



## **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](mailto:wydawnictwo@zut.edu.pl)

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

e-mail: [zarzad@zapol.com.pl](mailto:zarzad@zapol.com.pl)



## 9th SYMPOSIUM ON LASER TECHNOLOGY 9. SYMPOZJUM TECHNIKI LASEROWEJ

### **Badanie wpływu początkowej temperatury materiału na proces gięcia laserowego**

**Zygmunt Mucha<sup>1</sup>, Jacek Widłaszewski<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Centrum Laserowych Technologii Metali, Politechnika Świętokrzyska i PAN, Kielce

<sup>2</sup> Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

#### **Abstract**

Studies on touchless bending of metal plates by use of a laser beam are presented. Laser beam is modeled as a heat source of finite dimensions, which moves over the plate surface. The analytical approximation of Ashby and Easterling of the temperature field is adopted. Continuous temperature distribution in the material yield region is considered. The bend angle is investigated as a function of processing parameters, material parameters and the initial material temperature. The derived solution for the angle of thermal bending is used to analyze the dependence of the bend angle on the initial material temperature. Theoretical results are compared with experimental values. Existence of the optimal value of the initial temperature with respect to the bend angle maximum has been found.

#### **Wstęp**

Kształtowaniem termicznym nazywamy procesy prowadzące do celowej zmiany kształtu przedmiotu z wykorzystaniem zjawiska rozszerzalności termicznej. Poprzez lokalne ogrzewanie materiału wykazującego rozszerzalność termiczną i zdolnego do deformacji plastycznej można w sposób bezdotykowy realizować proces obróbki plastycznej, bez użycia sił zewnętrznych. Precyzyjnym i łatwym do sterowania nośnikiem ciepła dla procesów kształtowania termicznego jest wiązka laserowa, skąd wywodzi się nazwa kształtowanie laserowe. W przypadku deformacji giętej, która zachodzi w jednej płaszczyźnie, stosuje się termin gięcie laserowe. W literaturze przedmiotu znane są dwa mechanizmy laserowego gięcia (mechanizm gradientowy i mechanizm wyboczeniowy) oraz jeden mechanizm termicznego spęczania blach i płyt [1].

Wpływ początkowej temperatury materiału na otrzymywane kąty zgięcia zauważyli Klocke, Demmer i Dietz [2]. Prowadząc eksperymenty laserowego gięcia stali St12 z użyciem wiązki lasera Nd:YAG stwierdzili znaczny wzrost kąta zgięcia przy zwiększaniu temperatury początkowej w zakresie 20-175°C w przypadku działania mechanizmu wyboczeniowego. Dla parametrów obróbki, przy których działa

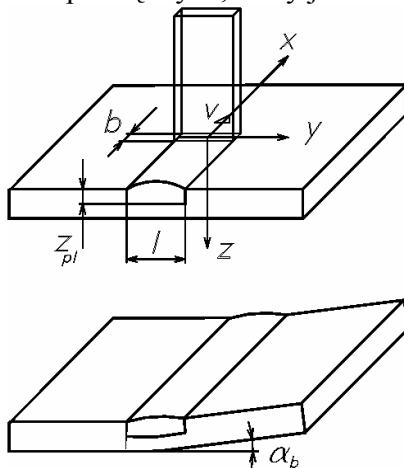
mechanizm gradientowy, ich wyniki doświadczalne pokazują wyraźny przyrost kąta zgięcia przy zwiększaniu temperatury początkowej w zakresie 20-100°C i nieznaczną zależność kąta zgięcia od temperatury początkowej w zakresie 100-150°C.

Yau, Chan i Lee [3] badali zależność kąta zgięcia od liczby przejść wiązki laserowej dla różnych czasów pauzy pomiędzy przejściami. Stwierdzili, że wraz ze zwiększaniem czasu pauzy, otrzymuje się mniejsze kąty zgięcia. Efekt ten został wytłumaczony spadkiem temperatury materiału podczas fazy chłodzenia, a w konsekwencji zmniejszeniem maksymalnej temperatury osiąganey w kolejnych nagrzewaniach.

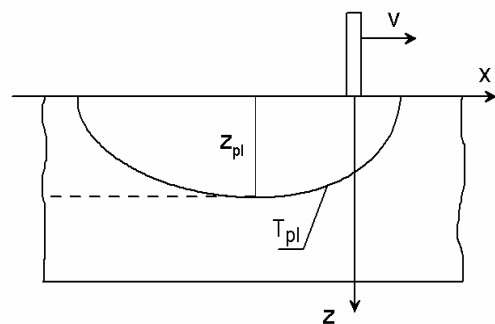
W niniejszej pracy podjęto próbę analitycznego opisanie wpływu temperatury początkowej na proces gięcia laserowego i przedstawiono metodykę oraz wyniki badań eksperymentalnych potwierdzających wyniki teoretyczne.

