

POMIAR ODKSZTAŁCEŃ PLASTYCZNYCH METODĄ MORY¹⁾

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 SO²⁾) na obraz siatki wzorcowej SW³⁾ [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} :

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

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

Warszawa 4-6 września 1978

²⁾ Siatka SO — siatka naniesiona na obiekt, która ulega odkształceniu.

³⁾ Siatka SW — siatka wzorcowa.

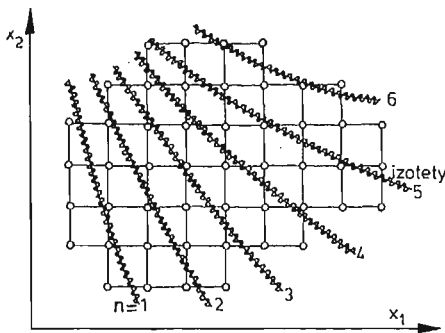
Dla skończonych deformacji miarą jest tensor odkształcenia Almansiego:

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

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



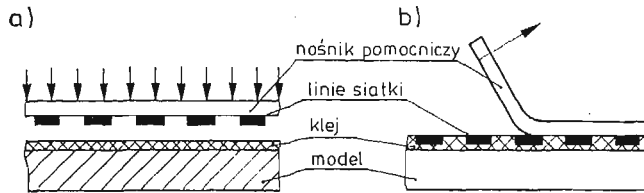
Rys. 1. Dyskretyzacja odkształconego obszaru za pomocą siatki kwadratowej

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

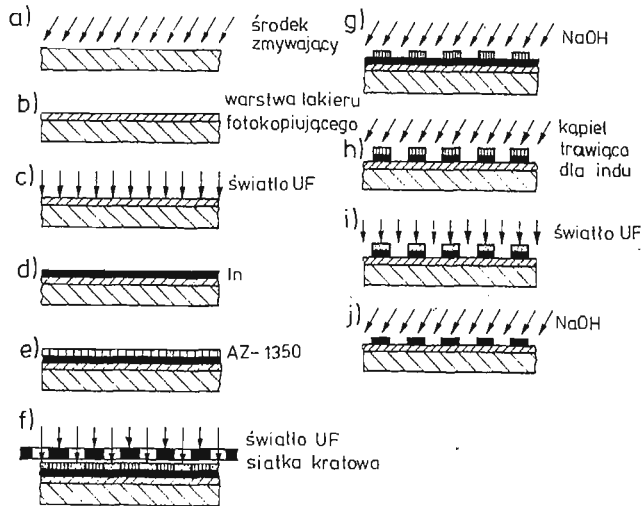
Procedura nanoszenia na obiekt badany siatki przedmiotowej SO, która ulega odkształceniu razem z modelem (elementem konstrukcyjnym) następcza największej kłopotów. Poniżej podano opis metody, która bazuje na uprzednio przedstawionej przez Zandmana technice nanoszenia siatki (rys. 2). Oddzielnie przygotowane 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

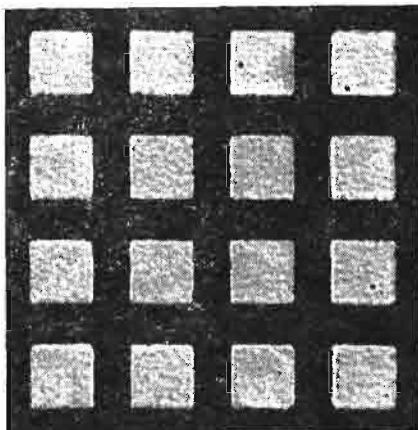


Rys. 3. Tok postępowania w celu wytworzenia siatki SO (nanoszonej na obiekt)

- a) Oczyszczenie nośnika pomocniczego (folia poliestrowa, podłoże-film ORWO 180 μm , hostaphan 125, melinex 100 μm) w roztworze alkilosulfonianu, opłukanie wodą destylowaną.
- b) Powlekanie warstwą ujemnego lakieru fotokopiującego na grubości 0,3 μm .
- c) Naświetlanie wszystkich warstw.
Cienka warstwa lakieru bezpośrednio na nośniku pomocniczym gwarantująca dokładne przeniesienie siatki (6).
- d) Napylenie próżniowe indem (grubość 200 μm) przedtem oczyszczenie powierzchni przez wyżarzanie
- e) Powlekanie 0,5 μm 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 μm

