

O BEZPOŚREDNIEJ METODZIE POMIARU PRĘDKOŚCI POWIERZCHNI SWOBODNEJ CIAŁA STAŁEGO

W. W. BYSZEWSKI, M. DEMBIŃSKI i Z. MUCHA (WARSZAWA)

1. WSTĘP

Zderzenia ciał poruszających się z dużymi prędkościami, łączenie metali za pomocą ładunku wybuchowego, prowadzone ostatnio badania nad możliwością intensywnego ograniczania i kumulowania plazmy za pomocą wybuchowo poruszanych powierzchni metalicznych, wyrzucanie ciał z dużymi prędkościami, a także podstawowe badania własności ciał stałych przy wysokich ciśnieniach — to tylko część zagadnień mechaniki ciała stałego intensywnie ostatnio rozwijanych. Podstawowymi badaniami prowadzonymi w ramach tych zagadnień są następujące: ruch ciał z dużymi prędkościami (kilku i kilkunastu km/s), ruch powierzchni swobodnej tych ciał oraz ruch fal uderzeniowych. Dlatego też śledząc literaturę można zaobserwować duży rozwój technik i metod pomiaru tych wielkości od znanych wcześniej i udoskonalonych ostatnio metod optycznych [1, 2 i 3] do opracowanych w ostatnim okresie metod laserowych [4 i 5].

Termodynamiczny opis ośrodka stałego przy wysokich ciśnieniach stanowi bardzo złożony problem daleki od poprawnego rozwiązania teoretycznego. Brak znajomości równania stanu wymaga pomiaru przynajmniej dwóch wielkości po to, aby przy danych warunkach początkowych móc określić stan za falą uderzeniową. Stanowi to zasadniczą różnicę w sposobie badania stałego i gazowego ośrodka ciągłego. Badanie fal uderzeniowych w ciałach stałych daje możliwość znajdowania adiabat Hugoniota dla poszczególnych materiałów. Praktycznie rzecz biorąc najwygodniej jest mierzyć parametry kinetyczne takie np. jak prędkość fali uderzeniowej i prędkość masową.

Prędkość fali uderzeniowej mierzy się stosunkowo prosto, rejestrując zazwyczaj elektrycznie lub optycznie momenty przejścia frontu fali uderzeniowej przez wyznaczone punkty ciała stałego. Z danych wielkość geometrycznych ciała oblicza się średnią prędkość na danym odcinku.

Mimo prostej zasady napotyka się tutaj na pewne trudności doświadczalne związane głównie z tym, że odległości między wybranymi punktami mogą praktycznie wynosić zaledwie 1–10 mm. Prędkości fal uderzeniowych, z jakimi w praktyce mamy do czynienia w ciałach stałych, są rzędu od 1 do 10 km/s. Wobec tego rejestrowane czasy są rzędu 1 μ s, co wymaga już stosowania nanosekundowej techniki elektronicznej, lub super szybkiej fotografii w przypadku rejestracji optycznej.

Pomiar prędkości masowej jest znacznie trudniejszy i zawsze wymaga stosowania pośrednich metod pomiaru. Metody te w zasadzie można podzielić na trzy grupy w zależności od sposobu prowadzenia i rodzaju eksperymentu, zakresu parametrów i żądanej dokładności: a) wyznaczanie prędkości masowej przez pomiar prędkości powierzchni swobodnej, b) metody hamowania oraz c) metody odbicia fali uderzeniowej.

Metoda odbicia fali uderzeniowej polega na wyznaczaniu z praw zachowania adiabaty uderzeniowej przez pomiar jedynie prędkości fali uderzeniowej w badanym ośrodku oraz w ośrodku o znanej adiabacie uderzeniowej. Zaletą tej «porównawczej» metody jest możliwość badania ośrodka bez wyznaczania prędkości masowej, co istotnie ułatwia pomiary.

Metody hamowania stosowane są głównie dla bardzo intensywnych fal uderzeniowych i dla ośrodków porowatych, tzn. tam, gdzie nie można stosować metod powierzchni swobodnej. W metodzie tej wielkością mierzoną jest prędkość próbki tuż przed zderzeniem ze spoczywającą tarczą (ang. target) a wykonany z tego samego materiału co próbka. Do wyliczenia prędkości masowej stosuje się tutaj prostą zależność, z której wynika, że prędkość masowa jest dwukrotnie mniejsza od prędkości próbki w momencie zderzenia.

