

Dwukierunkowe mikrogięcie laserowe dla układów MOEMS

Bi-direction laser microbending for MOEMS

JACEK WIDŁASZEWSKI*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.12.572

Bezdotykowa laserowa metoda mikropozycjonowania pozwala omijać ograniczenia tradycyjnych technik mechanicznych stosowanych przy montażu mikroukładów elektromechanicznych (*micro-electro-mechanical systems*, MEMS) oraz optoelektromechanicznych (*micro-opto-electro-mechanical systems*, MOEMS). Przedstawiono badania doświadczalne i symulacje numeryczne mechanizmu termicznego mikrogięcia, który pozwala uzyskiwać deformacje dwukierunkowe, to jest w kierunku do lub od padającej wiązki laserowej, w zależności od przyjętych parametrów obróbki. Zweryfikowany doświadczalnie model numeryczny umożliwił wyjaśnienie zachowania małych belek wysięgnikowych wykonanych ze stali nierdzewnej, poddawanych nagrzewaniu impulsem lasera Nd:YAG. Przy ustalonej długości impulsu kierunek gięcia zależy od mocy wiązki laserowej. Ujawniony mechanizm gięcia charakteryzuje się występowaniem znacznego dodatniego plastycznego odkształcenia wzdłużnego w obszarach brzegowych nagrzewanej belki. Deformacja wynika z dużego gradientu temperatury na szerokości belki, z pewnym udziałem gradientu na kierunku grubości. Zastosowanie tego mechanizmu otwiera nowe możliwości przed laserową technologią mikropozycjonowania, zwłaszcza gdy obrabiany element jest dostępny tylko z jednej strony.

SŁOWA KLUCZOWE: kształtowanie laserowe, gięcie laserowe, laserowe mikropozycjonowanie, mikroukłady optoelektromechaniczne

Laser-based non-contact micro-adjustment method is a way of going beyond limits of traditional mechanical techniques applied for precise alignment during assembly of micro-electro-mechanical and micro-opto-electro-mechanical systems (MEMS and MOEMS). This paper presents experimental and numerical investigation of thermal micro-bending mechanism, which enables bi-directional deformation, i.e. either towards or away from the incident laser beam, dependent on the applied processing parameters. Experimentally validated numerical model explained behavior of stainless steel cantilever beams subject to the heating by the Nd:YAG laser pulse. With constant pulse duration, direction of bending depends on the laser beam power. The revealed mechanism of bending involves significant positive longitudinal plastic strain in the edge regions of the heated beam. The deformation results from a considerable temperature gradient across the width of the cantilever beam, with some contribution of the temperature gradient in the thickness direction. Application of the mechanism opens up new opportunities for the laser-based micro-adjustment technology, particularly when the processed component is accessible from one side only.

KEYWORDS: laser forming, laser bending, laser micro-adjustment, MEMS, MOEMS

Mikrodeformacje wywoływane laserowo są szeroko stosowane w procesach wytwarzania w branży elektrycznej i elektronicznej, np. podczas produkcji komputerowych

dysków twardych [1] i miniaturowych przełączników elektrycznych. Wiodące koncerny tego sektora opatentowały liczne rozwiązania oparte na lokalnym nagrzewaniu laserowym materiałów metalicznych i niemetalicznych, które pozwalają na precyzyjne, bezdotykowe (z dystansu) i szybkie korygowanie kształtu w skali mikro, w celu pozycjonowania części i podzespołów, takich jak: magnetyczne głowice zapisu i odczytu, włókna optyczne, soczewki i fotodiody [2]. Nastawianie krytycznych odległości lub kątów położenia z mikrometryczną lub miliradianową dokładnością w małych elementach metalowych jest wykorzystywane w produkcji masowej na etapie montażu i pozwala na przyjmowanie względnie dużych tolerancji w poprzedzających etapach produkcji.

Podstawowymi mechanizmami laserowego termicznego kształtowania rozpoznanymi do tej pory są:

- mechanizm gradientowy (*temperature gradient mechanism*, TGM),
- mechanizm spęzeniowy (*upsetting mechanism*, UM),
- mechanizm wybozeniowy (*buckling mechanism*, BM).

W zależności od parametrów obróbki laserowej, rozmiarów i kształtowania obrabianej części lokalne nagrzewanie laserowe impulsowe lub ciągłe może wywoływać różne zmiany kształtu.

Jednorodne spęcenie powstaje przy jednorodnym lub symetrycznym rozkładzie temperatury na grubości materiału, w warunkach ograniczenia możliwości jego termicznego rozszerzania się na kierunku wzdłużnym (w przypadku prętów) lub w płaszczyźnie elementu (w przypadku elementów typu tarcza, płyta lub powłoka). Zastosowanie mechanizmu spęzeniowego powoduje skrócenie materiału na kierunku wzdłużnym i zwiększenie jego grubości w obszarze bezpośrednio ogrzewanym. Ten mechanizm jest stosowany w technice laserowego pozycjonowania z użyciem aktuatorów dwu- i trzymostkowych [3–5].

Efekt zginania, to jest deformacja pozapłaszczyznowa, może być uzyskany, gdy odkształcenie plastyczne pojawia się przy dostatecznie dużym gradiencie temperatury na grubości materiału (TGM) lub ogrzewany obszar ulega termicznemu wyboczeniu (BM). To drugie zjawisko występuje, jeśli obszar ogrzewania charakteryzuje się dużą smukłością i jest dostatecznie sztywno podparty na brzegach w celu ograniczenia swobody jego deformacji termicznej w płaszczyźnie. Podczas gdy niestateczność jest nierozdzielnie związana z mechanizmem wybożenia termicznego i ogranicza możliwości jego wykorzystania [6], wadą mechanizmu gradientowego jest to, że pozwala uzyskiwać zgięcie tylko w jedną stronę, zawsze w kierunku użytego źródła ciepła (np. wiązki laserowej). Taka deformacja jest w literaturze przedmiotu nazywana wklęsłą (*concave*) lub dodatnim gięciem [6], a związana z tym deformacja kątowna jest w niniejszej pracy przyjmowana jako dodatnia (rys. 1). Odwrotna deformacja jest nazywana wypukłą (*convex*) lub gięciem ujemnym [6].