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°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

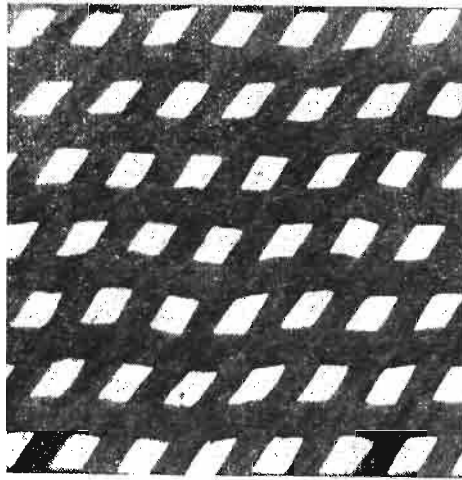
Płyta ORWO LO2

Fototechniczna płyta FU5

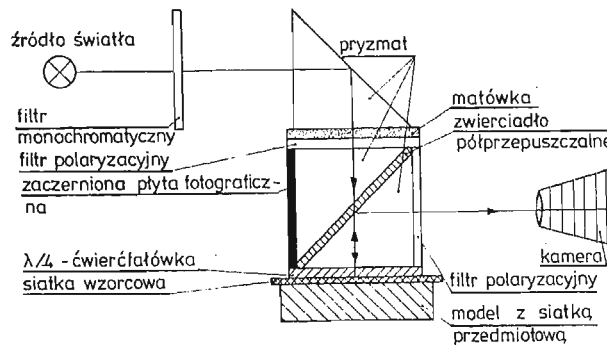
Filmy: Kreskowe i siatkowe filmy reprodukcyjne na stałym podłożu poliestrowym (0,10 mm lub 0,18 mm grubości)

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° 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°

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

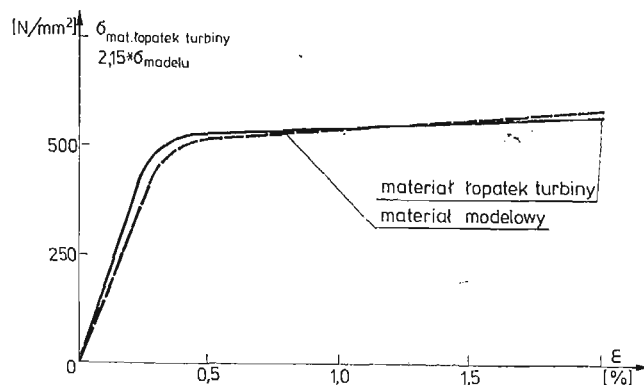
Przy pomiarze odkształceń plastycznych można rozróżnić trzy zasadnicze grupy zagadnień.

- 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.

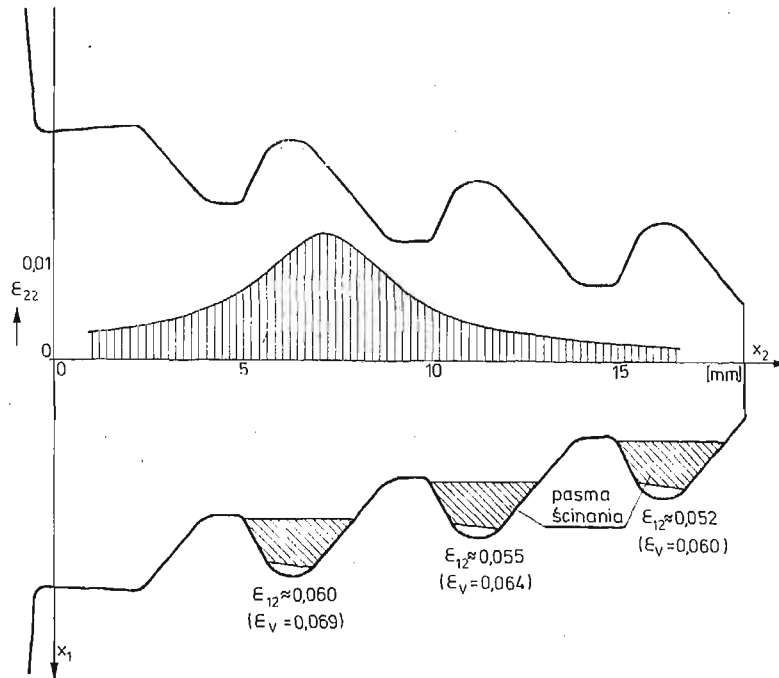
Poniżej zostaną przedstawione pojedyncze przykłady wyników badań dla wymienionych grup zagadnień.