Najbardziej rozpowszechnione metody wyznaczania prędkości masowej polegają na bezpośrednim pomiarze prędkości powierzchni swobodnej. Ruch powierzchni swobodnej ciała stałego wywołany jest przez dochodzącą do niej falę uderzeniową. W szerokim zakresie parametrów (do ciśnień za falą rzędu 10^6 atm) spełnione jest prawo dwukrotnie większej prędkości powierzchni swobodnej w porównaniu z prędkością masową. Opierając się na tym prawie wyznacza się w metodzie powierzchni swobodnej prędkość masową.

Techniki pomiaru prędkości powierzchni swobodnej można formalnie podzielić na trzy następujące grupy: 1) metody elektryczne, 2) metody optyczne oraz 3) metody laserowe.

Przedmiotem niniejszej pracy jest przedstawienie nie rozpowszechnionej dotychczas metody optycznej, pozwalającej na bezpośrednią obserwację ruchu powierzchni swobodnej (lub ciała stałego jako całości). Prostota bezpośredniej metody i możliwość ciągłego pomiaru prędkości jednocześnie dla wielu punktów powierzchni, leżących na wybranej prostej, pozwalają przypuszczać, że rozpowszechnienie jej da wiele korzyści zwłaszcza przy badaniach jakościowych.

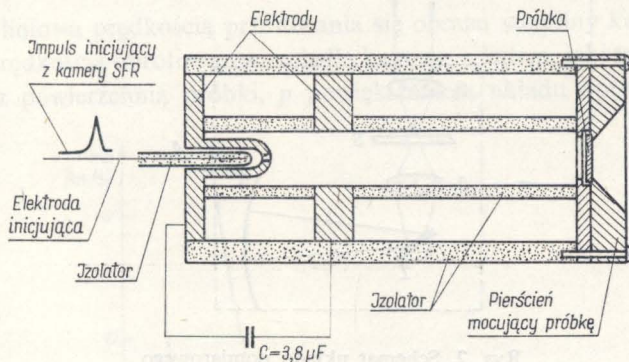
Autorzy znaleźli jedną wzmiankę w literaturze [6], dotyczącą możliwości bezpośredniej obserwacji ruchu powierzchni swobodnej (z r. 1962). Niestosowanie bezpośredniej metody w późniejszych badaniach pozwala sądzić, że wspomniana wzmianka nie została chyba dostrzeżona.

Metoda bezpośrednia przedstawiona będzie na przykładzie obserwacji ruchu folii przyśpieszanej w dziale plazmowym. Pokazane będzie również jej zastosowanie do obserwacji ruchu folii mylarowej⁽¹⁾ wyrzucanej przy eksplozji metalowej folii.

⁽¹⁾ Polskim odpowiednikiem mylaru jest elana. Folia przyklejona była do folii metalowej tak jak to przedstawiono na rys. 7.

2. KONSTRUKCJA DZIAŁA PLAZMOWEGO, SŁUŻĄCEGO DO MODELOWANIA RUCHU POWIERZCHNI SWOBODNEJ

Skonstruowane działo plazmowe (rys. 1) jest trójelektrodowym iskiernikiem z podwójnymi ścianami bocznymi. Odległość między pierścieniowymi elektrodami dobierana jest dla danego zakresu napięć baterii kondensatorów i wynosi kilka centymetrów. Stosowano baterię kondensatorów o pojemności $3,8 \mu\text{F}$, ładowaną do



