oddziału PAN we Wrocławiu przy współudziale finansowym Politechniki Wrocławskiej.

W sympozjonie wzięło udział 6 ośrodków: gdański (2 referaty), gliwicki (1 referat), kielecki (1 referat), opolski (3 referaty), krakowski (7 referatów) i wrocławski (20 referatów). Z przykrością odnotować należy brak ośrodka warszawskiego. Również, trochę z winy komitetu organizacyjnego, który zbyt nieufnie zaufała działalności poczty, nie dotarły na czas zawiadomienia o sympozjonie do ośrodków poznańskiego i białostockiego, które tradycyjnie czynnie uczestniczyły we wszystkich poprzednich sympozjonach.

VII sympozion poświęcony reologii był pierwszym, który odbył się pod nieobecność zmarłego zastępczego organizatora działalności PTMITS we Wrocławiu i organizatora szeregu naszych sympozjonów profesora Adama MITZELA. Odszedł od nas na zawsze aktywny działacz, znakomity organizator i poważny badacz w dziedzinie reologii betonu, a nieobecność Jego odczuliśmy wszyscy.

Obrady, które zgromadziły stosunkowo niewielkie, ponad 60 osób zaledwie liczące grono zainteresowanych osiągnięciami i rozwojem reologii, toczyły się, z uwagi na konieczność maksymalnego skrócenia czasu trwania sympozionu, w dwu sekcjach. Sekcja I obejmowała zagadnienia ogólne reologii, reologię metali i polimerów, a sekcja II poświęcona była reologii betonu i gruntów. 18 referatów miało charakter czysto teoretyczny, pozostałe 16 doświadczalny, z niewielkimi uzasadnieniami teoretycznymi. Rozważane były następujące zagadnienia.

1. Reologia polimerów. Jak zwykle, wiodącą rolę odgrywał tutaj zespół prof. J. ZAWADZKIEGO z Politechniki Wrocławskiej (referaty na str. 134, 367, 393, 417 i 428 materiałów). Jak zwykle również reprezentowały one solidną bazę teoretyczną i cenne wyniki doświadczalne. Poruszono w nich m.in. zagadnienia dekohezji reologicznej belek przekładkowych, podstawy teoretyczne i praktyczne badań nad pelzaniem termoplastów przy obciążeniach stochastycznych oraz zagadnienia reostateczności dynamicznej.

2. Reologia betonu i elementów betonowych. Badania prowadzono głównie nad dwuosiowym stanem naprężenia i deformacji; jest to kontynuacja kierunku, zapoczątkowanego przez prof. A. MITZELA (referaty na str. 37, 125, 157, 172, 217, 267, 316 i 333 materiałów). Nie dając jeszcze całkowitego rozwiązania zagadnienia dwuosiowego pelzania betonu, omawiana grupa referatów stanowi, niewątpliwie, dalszy krok na drodze do poznania rzeczywistych właściwości reologicznych betonu.

3. Zagadnienia konsolidacji gruntów, przedstawione głównie przez ośrodek krakowski (prof. G. SZEFER ze współpracownikami) obejmowały referaty na str. 4, 92, 104 i 355 materiałów. Interesujący i obiecujący w sensie dalszych poszukiwań referat dotyczył zastosowania teorii odkształceń skończonych do zagadnień konsolidacji w ujęciu Bioła. Badania w tym kierunku powinny być kontynuowane, są one bowiem, po pierwsze, jedne z nielicznych na świecie, a po drugie, przedstawione wyniki sugerują nowe możliwości także dla zastosowań praktycznych konsolidacji.

4. Reologia gruntów: referaty grupy prof. J. DMITRUKA dotyczyły problemu sformułowania na bazie teorii identyfikacji nowych modeli reologicznych gruntów (str. 79 i 299 materiałów). Wyniki doświadczeń wydają się wskazywać na niewątpliwie zalety wymienionej propozycji. Niemniej jednak, do zakończenia



prac nad tym zagadnieniem jest jeszcze daleko. WOJCIECHOWSKI (Poltegor) przedstawił ciekawe wyjaśnienie przebiegu osuwiska w oparciu o reologiczne właściwości podłoża skarpy (str. 378 materiałów).

