

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

LEIF JILKÉN, JAN BÄCKLUND (LINKÖPING)

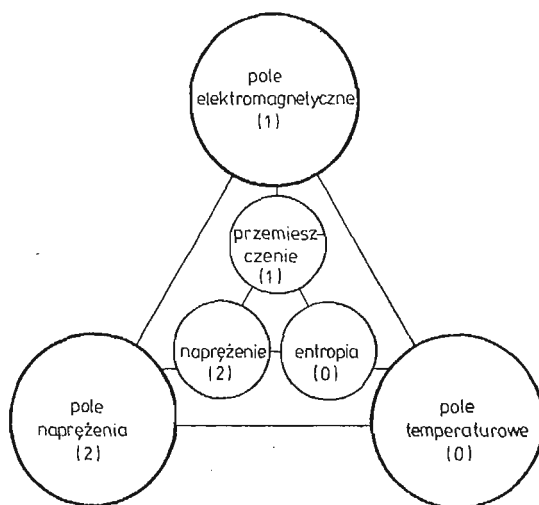
### 1. Wstęp

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].

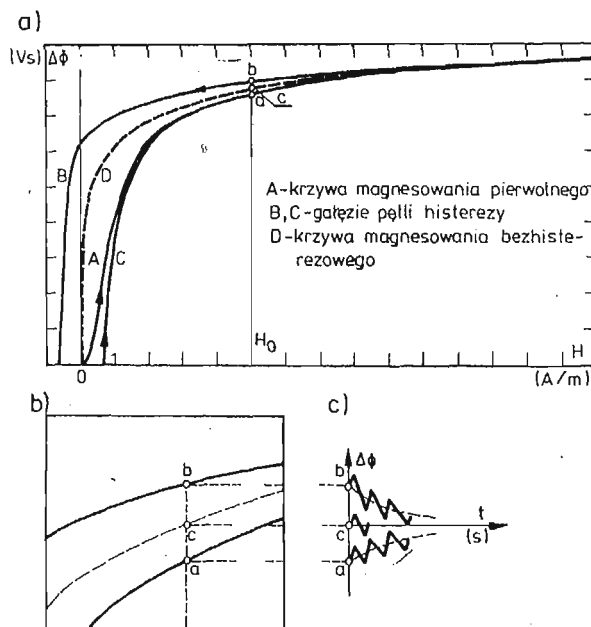
### 2. Sprzężenie magnetomechaniczne

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 bezhisterezyowego materiału ferromagnetycznego

