



9. SYMPOZJUM TECHNIKI LASEROWEJ

21 – 25 wrzesień 2009
Szczecin – Świnoujście

Organizatorzy:

Instytut Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Wydział Elektryczny
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego
w Szczecinie

Politechnika Warszawska
Wojskowa Akademia Techniczna

Symposium zorganizowane pod auspicjami:

Komitetu Elektroniki i Telekomunikacji PAN
Polskiego Komitetu Optoelektroniki SEP
Polskiego Stowarzyszenia Fotonicznego

SZCZECIN 2009

Wydanie publikacji dofinansowane przez Fundację na Rzecz Rozwoju Politechniki Szczecińskiej

Projekt okładki
Ewa Rejszel

WYDANO ZA ZGODĄ
REKTORA ZACHODNIOPOMORSKIEGO UNIWERSYTETU TECHNOLOGICZNEGO
W SZCZECINIE

ISBN 978-83-7663-015-1

WYDAWNICTWO UCZELNIANE ZACHODNIOPOMORSKIEGO UNIWERSYTETU TECHNOLOGICZNEGO W SZCZECINIE

70-311 Szczecin, al. Piastów 50, tel. 091 449 47 60, e-mail: wydawnictwo@zut.edu.pl

Druk: PPH „Zapól” Dmochowski, Sobczyk, Sp.j., 71-062 Szczecin, al. Piastów 42, tel. 091 434 10 21

e-mail: zarzad@zapol.com.pl



9th SYMPOSIUM ON LASER TECHNOLOGY
9. SYMPOZJUM TECHNIKI LASEROWEJ

Modelowanie laserowego indukowania deformacji plastycznych stosowanych w mikropozycjonowaniu

Jacek Widłaszewski

Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk
Ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa

Wstęp

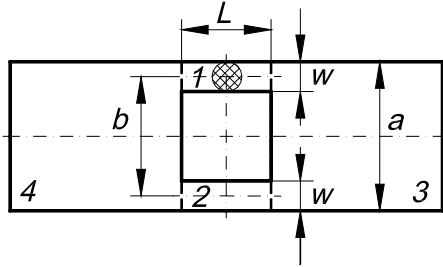
Postępująca miniaturyzacja i rozwój technologii układów mikro-opto-elektromechanicznych (MOEMS) wymaga stosowania nowych metod wytwarzania, które pozwalają przewyższać ograniczenia związane z manipulacjami mechanicznymi przy produkcji mikroelementów. Od niedawna w Europie Zachodniej i w Japonii w produkcji przemysłowej stosowana jest metoda bezdotykowego mikropozycjonowania z wykorzystaniem deformacji plastycznych wywołanych przez lokalne ogrzewanie elementów pozycjonujących wiązką laserową [1], [2]. Zastosowanie techniki laserowej pozwala na doprowadzanie energii do elementów obrabianych w sposób dobrze kontrolowany i w miejscach trudnodostępnych dla operacji mechanicznych. Wysoką dokładność pozycjonowania uzyskuje się przez zastosowanie sterowania w pętli ze sprzężeniem zwrotnym, a stabilność wymiarową poprzez wykonywanie międzyoperacyjnego wygrzewania odprężającego. Prezentowana praca przedstawia opis teoretyczny wywołania deformacji plastycznej miniaturowej konstrukcji ramowej, która jest modelem aktuatora wykorzystywanego w laserowym mikropozycjonowaniu.