Mikrokształtowanie laserowo wywołwaną falą uderzeniową jest od niedawna przedmiotem badań jako nietermiczna alternatywa tworzenia plastycznego odkształcenia

* Dr inż. Jacek Widłaszeowski (jacek.widlaszewski@ippt.pan.pl) – Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Polska Akademia Nauk

i mikrodeformacji w podzespołach wrażliwych na temperaturę [7]. Fale uderzeniowe stosowane do kształtowania przez laserowe młotkowanie (*laser peen forming*) są wytwarzane za pomocą impulsów nano-, piko- i femtosekundowych, z użyciem lub bez dodatkowej warstwy absorpcyjnej [8–11]. Ta nowa metoda gięcia folii i blach cienkich jest analizowana pod kątem jej zastosowania w produkcji przyrządów medycznych, sprzętu elektronicznego [11] i ramion zawieszenia głowicy magnetycznej dysku twardego. Pomiarów termoparami podczas obróbki impulsami laserowymi o długości 8 ns wykazały znaczące przyrosty temperatury materiału [12]. Nadtapianie stali nierdzewnej AISI 302 obserwowano w badaniach nad laserowo sterowanymi mikroaktuatorami, gdy stosowane były impulsy o długości 20 ps [8].

Mechanizmy powstawania deformacji pod wpływem nagrzewania impulsowego są ciekawe zarówno pod względem teoretycznym, jak i ich przemysłowego wykorzystania. Badania nad mikropozycjonowaniem przez impulsowe gięcie termiczne laserowe zostały zapoczątkowane w Polsce, w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN, już ponad 20 lat temu [13]. Jednak przez wiele lat wydawało się, że można uzyskiwać jedynie dodatnie końcowe deformacje kątowe.

Autorzy pracy [14] analizowali mikrogięcie belek ze stali nierdzewnej 301, o grubości 100 μm , z zastosowaniem lasera Nd:YLF i impulsów o długości 10 ns. Plamka laserowa w kształcie paska o szerokości w zakresie 29–87 μm pokrywała całą szerokość próbki. Stwierdzono zmniejszenie się końcowego kąta zgięcia (dodatniego) wraz ze wzrostem szerokości plamki.

Z kolei autorzy [15] zaprezentowali badania nad dynamicznymi mikrodeformacjami belek wysięgnikowych ze stali St14 i C45, ogrzewanych wiązką lasera CO₂ o gausowskim rozkładzie gęstości mocy na przekroju poprzecznym. Ujemny końcowy kąt zgięcia próbki ze stali węglowej C45 przypisano skutkom przemiany martenzytycznej i związanemu z tym wzrostowi objętości właściwej materiału w pobliżu powierzchni ogrzanej wiązką laserową.

W pracy [16] analizowano chwilowe i końcowe deformacje belki wysięgnikowej ze stali nierdzewnej typu 18-8. Wyniki doświadczalne oraz numeryczne wykazały spadek dodatniego końcowego kąta zgięcia wraz ze wzrostem średnicy plamki laserowej. Największa przyjęta w analizie wartość ilorazu średnicy plamki i szerokości próbki wynosiła 0,45.

Efekty impulsowo wywołwanego przetapiania i krępowania stali 301 o grubości 100 μm były badane przez autorów [17] z użyciem metody elementów skończonych i modelu dwuwymiarowego. Zastosowana wiązka laserowa miała szerokość 30 μm i jednorodny rozkład intensywności na szerokości próbki. Impulsy laserowe o długości 120 ns dawały tylko dodatnie końcowe kąty zgięcia.

Ujemne kąty gięcia w rezultacie działania mechanizmu wyobczeniowego były rejestrowane po obróbce ceramiki Al₂O₃/TiC o grubości 350 μm , z zastosowaniem lasera włóknowego o pracy ciągłej (*continuous wave*, CW), wiązki o średnicy 40,8 μm oraz prędkości skanowania mniejszej niż 26 mm/s [18]. Materiał ceramiczny użyty w tych eksperymentach jest stosowany przy wytwarzaniu głowicy zapisu i odczytu w dyskach twardych.

Autorzy [19] analizowali także laserowe gięcie krzemowych mikrowysięgników, które są stosowane w ekstremalnie wrażliwych czujnikach fizycznych, chemicznych i biologicznych, np. w mikroskopach sił atomowych. Wiązka laserowa o długości fali 524 nm (wiązka lasera Nd:YLF ze zdwojoną częstotliwością fali) działała impulsami o długo-

ści 20 ns i częstotliwości repetycji 2 kHz. Plamka laserowa o średnicy 8 μm była przemieszczana w poprzek krzemowej beleczki wysięgnikowej o grubości 0,6 μm . Uzyskano gięcie z rozdzielczością 3,5 μrad . Przemieszczenie końca mikrowysięgnika wynosiło ok. 1,3 nm przy kącie gięcia 14 μrad . Autorzy wskazali, że ta technika jest łatwa do wdrożenia i bardzo użyteczna w zastosowaniu do zespołów równoległych mikrowysięgników w czujnikach chemicznych i biologicznych, jednak jej istotnym ograniczeniem jest możliwość zginania tylko w jednym kierunku.

Gdy element lub podzespół jest dostępny tylko z jednej strony, aby otrzymać ujemne deformacje kątowe, trzeba użyć specjalnych technik. Należy do nich wywołanie ogrzewaniem laserowym relaksacji wstępnego naprężenia materiału [7]. Takie podejście wykorzystuje się w produkcji dysków twardych. Ramię zawieszenia głowicy zapisująco-odczytującej jest poddawane kilku operacjom bezdotykowego laserowego mikrokształtowania. Służą one uzyskaniu w ramach produkcji masowej możliwie małej „wysokości lotu” głowicy (na poduszce powietrznej) nad powierzchnią magnetycznego nośnika informacji, aby zapewnić dużą gęstość zapisu. Minimalna aktualnie osiągnięta odległość głowicy od nośnika to ok. 3 nm. Na etapie montażu dysku, przy regulowaniu siły oddziaływania ramienia na zespół głowicy i jej łożyska powietrzne, ujemne deformacje kątowe powstają przez wygrzewanie materiału wiązką laserową [20].

Inne podejście wymaga zastosowania specjalnie skonstruowanych tzw. aktuatorów z przetłoczeniem. Dodatnie lub ujemne kąty zgięcia takiego aktuatora mogą być uzyskiwane poprzez wybór obszaru materiału, w którym jest wywoływane termiczne spęczenie – powyżej lub poniżej osi obojętnej przekroju poprzecznego elementu.

Bez wykorzystania wstępnego naprężenia ujemne kąty gięcia można otrzymać po obróbce femtosekundowymi impulsami laserowymi [7, 9]. Ta metoda wymaga jednak stosunkowo długiego czasu obróbki, ponieważ deformacja powstaje w wyniku skanowania przedmiotu obrabianego wiązką laserową i akumulacji efektów wielu impulsów. Jeśli nie jest stosowana dodatkowa warstwa ablacyjna, nie da się uniknąć pewnego ubytku materiału. Degradacja warstwy, w której zachodzą absorpcja promieniowania i ablacja laserowa, ma niekorzystny wpływ na efektywność procesu [12].