a — rysunek ogólny

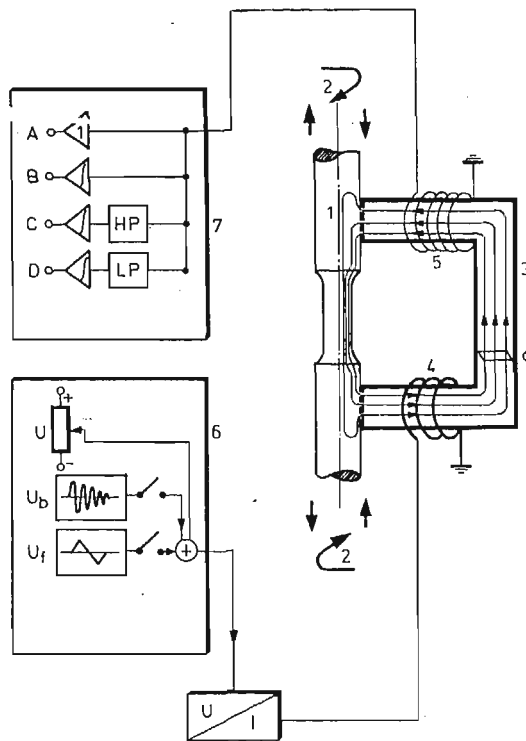
b — fragment

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

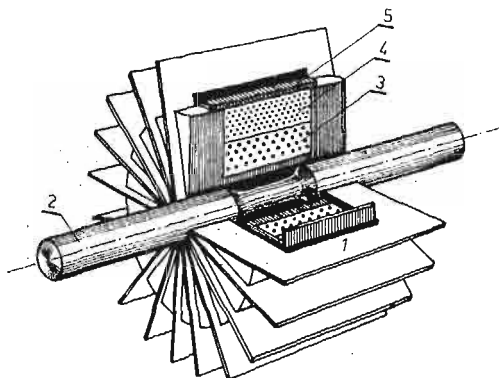
Zasadniczy schemat układu pomiarowego pokazany jest na rys. 3. Badana **próbka** (1), którą można rozciągać, ściskać lub skręcać (2), tworzy obwód magnetyczny wraz z żelaznym jarzmem (3), na którym nawinięte jest **uzwojenie** pierwotne (4) i wtórne (5). Zespół zasilający (6) jest źródłem stałego napięcia,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



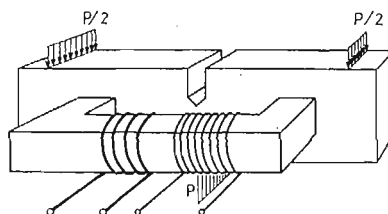
Rys. 3. Zasadniczy schemat układu pomiarowego

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.

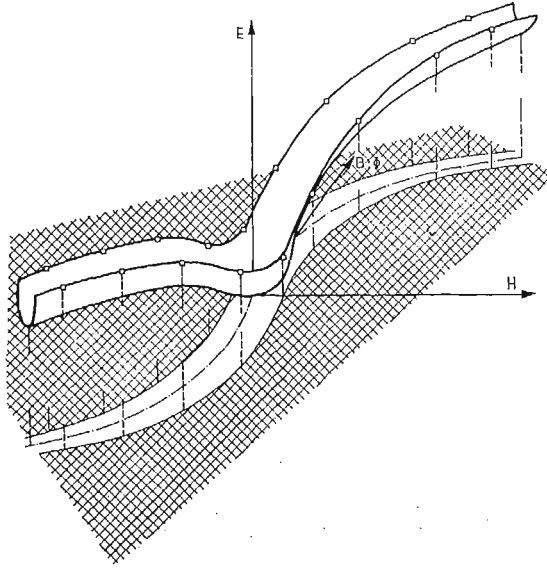
#### 4. Technika pomiarowa

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.

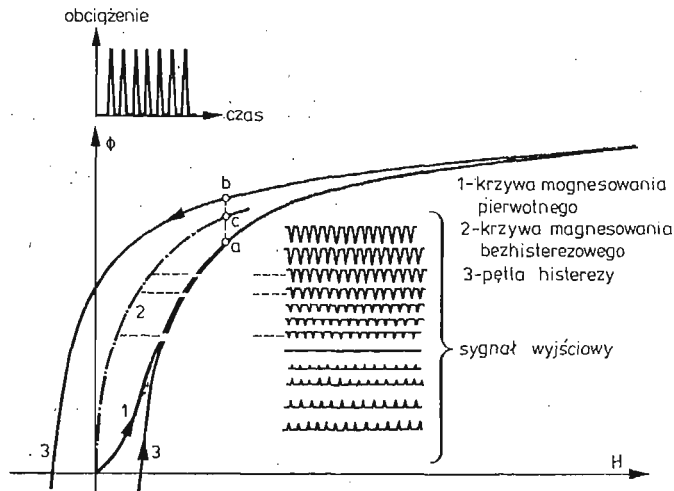
Wykres tej powierzchni przedstawiony jest na rys. 6 wraz z jej rzutem na płaszczyznę  $H-\Phi$  (lub  $H-B$ ). Brzegami rzutu są tradycyjne krzywe magnesowania, podczas gdy krzywą magnesowania bezhisterezyowego jest miejsce geometryczne lokalnych minimów tej powierzchni. Pojęcie powierzchni energii pozwala 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 zmierzających 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.



