

METODA IMERSYJNA INTERFEROMETRII HOLOGRAFICZNEJ DO BADANIA KSZTAŁTU I ODKSZTAŁCEN¹

MAREK LECH, IRENA MRUK, JACEK STUPNICKI (Warszawa)

1. Wstęp

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

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

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

2. Podstawy metody

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

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

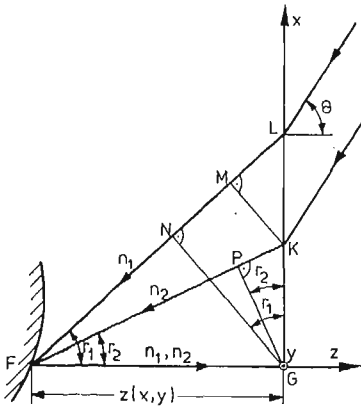
Rolę tej płaszczyzny w kuwecie spełnia płaska płyta szklana, przez którą oglądamy baczony na niej przedmiot.

Dla cieczy o współczynniku załamania n_1 droga optyczna wiązki przedmiotowej (rys. 1) wyraża się wzorem:

$$(1) \quad l_1(x, y) = l_g(x, y) \cdot n_1 + l_0(x, y),$$

gdzie: l_g droga geometryczna wiązki przedmiotowej w ośrodku o współczynniku załamania n_1 ,

l_0 droga tej samej wiązki przedmiotowej w powietrzu.



Rys. 1. Droga optyczna wiązki przedmiotowej

Po zarejestrowaniu obrazu kuweta zostaje wypełniona cieczą o współczynniku załamania n_2 dla której:

$$(2) \quad l_2(x, y) = l_g(x, y) \cdot n_2 + l_0(x, y).$$

Różnica dróg optycznych $l_1 - l_2$ dla obu ekspozycji hologramu wynosi:

$$(3) \quad \Delta l(x, y) = l_g(x, y) \cdot (n_1 - n_2).$$

Rekonstruując tak otrzymany hologram wiązką odniesienia, otrzymujemy układ ciemnych prążków interferencyjnych, dla których $\Delta l(x, y)$ wyraża się nieparzystą wielokrotnością długości połowy fali λ . Prążki te interpretujemy jako warstwy, ponieważ są miejscem geometrycznym punktów przedmiotu równoodległych od płaszczyzny odniesienia [1, 2].

Warunek wygaszania punktów obrazu ma postać:

$$(4) \quad \Delta l(x, y) = (2k+1) \frac{\lambda}{2} \quad \text{gdzie} \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Biorąc pod uwagę (3)

$$(5) \quad l_g(x, y) = \frac{(2k+1)\lambda}{2(n_1 - n_2)}.$$

W przypadku gdy promień światła laserowego pada pod $\angle \Theta$ na płaszczyznę odniesienia, różnica dróg optycznych:

$$(6) \quad \Delta l(x, y) = z(x, y) (n_1 - n_2 + \sqrt{n_1^2 - \sin^2 \Theta} - \sqrt{n_2^2 - \sin^2 \Theta}),$$

gdzie $z(x, y)$ jest odległością powierzchni przedmiotu od płaszczyzny odniesienia.

Uwzględniając (3) można (6) przedstawić następująco;

