

Pomiary i analiza naprężeń resztkowych w stopie tytanu Ti6Al5 z zastosowaniem elektronicznej interferometrii plamkowej (ESPI)

Mgr inż. Robert TOMKOWSKI

Od roku 2005 doktorant, a od roku 2008 pracownik na stanowisku Samodzielny Technik w Laboratorium Mikro- i Nanoinżynierii w Katedrze Mechaniki Precyzyjnej Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. W swojej działalności naukowej zajmuje się metrologią, głównie metrologią powierzchni, modelowaniem i symulacją procesów obróbki oraz zastosowaniami metod sztucznej inteligencji.

e-mail: robert.tomkowski@tu.koszalin.pl



Prof. dr inż. Wojciech KACALAK

Kierownik Katedry Mechaniki Precyzyjnej. Specjalność naukowa: mechatronika, diagnostyka, optymalizacja i automatyzacja procesów mikroobróbki oraz procesów bardzo dokładnej obróbki ścierniej, w tym zwłaszcza materiałów trudno obrabialnych, a także budowa i eksploatacja precyzyjnych urządzeń technologicznych.

e-mail: wojciech.kacalak@tu.koszalin.pl



Dr inż. Dariusz LIPIŃSKI

W latach 1999 – 2005 asystent a od roku 2005 adiunkt w Katedrze Mechaniki Precyzyjnej Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. W swojej działalności naukowej zajmuje się zastosowaniem metod sztucznej inteligencji do monitorowania, optymalizacji i oceny jakości procesów obróbki.

e-mail: dariusz.lipinski@tu.koszalin.pl



In the ESPI method stresses are recorded in all directions perpendicular to the axis of the hole.

Keywords: residual stress, titanium alloy, electronic speckle pattern interferometry.

1. Wstęp

W określonym cyklu eksploatacji części maszyn dochodzi do samoczynnych uszkodzeń, które przyjmują charakter pęknięć i mikropęknięć, zużycia kształtowo-wymiarowego, korozji, a także złuszczenia warstwy wierzchniej. Przyczynami wyżej wymienionych uszkodzeń jest zazwyczaj zły stan warstwy wierzchniej (dalej zwanej *WW*), która może być opisana poprzez analizę struktury geometrycznej powierzchni, mikrotwardość, naprężenia resztkowe σ , oraz inne właściwości fizyko-chemiczne.

Naprężenia resztkowe, wpływają między innymi na takie właściwości eksploatacyjne części maszyn, jak odkształcenie, wytrzymałość statyczna i dynamiczna, zużycie materiału, czy też wytrzymałość stykowa. Podczas szlifowania, wartość głębokości, na której można zaobserwować zmianę stanu naprężeń resztkowych, sięga od kilku mikrometrów do nawet 0,5 milimetra i jest zależna od materiału.

Temperatura warstwy wierzchniej jest znacznie podwyższona w wyniku obróbki szlifowaniem względem temperatury głębiej położonych warstw materiału. W skutek oddziaływania ciepła, w *WW* mogą zachodzić różne procesy, m.in. hartowanie, hartowanie wtórne (dla materiałów wcześniej hartowanych), czy też rekrytalizacja. Procesy te są główną przyczyną zmian naprężeń szczątkowych i ich przebiegów wraz ze zmianą głębokości *WW*.

Rozkład temperatur w strefie obróbki powoduje nierównomierne oddziaływanie cieplne w poszczególnych strefach (rys. 1). W wyniku rozszerzalności cieplnej w warstwie przypowierzchniowej dochodzi do jej rozciągania i powstawania naprężeń ściskających, do momentu osiągnięcia temperatury austenitizacji. W obszarze *III* podczas obniżania temperatury następuje jej kurczenie się, czemu przeciwstawia się warstwa podpowierzchniowa powodując naprężenia rozciągające osiągając wartość σ_{max} . Krzywa przedstawiona na rysunku 1 wyznacza charakter zmian i powstawanie naprężeń resztkowych σ_s w warstwie wierzchniej przedmiotów szlifowanych, co opisano powyżej.

Naprężenia rozciągające powstałe w wyniku obróbki ścierniej zmniejszają wytrzymałość zmęczeniową obciążonych dynamicznie części maszyn. Korzystnym jest, kiedy w warstwie wierzchniej uzyskuje się naprężenie ściskające. Dlatego też, zaleca się redukcję lub najlepiej usunięcie naprężeń rozciągających w elementach części maszyn, np. poprzez zmniejszenie wartości parametrów technologicznych (dosuw).

