

FOTOGRAMETRYCZNA METODA POMIARU PŁASKIEJ DEFORMACJI(*)

ANDRZEJ DRESCHER, STANISŁAW OSTAFICZUK,
STANISŁAW RUDOWSKI i WIESŁAW TRĄMPCZYŃSKI (WARSZAWA)

W pracy omówiono pewną optyczną metodę pomiaru płaskiej deformacji ciała polegającą na wykorzystaniu obrazu stereoskopowego, powstającego na skutek paralaksy czasowej. Podstawową zaletą metody jest jej polowy charakter, łatwość przygotowania ciała do pomiarów oraz możliwość natychmiastowej oceny charakteru deformacji i selekcji doświadczeń. Podano przykłady zastosowania metody w badaniach ośrodków sypkich i metali. Omawiana metoda może znaleźć szersze zastosowanie w wielu badaniach doświadczalnych.

1. WSTĘP

W przeważającej liczbie badań doświadczalnych podejmowanych w ramach problematyki mechaniki ośrodków odkształcalnych podstawowym celem doświadczeń jest określenie deformacji występujących w ośrodku na skutek różnych oddziaływań zewnętrznych (obciążeń, przemieszczeń, temperatury). Powszechność tego celu doświadczeń przy równoczesnej ich specyfice zależnej od rodzaju ośrodka, wielkości i charakteru odkształceń — spowodowała powstanie szeregu metod pomiaru deformacji wykorzystujących różne zjawiska fizyczne (elektryczne, optyczne, akustyczne, mechaniczne i magnetyczne). W konsekwencji każda z tych metod posiada inne zalety i ograniczenia, a zatem inny zakres stosowalności.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie pewnej optycznej metody pomiaru płaskiej deformacji, wykorzystującej efekt stereoskopowy wywołany paralaksą czasową i fotogrametryczny pomiar przemieszczeń. Aczkolwiek metoda wywodzi się z fotogrametrii stosowanej powszechnie w opracowaniach map topograficznych, jej zastosowanie w badaniach doświadczalnych z zakresu mechaniki ośrodków odkształcalnych jest, zdaniem autorów pracy, niedostateczne. Posiada ona bowiem w porównaniu do innych metod szereg zalet wynikających z fotograficznej rejestracji przemieszczeń i polowego charakteru ich pomiaru.

W pracy przedstawiono istotę metody, wymagania i ograniczenia jej stosowalności oraz szereg przykładów jej zastosowań. Szczegółowe informacje o podstawach i zasadach fotogrametrii, przyrządach pomiarowych i technice prowadzenia pomiarów zawarte są w szeregu specjalistycznych prac i monografii np. [4 i 9]. Podstawy opisanej metody można znaleźć m.in. w pracach [2, 5, 6, 7 i 8].

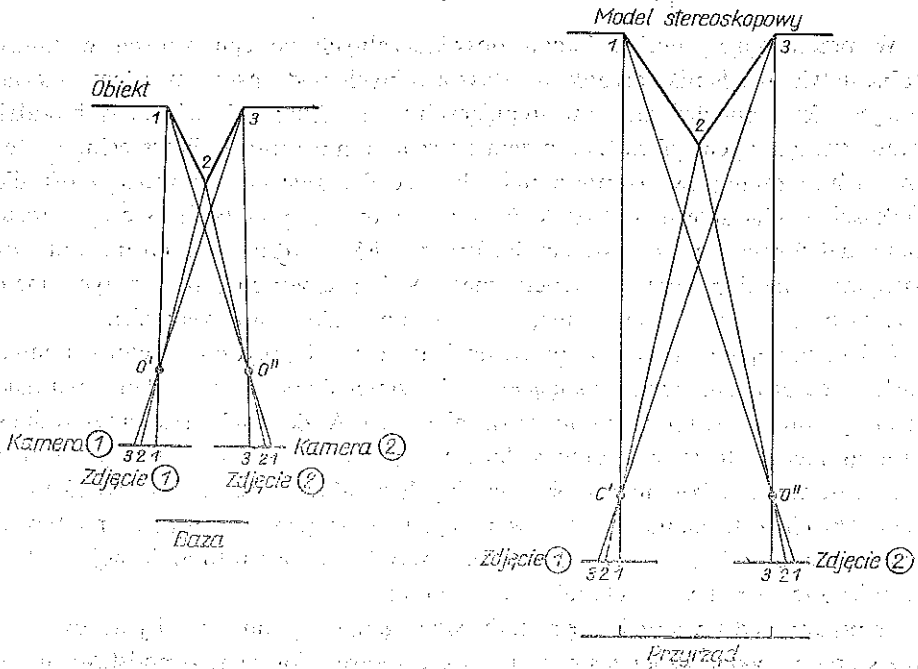
(*) Praca wykonana w ramach problemu węzłowego 05.12 „Wytrzymałość i optymalizacja konstrukcji maszynowych i budowlanych”, koordynowanego przez Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN.

2. OPIS METODY

2.1. Zasada przestrzennego widzenia i jej zastosowanie do pomiaru płaskiej deformacji

Zdolność przestrzennego widzenia obiektów trójwymiarowych wynika z faktu odbierania prawym i lewym okiem obrazów różniących się między sobą. Różnica obrazów spowodowana jest odbieraniem ich z dwóch miejsc oddalonych od siebie w przybliżeniu 60 mm, co stanowi tzw. bazę oczną.

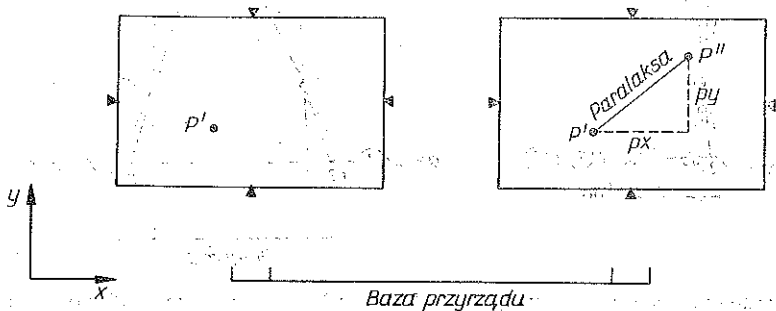
Podobnie dwa zdjęcia fotograficzne (fotogramy) pewnego obiektu wykonane z dwóch różnych miejsc umożliwiają przestrzenną (stereoskopową) jego obserwację. Dwa fotogramy obejmujące ten sam obiekt z różnych stanowisk oddalonych o pewną odległość (bazę) tworzą stereogram. Do stereoskopowego oglądania fotogramów służą różne przyrządy umożliwiające jednoczesną obserwację jednego ze zdjęć lewym okiem a drugiego zdjęcia okiem prawym. Warunkiem powstania wrażenia odbioru przestrzennego, nazywanego modelem stereoskopowym obiektu, jest istnienie na fotogramach różnicy wzajemnego położenia tych samych punktów obiektu w kierunku równoległym do bazy obserwacji w przyrządzie.