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

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

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

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

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

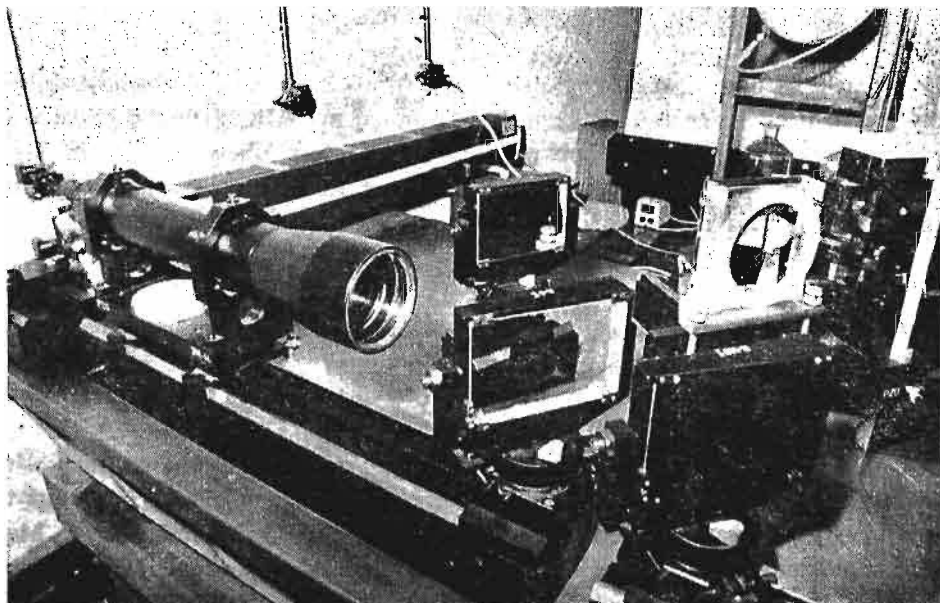
a odległość między dwiema kolejnymi warstwicami:

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

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

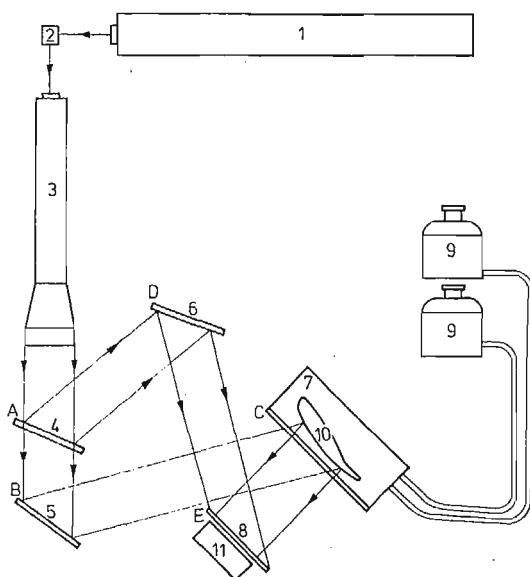
3. Opis stanowiska

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



Rys. 2. Widok ogólny układu badawczego

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



Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego

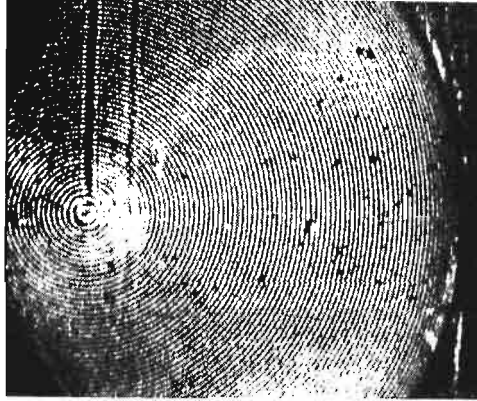
Ze względu na ograniczoną drogę koherencji światła zapewniono równość dróg optycznych wiązki odniesienia ADE i wiązki przedmiotowej ABCE. Płytkę szklaną, tzw. zwierciadło 0%, ustawioną względem wiązki wychodzącej z lunety pod kątem $30 \div 45^\circ$ odbijała około 10% światła tworząc wiązkę odniesienia.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

