

**POLITECHNIKA WARSZAWSKA**

**PRACE NAUKOWE  
MECHANIKA z. 217**



WARSZAWA 2007

---

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

REDAKTOR DZIAŁOWY

Andrzej Tylikowski

Artykuły przyjęte do druku zostały zakwalifikowane przez Komitet Naukowy XXII Symposium  
Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego

Wszystkie artykuły podlegały recenzji przez wybranych członków Komitetu Naukowego:

prof. dr hab. inż. Marek Bijak-Żochowski

prof. dr hab. inż. Romuald Będziński

prof. dr hab. inż. Lech Dietrich

prof. dr hab. inż. Jan Szlagowski

Skład komputerowy wykonali Autorzy

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2007

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

00-644 Warszawa, ul. Polna 50, tel. 022-825-75-18

Księgarnia internetowa [www.wpw.pw.edu.pl](http://www.wpw.pw.edu.pl)

PUBLISHING HOUSE OF THE WARSAW UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

00-644 Warsaw, Poland, Polna 50, phone 48-22-825-75-18

Internet booksellers [www.wpw.pw.edu.pl](http://www.wpw.pw.edu.pl)

Druk: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Zamówienie nr 231/2007

**XXII Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego**  
Jachranka, 18÷21 października 2006

**22<sup>nd</sup> Symposium on Experimental Mechanics of Solids**  
Jachranka, Poland, October 18÷21, 2006

---

## **ANALIZA LASEROWO INDUKOWANYCH DEFORMACJI PLASTYCZNYCH SIŁOWNIKA DWUMOSTKOWEGO**

**Jacek Widłaszewski**

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN  
Ul. Świętokrzyska 21, 00-049 Warszawa  
Tel.: 0 22 826 12 81 w. 320. E-mail: jwidl@ippt.gov.pl

### **ANALYSIS OF LASER-INDUCED PLASTIC DEFORMATIONS OF THE TWO-BRIDGE ACTUATOR**

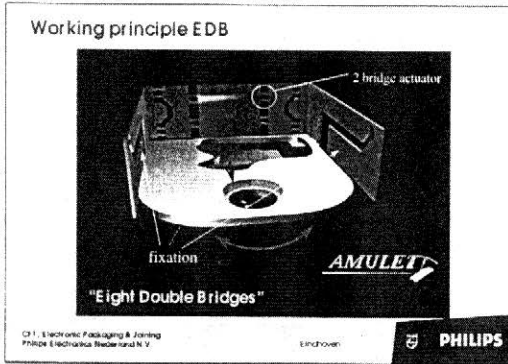
Two-bridge actuators are applied in precise positioning during assembly of micro-opto-electro-mechanic systems (MOEMS). Numerical simulation with the Finite Element Method and experimental measurements of laser-induced plastic deformation of the two-bridge actuator model are presented. Results give insight into mechanism of deformation of the structure. In particular, simulation reveals influence of thermally generated bending moment in the heated segment on stress and strain fields. Described modeling procedure can be applied in analysis of other thermal actuators.

#### **1. Wstęp**

Lokalnie ogrzewając elementy wykonane z metali i innych materiałów można w sposób kontrolowany powodować ich trwałą deformację. Precyzyjnym i łatwym do sterowania źródłem ciepła jest wiązka laserowa. Wywoływanie zmiany kształtu poprzez ogrzewanie wiązką laserową nazywane jest kształtowaniem laserowym [1]. Metoda ta jest przemysłowo stosowana przy wytwarzaniu miniaturowych podzespołów optoelektronicznych i elektromechanicznych (MOEMS). Laserowo indukowane mikrodeformacje są podczas montażu wykorzystywane do precyzyjnego pozycjonowania elementów. Do stosowanych w tym celu miniaturowych konstrukcji wsporczych, podlegających mikrodeformacji pod wpływem lokalnego ogrzewania wiązką laserową, w języku angielskim używa się terminu *actuators*. Wydaje się, że właściwym określeniem takich konstrukcji w języku polskim może być termin *siłowniki termiczne*. Przykład rozwiązania wykorzystującego osiem siłowników dwumostkowych (*two-bridge actuators*) jest przedstawiony na rys. 1.

Model analityczny i badania eksperymentalne modeli siłowników dwumostkowych zostały przedstawione w pracach [2], [3]. Niniejsza praca prezentuje wyniki modelowania numerycznego i ich weryfikację doświadczalną. Symulacje metodą elementów skończonych

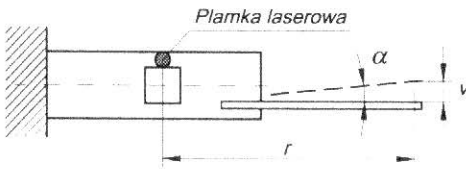
miały na celu pogłębienie zrozumienia mechanizmu laserowego indukowania deformacji siłowników dwumostkowych.