### Model analityczny termicznego gięcia płyt

Przedmiotem analizy jest bezdotykowe gięcie blach z wykorzystaniem mechanizmu gradientu temperatury. Podczas tego procesu wiązka laserowa o przekroju prostokątnym o wymiarach  $b \times l$  porusza się względem materiału z prędkością  $v$  w kierunku osi  $x$  układu współrzędnych, który jest związany z wiązką (rys. 1).



Rys. 1. Gięcie laserowe z użyciem wiązki o przekroju prostokątnym: faza nagrzewania i kształt końcowy.



Rys. 2. Izoterma temperatury krytycznej  $T_{pl}$ .

Pod wpływem lokalnego nagrzewania wiązką laserową, zjawiska rozszerzalności termicznej i ograniczenia swobody deformacji termicznej z powodu oporu stawianego przez otoczenie obszaru ogrzanego, pojawia się naprężenie termiczne. Wraz ze wzrostem temperatury generalnie występuje spadek naprężenia uplastyczniającego metali i ich stopów. Przy dostatecznie wysokim poziomie wywołwanego naprężenia termicznego powstaje odkształcenie plastyczne.

W analitycznym modelowaniu zagadnień termoplastycznych wykorzystuje się często pojęcie temperatury krytycznej  $T_{pl}$ , jako temperatury, przy której materiał traci własności sprężyste. Pojawienie się odkształcenia plastycznego zależy zarówno od składowych naprężenia, jak i od temperatury materiału. Stąd używane w obliczeniach

wartości temperatury krytycznej przyjmowane są z pewną dowolnością ze względu na rodzaj materiału i specyficzne warunki ograniczenia swobody deformacji termicznej.

Do charakteryzowania warunków termicznych w procesie gięcia laserowego można wykorzystać liczbę Fouriera zdefiniowaną jako stosunek czasu  $\tau_h = \frac{b}{v}$  oddziaływania

wiązki laserowej na materiał do czasu  $\tau_d = \frac{\kappa}{h^2}$  ( $h$  – grubość płyty,  $\kappa = \lambda/(\rho c)$  – dyfuzyjność termiczna,  $\lambda$  – współczynnik przewodnictwa ciepła,  $\rho$  – gęstość,  $c$  – ciepło właściwe), który charakteryzuje prędkość dyfuzji ciepła przez grubość materiału

$$Fo = \frac{\tau_h}{\tau_d} = \frac{\kappa b}{v h^2} \quad (1)$$

Prezentowany model teoretyczny opiera się na następujących założeniach upraszczających [4], [5], [6]:

1. Pole temperatury jest quasi-stacjonarne w układzie współrzędnych związanym ze źródłem ciepła.
2. W fazie nagrzewania, wzdłuż ścieżki laserowej powstaje obszar odkształcenia plastycznego, który ma szerokość równą szerokości wiązki  $l$  (rys. 1) i głębokość  $z_{pl}$  równą maksymalnej głębokości izotermy krytycznej  $T_{pl}$  (rys. 2). Pozostała część płyty w fazie nagrzewania pozostaje sztywne.
3. Przy obliczaniu odkształcenia plastycznego termicznego spęczenia materiału uwzględnia się ciągły rozkład temperatury w obszarze deformacji plastycznej.
4. Materiał nie przechodzi w stan ciekły.
5. Kąt zgięcia jest mały, tj. spełnione są przybliżenia  $tg\alpha_b \approx \sin\alpha_b \approx \alpha_b$ .
6. Liczba Fouriera dla procesu laserowego nagrzewania spełnia warunek  $Fo = (\kappa b)/(v h^2) < 1$ .
7. Płyta jest modelowana jako belka Bernoulliego-Eulera. Obowiązuje zasada zachowania płaskich przekrojów.
8. Parametry materiałowe mają stałe wartości. Są one przyjmowane dla średniej wartości temperatury w cyklu termicznym laserowego nagrzewania i swobodnego stygnięcia. Wartość naprężenia uplastyczniającego po osiągnięciu temperatury krytycznej  $T_{pl}$  przyjmuje się zerową (tzw. schemat Prandtla [7]).