4. Przykłady zastosowania metody immersyjnej do badania kształtu powierzchni metalowych

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

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

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

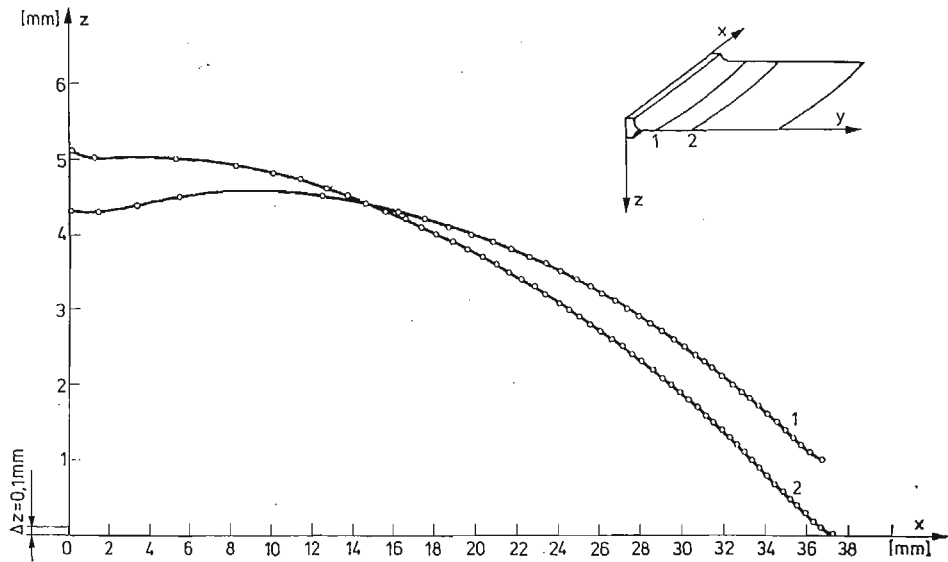


Rys. 4. Stożek wzorcowy z układem prążków warstwicznych

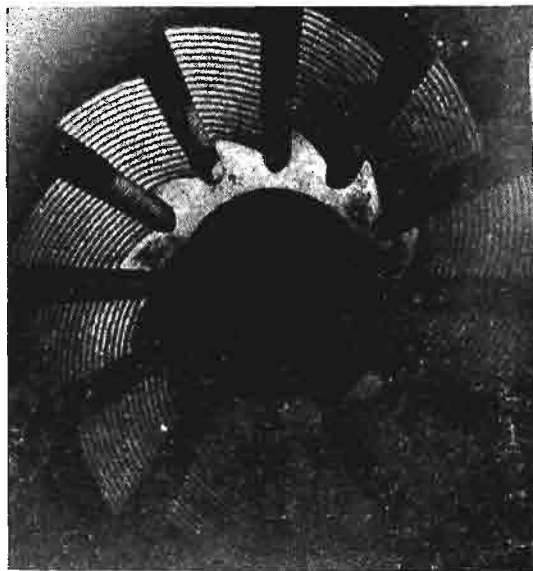
Rys. 5 przedstawia zdjęcie obrazu holograficznego łopatki sprężarki silnika odrzutowego z widoczną na łopatkę, charakterystyczną dla jej kształtu, siecią warstwic o głębokości pomiędzy warstwicami $\Delta z \cong 0,1$ mm, a rys. 6 przedstawia zarys kształtu powierzchni w dwóch przekrojach.



Rys. 5. Powierzchnia łopatki turbiny pokryta prążkami warstwicznymi.