Rys. 1. Zasada powstawania modelu stereoskopowego z dwóch zdjęć obiektu trójwymiarowego wykonanych z różnych położeń

Różnica położenia obrazu tego samego punktu obiektu na dwóch fotogramach tworzących stereogram, mierzona względem wspólnego układu odniesienia (tzw. układu współrzędnych płowych), nazywana jest paralaksą. Paralaksa jest wynikiem odmiennego biegu promieni rzutujących punkty obiektu na każde ze zdjęć (rys. 1).

W ogólności paralaksy punktów obiektu nie muszą być równoległe do bazy optycznej w przyrządzie. W takim przypadku wrażenie przestrzenności obiektu wywołane jest nie całą paralaksą, ale jedynie jej składową w kierunku równoległym do bazy przyrządu (rys. 2). Wynika, stąd, że przestrzenność obrazu zależy również od orientacji fotogramów w przyrządzie. Zjawisko to nie występuje przy bezpośredniej obserwacji obiektu, gdyż paralaksy jego punktów są zawsze równoległe do bazy ocznej.

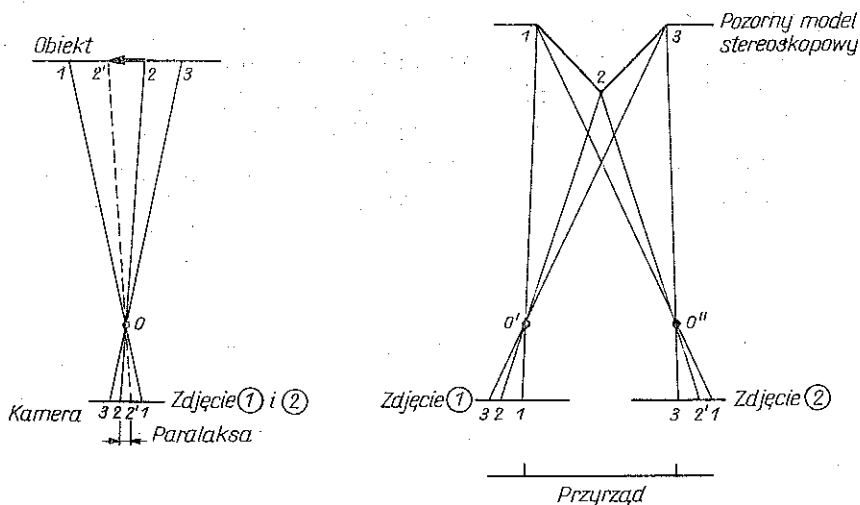


Rys. 2. Paralaksa i jej składowe

Paralaksa obrazów punktów obiektu na fotogramach może powstać nie tylko na skutek wykonywania zdjęć z dwóch różnych miejsc. Pojawi się ona także, jeżeli zdjęcia wykonywane są jedną kamerą i z jednego jej położenia, ale punkty obiektu przemieszczają się w czasie pomiędzy kolejnym wykonywaniem zdjęć. Taka paralaksa nazywana jest paralaksą czasową, a para kolejnych fotogramów stereogramem czasowym. Wrażenie przestrzenności takiego stereogramu jest identyczne z wrażeniem powstającym ze zdjęć wykonywanych z dwóch położen kamery. Jediną różnicą jest to, że model przestrzenny stereogramu czasowego uzyskuje się tylko z tych części obiektu, w których nastąpiły zmiany położenia punktów w czasie pomiędzy wykonywaniem zdjęć. Obserwacja stereoskopowa fotogramów czasowych nie służy zatem do oceny czy pomiaru przestrzennego kształtu obiektu, a jedynie do oceny zmian jego kształtu.

Dla powstania wrażenia przestrzenności stereogramu czasowego, podobnie jak stereogramu otrzymanego z dwóch położen kamery, konieczne jest, by przemieszczenia punktów obiektu, a zatem ich paralaksy na fotogramach, posiadały składową równoległą do bazy przyrządu. Warunek ten będzie spełniony również w przypadku, gdy obiekt ma powierzchnię płaską, a przemieszczenia jej punktów zachodzą jedynie w płaszczyźnie powierzchni. Obserwując stereogram takiej deformacji w przyrządzie uzyskamy nadal wrażenie obrazu przestrzennego, będzie to jednak obraz pozorny (rys. 3).

Ten szczególny przypadek deformacji ma miejsce dla ciała znajdującego się w płaskim stanie odkształcenia na powierzchni równoległej do płaszczyzny ruchu jego punktów. Dysponując fotogramami czasowymi tej powierzchni możemy zatem przetworzyć optycznie jej przemieszczenia na obraz przestrzenny i zamiast klasycznych metod pomiaru deformacji zastosować metody fotogrametryczne. Powyższa możliwość jest istotą opisywanej metody pomiaru płaskiej deformacji.



Rys. 3. Zasada powstawania pozornego modelu stereoskopowego z dwóch zdjęć obiektu płaskiego wykonanych z jednego położenia ale w różnym czasie

2.2. Metoda fotogrametrycznego pomiaru deformacji

Fotogrametryczny pomiar obrazu przestrzennego sprowadza się do pomiaru głębi czy wysokości jego punktów względem pewnego znanego poziomu odniesienia a następnie do ich analitycznego lub graficznego przetworzenia na rzeczywisty kształt obiektu trójwymiarowego lub też do określenia jego przemieszczeń. W przypadku interesującej nas płaskiej deformacji wysokość czy głębia danego punktu pozornego obrazu przestrzennego jest liniowo związana ze składową paralaksy (a zatem przemieszczenia) równoległą do bazy przyrządu.

Do pomiaru wysokości obrazu przestrzennego służą, znajdujące się w przyrządach pomiarowych, dwa znaczkii o regulowanej odległości. Jeden znaczek jest widoczny lewym okiem na tle lewego zdjęcia, drugi widoczny okiem prawym na tle zdjęcia prawego. W efekcie powstaje obraz jednego znaczka położonego na pewnej głębi czy wysokości. Zmieniając odległość pomiędzy znaczkami uzyskujemy wrażenie zmiany jego wysokości czy głębi. Umiejscawiając obraz znaczka pomiarowego w wybranym punkcie modelu stereoskopowego na jego widocznej przestrzennie powierzchni (lewy znaczek leży wtedy w takim samym punkcie obrazu lewego zdjęcia, co znaczek prawy na obrazie zdjęcia prawego) możemy odczytać na przyrządzie lokalizację tego punktu w odpowiednim układzie współrzędnych płaskich fotogramu oraz jego odległość (głębnię), tzn. składową paralaksy w kierunku bazy przyrządu (paralakse podłużną p_x). Lokalizacja i składowa paralaksy odnoszą się do fotogramu, ich przetworzenie na wartości rzeczywiste wymaga znajomości jego skali.