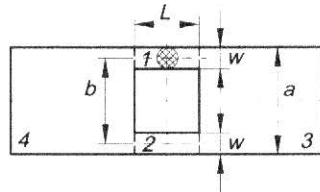
Rys 1. Konstrukcja wsporcza soczewki zawierająca osiem siłowników dwumostkowych [4].

## 2. Badania eksperymentalne

Wykonano pomiary deformacji kątowej próbki będącej studialnym modelem siłownika termicznego dwumostkowego. Próbka była przez 1.3 s nagrzewana nieruchomą wiązką o mocy 21.5 W lasera Nd:YAG typu RSY 150 Q. Kształt próbki, miejsce nagrzewania oraz sposób mierzenia deformacji kątowej przedstawia rys. 2. Charakterystyczne wymiary, które są pokazane na rys. 3, wynosiły  $L=6$  mm,  $b=10$  mm,  $w=2$  mm.



Rys 2. Sposób mierzenia deformacji kątowej próbki nagrzewanej wiązką laserową.

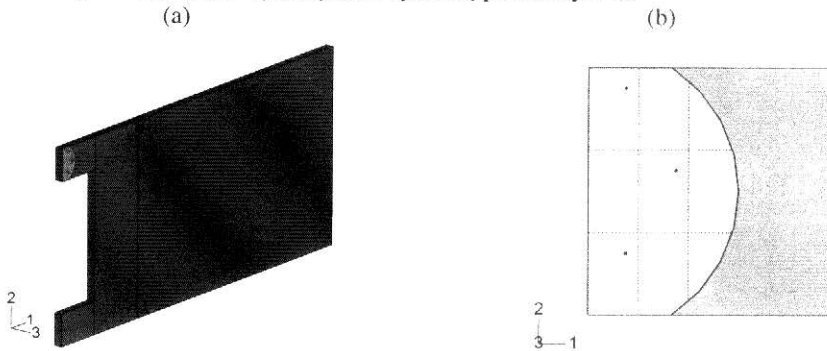


Rys 3. Oznaczenia wymiarów i segmentów próbki.

Próbka została wycięta laserowo z blachy o grubości 0.505 mm ze stali nierdzewnej austenitycznej chromowo-niklowej 1H18N9T, która należy do grupy stali typu 18/8 zawierających około 18% Cr i około 9% Ni. Dla zmniejszenia naprężeń własnych i uzyskania powłoki tlenkowej zapewniającej stabilne warunki absorpcji promieniowania próbka była wyżarzana w piecu w temperaturze 500 °C przez 0.5 godz. Deformacja kątowa została wyznaczona na podstawie bezdotykowych pomiarów przemieszczenia liniowego  $v$  wykonywanych z użyciem laserowego mikrometru skanującego. Mikrometr laserowy mierzył zmianę pozycji dodatkowego elementu o dobrej jakości powierzchni i niewielkiej masie, który był przymocowany do próbki. Kąt  $\alpha$  używany jako miara deformacji próbki był obliczany z wyrażenia  $\alpha = \arctan(v/r)$ , na podstawie promienia  $r$  i rejestrowanego przemieszczenia liniowego  $v$ . Po odpowiednim działaniu wiązki laserowej uzyskuje się deformację plastyczną (spęczenie termiczne) segmentu 1, czemu odpowiada końcowa bardzo mała i dodatnia wartość deformacji kątowej (rys. 7).

### 3. Modelowanie metodą elementów skończonych

Przy użyciu systemu ABAQUS przeprowadzono rozprzężoną quasistatyczną analizę zagadnienia termo-sprężysto-plastycznego. Najpierw zostało wyznaczone pole temperatury dla lokalnego ogrzewania próbki wiązką laserową oraz przy swobodnym stygnięciu materiału. Otrzymane pole temperatury zostało następnie użyte do wyznaczenia pól naprężeń, odkształceń i przemieszczeń. Wykorzystano symetrię próbki (rys. 4).