5. Reologia mieszanin i zawieszin: interesujące, poparte wyjaśnieniami teoretycznymi wyniki doświadczeń przedstawił PARZONKA (AR Wrocław) ze współpracownikami (str. 190 i 205) oraz SAWICKI (str. 275 materiałów).

6. Reologia konstrukcji. Do tej grupy piszący odnosi referaty o charakterze teoretycznym; a więc o „strukturach przestrzennych” z materiału lepkosprężystego (str. 146), o pelzaniu luków (str. 255) i o pelzaniu powłok (str. 283 materiałów). Piszącemu bardzo nie podoba się termin „struktury” w odniesieniu do układów prętowych; niestety termin ten chyba się przyjmie.

7. Ostatnią wreszcie grupę stanowią referaty, które można by objąć wspólną nazwą: referaty dotyczące podstaw reologii. Omawiane były m.in.: przedstawienie nowych rozwiązań lub sposobów rozwiązywania zagadnień z teorii stanów granicznych (str. 18, 26 i 116), omówienie problemu niestabilności materiałów reologicznych (str. 53), zagadnienie pelzania przy mimośrodowym ściskaniu (str. 239) i zniszczenia przy pelzaniu (str. 64) wreszcie problemy związane z termodyfuzją (str. 183 i 407 materiałów).

Pojęcie reologii w naszych sympozonach traktujemy raczej szeroko: odnosimy do reologii wszystkie procesy w których odbywa się deformacja materiału, a więc rozpoczynając od sprężystości i plastyczności poprzez pelzanie aż do płynięcia materiałów takich jak polimery, grunty, beton lub stal. Sądzę, że takie traktowanie można by jeszcze dalej rozszerzyć na przepływy cieczy i uważam, że takie ogólne traktowanie reologii, zmuszając do poszukiwania wspólnej wszystkim materiałom bazy teoretycznej, powinno stanowić cel rozwoju reologii. Myślę też, że w naszych dalszych sympozonach zachowamy taki właśnie charakter naszych dyskusji.

Wobec niezbyt dużej liczby uczestników posiedzenia w sekcjach miały wybitnie kameralny, roboczy charakter. Ożywiło to dyskusję; obecność osób naprawdę zainteresowanych przedstawianymi pod dyskusję referatami spowodowała, że dyskusja była żywa. Wg protokołów obrad zanotowano aż 61 wystąpień dyskusyjnych. Fakt ten może tylko cieszyć zarówno autorów referatów, jak i organizatorów sympozonu. Głównym — w rozumieniu organizatorów — celem sympozonu jest popieranie badań w dziedzinie szeroko pojętej reologii, a prezentowane na nim powinny być prace „in statu nascendi”.

Wszystkie bodaj przedstawione referaty spełniają to wymaganie. Dlatego sądzimy, że po uwzględnieniu uwag krytycznych, jakie padły na sali obrad zarówno w odniesieniu do każdego poszczególnego referatu, jak i do referatów tematycznie związanych, wszyscy autorzy opublikują swe prace w ogólnie dostępnych czasopismach naukowych. Gdy tak się stanie, organizatorzy sympozonu będą mogli uznać, że cel sympozonu został w pełni zrealizowany. Chciałoby się podkreślić, że zdaniem piszącego, wszystkie bodaj przedstawione referaty spełniają wstępnie warunki, umożliwiające ich publikację.

Niemniej jednak nasuwa się przy okazji uwaga organizacyjna. Nie wydaje się, by szczęśliwe było rozwiązanie (co prawda wymuszone brakiem czasu), zastosowane obecnie: podział obrad na sekcje. Nie sprzyja to wszechstronności obrad, nie sprzyja też możliwości wysłuchania dyskusji nad referatami także odległymi tematycznie od kierunku reprezentowanego przez danego uczestnika. Wydaje się, że głównym osiągnięciem w dotychczasowych sympozonach było to, że każdy mógł brać udział w omawianiu każdego referatu. I wniosek z powyższego: należy powrócić do dawnego sposobu prowadzenia obrad, nie dzieląc ich na sekcje.