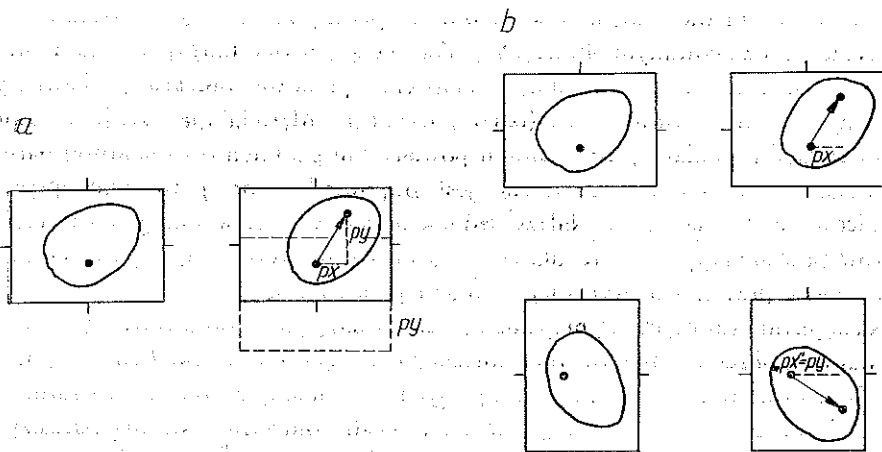
W przypadku istnienia składowej paralaksy punktów poprzecznej do bazy przyrządu obraz znaczka pomiarowego rozdwaja się. Dla uzyskania obrazu jednego znaczka leżącego na powierzchni modelu stereoskopowego konieczne jest dokonanie kompensacji składowej poprzecznej paralaksy. Kompensację wykonuje się przez poprzeczny ruch jednego ze znaczków (albo analogiczny ruch jednego z fotogramów).

Deformacja płaskiego obiektu będzie określona jednoznacznie, jeżeli znane są wektory przemieszczeń, czyli paralaksy jego punktów. Znając wektory przemieszczeń, możemy określić zgodnie z ich definicją składowe tensora odkształceń lub tensora przyrostu odkształcenia.

Z punktu widzenia metody prowadzenia pomiarów przemieszczeń na podstawie obrazu przestrzennego wyróżnić możemy pomiary punktowe i liniowe.

Pomiary punktowe. Pomiary wektorów przemieszczeń w dowolnie wybranych punktach płaszczyzny obiektu czy fotogramu wykonywać można w dwojaki sposób:

1. Mierzając dwie prostopadłe składowe wektora przemieszczenia równocześnie jako paralaksę podłużną p_x i poprzeczną p_y punktu w jednym położeniu fotogramów. Paralaksa poprzeczna odpowiada wartości przesunięcia znacznika pomiarowego lub fotogramu niezbędnego do uzyskania jednego jego obrazu (kompensacji paralaksy poprzecznej, rys. 4a).



Rys. 4. Orientacja fotogramów przy punktowym pomiarze paralaks

2. Mierzając dwie prostopadłe składowe wektora przemieszczenia oddzielnie jako paralaksę podłużną p_x dla dwóch położen fotogramów obróconych w przyrządzie o 90° (rys. 4b).

Pomiary liniowe. Pomiary liniowe polegają na przemieszczeniu znacznika pomiarowego po powierzchni modelu stereoskopowego i odczytywaniu czy automatycznym wykreślaniu paralaks lub też izol linii o stałej wartości paralaksy. W pierwszym przypadku otrzymujemy profil powierzchni modelu, czyli rozkład paralaks po odpowiednim przekroju fotogramu. W drugim, prowadząc znacznik na pewnej stałej wysokości modelu stereoskopowego, otrzymujemy izolinię odpowiadającą cięciu warstwicowemu modeli. W obu przypadkach pomiary wykonujemy oddzielnie dla obu prostopadłych składowych paralaks, tzn. dla dwóch położen fotogramów obróconych o 90° . Paralaksę poprzeczną kompensuje się stopniowo w trakcie prowadzenia znacznika pomiarowego.

Dobór odpowiedniej metody pomiarów uwarunkowany jest ich celem oraz przyrządem pomiarowym. Pomiary punktowe w węzłach regularnej siatki współrzęd-

nych płaskich fotogramu pozwalają na łatwe obliczanie składowych tensorów odkształcenia czy przyrostu odkształcenia. Nowoczesne przyrządy do pomiarów punktowych umożliwiają automatyczny zapis składowych przemieszczeń na taśmie perforowanej, a stąd można je wprowadzić do komputerów. Pomiarów liniowe dają graficzny obraz pola przemieszczeń i jego cech charakterystycznych. Nadają się zatem głównie do jakościowej oceny pola przemieszczeń.

Oprócz możliwości prowadzenia pomiarów punktowych i liniowych model stereoskopowy pozwala na bezpośrednią jakościową ocenę pola przemieszczeń, a tym samym na wybór odpowiedniej metody pomiarów i ich zagęszczenia. Pozwala także na bardzo szybką wstępną weryfikację doświadczeń, których dokumentację stanowią fotogramy, czy też ich selekcję do dalszych opracowań.

2.3. Wymagania i dokładność metody

Podstawowym warunkiem wykorzystania opisanej metody jest uzyskanie zdjęć o optycznie zróżnicowanym obrazie. Wynika to stąd, że oko ludzkie nie jest w stanie określić położenia, a zatem zmiany położenia punktów obiektu pozbawionych optycznych cech wyróżniających (barwy, kształtu). Metoda nie nadaje się zatem do obserwacji i pomiaru przemieszczeń powierzchni gładkich o jednakowej barwie; dla zastosowania metody konieczne jest odpowiednie przygotowanie optycznie zróżnicowanej powierzchni. Należy jednak unikać wykonywania geometrycznych wzorów powtarzających się regularnie i gęsto rozmieszczonych, gdyż utrudnia to uzyskanie w przyrządzie wyraźnego obrazu przestrzennego.

Następnym istotnym wymaganiem, zapewniającym poprawność pomiarów, jest stałość położenia aparatu fotograficznego względem obiektu. Unika się w ten sposób wprowadzenia poprawek związanych ze zmianą położenia aparatu. Dla uzyskania modelu stereoskopowego w jednej skali konieczne jest, aby płaszczyzna kliszy w aparacie fotograficznym była równoległa do płaszczyzny obiektu.

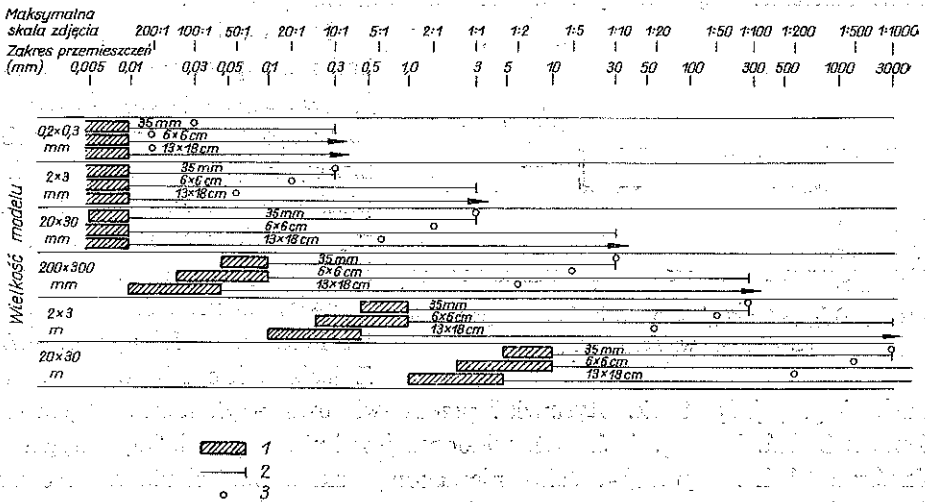
Na jakość obrazu przestrzennego, a zatem dokładność pomiarów, niekorzystny wpływ ma różnica oświetlenia lub obróbki fotograficznej kolejnych zdjęć.