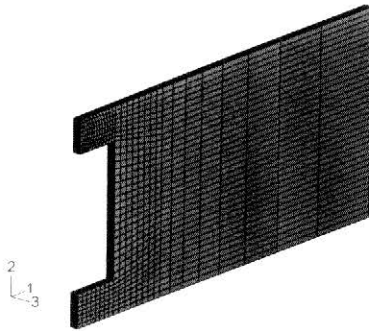
Rys. 4. Model i jego obciążenie termiczne wiązką laserową:

(a) model połowy symetrycznej próbki, (b) obszar segmentu I ogrzewany wiązką laserową.

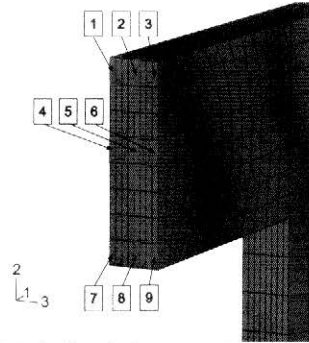
Przyjęto, iż obciążenie termiczne wielomodową wiązką lasera RSY 150 Q można zamodelować strumieniem ciepła o stałej intensywności na kołowym przekroju poprzecznym i w czasie. Rzeczywiste wiązki laserowe charakteryzuje brak ostrych granic przekroju poprzecznego. Z tego względu założono, że pewna część przekroju wiązki wychodzi poza materiał nagrzewany (rys. 4b). Uwzględniono dyssypację ciepła drogą promieniowania i konwekcji.

Model składał się z 6016 elementów ośmiowęzłowych (rys. 5). Dla odwzorowania efektów związanych z gradientem temperatury przyjęto osiem elementów na grubości materiału (rys. 6). Wartości współczynników konwekcji i absorpcji promieniowania zostały wyznaczone w procedurze eksperymentalno-numerycznej z użyciem pirometru dwubarwowego oraz symulacji MES. Wykorzystano dostępne w literaturze zależności parametrów materiałowych od temperatury [3].

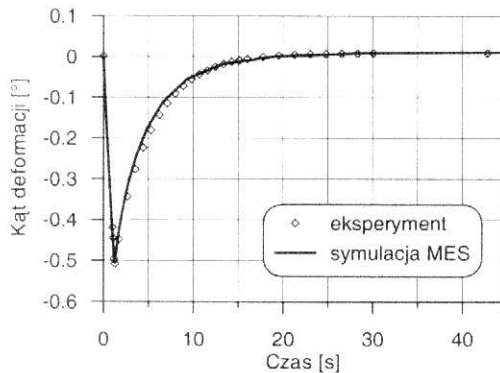
Kluczowe znaczenie dla właściwego zamodelowania deformacji termoplastycznej w rozpatrywanym zagadnieniu mają dane opisujące naprężenie uplastyczniające w zakresie wysokich temperatur. Niestety, nieliczne publikowane w literaturze dane te charakteryzuje znaczny rozrzut. Z tego względu do obliczeń przyjęto zależność uproszczoną na podstawie [5] i przy założeniu, że powyżej temperatury 840 °C granica plastyczności stali 1H18N9T ma szczytkową wartość 5 MPa (rys. 8). Dane te pozwoliły uzyskać zgodność deformacji plastycznej w symulacji z wynikiem doświadczalnym (rys. 7), jednak wynik ten zapewne można uzyskać również przyjmując inne przebiegi zmienności granicy plastyczności w zakresie wysokich temperatur. Dobra zgodność wyników symulacji i eksperymentalnych w całym cyklu termicznym (rys. 7) pozwala z zaufaniem wykorzystać wyniki numeryczne do jakościowej analizy mechanizmu termicznego indukowania deformacji rozpatrywanego siłownika.



Rys. 5. Podział modelu na elementy skończone. Oznaczenie osi układu odniesienia.