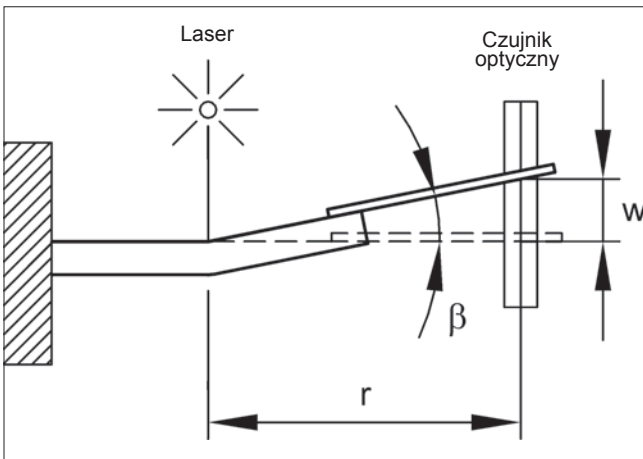
Autorzy pracy [9] badali możliwości zwiększenia efektywności gięcia z ujemnym kątem końcowym dzięki zastosowaniu zewnętrznego sprężystego napięcia wstępnego materiału oraz impulsów o długości 80 fs. Z kolei w [6] opisano eksperymenty gięcia laserowego folii ze stali nierdzewnej, wstępnie napiętej w zakresie sprężystym, przed ogrzewaniem ruchomą wiązką laserową. Jednak takie wprowadzanie zewnętrznych obciążeń mechanicznych wymaga dodatkowego oprzyrządowania i trudno zaliczyć to podejście do metod bezdotykowych. Brak mechanicznego kontaktu z przedmiotem obrabianym uznawany jest za fundamentalną zaletę kształtowania laserowego od samego pojawienia się jego koncepcji.

Niniejszy artykuł przedstawia doświadczalne i numeryczne badania mechanizmu termicznego mikrogięcia, który umożliwia uzyskiwanie deformacji w dwóch kierunkach – do lub od wiązki laserowej użytej jako źródło ciepła. W badaniach eksperymentalnych zaobserwowano wpływ mocy wiązki na kierunek gięcia małej belki wysięgnikowej wykonanej ze stali nierdzewnej, ogrzewanej nieruchomą wiązką lasera Nd:YAG. Opracowano trójwymiarowy model numeryczny na potrzeby obliczeń metodą elementów skończonych i rozpoznania nieznanego mechanizmu

deformacji. Po weryfikacji doświadczalnej model ten pozwolił na przeprowadzenie analizy pól temperatury, odkształcenia i naprężenia belki wysięgnikowej w rozpatrywanych cyklach termicznych.

Badania doświadczalne

Próbki o wymiarach $50 \times 4,05 \times 0,55$ mm, wykonane ze stali nierdzewnej typu 18-8, zamocowane w układzie wysięgnikowym, były ogrzewane nieruchomą wiązką lasera Nd:YAG (rys. 1). Przed eksperymentami gięcia laserowego były one wygrzewane w temperaturze 400°C przez pół godziny, aby zmniejszyć początkowe naprężenia własne i wytworzyć na powierzchni materiału warstwę tlenkową, zwiększającą pochłanianie energii promieniowania laserowego.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego do badań nad mikrogięciem laserowym. Określenie dodatniej deformacji kątowej $\beta > 0$

Wiązka laserowa była rozogniskowana w celu otrzymania plamki o średnicy 3,6 mm na powierzchni materiału. Plamka położona była centralnie, na osi symetrii próbki. Laser działał w trybie ciągłym (CW). Temperatura próbek była sprawdzana czujnikiem dotykowym przed każdym nagrzewaniem, aby zachować stałą początkową temperaturę materiału (temperaturę pokojową) przed każdym eksperymentem. Nominalna długość czasu nagrzewania wynosiła 1,05 s w serii doświadczeń z różnymi poziomami mocy wiązki w zakresie 21–72 W. Wahania mocy można oszacować na $\pm 5\%$ wartości nominalnej. Dokładność realizacji zadanego czasu nagrzewania wynosiła ok. $\pm 0,05$ s.

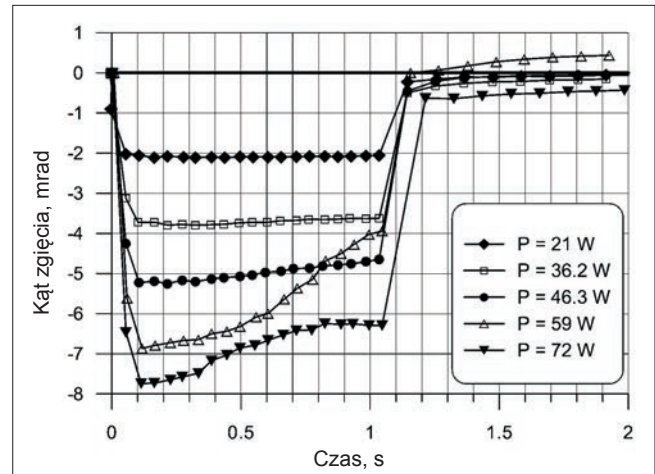
Bezdotykowe pomiary deformacji były wykonywane wysokiej klasy mikrometrem laserowym (Keyence). Urządzenie to może mierzyć pozycję i wielkość obiektu na podstawie jego cienia w polu pomiarowym. Aby zapewnić wysoką dokładność pomiarów optycznych, na próbce był mocowany dodatkowy element o dobrej jakości powierzchni i małej wadze (rurka igły strzykawki). Jego przemieszczenie było mierzone i rejestrowane podczas nagrzewania laserowego i po wystygnięciu próbki do temperatury początkowej.

Kąt gięcia β był obliczany na podstawie liniowego przemieszczenia w mierzonego mikrometrem. Zastosowano wzór:

$$\beta = \arctg(w/r) \quad (1)$$

gdzie r jest odległością środka plamki od płaszczyzny pomiaru przemieszczenia ($r = 48,8$ mm).