Dla dokładnego określenia układu odniesienia dla wysokości poziomu odniesienia konieczne jest umieszczenie na obiekcie stałych elementów punktowych, liniowych bądź powierzchniowych nie ulegających żadnym zmianom w trakcie doświadczeń.

Dokładność pomiaru przemieszczeń zależy w dużej mierze od jakości fotogramów, stosowanych kamer fotograficznych i przyrządów pomiarowych (oraz wprawy operatora). Przy właściwym doborze tych elementów maksymalną dokładność pomiarów punktowych można ustalić na 0,002 mm w skali opracowanych negatywów. Należy tu zaznaczyć, że większą dokładność uzyskuje się opracowując bezpośrednio negatywy zdjęć, a nie ich pozytywy. Wpływa na to przede wszystkim większa rozdzielczość negatywu. Dokładność pomiarów liniowych jest zazwyczaj mniejsza niż punktowych i wynosi 0,01 mm (nie jest ona jednak większa niż 0,1 mm w skali wykonywanego rysunku).

Dla wyraźniejszego przedstawienia dokładności pomiarów punktowych i zakresu dopuszczalnych przemieszczeń w zależności od wielkości obiektu i negatywu spo-

rzędzono rys. 5. Wynika z niego, że dla większych wymiarów obiektu lepszą dokładność uzyskuje się używając większych aparatów fotograficznych. Tak np. weźmy pod uwagę obiekt o wymiarach 200 × 300 mm w standardowych warunkach masowych pomiarów. Przy zastosowaniu kamery o formacie negatywu 24 × 36 mm można mierzyć przemieszczenia od 0,1 do 30 mm z dokładnością od 0,05 dla przemieszczeń minimalnych, do 0,1 mm dla przemieszczeń maksymalnych. Przy zastosowaniu kamery o formacie negatywu 6 × 6 cm zakres przemieszczeń wynosi od 0,1 mm do 300 mm z dokładnością odpowiednio od 0,03 do 0,1 mm. Przy zastosowaniu kamery o formacie negatywu 13 × 18 cm zakres przemieszczeń wynosi od 0,05 mm do 300 mm z dokładnością od 0,01 mm do 0,05 mm.



Rys. 5. Dokładność i zakres mierzalności przemieszczeń jako funkcja wielkości obiektu i negatywu

Błędy pomiarów mogą być zmniejszone przez zastosowanie specjalnej procedury pomiarów (ograniczoną liczbą punktów, pomiary wielokrotne). W praktyce nie można jednak uzyskać dokładności większej niż 0,002 mm niezależnie od wielkości obiektu.

Powyższe uwagi o dokładności metody odnoszą się do poziomów paralaks. Wrażenie przestrzenności modelu, a tym samym jakościową ocenę pola przemieszczeń, uzyskuje się dla mniejszych przemieszczeń.

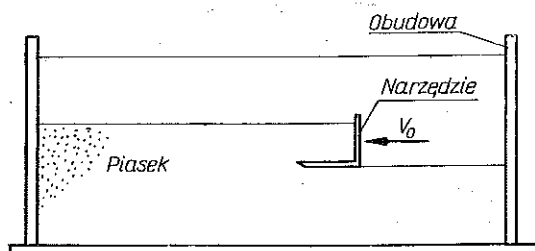
3. PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ METODY

Jedną z grup badań doświadczalnych, w których omówiona metoda może znaleźć szerokie zastosowanie, są badania zagadnień brzegowych płaskiego stanu odkształcenia ośrodków sypkich. Badania takie wykonywane są dość powszechnie, a ich celem jest zarówno ocena nośności granicznej ośrodka jak i jego kinematyki w stanie plastycznego płynięcia. Płaski stan odkształcenia ośrodka otrzymuje się przez umieszczenie go w prostopadłościennym, sztywnym pojemniku i przez ob-

ciążenie go na całej szerokości. Ściany zewnętrzne pojemnika, równoległe do płaszczyzny ruchu cząstek, wykonuje się z przezroczystego materiału, co pozwala na obserwację, bądź fotograficzną rejestrację położenia cząstek.

Celowość stosowania w powyższych badaniach fotogrametrycznej metody pomiaru przemieszczeń wynika z następujących faktów: a) ziarnista budowa materiałów sypkich zapewnia uzyskanie optycznie zróżnicowanych zdjęć; b) przemieszczenia są na tyle znaczne, że obraz przestrzenny jest wyraźny; c) cechą charakterystyczną deformacji ośrodków sypkich jest występowanie zlokalizowanych warstw znacznego ścignania, co jest widoczne na obrazie stereoskopowym w formie uskoków.

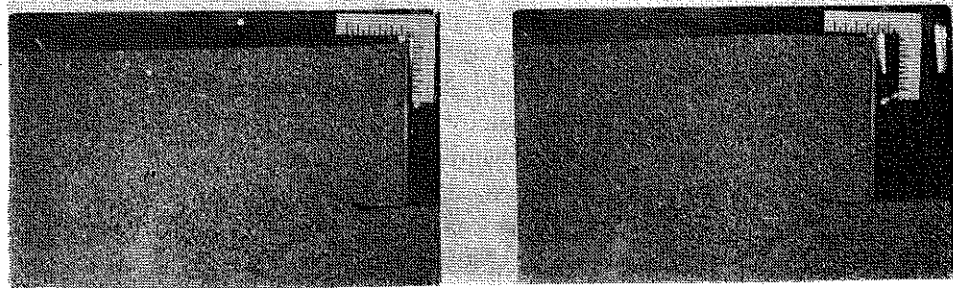
Poniżej przedstawimy kilka przykładów badań ośrodków sypkich w płaskim stanie odkształcenia, w którym zastosowano omawianą metodę.



Rys. 6. Schemat urządzenia do badania naporu narzędzia skrawającego na grunt.

Na rys. 6 pokazano schemat badania naporu narzędzia skrawającego na grunt (suchy piasek) stosowanego w maszynach do robót ziemnych [10]. Położenie ziarna piasku w trakcie przesuwu narzędzia rejestrowano małoobrazkowym aparatem fotograficznym ustawionym nieruchomo w odległości ok. 1 m od ściany pojemnika. Zdjęcia wykonano co 1 sek. przy czasie ekspozycji 1/500 sek. Rysunek 7 przedstawia dwa przykładowe zdjęcia uzyskane z badań. Na zdjęciach tych widoczna jest liniowa podziałka, służąca do określenia skali fotogramów. Jako nieruchomy układ odniesienia zastosowano ciekłą nić umieszczoną poza pojemnikiem.