Rys. 1. Działo plazmowe

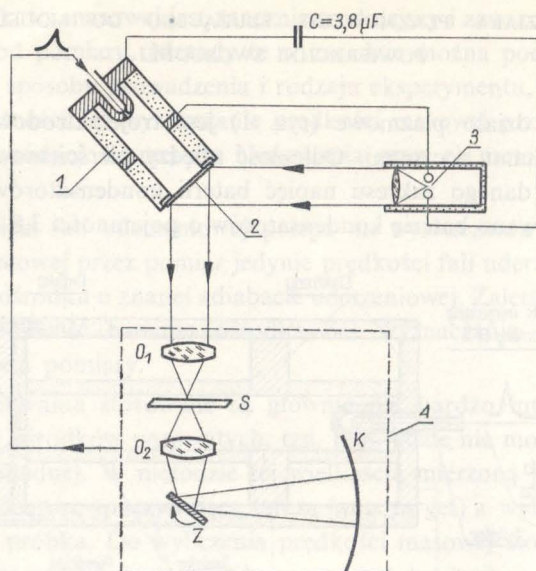
potencjałów 20, 25 i 30 kV. Do odpowiednio wyprofilowanej zewnętrznej elektrody wprowadzona jest odizolowana elektroda inicjująca. Impuls o wysokim napięciu, zwierający elektrody, podawany jest z pulpitu sterującego kamery SFR.

Działo zamknięte jest krążkiem lub folią metalową, których ruch był przedmiotem obserwacji. Ruch ten wywołany jest uderzeniem tłoka plazmowego, poruszanego siłą działającą na sznur prądowy zwierający elektrody.

3. SCHEMAT UKŁADU POMIAROWEGO

Schemat układu pomiarowego przedstawiony jest na rys. 2. Układ pomiarowy składa się z trzech części: działka plazmowego 1, lampy błyskowej 3, oświetlającej badaną powierzchnię, oraz kamery SFR do ultraszybkich fotografii 4.

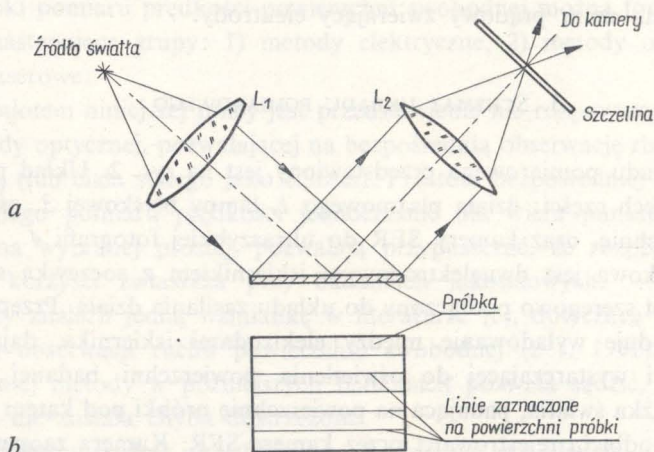
Lampa błyskowa jest dwuelektrodowym iskiernikiem z soczewką skupiającą. Iskiernik ten jest szeregowo podłączony do układu zasilania działka. Przepływ prądu w działku powoduje wyładowanie między elektrodami iskiernika, dając światło o intensywności wystarczającej do oświetlenia powierzchni badanej próbki 2. Równoległa wiązka światła, padająca na powierzchnię próbki pod kątem zbliżonym do 45° , jest po odbiciu rejestrowana przez kamerę SFR. Kamera zaopatrzona jest w dodatkowy obiektyw wejściowy O_1 zapewniający odpowiednią głębię ostrości. Szczelina S wycina wąski (rzędu 0,1 mm) pasek powierzchni, którego obraz rzutowany jest następnie za pomocą obiektywu O_2 i zwierciadła Z na kliszę kamery K . Wirujące zwierciadło Z pozwala na rozwinięcie w czasie światła odbitego przez wybrany pasek powierzchni badanej próbki.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego

4. BEZPOŚREDNIA METODA OBSERWACJI RUCHU KRĄŻKA LUB FOLII

Schemat bezpośredniej metody przedstawiony jest na rys. 3. Na rys. 3a pokazano podobnie jak poprzednio bieg promieni oświetlających badaną próbkę i rejestrowanych przez kamerę promieni odbitych. Na rys. 3b pokazano natomiast powierzchnię



