

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jacka Widłaszewskiego
(promotorstwa prof. dr. hab. inż. Lecha Dietricha) pt:
Modelowanie i badania doświadczalne termo-sprężysto-plastycznych
deformacji aktuatora dwumostkowego**

Temat i zawartość rozprawy

Tematem 211-to stronicowej rozprawy doktorskiej jest tzw. *kształtowanie termiczne* ustrojów sprężysto-plastycznych przy wykorzystaniu odpowiednio sterowanej wiązki laserowej. Sprężony efekt indukowanych w ten sposób w konstrukcji naprężeń termicznych oraz zmian lokalnych granic plastyczności pozwala na wymuszanie trwałych zmian pierwotnego kształtu. W szczególności, daje to możliwość pozycjonowania przy użyciu aktywatorów mostkowych wykorzystujących efekt kształtowania laserowego. Jest to nowa, rozwijająca się od 20-tu lat technologia znajdująca coraz większe zastosowanie np. w produkcji mikroelementów do układów MOEMS. Próba kompleksowego opisu tego zagadnienia stanowi wyzwanie ze względu na jego multidyscyplinarność i konieczność sprzężenia takich zjawisk fizycznych jak: laserowa emisja fal elektromagnetycznych, absorpcja i dyssypacja energii wiązki laserowej na powierzchni nagrzewanego mostka, transport ciepła w nagrzanym ustroju oraz związane z tym procesy generacji stref plastycznych i naprężeń własnych. Autor proponuje kompleksowe podejście do omawianego problemu poprzez: i) zbudowanie stanowiska badawczego pozwalającego na eksperymentalne wymuszanie zmian kształtu aktuatora mostkowego poprzez sterowaną wiązkę laserową, ii) stworzenie uproszczonego modelu analitycznego opisującego ten złożony eksperyment, iii) przeprowadzenie weryfikacji eksperymentalnej zaproponowanego modelu, iv) przeprowadzenie weryfikacji numerycznej (przy użyciu kodów komercyjnych) badanego zjawiska, usuwając część założeń upraszczających modelu analitycznego, v) i poprzez dyskusję otrzymanych rezultatów.

Praca podzielona została na 10 rozdziałów:

- Wstęp, zawierający opis dziedziny kształtowania termicznego, motywacje badań oraz uwagi terminologiczne
- Rozdział pierwszy, zawierający bogaty (32 strony) przegląd stanu wiedzy i techniki w omawianym obszarze badań
- Rozdział trzeci, zawierający sformułowanie celu i zakresu pracy
- Rozdział czwarty, zawierający opis stanowiska badawczego i zastosowanej procedury badawczej
- Rozdział piąty, poświęcony wyznaczeniu współczynników absorpcji i konwekcji
- Rozdział szósty (76 stron), zawierający opis uproszczonego modelu analitycznego aktuatora dwumostkowego oraz jego weryfikację eksperymentalną
- Rozdział siódmy, prezentujący numeryczny model MES aktuatora oraz weryfikacje jego wyników
- Rozdziały ósmy, dziewiąty i dziesiąty, zawierające uwagi końcowe, spis literatury oraz dodatki.

Główne dokonanie Autora polega na osiągnięciu postawionego sobie celu, polegającego na potwierdzeniu poprzez weryfikację eksperymentalną poprawności przyjętego modelu teoretycznego opisującego termo-sprężysto-plastyczną deformację aktuatora dwumostkowego pod wpływem impulsowego, lokalnego nagrzania wiązka laserową. W szczególności, sprowadzone to zostało do:

- zbudowania stanowiska badawczego do eksperymentalnego testowania zjawiska do precyzyjnego pozycjonowania aktuatora dwu-mostkowego

- opracowania uproszczonego, analitycznego modelu opisującego badane zjawisko
- przeprowadzenia weryfikacji eksperymentalnej zaproponowanego modelu analitycznego
- zbudowania modelu numerycznego opisującego badane zjawisko (eliminującego część założeń upraszczających modelu analitycznego) i jego weryfikacji eksperymentalnej
- przeprowadzenia analizy krytycznej otrzymanych rezultatów.