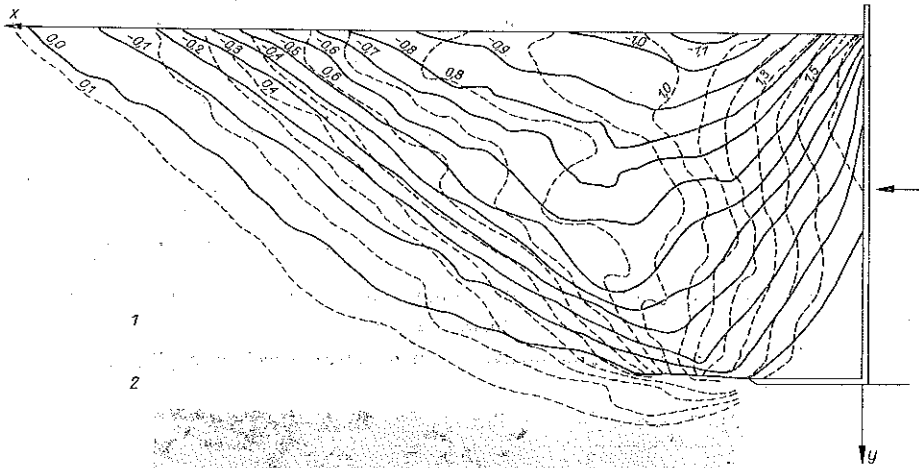
Celem badań było określenie kształtu obszaru materiału poruszanego (urabianego) narzędziem oraz pola prędkości cząstek wewnątrz tego obszaru. Wyniki badań



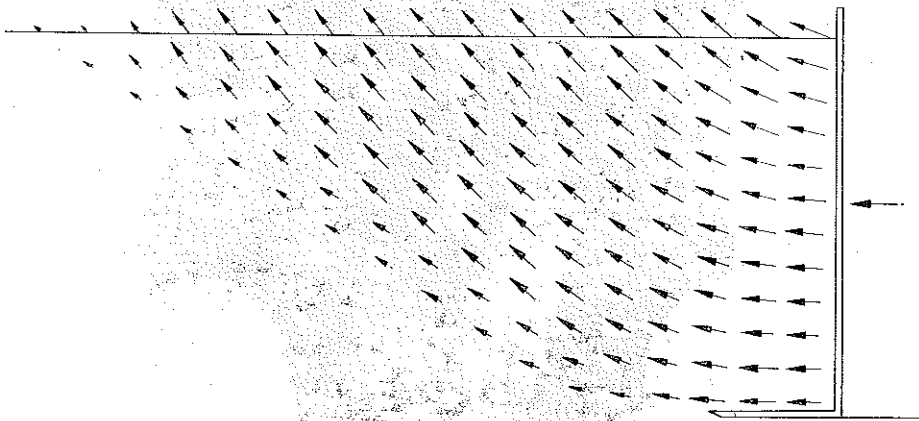
Rys. 7. Stereogram czasowy (dwa zdjęcia wykonane z jednego położenia aparatu)

porównano z teoretycznym polem prędkości otrzymanym przy założeniu sztywno idealnie-plastycznego modelu ośrodka. Prędkości cząstek utożsamiono z przyrostem przemieszczeń, mierząc te ostatnie na podstawie obrazu stereoskopowego z dwóch, odpowiednio wybranych, kolejnych zdjęć.

Rysunek 8, będący przykładem opracowania liniowego, przedstawia izolinie stałych wartości składowych przyrostu przemieszczeń w kierunku x i y . Wyniki punktowych pomiarów wektorów prędkości pokazuje rys. 9. Porównanie doświadczalnych i teoretycznych wektorów prędkości przedstawia z kolei rys. 10.

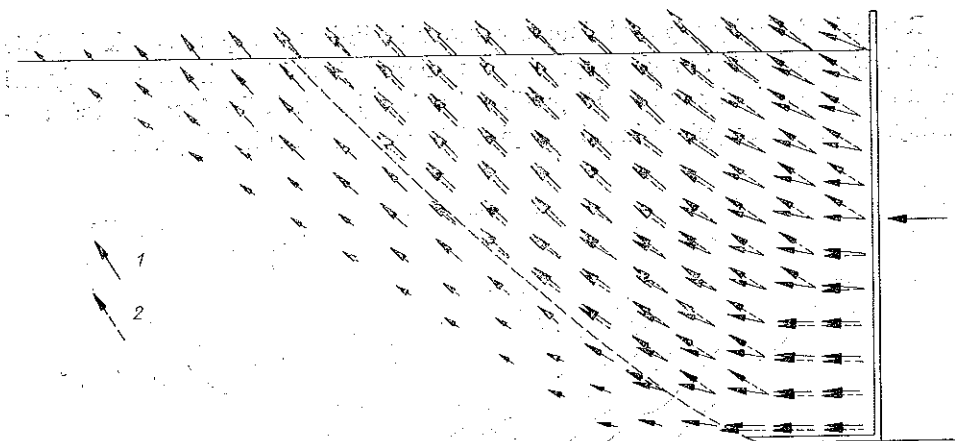


Rys. 8. Izolinie stałych wartości prędkości (przyrostów przemieszczeń)
— izolinie w kierunku y , - - - izolinie w kierunku x



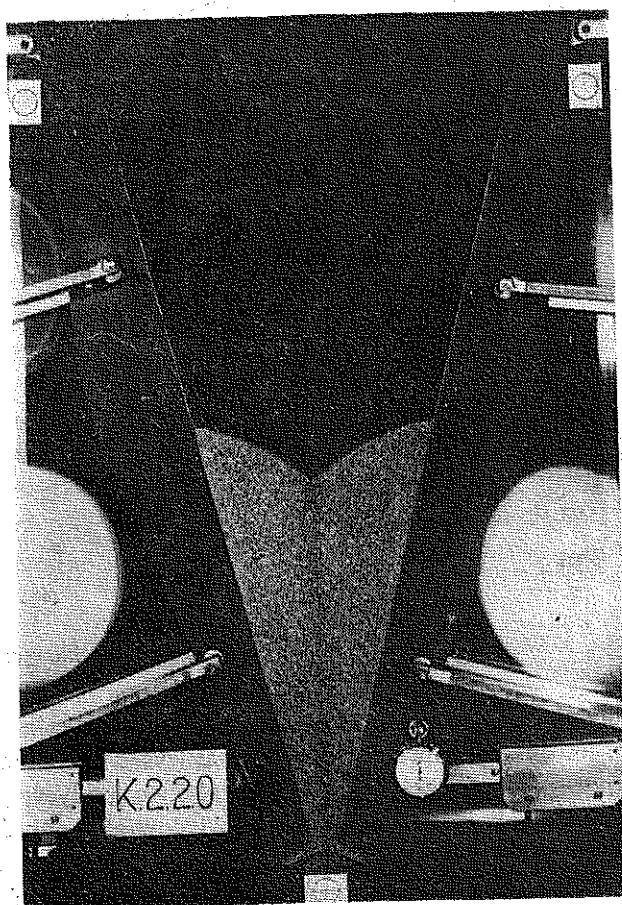
Rys. 9. Wektory prędkości określone z pomiarów punktowych

Kolejnym badaniem płaskiego ruchu ośrodka sypkiego, w którym zastosowano opisaną metodę, jest przepływ przez klinowy kanał (rys. 11). Celem tego badania było określenie pola prędkości cząstek przy nieustalonym wypływie grawitacyjnym. Na rys. 12 wykreślono izolinie stałych pionowych składowych prędkości oraz rozkłady tych składowych w kilku poziomych przekrojach kanału. Rysunek 13 przedstawia wektory prędkości. I w tym badaniu materiałem sypkim był suchy, średnioziarnisty piasek.