Należy pamiętać również o tym, że rodzaj występujących naprężeń zależy także od charakterystyki stosowanej ściernicy, gdzie duże znaczenie ma rodzaj dobranej ściernicy. Szlifowanie np. ściernicą z ziarnem elektrokorundowym powoduje prawie zawsze występowanie naprężeń rozciągających, w przeci-

Streszczenie

Naprężenia resztkowe wpływają między innymi na takie właściwości eksploatacyjne części maszyn, jak odkształcenie, wytrzymałość statyczna i dynamiczna, zużycie materiału, czy też wytrzymałość stykowa. Zastosowanie elektronicznej interferometrii plamkowej do pomiarów naprężeń resztkowych umożliwia wyeliminowanie problemów, które występują w standardowej metodzie tensometrycznej tj. pozycjonowanie wiertła względem rozety tensometrycznej, czy też zdeteminowana liczba kierunków pomiaru naprężeń. W pracy przedstawiono zagadnienia związane z pomiarami naprężeń resztkowych z zastosowaniem elektronicznej interferencji plamkowej (ESPI), stopu tytanu Ti6Al5 (TitanGrade 5) po obróbkę ścierniej, z zastosowaniem systemu Prism firmy Stresstech Oy.

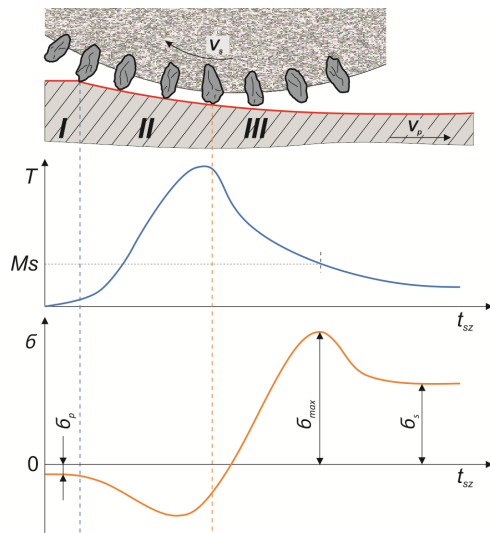
Słowa kluczowe: naprężenia resztkowe, stop tytanu, elektroniczna interferometria plamkowa.

Measurement and analysis of residual stresses in Ti6Al5 using electronic speckle pattern interferometry (ESPI)

Abstract

Residual stresses influence, among other parameters, on the performance characteristics of the machine, such as deformation, static and dynamic strength, material usage, or the strength of the contact. Extensional stresses as a result of abrasive machining reduce the fatigue strength for the dynamically loaded machine parts. It is preferred when the surface layer of the compressive stress is obtained. Therefore, it is recommended to reduce or remove most of the tensile stresses in the elements of the machine, for example, by reducing the value of technological parameters (feed-in). Note also that the type of occurring stresses depends also on the characteristics of the used grinding wheel, where the importance has the type of selected abrasive material. Grinding, eg. grinding wheel with aloxite grain is almost always the occurrence of tensile stresses, in contrast to CBN, which causes the formation of an compressive stresses in the surface layer. The article presents the issues related to the measurement of residual stresses by using electronic speckle pattern interference (ESPI), titanium alloy Ti6Al5 (TitanGrade 5), using a system of Stresstech Prism Oy. Stress measurements using ESPI can eliminate the problems that exist in the strain-gage method, such as the positioning of the axis of the drill in the center of the rosette hole, and only three directions of stress measurement (every 120 degrees).

wieństwie do regularnego azotku boru, który wywołuje powstawanie naprężeń ściskających w warstwie wierzchniej.



Rys. 1. Rozkład temperatur T i naprężeń σ_s w warstwie wierzchniej przedmiotu szlifowanego (σ_r – naprężenia przed szlifowaniem) [1]

Fig. 1. Distribution of temperatures T and stresses σ_s in the top layer of grinded sample (σ_r – residual stresses before grinding) [1]

2. Podstawy elektronicznej interferometrii plamkowej

Elektroniczna interferometria plamkowa (ang. *ESPI – Electronic Speckle Pattern Interferometry*), jest metodą optyczną, która wykorzystuje efekt plamkowania [2]. Zjawisko tzw. plamkowania jest znane od wielu lat i znajduje szerokie zastosowanie praktyczne od momentu pojawienia się laserów. Plamkowanie obserwowane w obrazie powierzchni rozpraszającej (oświetlonej światłem laserowym), zawiera losowo położone, nieregularne, niewielkie plamki o zróżnicowanej intensywności. Przesunięcie powierzchni rozpraszającej powoduje zmianę obrazu plamkowego. Widoczne na obrazie plamki są wynikiem interferencji tzw. fal wtórnych, będących wynikiem rozpraszania światła [3].