Komentarze i uwagi polemiczne

Wysoko oceniam komplementarność całego przedsięwzięcia badawczego, obejmującego budowę skomplikowanego stanowiska eksperymentalnego, próbę stworzenia uproszczonego modelu analitycznego zjawiska, bardziej precyzyjnego modelu numerycznego oraz weryfikację eksperymentalną tych modeli. Istotną rolę odgrywa tu wykorzystanie przez Autora swego bogatego dorobku badawczego w zakresie badań doświadczalnych dotyczących laserowego kształtowania termicznego.

Główne problemy pomiarowe, związane z precyzyjnym wyznaczeniem temperatury oraz zmiany kształtu badanego obiektu zostały w pracy omówione, choć zbyt pobieżnie. Są to kluczowe kwestie, wpływające istotnie na jakość wyników końcowych.

Precyzyjne pozycjonowanie bazujące na laserowych aktywatorach wielo-mostkowych, a ogólniej mówiąc laserowe kształtowanie termiczne wpisuje się w wiele zastosowań technicznych z dziedziny tzw. systemów inteligentnych, w których kluczową rolę odgrywają trzy następujące elementy składowe: sensory obserwujące aktualny stan systemu, aktywatory wymuszające zmiany systemu oraz sterowniki zdolne do optymalnego modyfikowania ustroju. Podjęta przez Autora próba opracowania kompleksowego modelu laserowego aktywatora dwumostkowego może być też traktowana jako wstęp do opracowania sterownika, zdolnego do optymalnego kontrolowania on-line wiązki laserowej. Wyzwaniem jest tu nadal opracowanie na tyle precyzyjnego modelu multi-fizycznego całego urządzenia, aby postawiony cel był osiągalny.

Mało przekonująco brzmi motywacja Autora przemawiająca za przyjęciem uproszczonego modelu analitycznego badanego zjawiska, pomimo, że (jak to wynika z wniosków końcowych rozprawy) prowadzącego do rezultatów niewiele rozbiegających się z wynikami uzyskanymi na drodze numerycznej. Podejściu takiemu brakuje perspektywy dalszego rozwoju. Istota problemu precyzyjnego modelowania zjawiska polega na konieczności rozwiązania zagadnienia sprzężonego, w którym występuje wiele źródeł niedokładności opisu. Główne z nich, jak stwierdza Autor, to parametry absorpcji i dyssypacji energii wiązki laserowej oraz termoplastyczne własności materiału. Bardziej obiecującym podejściem do tego typu problemu mogłoby okazać się sformułowanie zadania typu „*model updating*”, polegającego na wprowadzeniu do opisu zjawiska kilku parametrów nieznanych, opisujących wielkości obdarzone największym stopniem niewiedzy i ich identyfikacja poprzez rozwiązanie zadania optymalizacji z minimalizowaną funkcją celu zdefiniowaną jako miara rozbieżności odpowiedzi modeli: numerycznego i eksperymentalnego (np. lokalnie mierzone ewolucje deformacji i temperatury w kilku wybranych punktach ustroju). Parametrami do identyfikacji mogłyby być współczynniki opisujące absorpcję i dyssypację energii wiązki laserowej oraz współczynniki definiujące materiałowe własności termoplastyczne.

Obiecującą opcję sformułowania diskutowanego tu zagadnienia według formuły *model updating* daje podejście np. oparte na tzw. metodzie VDM (*Virtual Distortion Method*). Przyjmijmy, przykładowo, że zależność granicy plastyczności od temperatury (por. Rys.114 i 115) zostanie założona *a priori* jako funkcja odcinkami liniowa z punktami załamania, których współrzędne nie są znane na wstępie, lecz muszą być wyznaczone w procesie identyfikacji. Metoda numeryczna VDM pozwala na kontrolowane modyfikacje systemu wyjściowego (w naszym przypadku modyfikacje punktów załamania zależności termoplastycznej) w celu maksymalnego zbliżenia odpowiedzi modelowanego obiektu do pomiarów uzyskanych eksperymentalnie. Określone w ten sposób zadanie identyfikacji parametrów materiałowych sprowadzone zostaje do optymalizacji gradientowej z