Model teoretyczny

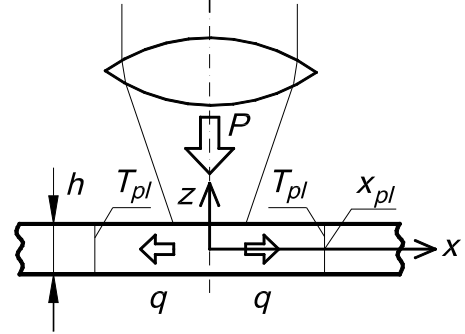
Przedstawiony na rys. 1 modelowy aktuator dwumostkowy jest traktowany jako miniaturowa konstrukcja ramowa składająca się z czterech segmentów: dwóch belek 1 i 2, które mogą doznawać deformacji wzdłużnej i giętnej oraz dwóch tarcz 3 i 4, traktowanych jako bryły sztywne. Podczas lokalnego ogrzewania belki 1 wiązką laserową o mocy P (rys. 2) następuje termiczne wydłużanie tej belki ograniczane sztywnością pozostałych części aktuatora. Wraz ze wzrostem temperatury T materiału, przy dostatecznych wartościach mocy P i czasu t_h działania wiązki, naprężenie osiąga wartość granicy plastyczności. Pojawia się odkształcenie plastyczne ogrzewanej belki, czemu towarzyszy trwała deformacja kątowa całego aktuatora.

Rys. 2 ilustruje przyjęty model przepływu ciepła w segmencie 1. Wiązka laserowa jest traktowana jako powierzchniowe źródło ciepła. Oszacowanie strumieni ciepła wymienianego drogą przewodnictwa, konwekcji i promieniowania wykazują, że w fazie nagrzewania z pewnym przybliżeniem można pomijać dyssypację energii drogą

konwekcji i promieniowania. Zakłada się, że zaabsorbowana część energii wiązki laserowej dzieli się na dwie połowy, które drogą przewodnictwa przekazywane są w kierunku obu końców segmentu 1.



Rys. 1. Modelowy aktuator dwumostkowy.



Rys. 2. Przyjęty schemat przepływu ciepła w segmencie 1.

Wykorzystując zasadę Saint–Venanta dla zagadnień wymiany ciepła drogą przewodnictwa można przyjąć, że w pewnej odległości od źródła przepływ ciepła w rozpatrywanej belce ma charakter jednowymiarowy, opisany rozwiązaniem [3]

$$T(x,t) = \frac{2q}{\lambda} \left[\sqrt{\kappa t} \operatorname{ierfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} \right) - \sqrt{\kappa(t-t_h)} \operatorname{ierfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa(t-t_h)}} \right) \right] + T_0 \quad (1)$$

gdzie: q jest strumieniem ciepła obliczanym w rozważanym zagadnieniu jako $q = \frac{AP}{2S}$;

A - współczynnik absorpcji promieniowania; P - moc wiązki laserowej; $\kappa = \frac{\lambda}{\rho c}$ -

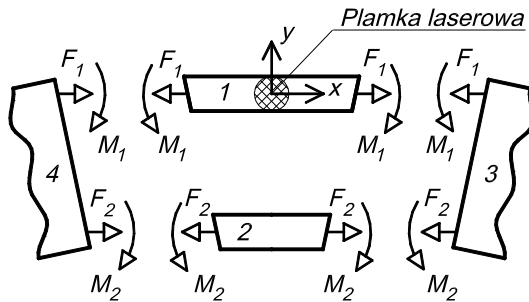
współczynnik wyrównywania temperatury; λ - współczynnik przewodzenia ciepła; ρ - gęstość materiału; c - ciepło właściwe materiału; $S = wh$ - pole powierzchni przekroju poprzecznego segmentu ogrzewanego wiązką laserową; w - szerokość segmentu; h - grubość materiału; t - czas; T_0 - temperatura początkowa. Na rys. 2 zaznaczono przebieg wybranej izotermi T_{pl} , a jej odległość od środka plamki laserowej jest oznaczona jako x_{pl} .

W analizie sił wewnętrznych zastosowano model belki Bernoulliego-Eulera. Przyjęty schemat sił i momentów sił działających na poszczególne segmenty konstrukcji jest przedstawiony na rys. 3. Wydłużenie termiczne ogrzewanej belki można obliczyć całkując rozkład temperatury (1). Na podstawie tego wydłużenia termicznego i analizy statyki ramy wyprowadzono wzór na kąt deformacji termosprężystej $\alpha_{el}(t)$ aktuatora dwumostkowego w fazie nagrzewania ($t \leq t_h$)