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

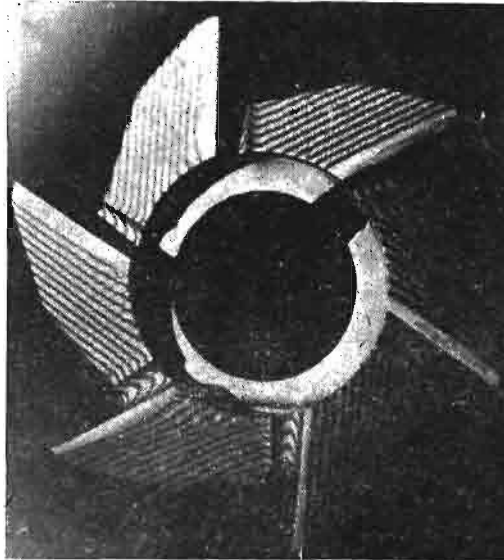


Rys. 7. Sieć warstwic na powierzchniach freza

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

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

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



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

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

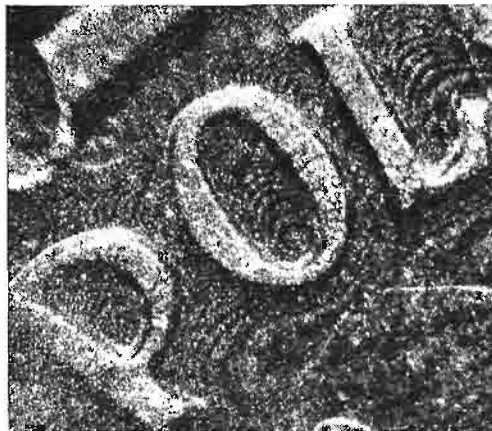
5. Badania mikronierówności dla powierzchni metalowych

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

Obraz przedstawiający fragment monety, pomiędzy literami napisu POLSKA, był fotografowany przy pomocy mikroskopu o powiększeniu około ~ 25 razy. Na czytelność warstwicy wpłynęła ziarnistość obrazu holograficznego i mała głębokość ostrości układu mikroskopowego.



Rys. 9. Układ warstwicy na powierzchni monety



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

6. Badanie ugięć powierzchni modelu półprzestrzeni sprężystej obciążonej siłami skupionymi

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

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



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

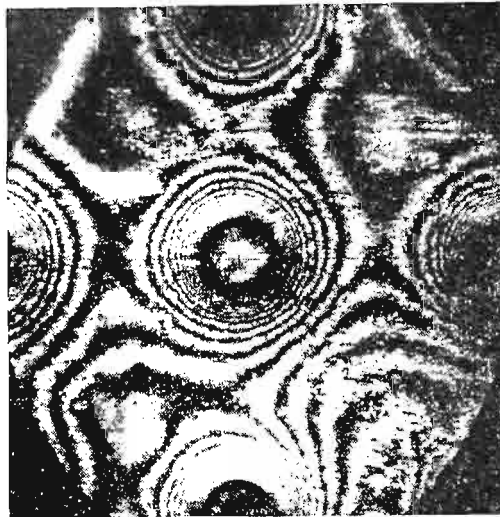


Rys. 12. Układ warstwic na powierzchni tego samego modelu, przy docisku większą siłą

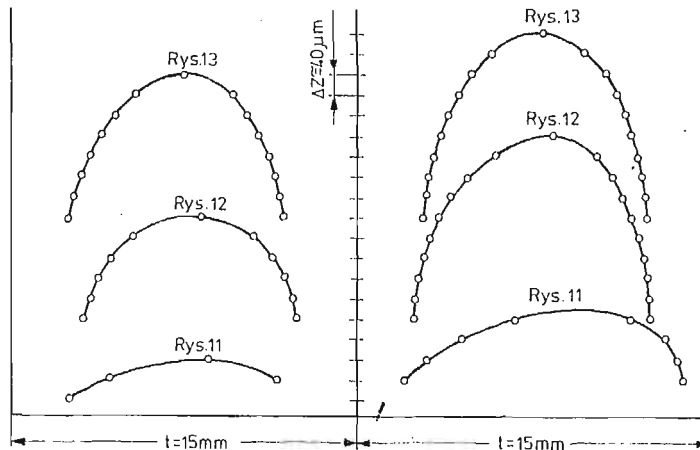
Rys. 11 przedstawia obraz warstwic powierzchni modelu dociskanego niewielką siłą do szklanej ściany kuwety. Odległość warstwic wynosi $\Delta z \cong 40 \mu\text{m}$. Widać, że powierzchnia modelu nie była gładka, ma liczne wady, oraz, że jest nieco nachylona do płaszczyzny bazy.

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

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



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



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

Wnioski

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

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

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

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

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

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

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

Literatura cytowana w tekście

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

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

Резюме

ИММЕРСИОННЫЙ МЕТОД ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ФОРМЫ И ДЕФОРМАЦИЙ

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

Summary

IMMERSION METHOD OF HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY FOR INVESTIGATION OF
SHAPE AND DEFORMATIONS

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

POLITECHNIKA
WARSZAWSKA

Praca została złożona w Redakcji dnia 9 stycznia 1979 r.