Podjęta przed 16 laty inicjatywa oddziału wrocławskiego PTMTS organizowania okresowych sympozonów z szeroko pojętej reologii raz jeszcze zdała egzamin życia i czasu. Chcielibyśmy nadal traktować te nasze sympozjony jako imprezę krajową, wewnętrzną, o charakterze roboczym. Nie udało się tym razem, ale zamierzamy nadal zorganizować dyskusję okrągłego stołu na temat podstawowych problemów rozwoju reologii. Sądzę, że dobrze by było już obecnie zastanowić się nad wyborem tematu dyskusji. Oddział wrocławski PTMTS powita z radością każdą na ten temat propozycję; uważamy bowiem, że okresy między sympozonami służyć powinny m.in. do przygotowywania następnych.

Nie chcielibyśmy nadawać naszym sympozjom większej rangi, choć w swoim czasie i o tym myślano. Wydaje się, że lepiej spełnią one swoje zadanie, gdy pozostaną tym, czym są obecnie: forum roboczym dla przedstawiania na gorąco tego, co w chwili bieżącej się robi, dla przedyskutowania przygotowanej pracy w gronie osób życzliwych, ale krytycznych. Imprezy wysokiej rangi są, niewątpliwie, potrzebne. Nabierają one jednak z reguły tak oficjalnego charakteru, że traci się cel zasadniczy: rozwój badań w naszym

własnym środowisku. Obecna obfitość imprez o wysokiej i najwyższej randze pozwala — bez potrzeby organizowania jeszcze jednej takiej imprezy — na przedstawienie każdej wartościowej pracy. Rzecz jednak w tym, by te wartościowe prace przygotować i przedyskutować może w nieco mniej reprezentatywnym, ale rzeczowym gronie. Temu celowi pragniemy przeznaczyć nasze sympozjony i z tą myślą oddział wrocławski PTMTS spodziewa się, zorganizować w 1981 roku kolejny sympozjon poświęcony reologii — w dwudziestolecie od daty zorganizowania pierwszego.

*Igor Kisiel*

## II KONFERENCJA KONSTRUKCJE POWŁOKOWE, TEORIA I ZASTOSOWANIA Goluń, 6 - 10.XI.1978

Cienkościennie konstrukcje i elementy powłokowe wykorzystywane są powszechnie w wielu dziedzinach techniki. W szczególności są one podstawą wielu nowoczesnych konstrukcji stosowanych w budownictwie lądowym i okrętowym, energetyce, lotnictwie, budowie maszyn i urządzeń oraz inżynierii chemicznej. Wyniki niektórych badań z mechaniki powłok znajdują zastosowanie również w akustyce i elektronice, a nawet w biologii i naukach medycznych.

Pierwsza ogólnopolska konferencja powłokowa zorganizowana została w kwietniu 1974 r. w Krakowie. Dokonano tam przeglądu aktualnego stanu badań krajowych w tej dziedzinie oraz nakreślono kierunki dalszych badań niezbędnych dla sprostania bieżącym i perspektywnym potrzebom rozwoju kraju.

W dniach 6 - 10.XI.1978 r. w Goluńiu k/Kościerzynie przeprowadzona została II Konferencja „Konstrukcje powłokowe, teoria i zastosowania”. Konferencję zorganizowano z inicjatywy i pod auspicjami Sekcji Mechaniki Konstrukcji Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN. Organizatorem konferencji był Instytut Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku, współdziałając z Centrum Techniki Okrętowej w Gdańsku i Gdańskim Oddziałem PTMTS.

Komitet Naukowy Konferencji, działający pod przewodnictwem czł. koresp. PAN Prof. A. SAWCZUKA, przedyskutował zakres tematyczny konferencji, wytypował aktualną tematykę referatów problemowych oraz ich referentów i dokonał merytorycznej oceny i selekcji nadesłanych 74-ch referatów indywidualnych. Organizacją konferencji zajmował się Komitet Organizacyjny działający pod przewodnictwem autora tej informacji.