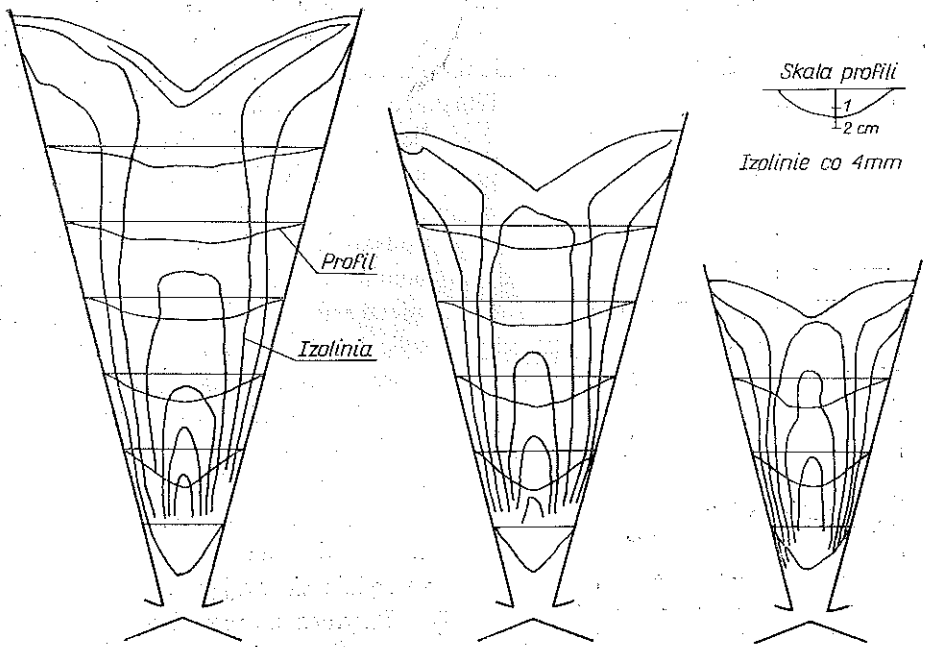


Rys. 10. Porównanie wektorów prędkości obliczonych teoretycznie z pomierzonymi w doświadczeniu

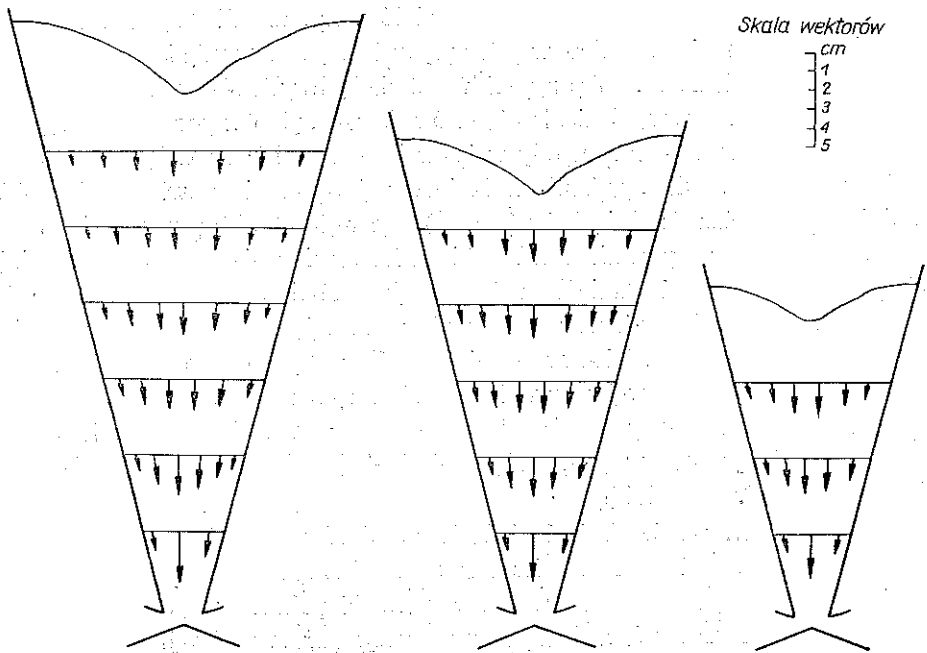
1) doświadczalny wektor prędkości, 2) teoretyczny wektor prędkości



Rys. 11. Stanowisko do badań grawitacyjnego wypływu ośrodka sypkiego z kanału

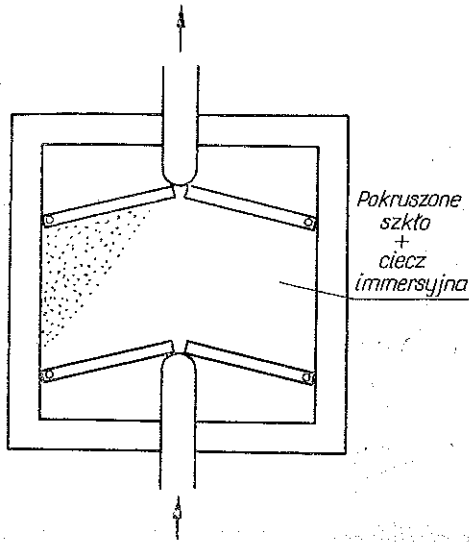


Rys. 12. Izolinie i profile pionowych przyrostów przemieszczeń w kolejnych fazach wypływu



Rys. 13. Wektory przyrostów przemieszczeń w kolejnych fazach wypływu

Omawianą metodę zastosowano także do pomiaru przemieszczeń w badaniu symetrycznego ścinania modelowego, czulego optycznie materiału sypkiego, jakim jest pokruszone szkło [3]. Schemat badania przedstawia rys. 14, a fotografię rozjaśnionych w świetle kołowo-spolarzowanym ziaren rys. 15. Ciemne punkty na zdjęciu,



Rys. 14. Schemat urządzenia do ścinania pokruszonego szkła

będące ziarnami pokruszonej porcelany, służyły do kontrolnego pomiaru przemieszczeń na mikroskopie. Na podstawie punktowych i liniowych pomiarów wektorów przyrostów przemieszczeń określono ich rozkłady (rys. 16), a następnie obliczono składowe tensora prędkości odkształcenia oraz jego część postaciową i objętościową.