Rys. 3. Schemat metody bezpośredniej

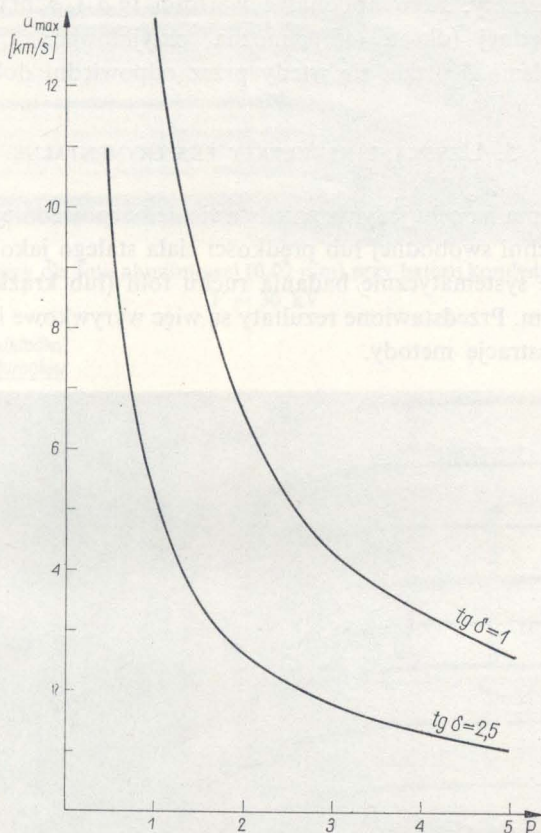
badanej próbki z zaznaczonymi na niej rysami (kreskami). Kamera jest ustawiona w takim położeniu, aby rzut jej szczeliny na powierzchnię badaną był prostopadły do linii zaznaczonych na powierzchni. W ten sposób na kliszy kamery obserwowane

są punkty przecięcia rzutu szczeliny z liniami zaznaczonymi na powierzchni. Ruch badanej próbki powoduje zakrzywienie torów wybranych punktów.

Wychodząc z prostych rozważań geometrycznych prędkość u badanej próbki można związać następującą zależnością z wielkością $\operatorname{tg} \delta$ trajektorii punktu w danej chwili czasu:

$$(3.1) \quad u = \frac{v_k}{p \cos \alpha} \operatorname{tg} [\delta(t)],$$

gdzie v_k jest liniową prędkością przesuwania się obrazu szczeliny kamery po kliszy, związaną z prędkością obrotową zwierciadła kamery, α kątem, jaki tworzy oś optyczna kamery z powierzchnią próbki, p powiększeniem układu optycznego kamery.



Rys. 4. Zależność maksymalnej prędkości możliwej do zmierzenia w bezpośredniej metodzie od powiększenia układu optycznego

Analizując wzór (3.1) widać, że dla ustalonego kąta obserwacji α (np. 45°) i ustalonej prędkości obrotowej lustra kamery (np. $v_k = v_{k\max} = 3,75$ km/s) ze wzrostem powiększenia p układu optycznego maleje wartość możliwej do zmierzenia prędkości ciała (z daną dokładnością odczytu z kliszy $\operatorname{tg} \delta$). Zmniejszenie powiększenia granicznej wartości u jest niestety niekorzystne, bowiem (zwłaszcza przy pomiarach

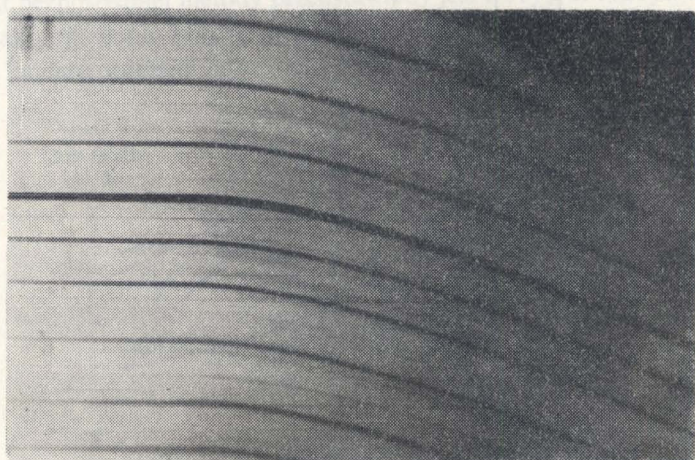
prędkości powierzchni swobodnej) interesujący jest ruch powierzchni rzędu pojedynczych milimetrów i wtedy błąd kreślenia stycznej znacznie wzrasta.