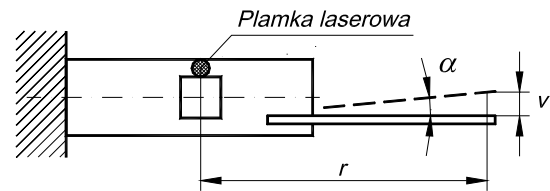
$$\alpha_{el}(t) = - \frac{3AP\alpha_T bt}{\rho ch w (3b^2 + w^2)} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{L}{4\sqrt{\kappa t}} \right) + \frac{L}{2\sqrt{\kappa t}} \operatorname{ierfc} \left(\frac{L}{4\sqrt{\kappa t}} \right) \right] \quad (2)$$

gdzie: α_T - współczynnik liniowej rozszerzalności termicznej.

Przy obliczaniu deformacji plastycznej wykorzystano założenie, że granicę obszaru uplastycznienia wyznacza zasięg x_{pl} w chwili t_h izotermy temperatury T_{pl} nazywanej w literaturze przedmiotu temperaturą krytyczną, temperaturą utraty własności sprężystych lub temperaturą uplastycznienia.



Rys 3. Przyjęty układ sił wewnętrznych.



Rys 4. Sposób mierzenia deformacji kątowej próbki nagrzewanej wiązką laserową.

Przyjęto, iż w chwili osiągnięcia przez materiał stanu uplastycznienia następuje relaksacja naprężenia termicznego, a towarzyszące jej odkształcenie określa termicznie indukowaną deformacją plastyczną konstrukcji. Wyprowadzono następujący wzór na kąt deformacji plastycznej aktuatora pod wpływem impulsowego i lokalnego nagrzania

$$\alpha_{pl} = \frac{3AP\alpha_T w b x_{pl} t_h}{L h \rho c (3b^2 + w^2)} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{L}{4\sqrt{\kappa t_h}} \right) + \frac{L}{2\sqrt{\kappa t_h}} \operatorname{ierfc} \left(\frac{L}{4\sqrt{\kappa t_h}} \right) \right] \quad (3)$$

Zasięg x_{pl} izotermy temperatury uplastycznienia wyznaczano numerycznie na podstawie rozkładu temperatury (1).

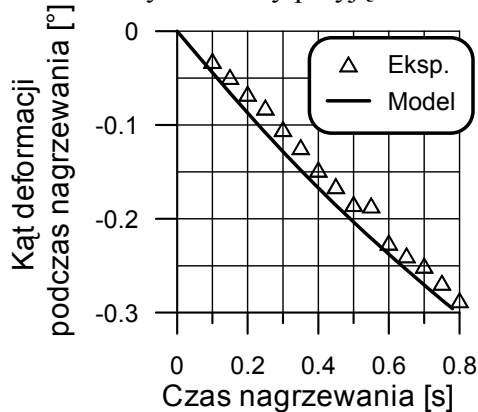
Weryfikacja doświadczalna i wyniki

Weryfikacja doświadczalna modelu teoretycznego została przeprowadzona przy użyciu próbek o różnych wymiarach, wykonanych ze stali niskowęglowej i stali nierdzewnej typu 18/8. Próbki były wstępnie wygrzewane w piecu dla zmniejszenia naprężeń własnych i wytworzenia powłoki tlenkowej stabilizującej absorpcję promieniowania laserowego. Eksperymenty były prowadzone z użyciem lasera Nd:YAG.

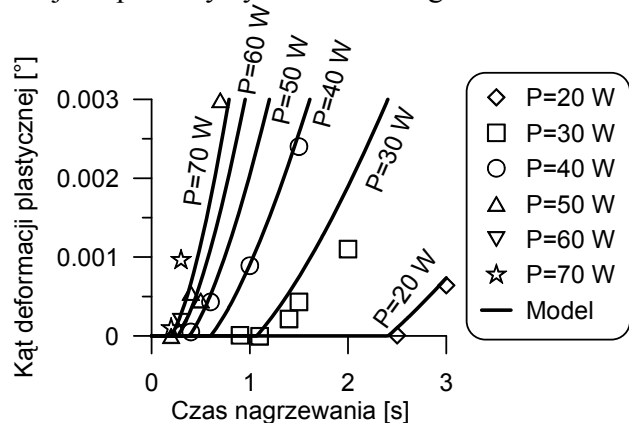
Zasadę pomiaru deformacji kątowej próbek przedstawia rys. 4. Deformacja kątowa była wyznaczana na podstawie bezdotykowych pomiarów przemieszczenia liniowego v wykonywanych z użyciem mikrometru laserowego. Kąt α używany jako miara deformacji próbki był obliczany z zależności $\alpha = \arctan(v/r)$, na podstawie promienia r i mierzonego przemieszczenia liniowego v lekkiego elementu związanego z badaną próbką.