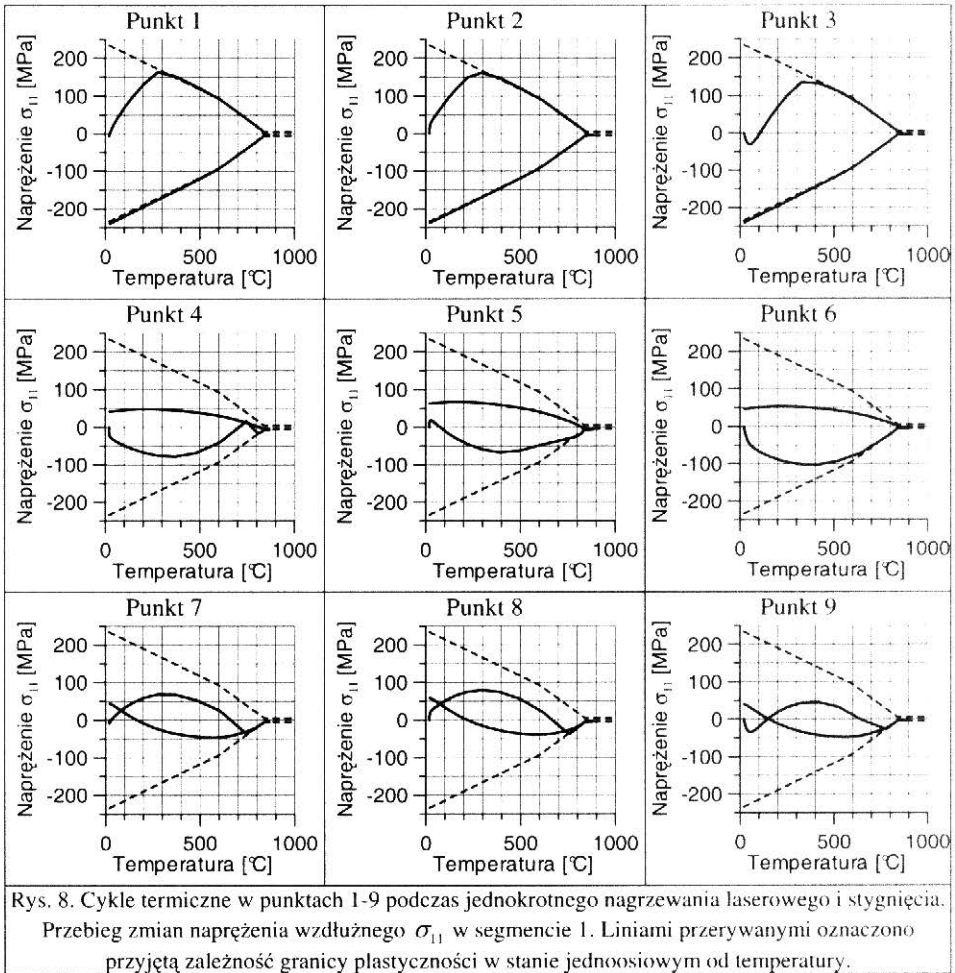
Rys. 6. Lokalizacja i oznaczenia punktów analizy modelu w ogrzewanym segmencie 1.



Rys. 7. Porównanie przebiegów czasowych deformacji kątowej w eksperymencie i symulacji MES.

Cykle termiczne wzdłużnej (w kierunku 1) składowej  $\sigma_{11}$  naprężenia w punktach 1-9 (rys. 6) podczas jednokrotnego nagrzewania laserowego i swobodnego stygnięcia są przedstawione na rys. 8. Analogiczne przebiegi zmian wzdłużnej składowej  $\varepsilon_{11}^p$  odkształcenia plastycznego pokazuje rys. 9. Lokalne ogrzewanie rozpatrywanej miniaturowej konstrukcji ramowej wywołuje złożone zmiany naprężenia i odkształcenia. Wykresy pokazują, iż w początkowym okresie fazy nagrzewania występuje intensywne rozciąganie górnych włókien segmentu 1 (punkty 1-3) od momentu gnącego. Jest on generowany deformacją całej konstrukcji pod wpływem termicznego wydłużenia ogrzewanego segmentu. Dopiero, gdy temperatura w rozpatrywanych punktach dochodzi do maksymalnych wartości (800-900 °C), zaczyna dominować odkształcenie plastyczne ściskania, które prowadzi do termicznego spęczenia segmentu na przeważającej części przekroju środkowego.