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.

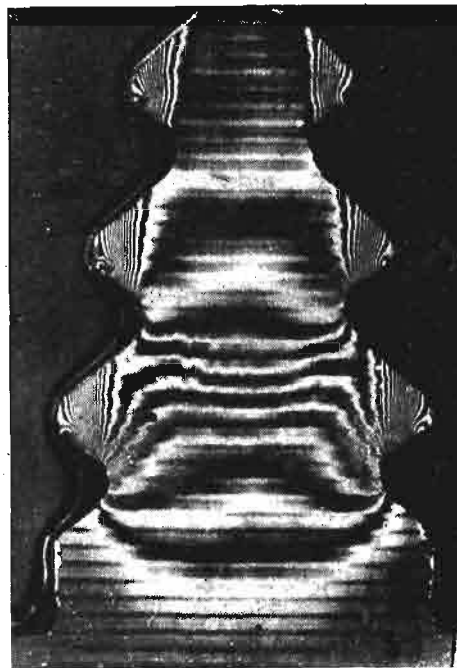


Rys. 7. Wykres σ - ϵ materiału łopatek turbiny i materiału modelu. Materiał łopatek: żaroodporny stop niklowy EI 437B (60 ST 5632-61), $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ - } 2 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, $T = 500 \text{ - } 600^\circ\text{C}$ Materiał modelowy: Al Zn Mg 1F26 $\dot{\epsilon} = 1,3 \cdot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



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

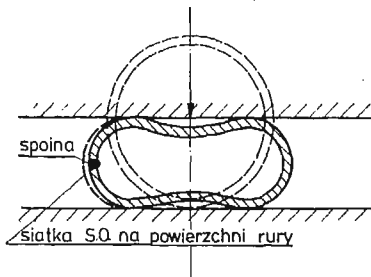


Rys. 9. Plastikzne odkształcenia zamka łopatki (opracowanie rysunku 8)

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 ϵ , 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.

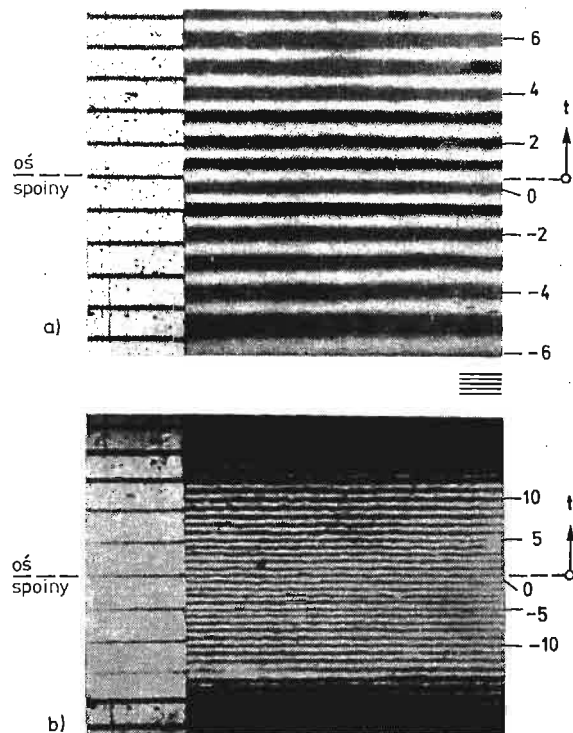
Dla tego zadania metoda mory okazała się szczególnie przydatna ze względu na swoje unikalne właściwości rejestracji dużych odkształceń dla bardzo małych długości pomiarowych (rys. 11).