Na rys. 4 przedstawiona jest zależność $u_{\max}(p)$ dla $\operatorname{tg} \delta \leq 1,0$ i $\operatorname{tg} \delta \leq 2,5$. Większe nachylenia trajektorii niż $\operatorname{tg} \delta = 2,5$ wprowadzają już na tyle duże błędy przy odczycie, że uniemożliwiają praktycznie pomiar. Dlatego też w celu zmniejszenia $\operatorname{tg} \delta$ przy dużych prędkościach u należy albo stosować mniejsze powiększenie, co jak wspomniano jest niekorzystne z innych względów, albo większe prędkości obrotowe lustra kamery, co jest możliwe do zrealizowania jedynie przez zastosowanie szybszej kamery niż SFR.

Ograniczenia $\operatorname{tg} \delta$ z lewej strony przedziału nie trzeba uwzględniać, bowiem zawsze można przy mniejszych prędkościach ruchu powierzchni zmniejszyć prędkość obrotową lustra kamery. Jako optymalne wartości $\operatorname{tg} \delta$ i p przy badaniu ruchu powierzchni swobodnej (dla $\alpha = 45^\circ$) można przyjmować: $1/3 \leq \operatorname{tg} \delta \leq 1$ oraz $2,5 \leq p \leq 4$. Nachylenie δ ustala się wtedy przez odpowiedni dobór v_k .

5. UZYSKANE REZULTATY EKSPERYMENTALNE

Praca niniejsza ma na celu jedynie przedstawienie bezpośredniej metody pomiaru prędkości powierzchni swobodnej lub prędkości ciała stałego jako całości. Nie były zatem prowadzone systematycznie badania ruchu folii (lub krążka) przyspieszanej w dziale plazmowym. Przedstawione rezultaty są więc wyrywkowe i należy traktować je jedynie jako ilustrację metody.

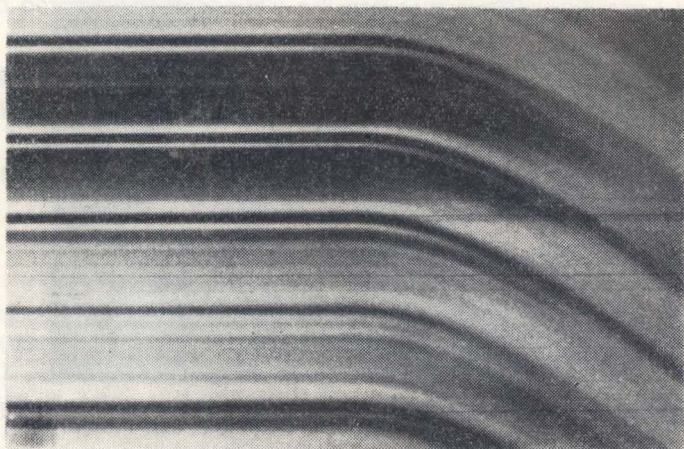


Rys. 5. Zdjęcie z kamery dla krążka niklowego (0,12 mm) przy baterii kondensatorów $C = 3,8 \mu\text{F}$, $V = 30 \text{ kV}$

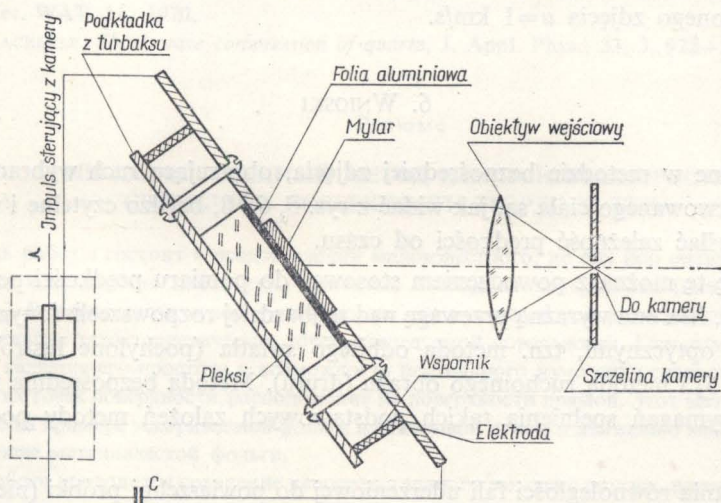
Zdjęcie przedstawione na rys. 5 obrazuje ruch krążka niklowego o grubości 0,12 mm dla baterii kondensatorów $C = 3,8 \mu\text{F}$ i $V = 30 \text{ kV}$. Zmierzona prędkość z nachylenia prostoliniowej części trajektorii punktów charakterystycznych wynosi $u = 0,378 \text{ km/s}$. Przeprowadzono również pomiary dla krążka o tej samej grubości z tą samą baterią kondensatorów, ale naładowaną do potencjału $V = 25 \text{ kV}$; uzyskana

prędkość wyniosła $u=0,256$ km/s. Dla porównania: krążek o grubości 0,21 mm przy $V=30$ kV uzyskał prędkość $u=0,109$ km/s.