Trwała deformacja płyty jest wyznaczana metodą odkształceń wewnętrznych (ang. the inherent strain method) [8], [9]. Polega ona na obliczeniu deformacji na podstawie narzuconego pola odkształcenia plastycznego, które w rozpatrywanym przypadku gięcia laserowego wynika z termicznego spęczenia materiału w obszarze objętym izotermą krytyczną  $T_{pl}$ . Odkształcenie takie bywa nazywane wewnętrznym, ponieważ podczas termicznego spęczania, w fazie nagrzewania często wywołuje się znaczne odkształcenie plastyczne materiału bez znaczących oznak zewnętrznych (deformacji obrabianego elementu).

Odkształcenie plastyczne podczas spęczania jest obliczane na podstawie współczynnika rozszerzalności termicznej  $\alpha_{th}$  i przyrostu temperatury od temperatury początkowej  $T_0$  do temperatury maksymalnej w danym punkcie. Takie podejście wykorzystuje istotną obserwację, między innymi z analizy dystorsji spawalniczych, iż dostateczną dla

praktyki dokładność modelowania można uzyskać rozpatrując odkształcenie termiczne obliczane dla maksymalnego przyrostu temperatury w danym punkcie, zamiast analizować, na ogół złożoną, historię zmian temperatury, naprężenia i odkształcenia. Kąt zgięcia płyty zostanie wyznaczony z warunku równowagi sił wewnętrznych wystygnięciu płyty. Rozkład naprężenia w zagadnieniu sprężysto-plastycznym z narzuconym odkształceniem plastycznym termicznego spęczenia opisuje następujące równanie

$$\sigma_{yy}(z) = ER_r^C \left( \varepsilon_y^0 + (z - h_{SC})C + R_r^H \alpha_{th} \Delta T(z) H(z_{pl} - z) \right) \quad (2)$$

gdzie:  $\varepsilon_y^0$  jest składową odkształcenia reprezentującą jednorodne wydłużenie lub skrócenie płyty w kierunku osi  $y$ ;  $(z - h_{SC})C$  jest składową odkształcenia reprezentującą deformację giętą;  $h_{SC} = h/2$ ;  $C$  jest krzywizną płyty w płaszczyźnie prostopadłej do ścieżki laserowej;  $H(x)$  funkcja Heaviside'a (dla  $x \leq 0$  jest  $H(x) = 0$ , dla  $x > 0$  jest  $H(x) = 1$ );  $R_r^H$  oraz  $R_r^C$  - współczynniki sztywności utwierdzenia obszaru odkształceń plastycznych odpowiednio: w fazie nagrzewania i chłodzenia [10], [11]. Współczynniki te wyrażają stopień ograniczenia swobody rozszerzalności termicznej i mogą przyjmować wartości w zakresie od 0 (brak ograniczenia swobody deformacji) do 1 (pełne ograniczenie). Zakładamy, że:

1. W fazie nagrzewania współczynnik sztywności utwierdzenia wynosi ( $R_r^H = 1$ ), ponieważ sztywność reszty płyty zapewnia dostatecznie duży opór przeciwko naporowi materiału znajdującego się w stanie uplastycznionym przy podwyższonej temperaturze.
2. W fazie chłodzenia sztywność utwierdzenia jest mała ( $R_r^C \ll 1$ ) przy niemal jednoczesnym skurczu warstw materiału wzdłuż nagrzanej ścieżki.

Przy dostatecznie dużej prędkości  $v$  ruchu źródła ciepła, to jest dla  $\frac{vb}{2\kappa} \gg 1$ , może ono

być traktowane jako źródło liniowe o zerowym rozmiarze w kierunku ruchu ( $x$ ) i skończonej szerokości w kierunku prostopadłym ( $y$ ) [12]. Przy spełnieniu tego warunku rozkład temperatury w materiale w odległości  $z$  od powierzchni, po której porusza się wiązka z prędkością  $v$  o szerokości  $l$  (rys. 1), przy absorbowanej mocy  $AP$  (gdzie  $A$  - współczynnik absorpcji), wyraża się zależnością wyprowadzoną w pracach [4] i [13]

$$\Delta T(z) = T(z) - T_0 = \sqrt{\frac{2}{\pi e}} \frac{AP}{\nu \rho c l (z + z_0)} \quad (3)$$

gdzie  $z_0 = \sqrt{\frac{\kappa b}{2ev}}$ .