Dokładność zastosowanego mikrometru laserowego zależy od liczby uśrednianych pomiarów elementarnych, które są wykonywane z częstotliwością 400 Hz. Relatywnie szybkozmienne deformacja w fazie nagrzewania była rejestrowana z uśrednianiem 16 pomiarów. W celu uzyskania maksymalnej dokładności końcowej deformacji kątowej (po wystygnięciu próbki do temperatury początkowej) liczba uśrednianych pomiarów była pod koniec fazy stygnięcia przełączana na wartość 1024. Przykłady przebiegów czasowych kąta zgięcia dla poziomów mocy wiązki laserowej 21; 36,2; 46,3; 59 oraz 72 W pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Zmiany kąta deformacji kątowej w eksperymentach z różnymi wartościami mocy P wiązki laserowej i przy stałej długości impulsu $t_h = 1,05$ s

Podczas działania wiązki występuje ujemna deformacja kątowa belki, gdyż dominującą rolę ma wówczas gradient temperatury na grubości materiału. Amplituda i nachylenie przedstawionych charakterystyk silnie zależą na tym etapie od mocy wiązki. Przebiegi czasowe kąta zgięcia, zaprezentowane na rys. 2, odzwierciedlają rozwój i udziały składników deformacji: termosprężystego i termoplastycznego.

Przy charakteryzowaniu mechanizmów deformacji kształtowania termicznego stosuje się dwa parametry: liczbę podobieństwa Fouriera Fo oraz iloraz charakterystycznego wymiaru obszaru nagrzewania i grubości materiału. Liczba Fouriera jest bezwymiarowym czasem, który pozwala wyrazić równanie przewodnictwa ciepła w postaci bezwymiarowej. Można ją przedstawić jako:

$$Fo = t_h/t_d \quad (2)$$

gdzie: t_h – czas doprowadzania ciepła do materiału, a t_d – charakterystyczny czas dyfuzji ciepła.

W przypadku impulsowego nagrzewania źródłem nieruchomym względem materiału czas t_h jest po prostu długością impulsu.

Czas charakterystyczny t_d dyfuzji ciepła można przyjąć na podstawie rozwiązania jednowymiarowego zagadnienia przewodzenia ciepła w ciele półnieskończonym, poddanym działaniu stałego strumienia ciepła na brzegu. Wynikowy wzór:

$$t_d = h^2/\kappa \quad (3)$$

gdzie κ jest współczynnikiem wyrównywania temperatury materiału, odpowiada przyrostowi temperatury ciała

w odległości h od brzegu do wartości ok. 35% przyrostu na jego powierzchni.

Przyjmując odległość h równą grubości próbki, otrzymujemy znany wzór:

$$Fo = \kappa t_h / h^2 \quad (4)$$

Stosując $\kappa = 5,5 \text{ mm}^2/\text{s}$ dla stali nierdzewnej w średniej temperaturze cyklu 500°C , dostajemy $Fo = 19$ przy długości impulsu $t_h = 1,05 \text{ s}$. Ta wartość nie spełnia przytaczanego w literaturze warunku małej liczby Fouriera dla mechanizmu gradientowego w procesie gięcia laserowego z ruchomą wiązką.

W pracy [22] analitycznie wyznaczono wartość liczby Fouriera 0,837 optymalną ze względu na maksymalizację kąta zgięcia przy stosowaniu mechanizmu gradientowego. Jeśli w rozpatrywanym przypadku mikrogięcia belki wysięgnikowej wyznaczyć iloraz średnicy plamki i grubości materiału, to otrzyma się wartość 6,5, odpowiadającą obszarowi przejściowemu pomiędzy TGM a BM w procesach gięcia z ruchomym źródłem ciepła.

Przytoczone parametry nie pozwalają jednoznacznie zakwalifikować badanego mechanizmu deformacji w ramach podziału stosowanego w literaturze przedmiotu. Z tego powodu zostały wykonane symulacje numeryczne, które pozwoliły przeanalizować mechanizm obserwowanych deformacji.

Symulacje numeryczne

Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem systemu ABAQUS, metodą elementów skończonych. Pominięto wpływ naprężenia i odkształcenia materiału na jego temperaturę, ponieważ ciepło generowane z powodu deformacji materiału jest pomijalnie małe w porównaniu z ciepłem doprowadzanym przez wiązkę laserową. Podobnie dla rozpatrywanej stali austenitycznej typu 18-8 pominięto efekty termiczne jakichkolwiek przemian mikrostruktury. Stąd możliwe było przeprowadzenie sekwencyjnie sprzężonej analizy termomechanicznej w dwóch etapach: wyznaczenie pola temperatury dla zadanego obciążenia cieplnego, warunków brzegowych i początkowych, a następnie przeprowadzenie sprężysto-plastycznej analizy przyrostowej naprężenia i odkształcenia dla tak znalezionej pola temperatury.

Rozkład mocy na przekroju poprzecznym zastosowanej wiązki laserowej wykazywał charakter wielomodowy i został przybliżony modelem rozkładu o stałej wartości na plamce laserowej. W eksperymentach promieniowanie laserowe o długości fali $1,06 \mu\text{m}$ padało na powierzchnię stali nierdzewnej pokrytej warstwą tlenkową wytworzoną podczas wygrzewania materiału. W uproszczonym modelu numerycznym tego procesu przyjęto stałą wartość 0,77 współczynnika absorpcji promieniowania i emisyjności powierzchni. Doprowadzanie energii przez wiązkę laserową zostało zamodelowane jako działanie powierzchniowego źródła ciepła, ponieważ pochłanianie promieniowania podczerwonego przez metale przeważnie zachodzi w warstwie o grubości zaledwie kilkudziesięciu nanometrów.

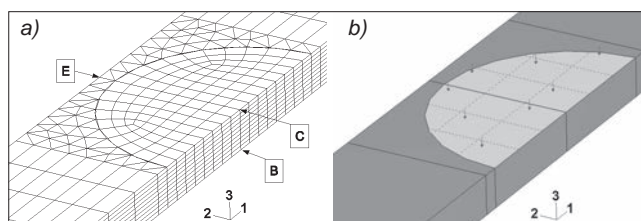
Użyte zostały trójwymiarowe elementy skończone o liczbie węzłów 6 oraz 8: elementy DC3D6 i DC3D8 w zagadnieniu termicznym oraz odpowiadające im elementy C3D6 i C3D8 w zagadnieniu mechanicznym. Przyjęto 10 warstw elementów na grubości materiału, aby dobrze zamodelować występujące gradienty temperatury i efekt zginania.

Wykorzystano symetrię obiektu, jego obciążenia i podparcia, i zamodelowano połowę próbki (rys. 3). Symetria zagadnienia termicznego została uwzględniona poprzez przyjęcie płaszczyzny symetrii jako adiabaticznej, podczas gdy na wszystkich pozostałych powierzchniach modelu uwzględniono wymianę ciepła z otoczeniem na drodze konwekcji i promieniowania. Warunki symetrii zagadnienia mechanicznego zostały zamodelowane przez narzucenie zerowych przemieszczeń pozapłaszczyznowych dla węzłów położonych na płaszczyźnie symetrii próbki.