Porównanie wyników eksperymentalnych i dla modelu teoretycznego w przypadku termosprężystej deformacji kątowej $\alpha_{el}(t)$ próbki wykonanej ze stali nierdzewnej jest pokazane na rys. 5. Wyniki pomiarów i obliczeń trwałej deformacji plastycznej próbek wykonanych ze stali niskowęglowej są przedstawione na rys. 6. Zgodnie z przyjętą konwencją kąt deformacji termosprężystej w fazie nagrzewania ma wartość ujemną, a kąt trwałej deformacji plastycznej ma wartość dodatnią, jak pokazuje rys. 4.

W obliczeniach zostały użyte następujące dane dla stali niskowęglowej: $A = 0.88$, $\alpha_T = 14.6 \cdot 10^{-6}$ [1/K], $\lambda = 38$ [W/(m K)], $c = 625$ [J/(kg K)], $\rho = 7680$ [kg/m³], $T_{pl} = 720$ [°C], a w przypadku stali nierdzewnej: $A = 0.85$, $\alpha_T = 18.7 \cdot 10^{-6}$ [1/K], $\lambda = 22$ [W/(m K)], $c = 529$ [J/(kg K)], $\rho = 7650$ [kg/m³], $T_{pl} = 900$ [°C]. Wartości stałych materiałowych zostały przyjęte dla średniej temperatury cyklu termicznego.



Rys 5. Wyniki dla stali nierdzewnej.
 $h = 0.505$ mm, $w = 2$ mm, $L = 6$ mm,
 $b = 10$ mm, $P = 19.8$ W.



Rys 6. Wyniki dla stali niskowęglowej.
 $h = 0.815$ mm, $w = 2$ mm, $L = 10$ mm,
 $b = 8$ mm.

Wśród możliwych powodów rozbieżności pomiędzy wynikami doświadczalnymi i teoretycznymi należy wymienić: uproszczenia dokonane w modelu teoretycznym, w szczególności pomijanie konwekcyjnych i radiacyjnych strat ciepła, a także wpływ niedokładności realizacji zadanego czasu nagrzewania na stanowisku badawczym (± 0.04 s) oraz wpływ fluktuacji mocy wiązki laserowej ($\pm 5\%$).

Podsumowanie

Weryfikacja eksperymentalna modelu teoretycznego pokazuje, że zaprezentowany opis deformacji plastycznej miniaturowej konstrukcji ramowej może być wykorzystywany przy projektowaniu i optymalizacji aktuatorów stosowanych w bezdotykowym mikropozycjonowaniu. Podane rozwiązanie może być stosowane także w przypadku innych źródeł ciepła.

Podziękowanie

Praca została częściowo wykonana w ramach projektu badawczego numer N503 012 31/1668 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2006-2009.

Literatura

1. Hoving W., Accurate manipulation using laser technology. Proceedings of the LANE 2001 (Laser Assisted Net Shape Engineering 3, International Conference), eds.: M. Geiger, A. Otto, Meisenbach-Verlag Bamberg 2001, 113-124.
2. Hagenah H., Wurm T. Geiger M., Computer Assisted Design of Actuators for High Precision Adjustment in Micro Technology. Rozdział w książce: Bramley A.,

- Brissaud D., Coutellier D. and McMahon C. (eds.), *Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, 403-416. Springer 2005.
3. Boley B. A., Weiner J. H., *Theory of thermal stresses*. John Wiley & Sons, Inc., 1960.