Dla  $z = 0$  otrzymamy wzór na przyrost temperatury powierzchni płyty

$$\Delta T_s = \frac{2AP}{l\lambda} \sqrt{\frac{\kappa}{\pi \nu b}} \quad (4)$$

Bezwymiarowa temperatura powierzchni  $\theta_s$  jest zdefiniowana jako temperatura powierzchni pod wiązką odniesiona do przyrostu  $\Delta T_{pl} = T_{pl} - T_0$  temperatury, przy którym materiał traci własności sprężyste, a więc

$$\theta_s = \frac{\Delta T_s}{\Delta T_{pl}} = \frac{2AP}{l\lambda(T_{pl} - T_0)} \sqrt{\frac{\kappa}{\pi vb}} \quad (5)$$

Warunki równowagi sił wewnętrznych na przekroju płyty płaszczyzną  $x-z$  zapisujemy w postaci całek:

$$\int_0^h \sigma_y(z) dz = 0; \quad \int_0^h \sigma_y(z) z dz = 0 \quad (6)$$

Powyższe równania pozwalają na znalezienie odkształcenia wzdłużnego (prostopadłego do ruchu wiązki)  $\varepsilon_y^0$  oraz krzywizny  $C$

$$\varepsilon_y^0 = -2\alpha_{th} \Delta T_{pl} Fr \theta_s \ln \theta_s \quad (7)$$

gdzie  $\Delta T_{pl} = T_{pl} - T_0$ ;  $Fr = \sqrt{\frac{2}{e}} Fo$  jest zmodyfikowaną liczbą Fouriera.

Krzywiznę  $C$  opisuje zależność

$$C = \frac{3}{h} \alpha_{th} \Delta T_{pl} Fr \theta_s \{ \ln \theta_s - Fr [\theta_s - \ln(e\theta_s)] \} \quad (8)$$

Kąt zgięcia (w radianach) można obliczyć z zależności

$$\alpha_b = Cl = 3L \alpha_{th} \Delta T_{pl} Fr \theta_s \{ \ln \theta_s - Fr [\theta_s - \ln(e\theta_s)] \} \quad (9)$$

gdzie bezwymiarowa szerokość wiązki laserowej jest zdefiniowana jako

$$L = \frac{l}{h} \quad (10)$$

Grubość warstwy uplastycznionej znajdziemy z zależności (3) przy warunku

$$\Delta T_{pl} = \Delta T(z = z_{pl}) \quad (11)$$

Z formie bezwymiarowej grubość warstwy uplastycznionej wyrażamy korzystając z równań (3), (4), (5) i (11)

$$Z_{pl} = \frac{z_{pl}}{h} = \sqrt{\frac{2Fo}{e}} (\theta_s - 1) = Fr(\theta_s - 1) \leq 1 \quad (12)$$

Widać, że otrzymane rozwiązania oraz warunek (12) zależą od trzech parametrów bezwymiarowych  $L$ ,  $\theta_s$  i  $Fo$ , które mogą być traktowane jako liczby podobieństwa zagadnienia termicznego kształtowania [14].

### Wpływ początkowej temperatury materiału na kąt zgięcia

W celu dokonania analizy zależności kąta zgięcia od temperatury początkowej materiału równanie na kąt zgięcia (9) zostanie zapisane w następującej postaci

$$\alpha_b = Cl = 6 \sqrt{\frac{2}{\pi e}} \frac{AP \alpha_{th}}{h^2 \nu \rho c} \left\{ \ln \theta_s - \sqrt{\frac{2}{e}} Fo [\theta_s - \ln(e\theta_s)] \right\} \quad (13)$$

W tym równaniu tylko bezwymiarowa temperatura powierzchni  $\theta_s$  zależy od temperatury początkowej  $T_0$  i dlatego, przy ustalonej liczbie Fouriera  $Fo$ , możemy znaleźć optymalną wartość temperatury  $\theta_s^{opt}$  powierzchni, przy której kąta zgięcia  $\alpha_b$  osiąga wartość maksymalną