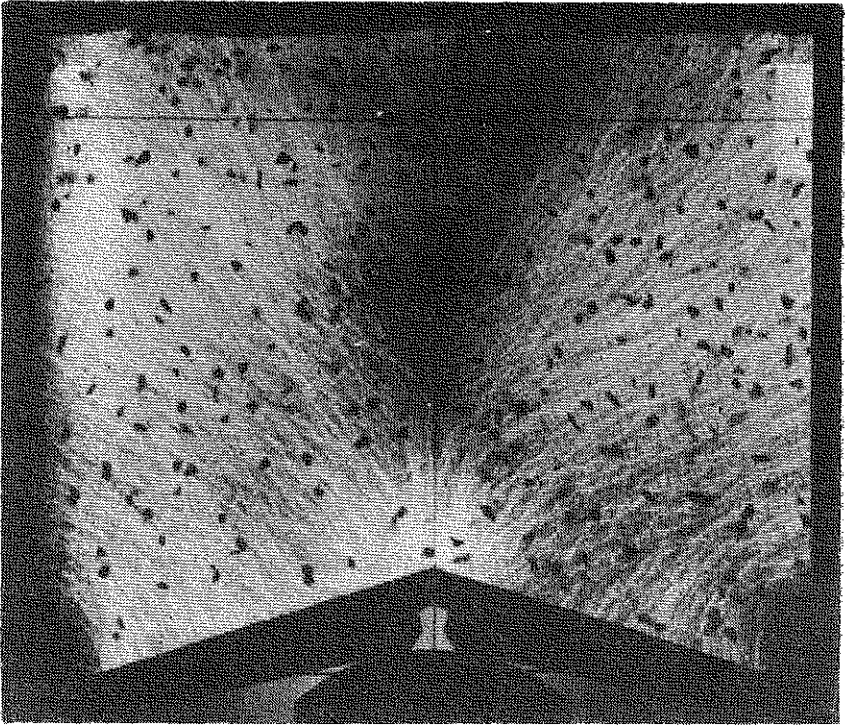
W obu ostatnich przykładach badań zachowano podobne warunki fotografowania jak w badaniu naporu narzędzia skrawającego.

Przytoczone przykłady fotogrametrycznego pomiaru pola przyrostów przemieszczeń dotyczyły badań na materiałach sypkich. Metodę można także stosować w badaniach innych materiałów, np. metali czy betonu, pod

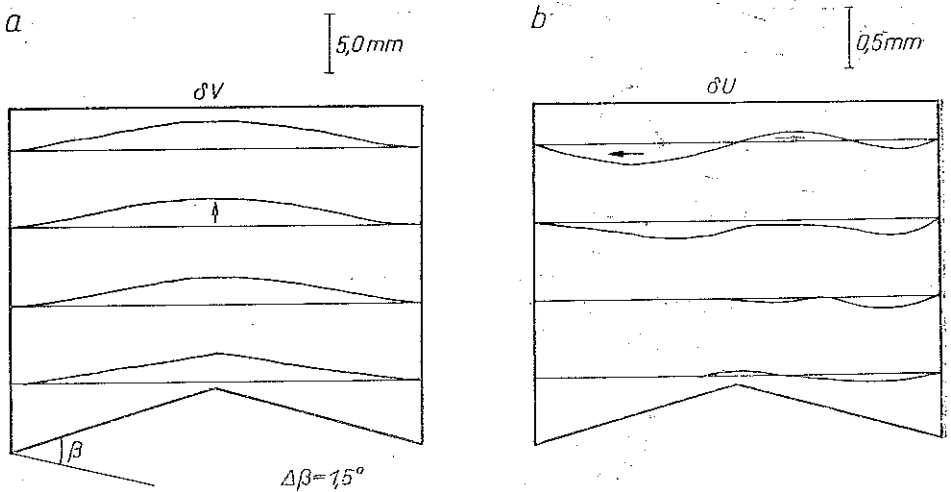
warunkiem otrzymania zróżnicowanych optycznie wystąpienia wystarczająco dużych przemieszczeń. W przypadku metali ciągliwych obserwacja stereoskopowa pozwala na łatwe wyróżnienie obszarów deformacji plastycznej i sprężystej.

Przykładem zastosowania metody w badaniach metali jest rozciąganie płaskiej próbki z otworem. Dla uzyskania zróżnicowanej optycznie powierzchni próbki aluminiowej natryskano na nią farbę (rys. 17). Rysunek 18 a i b przedstawia profile podłużne i poprzeczne przemieszczeń w kierunku rozciągania, a rys. 18 c izoliny tych przemieszczeń. W badaniu tym deformacja próbki zachodzi nie tylko w jej płaszczyźnie, stąd zaś uzyskane pomiary nie pozwalają na określenie wszystkich składowych odkształcenia. Możliwość taką dałoby połączenie obserwacji na podstawie zdjęć o bazie czasowej oraz wykonanych z dwóch położenia aparatu fotograficznego. Fotogrametryczny pomiar deformacji na podstawie zdjęć wykonanych z bazy rzeczywistej zastosowano w pracy [1] do badania procesu odkształcenia dynamicznego metalowej powłoki.

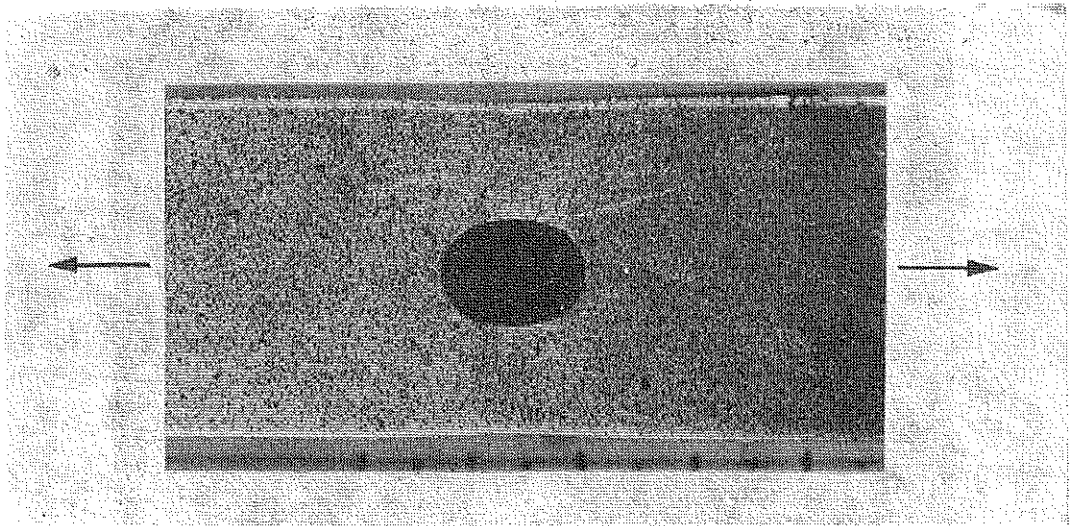
W omawianych przykładach badań do pomiarów przemieszczeń stosowano następujące przyrządy firmy Carl Zeiss, Jena: Stereokomparator 1818 i Stereokomputer (pomiary punktowe) oraz Stereoautograf 1318 EL i Topokart DE (pomiary liniowe). Należy tu jednak zaznaczyć, że do opracowań wstępnych czy selekcji badań wystarczające jest użycie najprostszych stereoskopów (np. produkcji Polskich Zakładów Optycznych).