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)

$$v_i = (v_1 v_2 0)$$



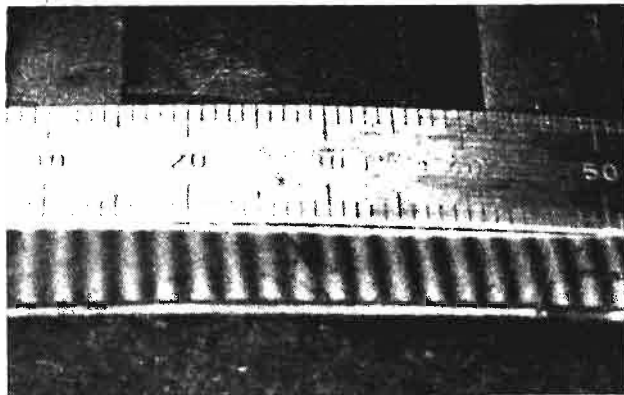
Rys. 11. Prążki mory w otoczeniu spoiny. Rura $40\text{ mm} \times 2,5\text{ mm}$ (ze stali St. 35), indowa siatka liniowa o gęstości 25 linii/mm;

— — — 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%

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

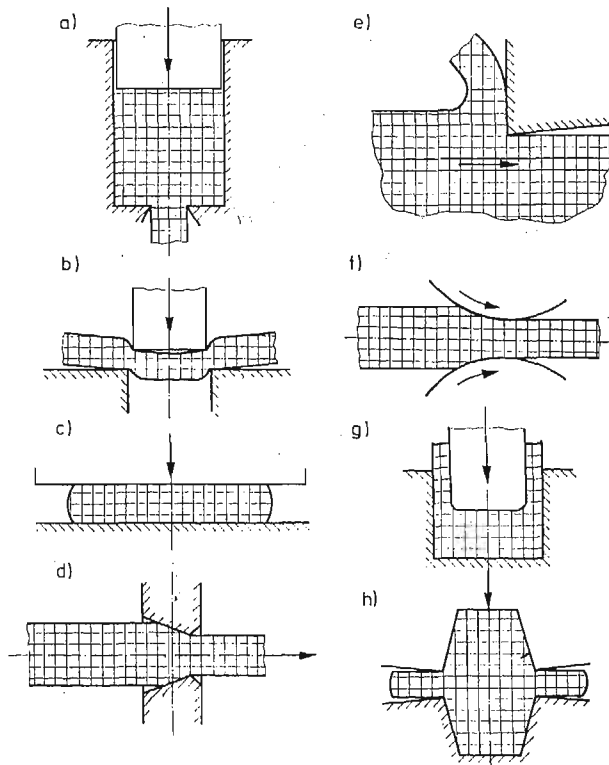
$$(7) \quad \dot{\sigma}_{33} \leq 0, \quad \sigma_{13} = \sigma_{23} = 0$$

gdzie v_1 oznacza wektor prędkości

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

σ_{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-

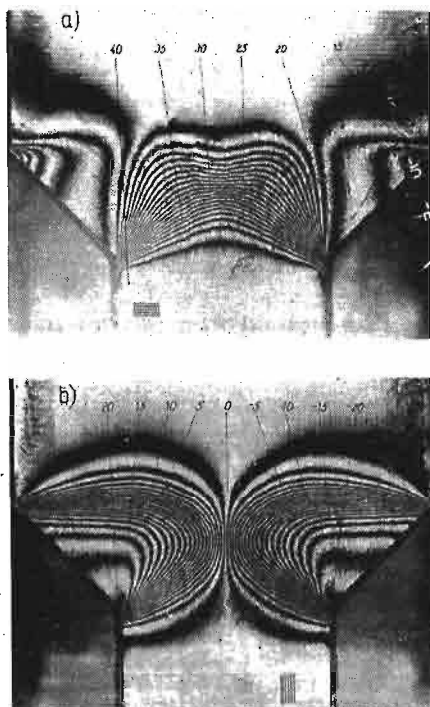


Rys. 13. Przykłady procesów kształtowania, które mogą być analizowane opisaną tu metodą:

- a) toczenie
- 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 Δt .