Ruch modelu jako bryły sztywnej został wykluczony dzięki nałożeniu dwóch warunków:

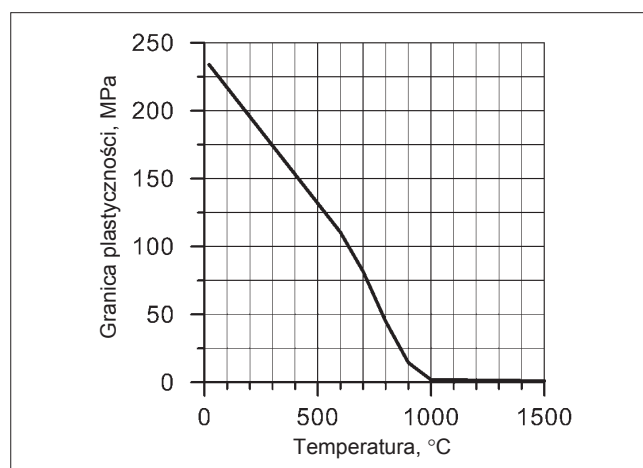
- sztywne przesunięcie modelu zostało wyeliminowane przez pełne unieruchomienie jednego węzła usytuowanego na utwierdzonym końcu belki,
- sztywnym obrotom zapobiegało zadanie zerowych przemieszczeń pozapłaszczyznowych dla dwóch innych węzłów leżących w płaszczyźnie utwierdzenia.

Model numeryczny składał się z 4380 elementów skończonych i 4895 węzłów.



Rys. 3. Model numeryczny: a) siatka elementów skończonych w regionie plamki laserowej, b) plamka laserowa

Uwzględniony został wpływ temperatury materiału na: współczynnik przewodzenia ciepła, ciepło właściwe, współczynnik rozszerzalności termicznej, moduł Younga, granicę plastyczności i gęstość. Dyssypacja ciepła na drodze konwekcji została opisana prawem Newtona; przyjęto współczynnik konwekcji o wartości $1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ dla danych warunków laboratoryjnych. Wyniki wstępnych symulacji i analiza ich wrażliwości wykazały, że wartości emisyjności powierzchni oraz współczynnika konwekcji mają drugorzędny wpływ na wyniki. Z tego powodu pominięto ich zależność od temperatury powierzchni materiału. Natomiast efekty numerycznego modelowania mikrodeformacji plastycznych wywoływanych laserowo w sposób zasadniczy zależą od przyjęcia odpowiedniej charakterystyki temperaturowej granicy plastyczności. Duża wrażliwość wyników symulacji na tę charakterystykę w zakresie



Rys. 4. Przyjęta w symulacjach numerycznych zależność granicy plastyczności stali nierdzewnej typu 18-8 od temperatury

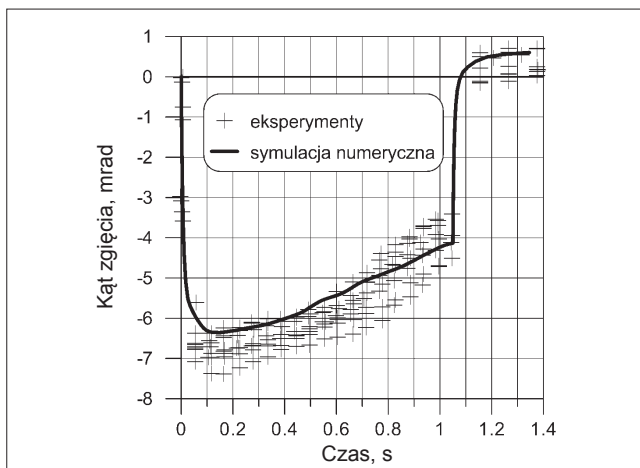
wysokiej temperatury została wykazana w modelowaniu zachowania aktuatora dwumostkowego, z wykorzystaniem koncepcji temperatury krytycznej [3]. Aby zapewnić wysoką dokładność modelowania, zastosowano w niniejszej pracy charakterystykę stali nierdzewnej typu 18-8 zaadaptowaną z pracy [23], przyjęto umowne odkształcenie trwałe 0,2% oraz wartość granicy plastyczności w temperaturze 20°C równą 234 MPa (rys. 4).

Użyto modelu materiału izotropowego, sprężysto-doskonale-plastycznego, bez efektu Bauschingera i wpływu prędkości odkształcenia. Umocnienie materiału zostało pominięte, ponieważ w rozpatrywanym procesie deformacja plastyczna pojawia się w zakresie podwyższonej temperatury, gdzie efekty umocnienia są znacząco redukowane przez procesy dynamicznego zdrowienia. Przyjęto warunek wyężeniowy Hubera–Misesa–Hencky'ego.

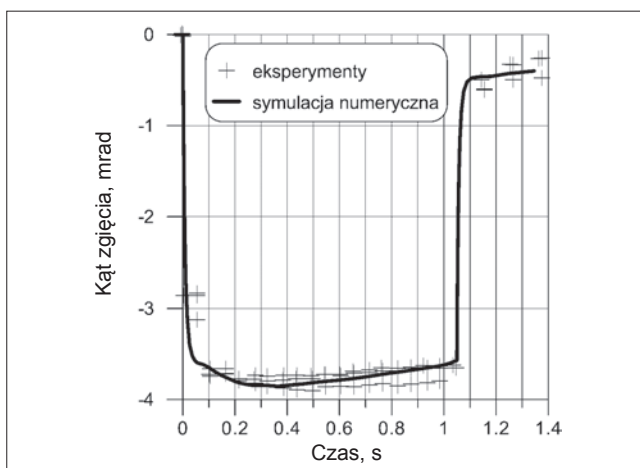
Wyniki

Na rys. 5 i 6 zaprezentowano wyniki pomiarów i obliczeń numerycznych kąta zgięcia podczas laserowego nagrzewania i wkrótce po nim, dla wiązki laserowej o mocy 36,2 W oraz 59 W.

Przedstawiono deformacje kątowe zmierzone w trakcie szeregu eksperymentów, aby zilustrować rozrzut danych z powodu fluktuacji mocy lasera, zmienności warunków absorpcji promieniowania laserowego, początkowego stanu materiału i innych czynników, które ograniczają powtarzalność warunków doświadczalnych.