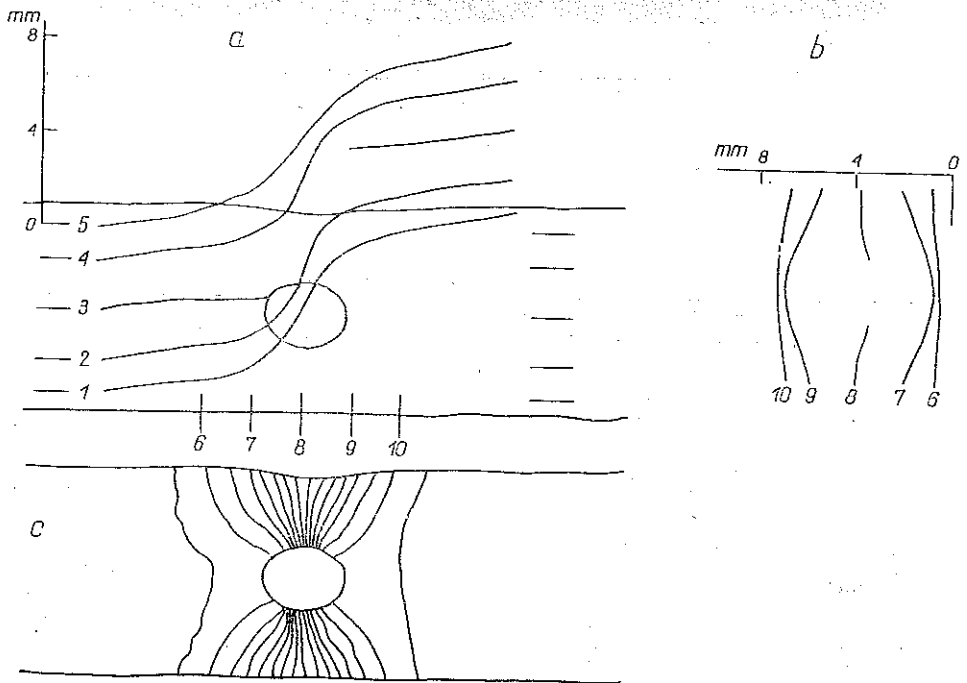
Rys. 15. Układ rozjaśnionych ziaren pokruszonego szkła oglądanych w świetle kołowo-spolaryzowanym



Rys. 16. Rozkłady przyrostów przemieszczeń: a) pionowych, b) poziomych



Rys. 17. Widok rozciągniętej próbki z natryskaną punktowo farbą



Rys. 18. Przemieszczenia w kierunku rozciągania: a) profile podłużne, b) profile poprzeczne, c) izolinie (co 0,45 mm)

4. WNIOSKI

Istota omówionej metody i przytoczone przykłady jej zastosowań wskazują, że fotogrametryczny pomiar przemieszczeń obiektów płaskich na podstawie stereogramów czasowych ma wiele zalet i może być z powodzeniem stosowany do niektórych badań z dziedziny mechaniki ośrodków odkształcalnych. Dotyczy to w szczególności badań na materiałach sypkich, gdzie tradycyjne metody polegające na punktowym pomiarze położenia wybranych ziaren z pomocą mikroskopu są niezwykle pracochłonne i często utrudnione przez niemożliwość identyfikacji ziaren na kolejnych zdjęciach. Odnosi się to także do badań na innych materiałach. Stosowane np. w metalach metody rastrowe czy metoda nacinania siatek wymagają specjalnego przygotowania powierzchni obiektów lub próbek.

Zasadnicze zalety omawianej metody są następujące: 1) Połowy charakter metody, możliwość dowolnego zagęszczania pomiarów punktowych lub liniowych. 2) Bezpośredni pomiar przemieszczeń, nie wymagający dodatkowego opracowania. 3) Bezpośrednia ocena charakteru deformacji, pozwalająca na wstępną ocenę doświadczeń i ich selekcję, łatwe określenie obszarów charakterystycznych (np. obszarów sztywnego ruchu lub zlokalizowanych warstw ścinania bądź dylatacji), ocenę jednorodności pola deformacji oraz śledzenie rozwoju całego pola deformacji w poszczególnych fazach procesu. 4) Łatwość lub możliwość pominięcia przygotowania powierzchni ciała do pomiaru. 5) Duża dokładność. 6) Możliwość bezpośredniego wprowadzenia wyników pomiarów do komputera przez zastosowanie urządzeń pomiarowych samorejestrujących (np. Sterekometru). 7) Brak konieczności stosowania nowej, specjalnej aparatury (przedstawione wyniki uzyskano za pomocą standardowych przyrządów fotogrametrycznych stanowiących normalne wyposażenie wielu instytucji geodezyjnych i geologicznych).

Powyższe zalety pozwalają uznać omawianą metodę za godną szerszego stosowania.

LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. T. BEDNARSKI, *The dynamic deformation of a circular membrane*, Int. J. Mech. Sci., **11**, 10, 1969.
2. R. BUTTERFIELD, R. HARKNESS and K. ANDRAWES, *A stereophotogrammetric method for measuring displacement fields*, Geotechnique, **20**, 3, 1970.
3. A. DRESCHER, *Badanie mechanizmów plastycznego płynięcia materiałów ziarnistych*, Prace IPPT, 1975.
4. A. LINSEBARTH, *Fotogrametria naziemna i specjalna*, PPWK, Warszawa 1974.
5. J. MULLER, St. OSTAFICZUK, *Application of photogrammetric methods to investigation of wind ripple dynamics*, Ann. Soc. Geol. Pol., **40**, 3—4, Kraków 1970
6. St. OSTAFICZUK, *Einsatz nichttypischer photogrammetrischer Methoden in der Geologie*, Jenaer Rund, **13**, 2, 1968.
7. St. OSTAFICZUK, *Wykorzystanie w badaniach geologicznych efektu przestrzennego do fotogrametrycznego określania przypowierzchniowych ruchów masowych i innych*, Przegl. Geolog., **6**, 1972.

8. St. OSTAFICZUK, *Opracowanie metodyki fotogeologicznych badań odkształceń w wybranych ośrodkach*, Archiwum Zakładu Prac Geolog. UW, Archiwum IPPT, 1975.
9. M. B. PIASECKI, *Fotogrametria lotnicza i naziemna*, PPWK Warszawa 1968.
10. W. TRĄP CZYŃSKI, *Mechanika procesów urabiania gruntów jako zagadnienie teorii plastyczności*, Praca doktorska, IPPT PAN 1975.

Резюме

ФОТОГРАМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

В работе обсуждены сущность, достоинства и ограничения некоторого оптического метода измерения плоской деформации тел, заключающегося в использовании стереоскопической картины — возникающей вследствие временного параллакса — и фотограмметрической ее обработке. Основным достоинством метода является его полевой характер, легкость подготовки поверхности тел для измерений и возможность непосредственной оценки характера деформации и селекции экспериментов. Даются примеры применений метода в исследованиях сыпучих сред и металлов. Обсуждаемый метод может найти более широкое применение в многих экспериментальных исследованиях.

SUMMARY

PHOTOGRAMMETRIC METHOD OF MEASURING PLANE DEFORMATION

The idea, advantage and limitations of the certain optical method of measuring plane deformation of the bodies, which bases on the use of stereoscope picture — arising in a consequence of time parallax — and its photogrammetric treatment is discussed. The basic advantage of the method is its field character, the ease of preparation of the body surface for measuring and possibility of immediate estimation of the character of the deformation and selection of experiments. The examples of application of the method to the investigation of soils and metals are presented. This method may certainly find wider application in many experimental investigations.

Praca została złożona w Redakcji dnia 29 lipca 1976 r.