$$\theta_s^{opt} = 1 + \sqrt{\frac{e}{2Fo}} \quad (14)$$

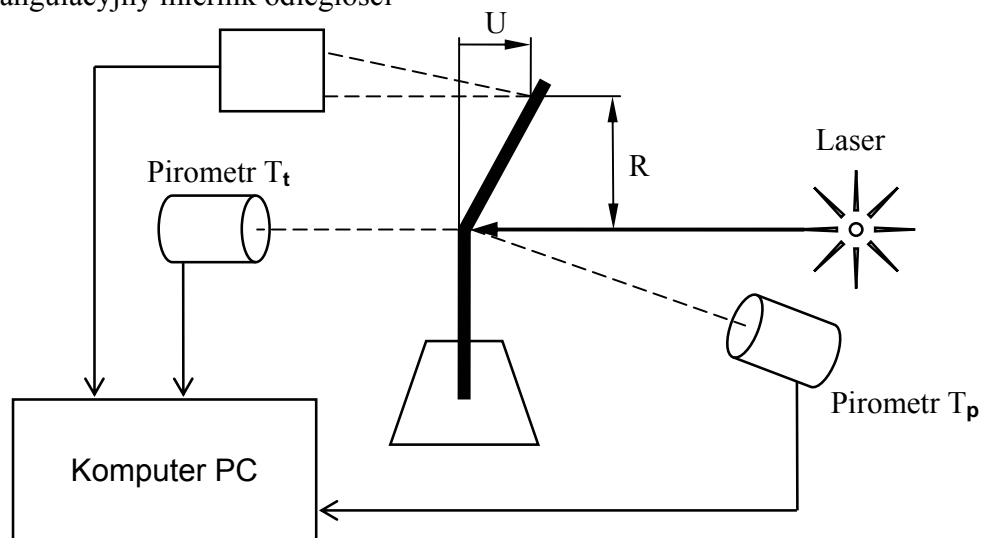
Stąd, biorąc pod uwagę zależność (5), otrzymamy wzór na optymalną wartość początkowej temperatury, przy której kąt zgięcia  $\alpha_b$  będzie maksymalny

$$T_0^{opt} = T_{pl} - 2\sqrt{\frac{2}{\pi e} \frac{AP\kappa}{l\lambda(Fr+1)vh}} ; \quad Fr = \sqrt{\frac{2\kappa b}{e\nu h^2}} \quad (15)$$

### Badania doświadczalne

Eksperymenty gięcia laserowego były prowadzone na prostokątnych próbkach o wymiarach 150 x 50 x 2 mm, wykonanych ze stali nierdzewnej 1H18N9T. Próbki były wstępnie wygrzewane w piecu dla zmniejszenia naprężeń własnych i dla wytworzenia powłoki tlenkowej, która dawała absorpcję energii wiązki laserowej na poziomie 75%. W eksperymencie gięcia termicznego jako źródło ciepła wykorzystywano laser CO<sub>2</sub> firmy TRUMPF, model TLF6000, który może wytwarzać wiązkę o mocy do 6 kW. Użyto głowicy ze zwierciadłem segmentowym dającym prostokątny przekrój poprzeczny wiązki laserowej. Schemat układu badawczego jest przedstawiony na rys. 3.

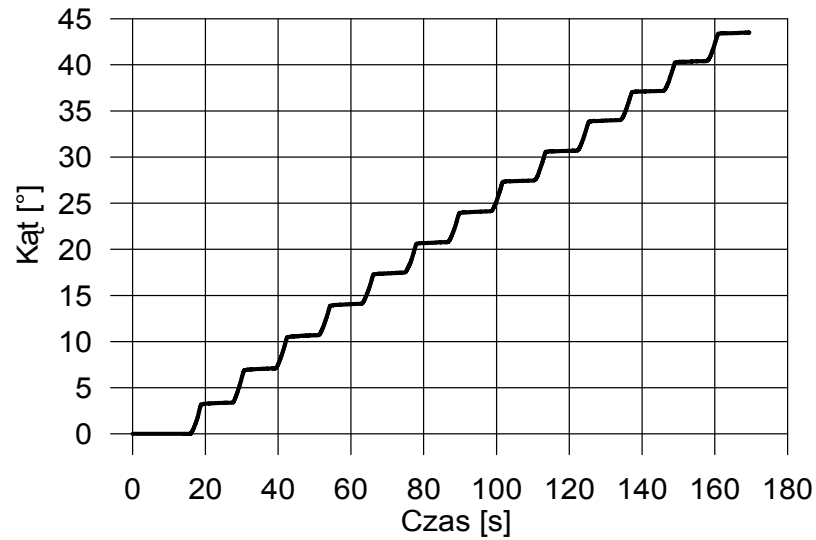
Triangulacyjny miernik odległości



Rys. 3. Schemat układu badawczego.