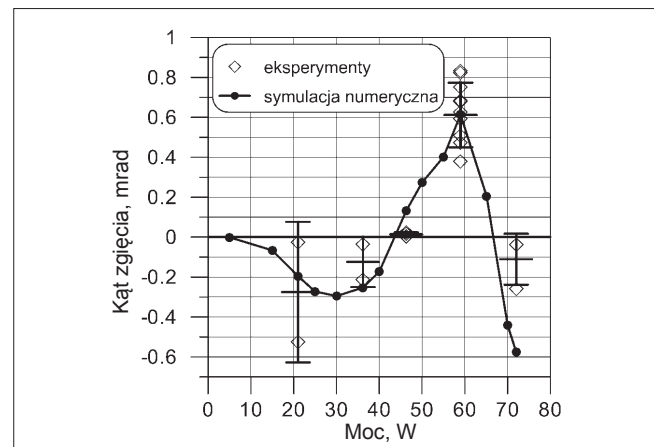
Rys. 5. Przebiegi czasowe kąta zgięcia w eksperymentach i symulacjach numerycznych przy mocy wiązki laserowej 36,2 W



Rys. 6. Przebiegi czasowe kąta zgięcia w eksperymentach i symulacjach numerycznych przy mocy wiązki laserowej 59 W

Zależność końcowej wartości kąta zgięcia od mocy wiązki laserowej pokazano na rys. 7. Pewna rozbieżność wyników numerycznych i doświadczalnych, widoczna dla najwyższego poziomu mocy 72 W, może być przypisana niskiej dokładności wartości granicy plastyczności materiału w temperaturze powyżej 1000°C. Ze względu na ograniczoną dokładność danych materiałowych i pomiarowych otrzymane wyniki symulacji (rys. 5–7) zostały uznane za zadowalającą weryfikację modelu obliczeniowego.

Wyniki pokazane na rys. 7 ujawniają nowy efekt w mikrogięciu laserowym. W zależności od zastosowanej mocy wiązki laserowej przy ustalonej długości impulsu można uzyskiwać dodatnie lub ujemne deformacje kątowe. Mechanizm tej deformacji zostanie przeanalizowany na dwóch przykładach:

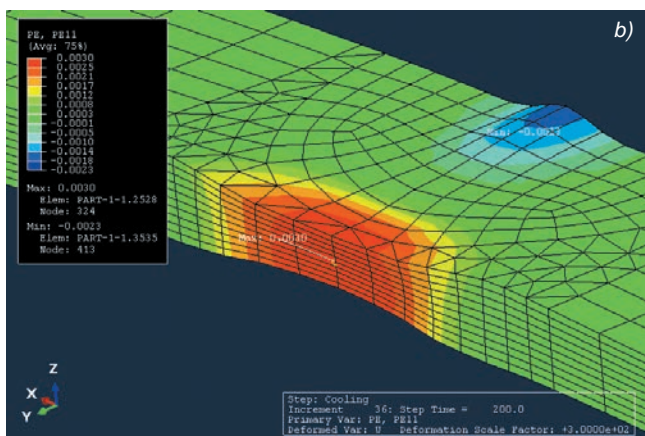
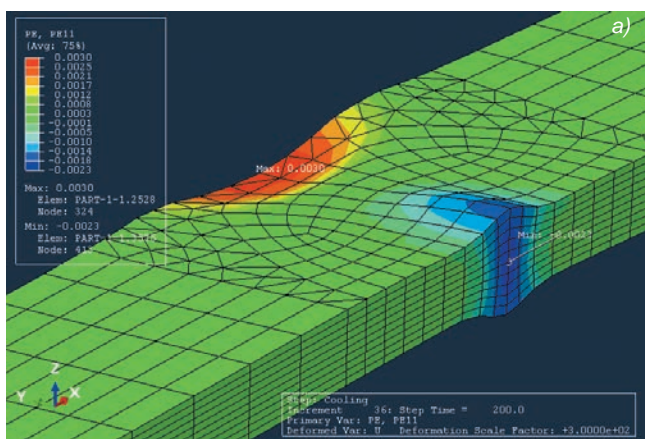


Rys. 7. Zależność końcowej wartości kąta zgięcia od mocy wiązki laserowej. Słupki błędów reprezentują odchylenie standardowe wyników eksperymentalnych

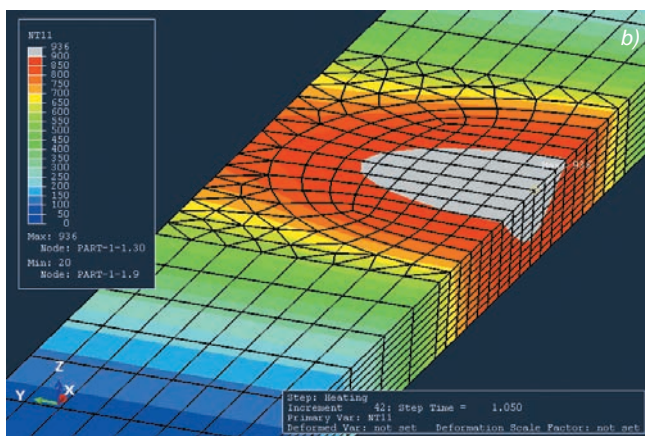
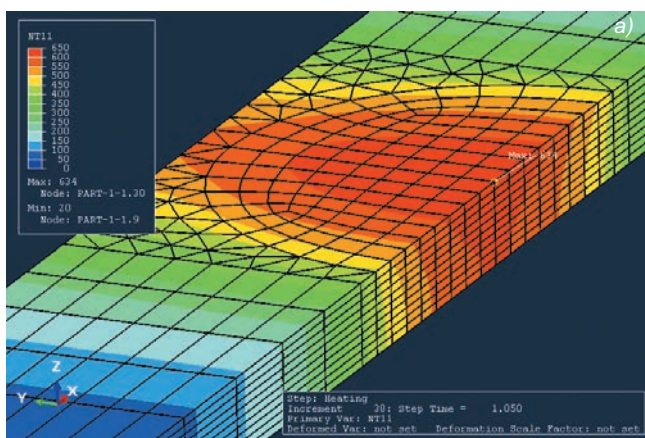
- ujemnej końcowej deformacji kątowej dla wiązki o mocy 36,2 W,
- dodatniej końcowej deformacji kątowej dla wiązki o mocy 59 W.