W konferencji uczestniczyło 105 osób z różnych krajowych ośrodków naukowych, w tym 22 z Gdańska, 21 z Warszawy, 17 z Krakowa, 11 z Poznania, 8 z Opola, 6 z Łodzi, 4 z Koszalina, 4 z Wrocławia, 3 z Białegostoku, 3 z Bielska Białej, 2 z Częstochowy oraz po jednej osobie z Gliwic, Kielc, Tarnowskich Gór oraz Kędzierzyna-Koźła. 79 uczestników reprezentowało placówki wyższych uczelni, 11 — instytuty Polskiej Akademii Nauk oraz 15 — instytuty resortowe, ośrodki badawczo-rozwojowe i biura projektowe. Wśród uczestników było 29 profesorów i docentów.

Materiały konferencyjne, zawierające obszernie streszczenia referatów indywidualnych [1] oraz pełne teksty referatów problemowych [2], zostały powielone techniką małej poligrafii, na prawach rękopisu, na trzy tygodnie przed rozpoczęciem obrad. Każdy uczestnik miał więc możliwość dokładnego zapoznania się z referatami i odpowiedniego przygotowania się do dyskusji.

Podczas trwania konferencji wygłoszono 6 referatów problemowych oraz 43 referaty indywidualne. Referaty problemowe przygotowane zostały na zlecenie organizatorów konferencji i dotyczyły następującej tematyki:

1. Z. DŻYGADŁO, Problemy obliczania powłok w turbinowych silnikach lotniczych
2. S. ŁUKASIEWICZ, Problemy powłokowe w budowie aparatury chemicznej
3. M. KLEIBER, Nieliniowa, statyczna i dynamiczna analiza powłok metodą elementów skończonych
4. Ł. KONIECZNY, Problemy obliczania powłok w budownictwie okrętowym
5. J. ORKISZ, Powłoki pneumatyczne
6. W. PIETRASZKIEWICZ, Niektóre problemy nieliniowej teorii powłok.

W referatach problemowych przedstawiono stan badań krajowych w tych dziedzinach na tle osiągnięć światowych (z uwzględnieniem wyników wieloletnich badań ich autorów) oraz wskazano aktualne trendy rozwojowe i szczegółowe problemy wymagające dalszych badań. Przedstawione referaty problemowe wywołały duży oddźwięk wśród uczestników oraz obszerną dyskusję.

Wygłoszone na konferencji referaty indywidualne dotyczyły różnych dziedzin mechaniki powłok i jej zastosowań technicznych. Najwięcej prac przedstawiono z zagadnień powłok liniowo-sprężystych (9 ref.), obliczeń statycznych i projektowania (7) oraz problemów nieliniowych (7). W innych referatach omawiano zagadnienia dynamiczne w powłokach (5), problemy stateczności powłok (4), stosowane metody numeryczne (4), obliczanie powłok niesprężystych (3) i powłok prętowych (3) oraz przedstawiono wynik badań eksperymentalnych (1).

Ponad połowa (22) wygłoszonych referatów miała charakter interdyscyplinarny. Referowano w nich wyniki teoretyczno-numeryczne z mechaniki powłok możliwe do wykorzystania w różnych dziedzinach techniki. W pozostałych referatach prezentowano metody i wyniki obliczeń konkretnych konstrukcji i elementów powłokowych stosowanych w budownictwie (8), energetyce i lotnictwie (4), budowie maszyn i urządzeń (4), aparaturze chemicznej (3) oraz w budowie okrętów (2).

Przebieg konferencji wykazał niezwykłą aktywność jej uczestników. Mimo bardzo napiętego programu (obrazy trwały od 9<sup>15</sup> do 18<sup>15</sup> z krótką przerwą obiadową) sala obrad była przez cały czas wypełniona. Godnym podkreślenia jest fakt, że każdy przedstawiony referat poddany został gruntownej krytyce naukowej a szereg dyskusji naukowych kontynuowano również w kularach i w godzinach wieczornych.