Obserwowane prążki interferencyjne, otrzymane w wyniku analizy sygnału wideo, zawierają informacje o przemieszczeniu fazowym obiektu. Na tej podstawie, możliwe jest wyznaczenie przemieszczenia przedmiotu, które opisane jest równaniem:

$$\Delta\phi = \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) dx \sin\theta \quad (1)$$

gdzie:

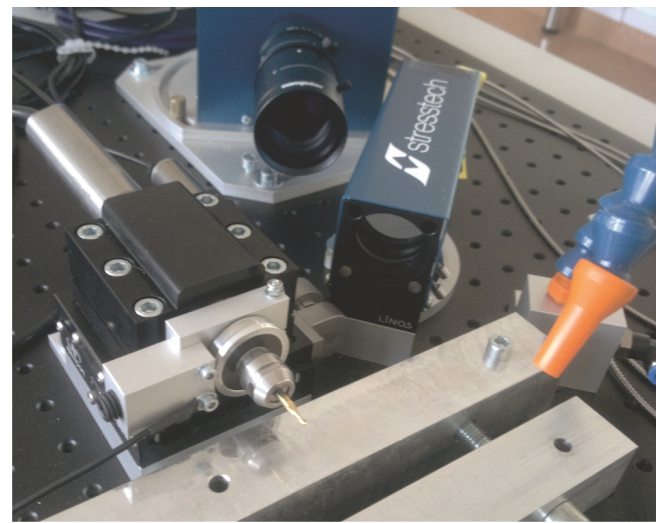
- $\Delta\phi$ jest różnicą fazową między przesunięciem obiektu i wiązki laserowej;
- λ jest długością fali wiązki laserowej;
- dx jest przemieszczeniem obiektu w kierunku x ;
- θ jest kątem iluminacji wiązki laserowej.

W celu wyznaczenia różnicy fazowej, wykorzystywana jest metoda przesunięcia fazowego dla czterech położenia kątownych: $\pi/2$, π , $3\pi/2$, oraz 2π . Każdy stan jest opisany przez zestaw czterech obrazów od I_1 do I_4 , z których każdy złożony jest z wiązki odniesienia z przesunięciem fazowym. Wiązka odniesienia interferuje z wiązką odbitą od obiektu na przetworniku CCD. Umożliwia to pomiar przemieszczenia powierzchni, jako przesunięcia fazowego według zależności ogólnej:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right) \quad (2)$$

3. PRISM – System do pomiaru naprężeń resztkowych

Do pomiarów naprężeń w warstwie wierzchniej zastosowano system interferencyjny PRISM fińskiej firmy Stresstech Oy (rys. 2), znajdujący się na wyposażeniu Katedry Mechaniki Precyzyjnej Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej.



Rys. 2. Widok ogólny systemu Prism do pomiaru naprężeń resztkowych, firmy Stresstech Oy, z zastosowaniem *ESPI*

Fig. 2. General view of the Prism system to measure residual stresses, provided by Stresstech Oy, with using *ESPI*

System ten poprzez inkrementalne nawiercanie otworu w analizowanej próbce rejestruje obrazy interferencyjne, na podstawie których wyznaczana jest krzywa naprężeń w funkcji głębokości otworu.

Prism dokonuje pomiaru zniekształcenia powierzchni stosując *ESPI*, bazując na metodzie pomiaru naprężeń wierceniem otworów (rys. 3), [4, 5]. Zarówno kierunek oświetlenia jak i kierunek obserwacji może być regulowany przez użytkownika, w celu dostosowania systemu do różnych warunków pomiarowych. Tym samym, może być wyznaczony kierunek czułości pomiaru (rys. 4).