Prędkości uzyskane dla sztywno umocowanych folii aluminiowych (ruch przed rozerwaniem folii) o grubości 0,02 mm są prawie dwukrotnie większe i dla $V=30$ kV wynoszą $u=0,610$ km/s, a przy tym samym potencjale dla folii o grubości



Rys. 6. Zdjęcie z kamery dla folii aluminiowej (0,02 mm) przy baterii kondensatorów $C = 3,8 \mu\text{F}$, $V = 30$ kV

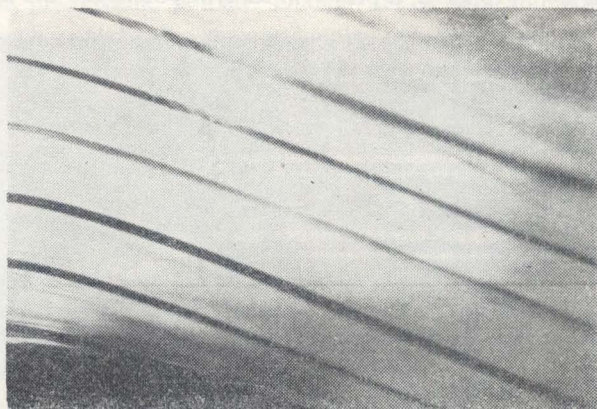


Rys. 7. Schemat układu pomiarowego ruchu folii mylarowej

0,01 mm wynoszą $u=0,700$ km/s. Ruch folii przed rozerwaniem zobrazowany jest na rys. 6 i dotyczy przypadku folii aluminiowej o grubości 0,02 mm i baterii kondensatorów $C=3,8 \mu\text{F}$, $V=30$ kV.

W celu dodatkowego zilustrowania metody przeprowadzono obserwację ruchu folii mylarowej wyrzucanej w wyniku eksplozji folii aluminiowej. Układ pomiarowy przedstawiony na rys. 7 nie wymagał stosowania lampy oświetlającej. Rejestrowano

bowiem kamerą SFR świecenie eksplodującej folii prześwietlającej badaną folię mylarową. Na powierzchni mylaru narysowane zostały nie przepuszczające światła kreski. Ruch punktów powstałych z przecięcia rzutu szczeliny z narysowanymi kreskami był przedmiotem rejestracji. Na rys. 8 pokazano jako przykład zdjęcie



Rys. 8. Zdjęcie z kamery dla folii mylarowej $C = 360 \mu\text{F}$, $V = 4 \text{ kV}$, $u = 1 \text{ km/s}$.

uzyskane dla baterii kondensatorów $C = 360 \mu\text{F}$ oraz $V = 4 \text{ kV}$. Obliczona z tangensa nachylenia trajektorii prędkość folii mylarowej po ustaleniu się ruchu wynosi dla przedstawionego zdjęcia $u = 1 \text{ km/s}$.

6. WNIOSKI

Uzyskane w metodzie bezpośredniej zdjęcia, obrazujące ruch wybranych punktów obserwowanego ciała są, jak widać z rys. 5, 6 i 8, bardzo czytelne i pozwalają łatwo określać zależność prędkości od czasu.