W stosunku do pierwszej konferencji powłokowej sprzed czterech lat obrady II konferencji wykazały wyraźny wzrost kwalifikacji jej uczestników oraz pewną ewolucję tematyki. Silnie zaznaczył się zwłaszcza wpływ mechaniki nieliniowej oraz upowszechnienie się komputerowych metod obliczania konstrukcji powłokowych. Szereg wartościowych i oryginalnych wyników referowały osoby stosunkowo młode, stojące dopiero u progu swej kariery naukowej.

Wymieńmy tutaj przykładowo kilka prezentowanych prac które, jak się wydaje, wyróżniły się kompletnością ujęcia na tle dobrego poziomu naukowego referatów przedstawionych na konferencji. Wybór tych kilku prac jest oczywiście subiektywny.

W referacie J. DREWKO, M. SPERSKIEGO i J. WIĘCKOWSKIEGO podano oryginalną metodę oraz program na EMC obliczania wytrzymałości kadłubów okrętowych o wielospójnym przekroju poprzecznym, zastosowaną do projektowania m.in. zbiorników, gazowców oraz statków promowych. W referacie J. MAKOWSKIEGO opracowano oryginalną klasyfikację uproszczonych wariantów równań stateczności sprężystej oraz pokrytycznego zachowania się powłok, opartą o ograniczenia nakładane na obroty elementów materialnych powłoki podczas deformacji wstępnej oraz podczas deformacji po utracie stateczności. J. SKRZYPEK i M. ŻYCZKOWSKI przedstawili teoretyczno-numeryczną analizę skomplikowanego procesu plastycznego płynięcia toroidalnej powłoki warstwowej przy łamanych trajektoriach obciążeń. W pracy W. SZYSZKOWSKIEGO przeanalizowano możliwość przystosowania się, poprzez lokalną utratę stateczności, niektórych typów obrotowych konstrukcji powłokowych do przenoszenia zwiększonych obciążeń. Opracowaną metodę zastosowano m.in. do wykazania dodatkowej rezerwy nośności w pofalowanych już eksportowych zbiornikach ciśnieniowych. W referacie M. MAZURKIEWICZA przedstawiono ogólną metodę numerycznego obliczania częstości drgań własnych powłok wstępnie napiętych i zastosowano ją do obliczeń dynamicznych wirujących łopatek maszyn przepływowych. W pracy matematyków A. LUTOBORSKIEGO i R. PAWLIKA, dla zadań liniowej teorii powłok rozwiązywanych metodą elementów skończonych, sformułowano kryterium całkowalności macierzy sztywności z użyciem punktów Gaussa, podano dowód zbieżności rozwiązania oraz określono charakter tej zbieżności.

Na zakończenie konferencji odbyła się dyskusja plenarna nt. „konstrukcje powłokowe, teoria i rzeczywistość”. Podczas dyskusji wskazywano na konieczność ściślejszego powiązania prowadzonych badań teoretycznych z nierozwiązanymi dotąd problemami występującymi w praktyce, podkreślano ważną rolę metod numerycznych (w tym metody elementów skończonych) we wdrażaniu wyników badań powłokowych, wskazywano na konieczność dopracowywania programów obliczania powłok na EMC do wersji „produkcyjnej” i ich reklamowania w czasopismach technicznych, wskazywano też na szereg ważnych kierunków badań z mechaniki powłok które nie są rozwijane w naszym kraju. Należą do nich m.in. termomechanika powłok (w tym również w wysokich temperaturach), mechanika pęknięcia i zniszczenia

powłok (w tym przy obciążeniach cyklicznych), obliczanie powłok kompozytowych, dynamika powłok silnie odkształcalnych (m.in. do obliczania zderzeń okrętów lub samochodów) a przede wszystkim technika badań eksperymentalnych zachowania się powłok w różnych warunkach pracy.