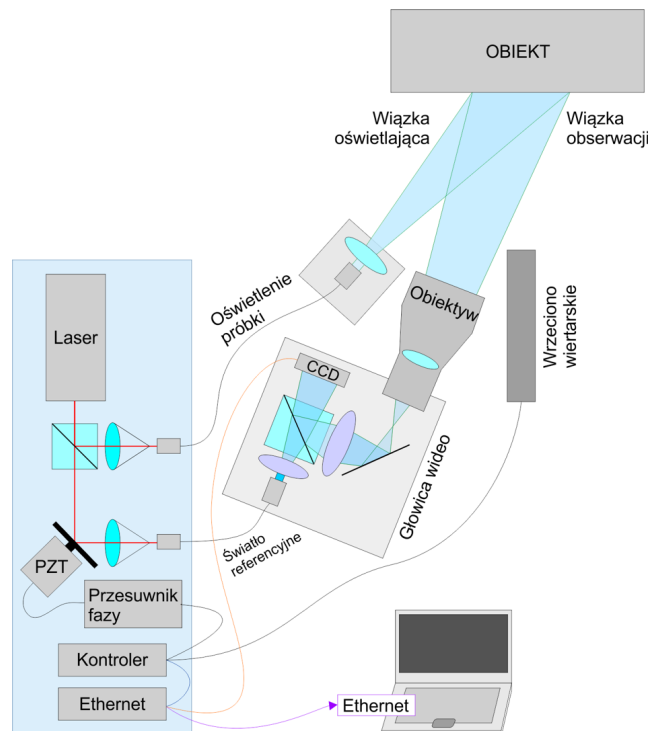
Analiza zarejestrowanych danych obejmuje wszystkie piksele w pierścieniowym obszarze wokół otworu, opisanym przez promień granicy wewnętrznej i zewnętrznej. Obszar graniczący bezpośrednio z krawędzią otworu nie dostarcza prawidłowych informacji, ponieważ w tej części występują zawsze zakłócenia wynikające z samego procesu wiercenia. Jako typowe przyjmuje się, że wewnętrzny promień jest dwukrotnością promienia otworu, a zewnętrzny promień jest czterokrotnością promienia otworu.

Dopasowanie uwzględnia również trzy zmienne opisujące wszystkie możliwe typy przesunięcia obiektu, ze względu na możliwość przesunięć pomiędzy rejestrowanymi zestawami reprezentacji graficznej mierzonej powierzchni.

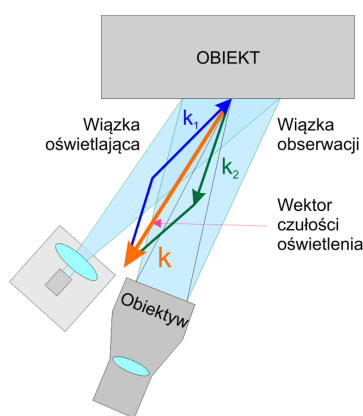
Wyznaczenie rozkładu naprężeń, dokonywane jest z zastosowaniem optymalizacyjnej metody regularyzacji Tikhonova [7], zmniejszając tym samym wpływ fluktuacji danych na dokładność rozwiązania. Jest to możliwe dzięki celowemu wprowadzeniu błędu systematycznego do procesu obliczeniowego.

Zarejestrowane obrazy zostają poddane analizie, do której niezbędnym jest określenie pozycji i rozmiaru otworu oraz zastosowanego na obiektywie powiększenia.

W trakcie pomiaru, oprogramowanie wyświetla na obrazie prążki, które są efektem optycznym podobnym do wzoru prążków Moiré'a. Prążki opisują ilościowo przemieszczenia; odległość pomiędzy dwiema sąsiednimi maksymalnymi pozycjami czarnego lub białego piksela wynosi połowę fali.



Rys. 3. Schemat działania systemu Prism, na podstawie [6]
Fig. 3. Schema of functioning of the Prism system, based on [6]



Rys. 4. Ilustracja wektora czułości pomiaru, na podstawie [6]
Fig. 4. Schema of the sensitivity vector, based on [6]

Połączenie intensywności wszystkich pikseli I_i daje mapę fazową Ω ,

$$I_i(p, q) = I_{ref}(p, q) + I_{obj}(p, q) + 2\sqrt{I_{ref}(p, q) \times I_{obj}(p, q)} \times \cos(\varphi(p, q)) \quad (3)$$

$$\Omega = \tan^{-1} \left| \frac{(I_1 - I_3)(I'_1 - I'_3) + (I_2 - I_4)(I'_2 - I'_4)}{(I_1 - I_3)(I'_2 - I'_4) - (I_2 - I_4)(I'_1 - I'_3)} \right| \quad (4)$$

gdzie:

- i – oznacza kolejny obraz z pojedynczego pomiaru ($i=1$ do 4);
- p i q – opisują położenie pikseli;
- φ – jest odniesieniem fazy światła dla danego piksela;
- I_i jest intensywnością przed wierceniem;
- I'_i jest intensywnością po wierceniu.