Rys. 14. Pole izotet przy płaskim wyciskaniu współbieżnym

Materiał modelowy: eutektyczny stop cynowo-olowiowy (wysokoplastyczny)

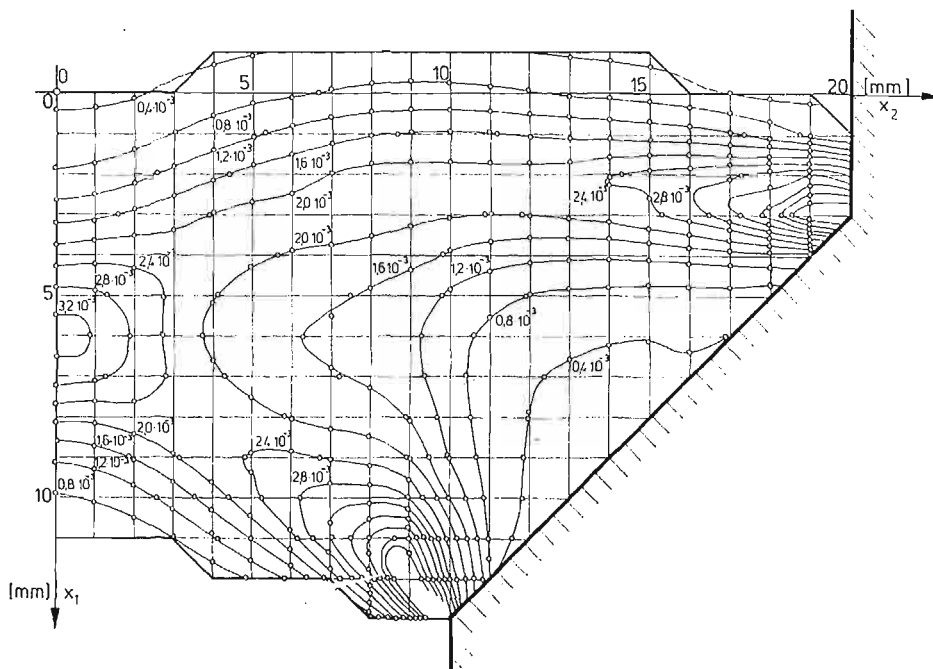
Siatka SO: kratowa siatka indowa o 25 liniach/mm naklejana przy użyciu plastyfikowanej żywicy epoksydowej, siatka wzorcowa: LP2,