Wiązka laserowa była przemieszczana w poprzek próbki zamocowanej w pozycji pionowej. Deformacja próbki była mierzona bezdotykowo i w sposób ciągły przy użyciu laserowego triangulacyjnego miernika przemieszczenia. Kąt zgięcia próbki wyznaczany był z zależności  $\alpha_b = \arctg(U/R)$  na podstawie mierzonego przemieszczenia  $U$  i odległości  $R$  punktu pomiaru przemieszczenia od środka wiązki laserowej (rys. 3). Na rys. 4 jest pokazany przykład przebiegu czasowego kąta zgięcia w serii 13 przejść wiązki laserowej o mocy  $P = 700$  W, z prędkością  $v = 1$  m/min. Pauza pomiędzy kolejnymi przejściami trwała 6 sekund.

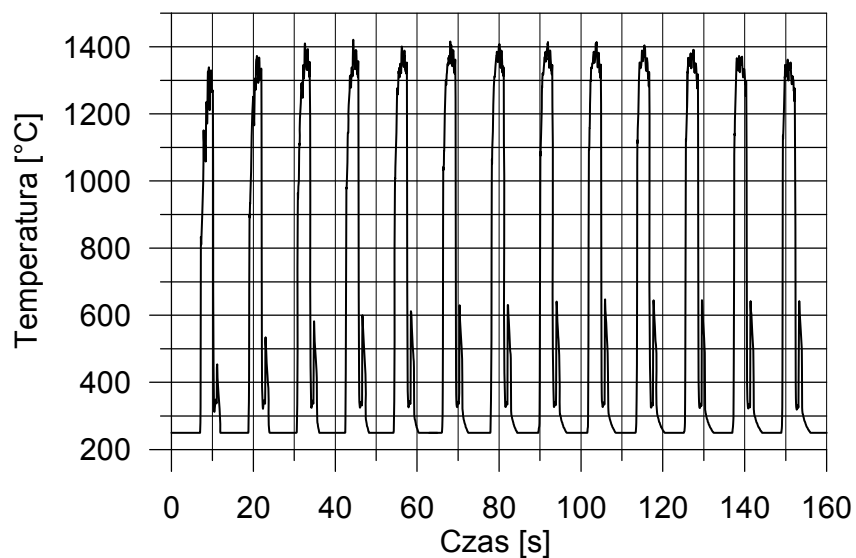




Rys. 4. Przebieg kąta zgięcia próbki w serii przejść wiązki laserowej.

$$P = 700 \text{ W}, v = 1 \text{ m/min.}$$

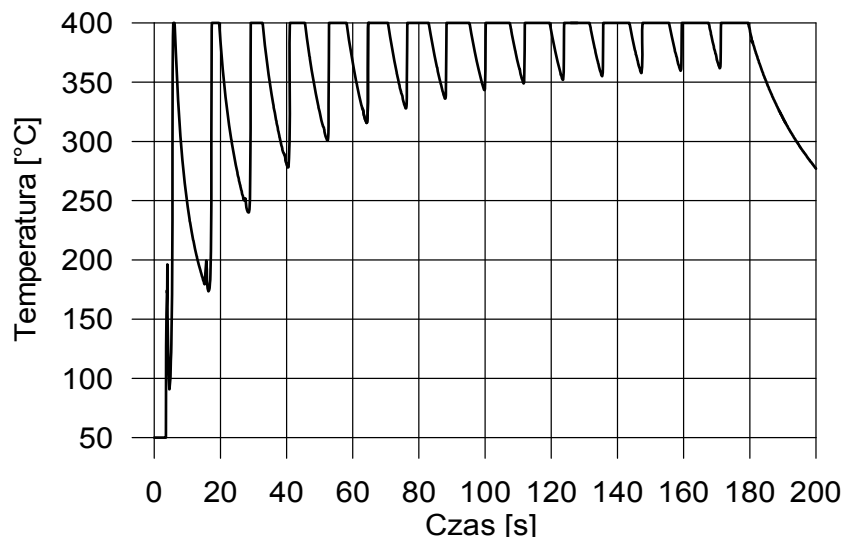
Temperatura próbki w plamce wiązki lasera CO<sub>2</sub> była mierzona w sposób ciągły przy użyciu pirometru oznaczonego „T<sub>p</sub>” na rys. 3, którego zakres pomiarowy wynosił 250-1650°C. Pirometr ten był związany z ruchomą wiązką lasera CO<sub>2</sub> i nacelowany w środek plamki laserowej. Pozwoliło to rejestrować maksymalną temperaturę próbki podczas nagrzewania laserowego. Przebieg zmian temperatury podczas serii nagrzewañ z mocy wiązki  $P = 700 \text{ W}$  i prędkością ruchu wiązki  $v = 1 \text{ m/min}$  jest przedstawiony na rys. 5. Widoczne na wykresie dodatkowe piki temperatury o wartościach szczytowych 500-700°C są efektem ubocznym, pochodzącym od nagrzewania wiązką laserową elementu osłonowego, na który wiązka schodziła z badanej próbki.