Rys. 5. Przykładowa mapa z prążkami interferencyjnymi i efektem plamkowania
Fig. 5. Sample map of interference fringes and the effect of the speckling

Wyznaczona mapa fazowa, zostaje następnie poddana działaniu algorytmu w celu wyznaczenia mapy przemieszczeń. Mapa zostaje wyznaczona na podstawie map modelowych, dla każdej z trzech zmiennych płaskiego stanu naprężenia.

Po obliczeniu profilu głębokości naprężeń, dostępna jest tabela z wartościami naprężeń w każdej głębokości i ich graficzna prezentacja.

4. Metodyka pomiarów

Powierzchnia mierzona musi być czysta, wolna od tłuszczu i kurzu oraz innych zanieczyszczeń. Jeżeli powierzchnia ma wysoki współczynnik odbicia światła lub jest bardzo ciemna i nie pozwala na wytworzenie wystarczającej ilości światła rozproszonego, może być konieczne zastosowanie cienkiej warstwy pokrycia powierzchni próbki specjalną emulsją. Farba powinna być koloru białego, lub zbliżonego do białego, i powinna być matowa.

Próbka powinna być zamontowana w uchwycie w taki sposób, aby zminimalizować drgania. Ważnym jest, aby w trakcie montażu nie wprowadzać dodatkowych naprężeń, np. poprzez zbyt mocne zaciskanie próbki w uchwycie. Ponadto, próbkę należy ustawić tak, aby otwór był wykonywany prostopadłe do powierzchni próbki.

Prawidłowe ustawienie kamery, jest krytyczne w pomiarach naprężeń metodą *ESPI*. Po prawidłowej konfiguracji i ustawieniu kamery, stwierdzono, że nie jest wymagana ciągła kontrola jej położenia. Jednakże ostrość rejestrowanego obrazu jest bardzo wrażliwa, szczególnie dla małych powierzchni i małej ostrości powierzchni. Kamera powinna być sprawdzana pod tym względem przed każdym pomiarem.

5. Wybrane wyniki badań eksperymentalnych

Badania przeprowadzono dla próbek szlifowanych wykonanych z materiału Ti6Al5. Próbka była szlifowana ściernicą ceramiczną z ziarnem z elektrokorundu szlachetnego 99A. Stopy tytanu nie mogą być obrabiane ściernicami z ziarnem diamentowym, ze względu na powinowactwo diamentu z tytanem, które skutkuje grafityzacją diamentu i jego szybkim zniszczeniem.

Kąt pomiędzy osią freza a osią oświetlenia wynosił -51° , natomiast pomiędzy osią kamery wynosił -32° . Do akwizycji obrazów i ich analizy zastosowano oprogramowanie producenta PrismRS w wersji v3.1.0. Do programu wprowadzono parametry materiałowe niezbędne do wyznaczania wartości naprężeń, którymi są współczynnik Poisson'a $\nu = 0,31$ oraz moduł Young'a $E = 110\,000$ MPa. Pomiary wykonano specjalnym frezem, o średnicy zewnętrznej 0,8 mm. Głębokość frezowania ustalono na 0,3 mm, w pięciu krokach, co 0,06 mm. Zastosowano przy tym współczynnik regularyzacji o wartości 0,05 mm. Wyznaczone wartości naprężeń resztkowych w funkcji głębokości przedstawiono w tabeli 1, natomiast wartości naprężeń głównych przedstawiono w tabeli 2.

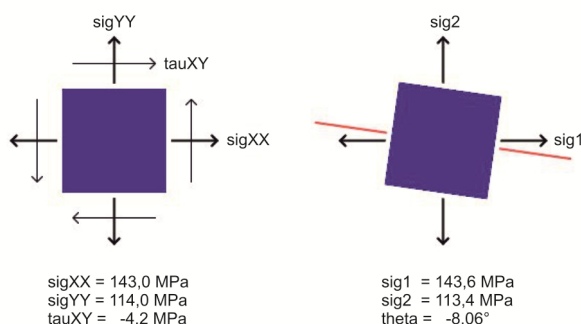
Tab. 1. Wartości naprężeń resztkowych
Tab. 1. Residual stresses table