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

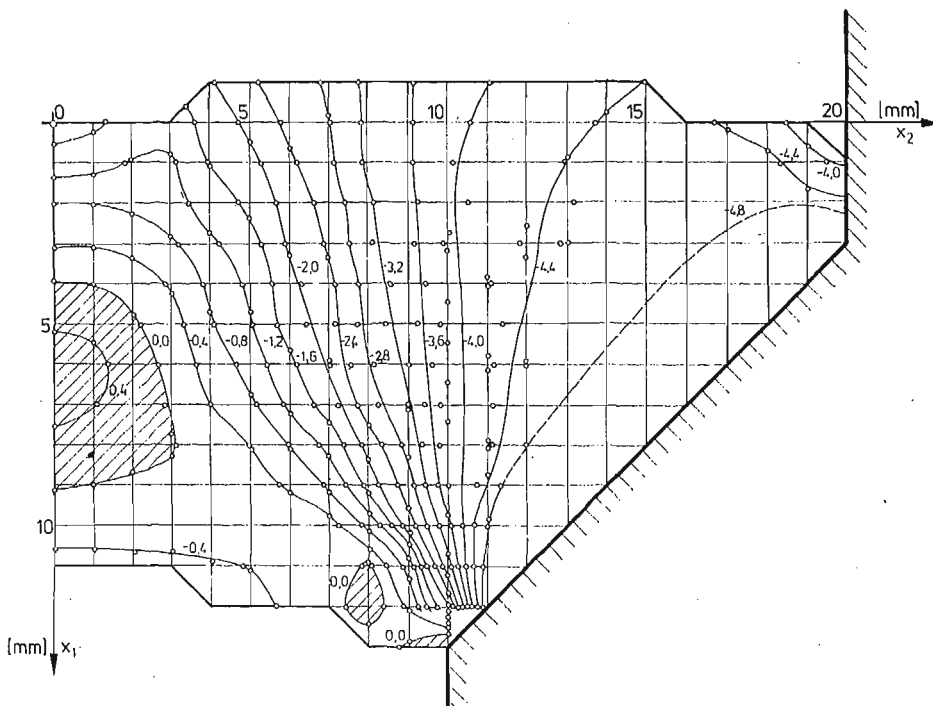
a) przemieszczenia w kierunku tłoczenia

b) przemieszczenia w kierunku poprzecznym

4. Wyjęcie wytłoczki z odkształconą siatką SO i pomiar pól przemieszczeń dla tych przedziałów czasowych Δt 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 σ_{11} (parametr w kp/mm^2). W środku pasma i na końcu matrycy występują naprężenia rozciągające

niach naprężenia posłużono się następującą zależnością materiału lepkosprężystego

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

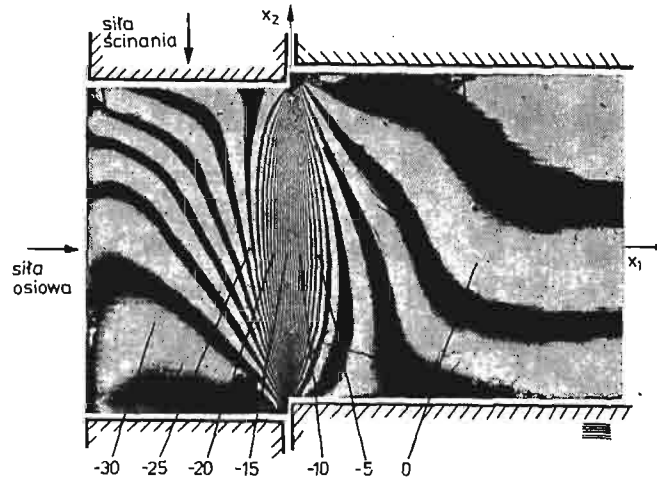
gdzie

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 σ i prędkością odkształcenia $\dot{\epsilon}$ w jednoosiowym stanie naprężeń [12].

3.5. Cięcie. 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 siatka liniowa o gęstości 25 linii/mm;

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

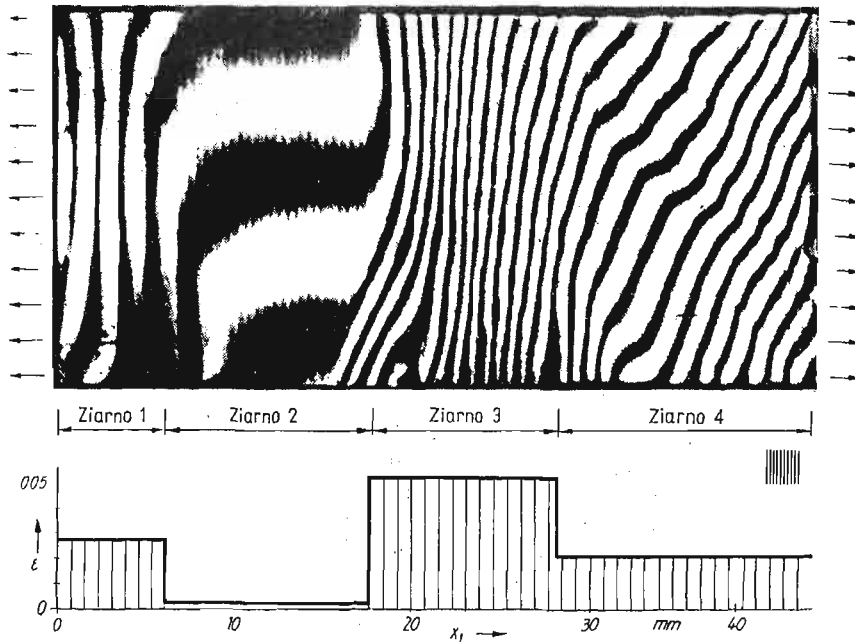
Siła osiowa: 353 N; siła tnąca: niemożliwa do określenia

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 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 umożliwiła 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 с 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.