Na początek warto rozważyć końcowy rozkład składowej wzdłużnej odkształcenia plastycznego PE11 (oznaczenie osi według układu odniesienia pokazanego na rys. 3) w połowie modelowanej próbki, gdy wiązka laserowa ma moc 36,2 W (rys. 8a i b). W obszarze środkowym, pod plamką laserową, składowa wzdłużna odkształcenia plastycznego przyjmuje wartość ujemną (wartość minimalna $-0,0023$). Związany z tym przyrost grubości materiału został pokazany na rys. 8a i b, przy współczynniku powiększenia deformacji wynoszącym 300. To termicznie wywołane lokalne spęczenie materiału wynika z ograniczenia swobody termicznego rozszerzania się obszaru środkowego belki w fazie nagrzewania przez jego chłodniejsze otoczenie. Wzdłużne naprężenie ściskające w obszarze środkowym jest równoważone przez wzdłużne naprężenie rozciągające w okolicach brzegów belki. Stąd przy odpowiednich warunkach naprężenia i temperatury może się pojawić plastyczne wydłużenie w obszarze brzegowym, wraz z towarzyszącym mu zmniejszeniem się grubości materiału. Rozkład odkształcenia plastycznego dla przypadku dodatniej końcowej deformacji plastycznej (moc 59 W) jest zbliżony do rozkładu pokazanego na rys. 8a i b.

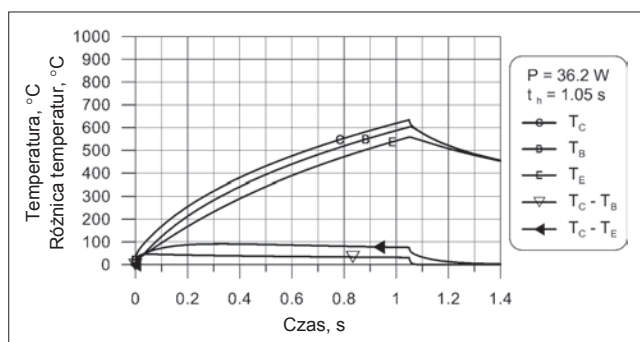
Na rys. 9a i b zaprezentowano rozkłady temperatury w chwili końcowej impulsu laserowego w obu rozważanych przypadkach – ujemnej i dodatniej końcowej deformacji kątowej. Najwyższa temperatura materiału w przypadku mocy 36,2 W wynosi 634°C, a dla mocy 59 W jest to 936°C.



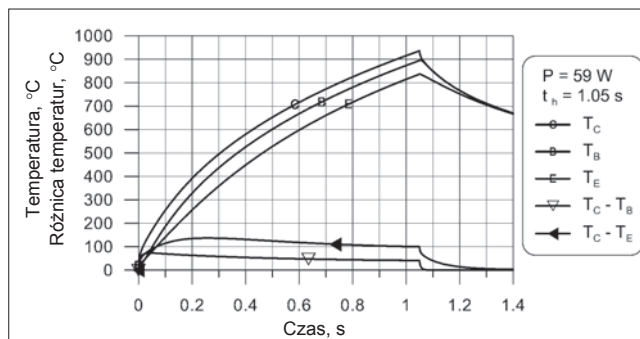
Rys. 8. Końcowy rozkład wzdłużnej składowej plastycznej odkształcenia dla wiązki laserowej o mocy 36,2 W: a) widok obszaru centralnego, b) widok obszaru brzegowego. Współczynnik powiększenia deformacji wynosi 300



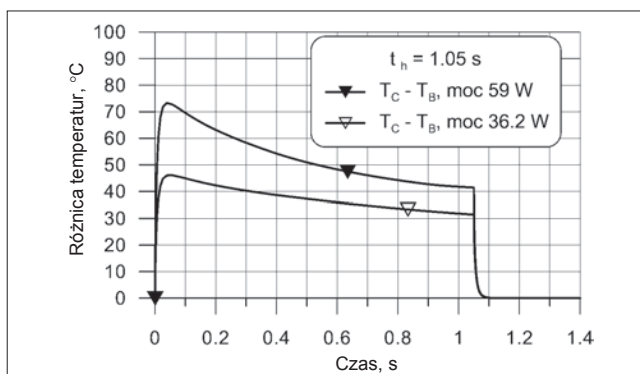
Rys. 9. Rozkład temperatury w chwili końcowej impulsu laserowego: a) moc wiązki 36,2 W, b) moc wiązki 59 W



Rys. 10. Porównanie przebiegów czasowych temperatury na środku plamki laserowej i na brzegu próbki – w przypadku ujemnej końcowej deformacji kątowej (moc wiązki 36,2 W)



Rys. 11. Porównanie przebiegów czasowych temperatury na środku plamki laserowej i na brzegu próbki – w przypadku dodatniej końcowej deformacji kątowej (moc wiązki 59 W)



Rys. 12. Porównanie różnic temperatury na grubości materiału

Ewolucja pola temperatury została zilustrowana na rys. 10 i 11. Wykresy pokazują przebiegi czasowe temperatury materiału w środkowym punkcie C na powierzchni górnej próbki (T_C), w środkowym punkcie B na powierzchni dolnej (T_B) oraz w punkcie brzegowym E na powierzchni górnej (T_E). Punkty te są zaznaczone na rys. 3a. Różnice temperatury pomiędzy punktami C i B ($T_C - T_B$) oraz pomiędzy punktami C i E ($T_C - T_E$) zostały także przedstawione na rys. 10 i 11. W obu przypadkach różnica temperatury na szerokości próbki jest ok. dwukrotnie większa od różnicy na grubości materiału, a więc mamy do czynienia ze znaczącym gradientem temperatury na szerokości próbki.

Iloraz średnicy plamki i szerokości belki wynosił 0,89 w prezentowanych eksperymentach i symulacjach. Jest to wartość blisko dwukrotnie większa od maksymalnej wartości przyjętej przez autorów [16], którzy rejestrowali tylko dodatnie kąty zgięcia. Relatywnie duży udział pod względem rozmiarów obszaru położonego pod plamką laserową do chłodniejszych obszarów brzegowych, a także występowanie znaczącej różnicy temperatury

między centrum a brzegiem próbki ($T_C - T_E$) sprzyjają pojawianiu się dodatniego odkształcenia plastycznego wzdłużnego w obszarach brzegowych.

Różnica temperatury na grubości próbki ($T_C - T_B$) jest większa w przypadku dodatniego końcowego kąta zgięcia (rys. 12). Wskazuje to na udział mechanizmu gradientowego w obserwowanej deformacji.