Metodę tę można z powodzeniem stosować do pomiaru prędkości powierzchni swobodnej. Ma ona wyraźną przewagę nad najbardziej rozpowszechnionymi obecnie metodami optycznymi, tzn. metodą odbitego światła (pochylone lustro) opisaną np. [1, 2 i 5] i metodą ruchomego obrazu (drotu). Metoda bezpośrednia nie stawia bowiem wymagań spełnienia takich podstawowych założeń metody pochyłonego lustra jak:

a) żądania równoległości fali uderzeniowej do powierzchni próbki (niespełnienie tego żądania w metodzie pochyłonego lustra prowadzi do błędów odczytu prędkości rzędu 100% już przy kącie rzędu kąta nachylenia lustra);

b) żądania płaskości fali uderzeniowej (istotne w metodzie pochyłonego lustra ze względu na obserwację w każdej chwili czasu innego punktu powierzchni);

c) wymagania stosunkowo dużej prędkości obrotowej lustra kamery (ważne w metodzie pochyłonego lustra ze względu na pomiar składowej prędkości znacznie większej co do wartości bezwzględnej od prędkości i powierzchni swobodnej) oraz podstawowego założenia metody ruchomego obrazu;

d) żądania dużej głębi ostrości stosowanej optyki; w metodzie tej ma to istotne znaczenie ze względu na dużą odległość drutu od jego obrazu (rzędu kilku milimetrów).

Proponowana metoda bezpośrednia pozwala ponadto na pomiar z tą samą dokładnością i przy zastosowaniu tej samej kamery smugowej dwukrotnie większej prędkości powierzchni swobodnej niż metoda ruchomego obrazu i kilkanaście razy większej niż metoda pochylonego lustra. Bezpośrednia metoda pomiaru prędkości wybranego przekroju powierzchni mimo mniejszej efektywności przewyższa rozpowszechnione metody prostotą, umożliwiającą uniknięcie wielu trudności technicznych i technologicznych, związanych zarówno ze stosowaniem metody pochylonego lustra jak i metody ruchomego obrazu.

LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. R. S. BRODLEY, *High pressure physics and chemistry*, Academic Press, 1963.
2. W. H. GUST, E. B. ROYCE, *Shock induced phase-transition pressures in Fe-Cr and Fe-Cr-Ni alloys*, J. Appl. Phys., **41**, 6, 2443-2446, 1970.
3. D. STIRPE, D. JOHNSON, J. WACKERLE, *Shock initiation of XIX-8003 and pressed PETN.*, J. Appl. Phys., **41**, 9, 3884-3893, 1970.
4. L. M. BARKER, R. E. HOLLENBACH, *Shock-wave studies of PMMA, fused silica and sapphire*, J. Appl. Phys., **41**, 10, 4208 - 4226, 1970.
5. J. KLEPACZKO, M. KORZUŃ, *Metody pomiaru prędkości masowych na czole fali uderzeniowej*, Biulet. WAT, **11**, 1970.
6. J. WACKERLE, *Shock-wave compression of quartz*, J. Appl. Phys., **33**, 3, 922 - 937, 1962.

Резюме

НЕПОСРЕДСТВЕННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Цель работы состоит в представлении малоизвестного, до сих пор оптического метода, дающего возможность наблюдать, движение свободной поверхности (или твердого тела в целом). В этом методе используется камера для ультра скорой фотографии, регистрирующей движение характеристических точек, исследуемой поверхности. Главным достоинством метода является его простота и возможность постоянного измерения скорости одновременно многих точек поверхности, расположенные на поверхности прямой. Этот метод представлен в работе на примере ускориваемой фольги в плазмовой пушке и движению майлорной фольги при взрыве металлической фольги.

В работе проводится сравнение непосредственного метода с другим, распространенными оптическими методами, указывая как их достоинства так и пороки.

SUMMARY

A DIRECT METHOD OF VELOCITY MEASUREMENT OF A SOLID STATE FREE SURFACE

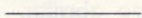
The subject of the paper is an optical method not hitherto propagated enabling direct observation of a free surface movement (or solid state as a whole). In this method, use is made of the camera for ultrarapid photography registering the motion of characteristic points of the surface investigated.

The principal advantage of this method is its simplicity and fact that it enables instant velocity measurement, several points of the surface lying simultaneously on a selected straightline. This method is described using the example of an accelerated leaf in the plasma sector and the motion of a mylar leaf ejected during the explosion of the metal leaf.

A comparison is made of this direct method with other known optical methods. Advantages and shortcomings are indicated.

**INSTYTUT PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI
POLSKIEJ AKADEMII NAUK**

Praca została złożona w Redakcji dnia 18 grudnia 1970 r.



[Faint, mirrored text from the reverse side of the page, including the title 'A DIRECT METHOD OF VELOCITY MEASUREMENT' and other illegible text.]