Głębokość	sigXX	sigYY	tauXY
mm	MPa	MPa	MPa
0,06	493,00	518,00	-13,20
0,121	377,00	285,00	4,06
0,181	143,00	114,00	-4,20
0,24	-24,90	6,10	4,20
0,3	-47,40	-80,00	18,00

Tab. 2. Wartości naprężeń głównych
Tab. 2. Principal stress table

Głębokość	Sig1	Sig2	Theta
mm	MPa	MPa	°
0,06	523,70	487,30	-66,72
0,121	377,20	284,80	2,85
0,181	143,60	113,40	-8,06
0,24	6,60	-25,50	82,38
0,3	-39,40	-88,00	23,92

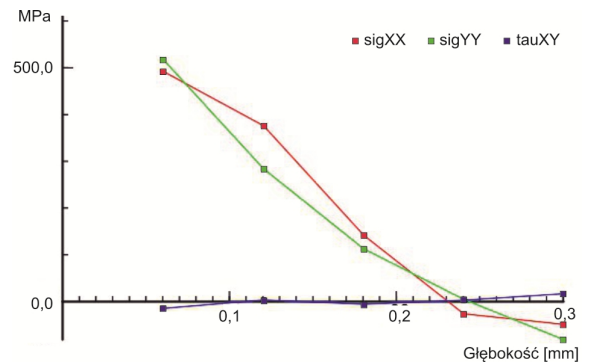
Dla każdego z etapów, wyznaczana jest graficzna reprezentacja naprężeń w określonych kierunkach, co przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Przykładowy profil naprężeń dla głębokości 0,181 mm, wyznaczony w odniesieniu do zerowej głębokości frezowania
Fig. 6. Graphical example of the stresses profile for depth 0.181 mm evaluated for zero-depth referencing

Końcowym wynikiem jest wykres naprężeń resztkowych w funkcji głębokości frezowania otworu, o określonej średnicy

i liczbie etapów frezowania, który został przedstawiony na rysunku 7.



Rys. 7. Wykres naprężeń resztkowych w funkcji głębokości frezowania do 0,3 mm, dla materiału szlifowanego TitanGrade5
Fig. 7. Residual stress diagram as a function of the cutting depth of 0.3 mm, for material sample Titan Grade 5 after grinding

6. Podsumowanie i wnioski

Zastosowanie elektronicznej interferometrii plamkowej do pomiarów naprężeń resztkowych umożliwia wyeliminowanie problemów, które występują w standardowej metodzie tensome-trycznej. W systemie Prism nie jest chociażby wymagana wysoka precyzja pozycjonowania frezu względem przedmiotu, tak jak ma to miejsce przy stosowaniu rozety tensometrycznej, gdzie wiertło musi znajdować się w osi rozety. Takie ułatwienie daje większą elastyczność w doborze miejsca pomiaru i dodatkowo eliminuje koszty związane z zastosowaniem samej rozety.

Należy zwrócić szczególną uwagę na to, że system Prism rejestruje naprężenia resztkowe w każdym kierunku, a nie co określony kąt, tak jak ma to miejsce w metodzie tensometrycznej.

Niestety w systemie Prism zastosowana metoda jest metodą niszczącą, ze względu na wykonywany otwór. Ponadto sporym ograniczeniem jest możliwość analizowania wyłącznie powierzchni płaskich.

Powyższy artykuł powstał w ramach prac badawczych finansowanych przez Narodowe Centrum Nauki.

7. Literatura

- [1] Oczko K., Porzycki J.: Szlifowanie. Podstawy i technika. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1986, 137-139.
- [2] Martinez A., Rayas J. A.: Evaluation of error in the measurement of displacement vector components by using electronic speckle pattern interferometry. Optics Communications, 271, 2007, 445-450.
- [3] Łukianowicz Cz.: Podstawy pomiarów nierówności powierzchni metodami rozpraszania światła. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2001, 40-43.
- [4] ASTM E837 - 08e2: Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method, 2008.
- [5] Lu J.: Handbook of Measurement of Residual Stresses, The Fairmont Press, Lilburn, 1996.
- [6] Stresstech Oy, Prism technical guide v.2.2., 2011.
- [7] Hanke, M.; Groetsch, C. W.: Nonstationary iterated Tikhonov regularization. Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 98, Issue I, 1998, 37-53

otrzymano / received: 10.05.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.10.2013

artykuł recenzowany / revised paper