Rys. 5. Przebieg temperatury próbki w plamce laserowej podczas serii przejść wiązki.

$$P = 700 \text{ W}, v = 1 \text{ m/min.}$$

Dla mierzenia początkowej temperatury  $T_0$  materiału zastosowano pirometr oznaczony „T<sub>1</sub>” na rys. 3, o zakresie pomiarowym 50-400°C, związany z nieruchomą próbką i stale wycelowany w jej środek na powierzchni tylnej. Przebieg zmian temperatury mierzonej przez ten pirometr podczas serii nagrzewań z mocy wiązki  $P = 700$  W i prędkością ruchu wiązki  $v = 1$  m/min jest przedstawiony na rys. 6. Na wykresie, oprócz zmian temperatury podczas przejścia wiązki po próbce, widać również zmiany temperatury na skutek nagrzewania się elementu osłonowego i uchwytu próbki.



Rys. 6. Przebieg temperatury próbki na powierzchni tylnej podczas serii przejść wiązki.

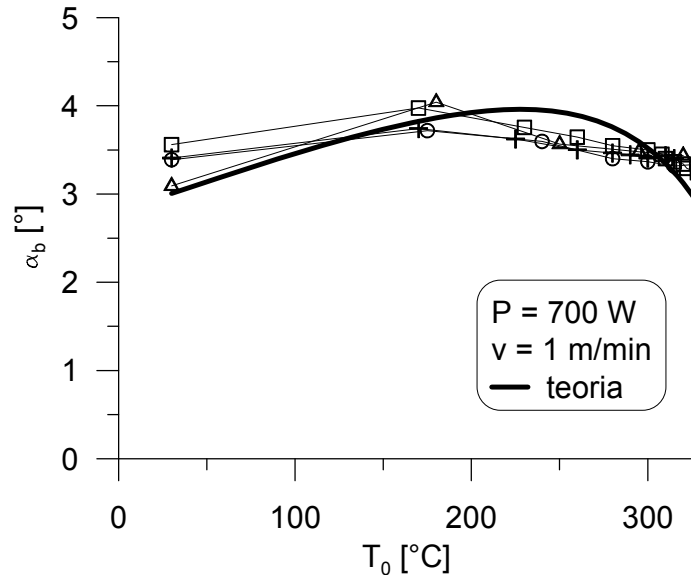
$$P = 700 \text{ W}, v = 1 \text{ m/min.}$$

Podczas pauzy, która następowała po przejściu wiązki, występowało szybkie ujednorodnienie rozkładu temperatury oraz wolniejsze, swobodne stygnięcie próbki. Przykładowy przebieg na rys. 6 pokazuje, że kolejne przejścia wiązki laserowej rozpoczynają się przy rosnących temperaturach początkowych  $T_0$  materiału ze względu na niedostateczną dyssypację ciepła z próbki podczas pauz pomiędzy laserowymi nagrzewaniami. Zastosowany sposób prowadzenia eksperymentów pozwolił na realizację gięcia laserowego przy różnych temperaturach początkowych  $T_0$  materiału, bez stosowania dodatkowego źródła ciepła. Eksperymenty były prowadzone na wielu próbkach i przy różnych czasach pauz pomiędzy kolejnymi laserowymi nagrzewaniami.

### Wyniki badań i dyskusja

Na podstawie przebiegów kąta zgięcia (przykład na rys. 4) wyznaczano przyrosty kąta zgięcia  $\alpha_b$  po kolejnych przejściach wiązki laserowej, a na podstawie przebiegów temperatury  $T_t$  próbki na powierzchni tylnej (przykład na rys. 6) wyznaczano początkową temperaturę  $T_0$  materiału w chwili startu kolejnego przejścia wiązki. Tak otrzymane dane pozwoliły na sporządzenie zależności kąta zgięcia  $\alpha_b$  od początkowej temperatury  $T_0$  materiału. Porównanie zależności teoretycznej (równanie 9) i wyników

eksperymentalnych dla kilku próbek jest przedstawione na rys. 7. Jednakowymi symbolami graficznymi oznaczono wyniki eksperymentalne uzyskane z tym samym czasem paazy pomiędzy przejściami wiązki.