W słowie końcowym czl. koresp. PAN Prof. A. SAWCZUK przedstawił merytoryczną ocenę tematyki konferencji, omówił pożądane kierunki rozwoju badań powłokowych wyprzedzające potrzeby tworzone obecnie nowych gałęzi przemysłu, a także sformułował szereg wynikających z konferencji wniosków pod adresem Sekcji Mechaniki Konstrukcji KILiW PAN oraz Komitetu Mechaniki PAN. W szczególności, wskazano na celowość opracowania kilku podręczników z mechaniki powłok na różnych poziomach teoretycznych, przygotowania konkretnych sugestii uściślenia norm i przepisów dotyczących projektowania konstrukcji powłokowych, przygotowania raportu nt. stanu wiedzy krajowej w mechanice powłok i jej zastosowań w technice oraz zorganizowania konferencji szkoleniowej z nowoczesnych zagadnień mechaniki powłok. Uznano również za celowe zorganizowanie za ok. 3 lata kolejnej III konferencji powłokowej.

Materiały konferencyjne:

1. II Konferencja „*Konstrukcje powłokowe, teoria i zastosowania*”, Gołuń, 6 - 10.XI.1978, Referaty; CTO Gdańsk 1978, str. 280

2. II Konferencja „*Konstrukcje powłokowe, teoria i zastosowania*”, Gołuń, 6 - 10.XI.1978, Referaty problemowe; CTO Gdańsk, 1978, str. 160.

Wojciech Pietraszkiewicz

W następnym zeszycie ukaza się prace:

- M. NOWAK, A. WŁOSNOWICZ, Analiza zmian trwałości zmęczeniowej i mikrostruktury poliamidu w funkcji stanu cieplnego formy i obróbki cieplnej  
Анализ изменений усталости и микроструктуры полиамида в функции термического состояния формы и термической обработки  
Analysis of changes in fatigue life and physical microstructure of polyamid as a function of thermal conditions of mould and thermal treatment
- G. GLINKA, Teoretyczna i eksperymentalna analiza wzrostu szczelin zmęczeniowych w obecności spawalniczych naprężeń własnych  
Теоретический и экспериментальный анализ роста усталостных трещин при присутствии сварных остаточных напряжений  
Theoretical and experimental analysis of fatigue cracks growth in a presence of welding residual stresses
- E. MACIĄG, Interakcja układu budynek-podłoże podlegającego działaniom sejsmicznym i parasejsmicznym  
Взаимодействие системы здание-основание при землетрясениях и парасейсмических колебаниях  
Building-foundation interaction during an earthquake and paraseismic vibrations
- J. TALER, Nieustalone pole temperatury i naprężeń w nieskończenie długim, wydrążonym walcu ogrzewanym na zewnętrznej powierzchni i chłodzonym na wewnętrznej  
Нестационарные поля температуры и напряжений в бесконечном полом цилиндре нагреваемым на внешней и охлаждаемым на внутренней поверхностях  
Unsteady temperature and thermal stresses in a hollow cylinder heated on the outer and cooled on the inner surface
- K. MAZUR-ŚNIADY, Skręcanie pryzmatyczne prętów jako ciał z wewnętrznymi więzami I  
Кручение призматических стержней как тел с внутренними связями I  
Torsion of prismatic rods as bodies with internal constraints I
- K. MAZUR-ŚNIADY, Skręcanie pryzmatycznych prętów jako ciał z wewnętrznymi więzami II  
Кручение призматических стержней как тел с внутренними связями II  
Torsion of prismatic rods as bodies with internal constraints II
- K. SZUWAŃSKI, Nośność rozdzielcza pierścieniowej tarczy kołowo-symetrycznej ze sztywną inkluzją  
Несущая способность осесимметрического кольцевого диска с жестким включением  
Decohesive carrying capacity of annular axially-symmetrical disc with rigid inclusion
- S. KOSAŃDA, A. LIKOWSKI, Badania prędkości pęknięcia i kształtu pęknięcia w stali o podwyższonej wytrzymałości przy zmiennym zginaniu  
Исследование скорости роста и формы трещин в высокопрочной стали при циклическом изгибе  
Investigation of fatigue crack growth rate and crack shapes in high-strength steel under cyclic bending

Cena zł 30.—

Warunki prenumeraty  
Cena prenumeraty krajowej  
rocznie zł 120.—  
półrocznie zł 60.—

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 II półrocze roku bieżącego.

Jednostki gospodarki uspołecznionej, 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 O/M w Warszawie, nr konta 11153-201045-139-11 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 17, pokój 1724)*

---