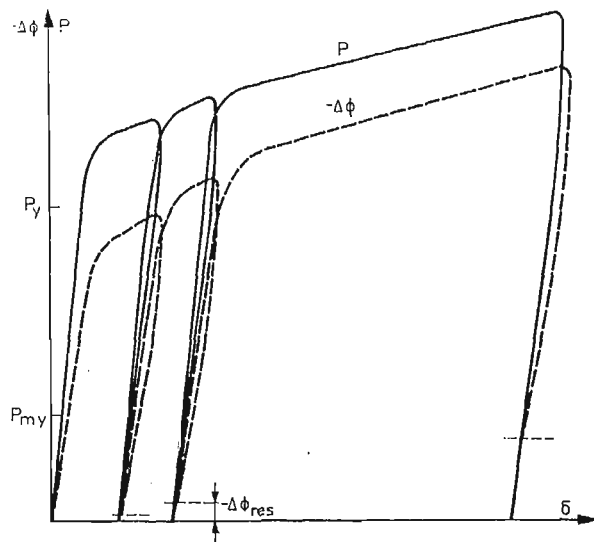
Rys. 6. Powierzchnia energii elektromagnetycznej w przestrzeni  $E-B-H$



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

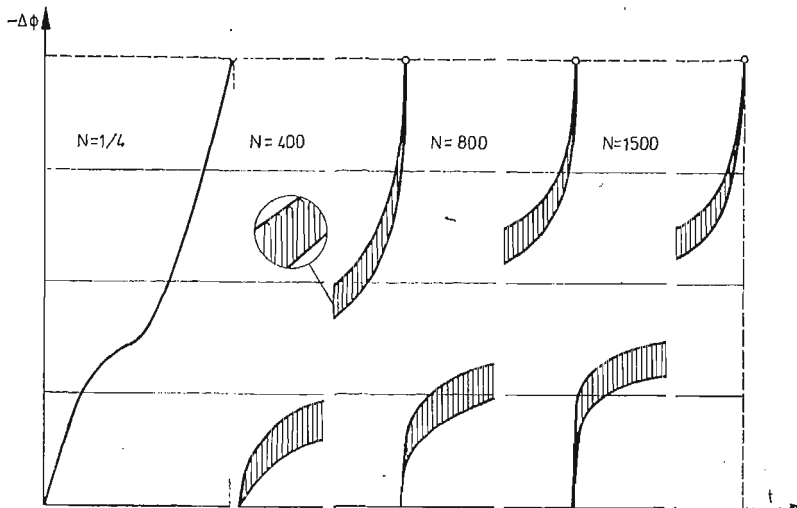
Elektromagnetyczny układ pomiarowy wykorzystany był również z powodzeniem do badań zmęczeniowych, zarówno nisko jak i wysoko cyklowych. W badaniach zmęczenia materiałów wiele wysiłku wkłada się w wyznaczenie krzywych Wöhlera [3], a szczególnie w określenie **wytrzymałości zmęczeniowej**. Przeprowadzone 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-