Rys. 7. Porównanie doświadczalnej i teoretycznej zależności kąta zgięcia  $\alpha_b$  od początkowej temperatury  $T_0$  materiału.

W obliczeniach teoretycznych przyjęto wartość współczynnika absorpcji  $A = 0.75$  oraz wartość temperatury krytycznej  $T_{pl} = 480^\circ\text{C}$ . Wyniki eksperymentalne pokazują, podobnie jak i zależność teoretyczna, istnienie temperatury początkowej  $T_0$ , przy której uzyskiwana jest maksymalna wartość przyrostu kąta zgięcia dla jednego przejścia wiązki. Według danych doświadczalnych ta optymalna wartość temperatury początkowej dla badanej stali i zastosowanej wiązki laserowej wynosi około  $170^\circ\text{C}$ , podczas gdy zależność teoretyczna wykazuje maksimum przy temperaturze  $230^\circ\text{C}$ .

### Konkluzje

W pracy wyprowadzono wzór na optymalną temperaturę początkową materiału ze względu na maksymalizację wartości kąta zgięcia uzyskiwanego w wyniku przejścia wiązki laserowej. Wyniki doświadczalne potwierdziły istnienie takiego optimum. Opracowano metodę prowadzenia eksperymentów dla różnych wartości początkowej temperatury materiału niewymagającą podgrzewania przez dodatkowe źródło ciepła. Wyprowadzony wzór na optymalną temperaturę początkową (15) można wykorzystać do wyznaczania efektywnej wartości temperatury krytycznej.

### 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. Vollertsen F., *Mechanisms and Models for Laser Forming*. Proceedings of the 26th International CIRP Seminar on Manufacturing Systems - LANE '94 (Laser Assisted Net Shape Engineering), Editors: M. Geiger, F. Vollertsen. Meisenbach-Verlag, Bamberg (1994), 345-360.
2. Klocke F., Demmer A., Dietz C., *Laser-assisted metal forming*. Proceedings of the 30<sup>th</sup> International CIRP Seminar on Manufacturing Systems - LANE'97 (Laser Assisted Net shape Engineering 2), M. Geiger, F. Vollertsen (eds.), Meisenbach-Verlag, Bamberg 1997, 81-92.
3. Yau C. L., Chan K. C., Lee W. B., *Laser bending of leadframe materials*. Journal of Materials Processing Technology, 82: (1-3) OCT 1, 1998, 117-121.
4. Mucha Z., *Modelowanie i eksperymentalne badania kształtowania laserowego materiałów konstrukcyjnych*. Wydawca Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2004.
5. Mucha Z., Widłaszewski J., Cabaj M., Gradoń R., *Surface temperature in laser forming*. Archives of Thermodynamics. Vol. 24 (2003), No. 2, 89-105.
6. Mucha Z., Widłaszewski J., *Physical Foundations of Laser Thermal Forming*, Proceedings of the 1st International Conference on New Forming Technology, Harbin (China), September 6-9, 2004, pp. 235-240.
7. Myśliwiec M., *Cieplno-mechaniczne podstawy spawalnictwa*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1970.
8. Watanabe M., Satoh K., *Effect of Welding Conditions on the Shrinkage Distortion in Welded Structures*, The Welding Journal, Welding Research Supplement 40 (August 961) 8, 377-384.
9. Jang C.D., Seo S.I., Ko, D.E., *A Study on the Prediction of Deformations of Plates Due to Line Heating Using a Simplified Thermal Elastoplastic Analysis*. Journal of Ship Production. Vol. 13, No. 1, 1997, pp. 22-27.
10. Taira S., Ohtani R., *High Temperature Strength of Materials*. Metallurgy Publishers, Moscow 1986.
11. Żuchowski R., *Zmęczenie cieplne metali*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1981.
12. Rykalin N., Uglov A., Kokora A., *Laser Machining and Welding*. Mir Publishers, Moscow, 1978.
13. Ashby M. F., Easterling K. E., *The transformation hardening of steel surfaces by laser beams – I. Hypo-eutectoid steels*. Acta Metall. Vol. 32, No 11 (1984), 1935-1948.
14. Mucha Z., *Similarity Numbers in Laser Thermal Forming*. Advances in Manufacturing Science and Technology. Vol. 28, No. 3, 2004.