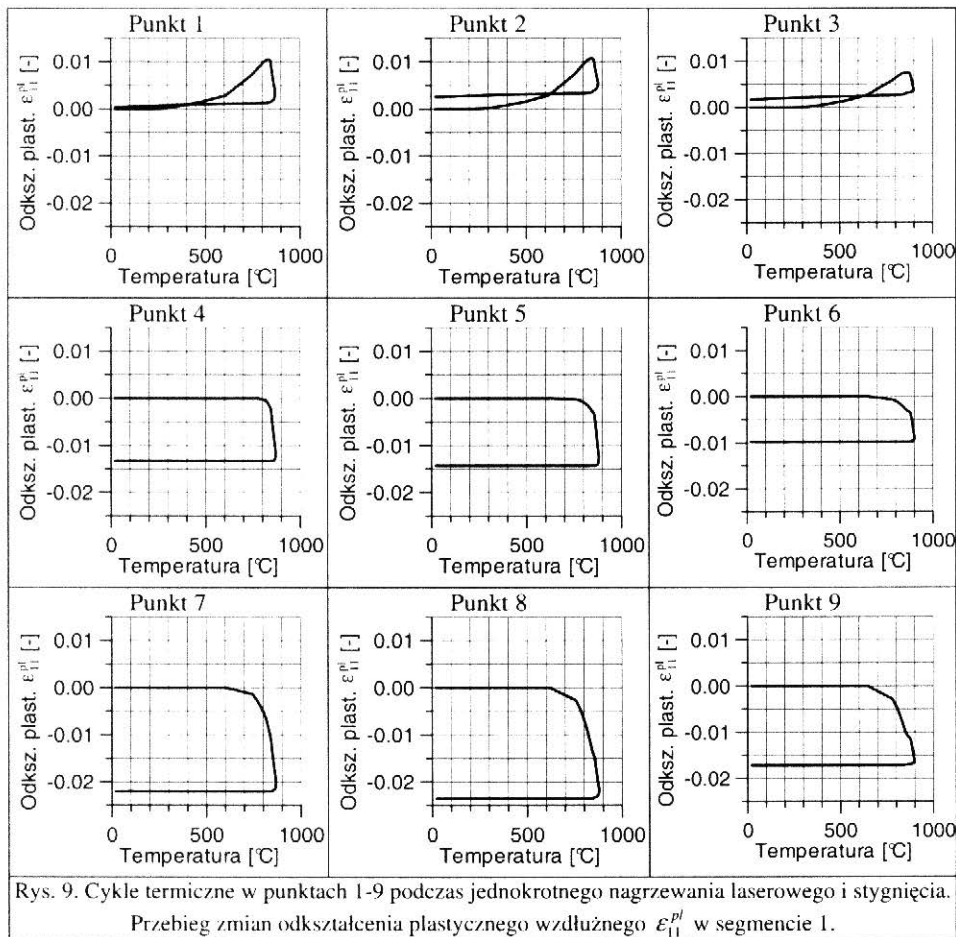
Porównanie wykresów umieszczonych na tym samym poziomie (1-2-3, 4-5-6, 7-8-9) wskazuje istnienie nieznacznego efektu gradientu temperatury na grubości materiału. Obliczenia wykazały zasadność przyjętego w modelu analitycznym założenia upraszczającego o pole temperatury w segmencie 1 bliskim modelowi jednowymiarowemu. Stąd wynika widoczna na rys. 9 zbieżność temperatur maksymalnych w punktach 1-4-7, 2-5-8 oraz 3-6-9.



#### 4. Wnioski

Przedstawiona symulacja numeryczna pozwala lepiej poznać mechanizm termo-sprężysto-plastycznej deformacji siłownika dwumostkowego. Daje wgląd w ograniczenia stosowalności istniejących modeli analitycznych i otwiera perspektywę ich doskonalenia.

Symulacja metodą elementów skończonych termicznego indukowania mikrodeformacji plastycznych wymaga starannego modelowania i wysokiej dokładności stosowanych danych materiałowych. Wpływ temperaturowej zależności granicy plastyczności w zakresie wysokich temperatur powinien być przedmiotem dalszej analizy. Przedstawiony sposób symulacji numerycznej może być zastosowany do projektowania i analizy innych rozwiązań konstrukcyjnych siłowników termicznych.



### Literatura cytowana

- [1] Widłaszewski J., *Przegląd metod kształtowania termicznego*. Materiały Konferencji „Badania Mechanicznych Właściwości Materiałów i Konstrukcji 1”, IPPT PAN, 2003, 257-285.
- [2] Widłaszewski J., *Micro Adjustment by Thermal Upsetting*. Thermal Forming. Proceedings of the IWOTE'05, 1st International Workshop on Thermal Forming. Vollertsen F., Seefeld T. (red.), Bremer Institute für angewandte Strahltechnik GmbH (BIAS), 2005, 93-109.
- [3] Widłaszewski J., *Modelowanie termo-sprężysto-plastycznych deformacji termicznego sitownika dwumostkowego*. Seminarium Szkoleniowe „Oceny stopnia degradacji materiałów i laserowe obróbki materiałów”. IPPT PAN, Centrum Doskonałości LAPROMAT, 2005, 279-310.
- [4] Hoving W., Verhoeven E. C. M., *High-precision micro-assembly using laser-adjustment*. Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik - LEF 2000. Red.: M. Geiger, A. Otto., Meisenbach Bamberg, 2000.
- [5] Sędek P., *Problemy naprężeń i odkształceń spawalniczych*. Inżynieria Materiałowa. Biuro Gamma, Warszawa 2000. ISBN 83-87848-20-4.