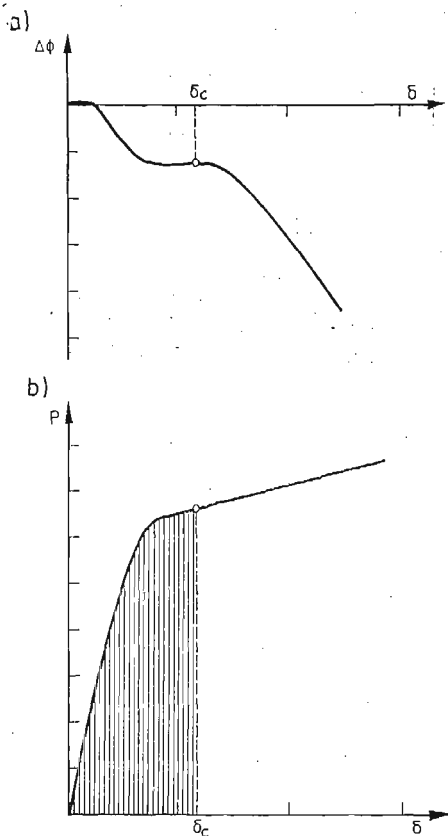


Rys. 9. Sygnał wyjściowy w zmęczeniu niskocyklowym. Na rysunku pokazane są cztery różne przebiegi czasowe strumienia magnetycznego  $-\Delta\Phi$  odpowiadające liczbom cykli od 1/4 do 1500 dla kolejno malejących amplitud obciążenia

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

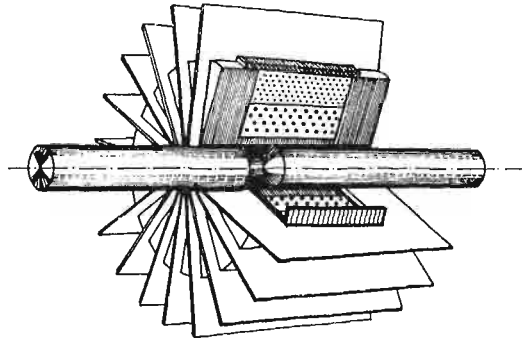


określając to ugięcie  $\delta_c$ , które zapoczątkowuje propagację szczeliny. Pozostaje tylko wyliczyć krytyczną wartość  $J_c$  całki  $J$  jako podwojone pole pod krzywą do punktu  $\delta_c$  (rys. 10b), podzielone przez minimalny przekrój próbki.

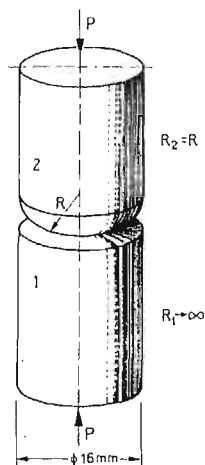
Szczegółowy opis próbek, sposobu przeprowadzania badań oraz zestawienie otrzymanych wyników znajduje się w [5].

### 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.

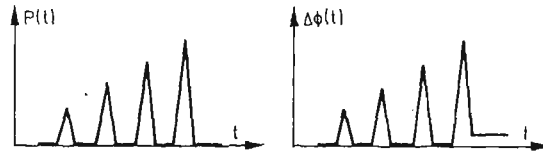
Promień zaokrąglenia ( $R$ ) wynosił w tych próbach 80 mm (rys. 12). Wykonano trzy próby dla każdego rodzaju stali, a otrzymane wyniki zestawiono na rys. 14. Wykreślone linie są krzywymi teoretycznymi określającymi moment mikro i makropłynięcia w półprzestrzeni, na którą oddziałuje kula. Podstawowe wielkości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

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

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

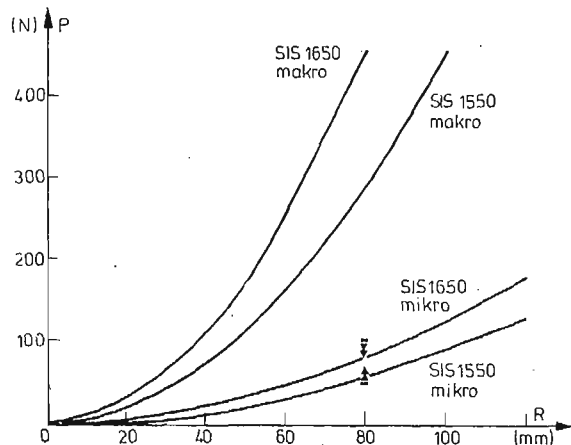
$$\sigma_{eT} = 0.62p_0,$$

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.*