Podsumowanie

Przedstawione badania doświadczalne i symulacje numeryczne ujawniły nowy mechanizm laserowo wywołanego mikrogięcia. Stwierdzono, że końcowa deformacja kątowa belki wysięgnikowej nagrzewanej tylko z jednej strony przez nieruchomą wiązkę laserową może być dodatnia lub ujemna, w zależności od zastosowanej mocy, przy ustalonej długości impulsu. Końcowy kąt zgięcia wynika z rozkładu odkształcenia plastycznego wytworzonego w cyklu nagrzewania i stygnięcia. W zestawieniu z innymi mechanizmami kształtowania termicznego wyróżniającą cechą końcowego stanu pola odkształcenia plastycznego jest tu obecność obszarów, w których występuje znaczące rozciągnięcie materiału. Końcowa deformacja belki jest wynikiem występowania ujemnego odkształcenia plastycznego w obszarze środkowym oraz dodatniego w pobliżu brzegów, z pewnym udziałem deformacji pozapłaszczyznowej z powodu gradientu temperatury na grubości materiału. Zależność końcowego kąta zgięcia od mocy wiązki laserowej (rys. 7) wskazuje na możliwość sterowania zarówno wielkością, jak i kierunkiem bezdotykowego mikrogięcia.

Ujawniony mechanizm rozszerza możliwości technologii laserowego mikropozycjonowania. Mikrogięcie z ujemnym kątem końcowym może znaleźć liczne zastosowania przy wytwarzaniu układów MEMS i MOEMS, ponieważ wymogi integracji i miniaturyzacji zazwyczaj ograniczają dostęp do tych urządzeń do tylko jednej strony.

* * *

Obliczenia zostały wykonane przy wsparciu Interdyscyplinarnego Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego (ICM) Uniwersytetu Warszawskiego w ramach grantu obliczeniowego nr G63-5.

LITERATURA

- Sanada T., Watanabe H., Ushimaru A., Nomura M. "Development of high-speed and high-accuracy roll and pitch angle adjustment machine for HDD suspension". *J. Laser Micro Nanoeng.* Vol. 4, No. 2 (2009): pp. 141–143.
- Widłaszewski J. "Applications of laser forming in micro technologies". Adamczak S., Radziszewski L. (red.) *Selected problems of modeling and control in mechanics*. M19. Kielce: Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2011, s. 96–106.
- Widłaszewski J. "Numerical modeling of the thermal upsetting mechanism in a two-bridge actuator". Geiger M., Otto A., Schmidt M. (red.) *Proceedings of the LANE 2007 (Laser Assisted Net Shape Engineering 5, International Conference)*. Bamberg: Meisenbach-Verlag, 2007, pp. 631–644.
- Widłaszewski J. "The effects of design parameters on the laser-induced in-plane deformation of two-bridge actuators". *Int J Machine Tools and Manufacture*. Vol. 80–81C (2014): pp. 30–38.
- Folkersma K.G.P. "Laser forming for sub-micron adjustment: with application to optical fiber assembly". University of Twente, 2015: <http://dx.doi.org/10.3990/1.9789036540186> (dostęp: 24.03.2016).
- Liu J., Sun S., Guan Y., Ji Z. "Experimental study on negative laser bending process of steel foils". *Optics and Lasers in Engineering*. Vol. 48 (2010): pp. 3–88.
- Bechtold P., Schmidt M. "Non-thermal micro adjustment using ultra-short laser pulses". *JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering*. Vol. 2, No. 3 (2007): pp. 183–188.
- Griffiths J., Edwardson S.P., Dearden G., Watkins K.G. "Thermal laser micro-adjustment using picosecond pulse durations". *Applied Surface Science*. Vol. 258 (2012): pp. 7639–7643.
- Sagisaka Y., Kamiya M., Matsuda M., Ohta Y. "Thin-sheet-metal bending by laser peen forming with femtosecond laser". *J Materials Processing Technology*. Vol. 210, No. 15 (2010): pp. 2304–2309.
- Ye Y., Feng Y., Lian Z., Hua Y. "Mold-free fs laser shock micro forming and its plastic deformation mechanism". *Optics and Lasers in Engineering*. Vol. 67 (2015): pp. 74–82.
- Sagisaka Y., Yamashita K., Yanagihara W., Ueta H. "Microparts processing using laser cutting and ultra-short-pulse laser peen forming". *J Materials Processing Technology*. Vol. 219 (2015): pp. 230–236.
- Edwards R., Edwardson S.P., Carey C., Dearden G., Watkins K.G., "Laser micropeen forming without a tamping layer". *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* Vol. 47 (2010): pp. 191–200.
- Widłaszewski J. "Precise laser bending". Geiger M., Vollertsen F. (red.) *Proceedings of the LANE '97 (Laser Assisted Net Shape Engineering 2, International Conference)*. Meisenbach Bamberg, 1997: pp. 393–398.
- Chen G., Xu X., Poon C.C., Tam A.C. "Experimental and numerical studies on microscale bending of stainless steel with pulsed laser". *J. Appl. Mech.* Vol. 66, No. 3 (1999): pp. 772–779, DOI:10.1115/1.2791741
- Wang X.F., Chen G.N., Hu Sh.G., Takacs J., Krallics Gy, Su Y.P. "Research on dynamic micro-deformation under laser point source". *Int J Machine Tools and Manufacture*. Vol. 45, No. 12–13 (2005): pp. 1515–1522.
- Hsieh H.-S., Lin J. "Thermal-mechanical analysis on the transient deformation during pulsed laser forming". *Int J of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 44 (2004): pp. 191–199.
- Zhang X.R., Xu X. "Finite element analysis of pulsed laser bending: The effect of melting and solidification". *Trans ASME, J Applied Mechanics*. Vol. 71 (2004): pp. 321–326.
- Zhang X.R., Xu X. "High precision microscale bending by pulsed and CW lasers". *ASME J Manuf Sci Eng*. Vol. 125, No. 3 (2003): pp. 512–518, DOI: 10.1115/1.1580528.
- Zhang X.R., Xu X. "Laser bending for high-precision curvature adjustment of microcantilevers". *Appl. Phys. Lett.* Vol. 86 (2005) 021114.
- Jurgenson R., Danielson R.C., Lien B.D., Lewandowski M.S. "In-stack adjustable magnetic head suspension". United States Patent US5995335 (1999).
- Hu Y., Xu X., Yao Z., Hu J. "Laser peen forming induced two way bending of thin sheet metals and its mechanisms". *J. Appl. Phys.* Vol. 108 (2010) 073117.
- Mucha Z., Widłaszewski J., Cabaj M., Gradoń R. "Surface temperature control in laser forming". *Archives of Thermodynamics*. Vol. 24, No. 2 (2003): pp. 89–105.
- Chen J., Young B. "Stress-strain curves for stainless steel at elevated temperatures". *Engineering Structures*. Vol. 28 (2006): pp. 229–239. ■