

Agnieszka JĘDRUSIK<sup>1</sup>  
Zenon OPIEKUN<sup>2</sup>  
Magdalena LENIK<sup>3</sup>

## SPRAWNOŚĆ CIEPLNA LASERA TRUDISK 4002

W artykule przedstawiono wyniki badań sprawności cieplnej spawania laserem Trudisk 4002, zainstalowanego w stanowisku TruLaser 5020<sup>4</sup> cienkich blach ze stopu żaroodpornego na osnowie niklu Inconel 718. Sprawność cieplną  $\eta_e$  lasera określono przy użyciu kalorymetru przepływowego chłodzonego wodą. Próbki blach o grubości 0,7 i 0,9 mm instalowane w kalorymetrze poddawano strumieniowi światła lasera o mocy od 400 do 700 W, przemieszczanemu wzdłuż linii ze stałą prędkością  $V_s = 25$  mm/s. Sprawność cieplną obliczono jako iloraz ciepła przejętego przez spawane blachy określonego kalorymetrycznie do całkowitej ilości ciepła generowanej przez laser. Z przeprowadzonych badań wynika, że sprawność cieplna spawania zależy nieliniowo od mocy lasera. Grubość spawanych blach nie ma wpływu na sprawność. Ze wzrostem wartości mocy lasera od 400 do 600 W, sprawność cieplna maleje trzykrotnie, od ok 21% do 7%, by przy wzroście jego mocy do 700 W, sprawność cieplna wzrosła do 18%.

**Słowa kluczowe:** spawanie, stop niklu Inconel 718, parametry cieplne

### 1. WSTĘP

Rozwój techniki lotniczej związany jest z opracowaniem i zastosowaniem nowych materiałów oraz technologią ich łączenia. Wymagania stawiane materiałom metalicznym w zależności od warunków ich pracy, rodzaju obciążeń mechanicznych, temperatury i oddziaływania środowiska mogą być różne [1].

Do budowy współczesnych silników lotniczych niezbędne są tworzywa metaliczne, które mogą pracować w temperaturze do 1200°C. Metale spełniające wymagania dobrej żaroodporności to stopy na osnowie niklu, wśród których duże znaczenie posiada stop Inconel 718. Stop ten ma dobrą odporność na korozję

<sup>1</sup> Agnieszka Jędrusik, BorgWarner Poland, 950B, 36-002 Jasionka, agnieszkajedrusik@o2.pl

<sup>2</sup> Autor do korespondencji: Zenon Opiekun, Katedra Odlewnictwa i Spawalnictwa, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, zopiekun@prz.edu.pl

<sup>3</sup> Magdalena Lenik, Katedra Odlewnictwa i Spawalnictwa, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, m.lenik@prz.edu.pl

<sup>4</sup> Badania prowadzono w Inkubatorze Technologicznym w Stalowej Woli.

wysokotemperaturową i jest jednym z głównych materiałów stosowanych w silnikach lotniczych PW4000 (wytwarzanych przez firmę Pratt-Whitney) i silnikach CF6 (wytwarzanych przez General Electric).

Z tego stopu wykonywane są łopatki kompresora, wały, turbiny, a także spawane z blach części komór spalania i wylotu spalin. Blachy z Inconelu 718 łączone są nierozłącznie metodą spawania laserowego bez dodatku spoiwa [1,2].

Podstawowe zalety w stosowaniu lasera do łączenia blach to: wysoka jakość złączy spawanych o wąskiej strefie wpływu ciepła, minimalne odkształcenia i naprężenia spawalnicze, a także dobra wydajność, łatwość automatyzacji i robotyzacji procesu spawania. Dodatkowe zalety to możliwość wykonania złączy niewymagających dalszej obróbki lub znacznie ograniczonej obróbki wykańczającej, ograniczenie szkodliwego oddziaływania na środowisko oraz proste szkolenie i obsługa urządzeń.

Do głównych niedogodności w zastosowaniu lasera do procesu spawania należy, obok wysokiej ceny mała jego sprawność.

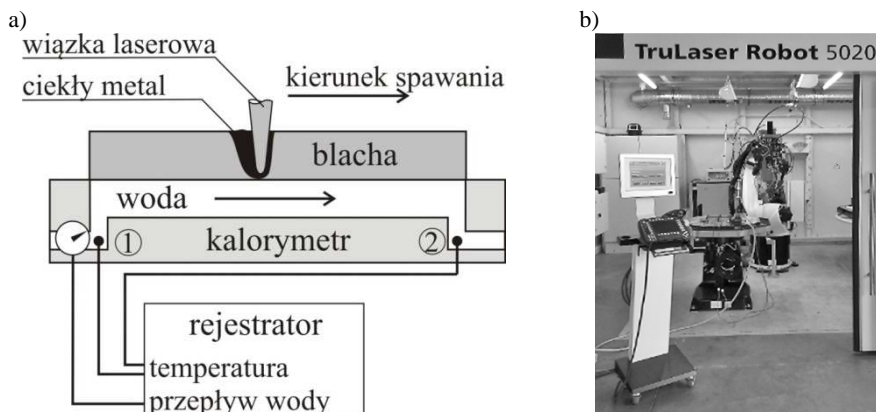
Podstawowymi parametrami lasera decydującymi o jakości uzyskiwanych złączy spawanych są: moc jego wiązki, energia i częstotliwość impulsu światła, prędkość spawania oraz sposób ogniskowania wiązki.

Celem niniejszego opracowania jest określenie sprawności cieplnej lasera Trudisk 4002 w zakresie mocy używanej do spawania blach cienkich ze stopu żaroodpornego na osnowie niklu Inconel 718. Laser Trudisk 4002 posiadał długość fali światła 1030 nm o rozbieżności wiązki 8 mm x mrad.

## 2. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Materiał do badań stanowiły cienkie pasma blachy ze stopu na osnowie niklu Inconel 718 o długości 250 mm, szerokości 50 mm i grubości 0,7 i 0,9 mm. Skład chemiczny blach określony przy użyciu optycznego spektrometru emisyjnego Q4 Tasman (Bruker) był następujący: 19,0%Cr, 12,5%Fe, 5,2%Nb, 3,2%Mo, 0,87%Ti, 0,75%Al, reszta Ni.

Pasma tych blach umieszczano w kalorymetrze przepływowym [3]. Blachy poddawano oddziaływaniu wiązki laserowej o mocach od 400 W do 700 W generowanej w głowicy lasera na stanowisku TruLaser 5020, przemieszczanej wzdłuż linii na drodze o długości  $S = 200$  mm ze stałą prędkością spawania  $V_s = 25$  mm/s. Blachy, podczas przemieszczania wiązki laserowej chłodzono wodą o stałym wydatku wynoszącym,  $V_{H_2O} = 6$  l/min. Przy użyciu termopar Ni-CrNi zainstalowanych w punktach, na początku i końcu drogi wiązki laserowej 2 (wpływie i wypływie wody), mierzono różnicę temperatury  $\Delta T$  przy użyciu termokompensatora. Schemat stanowiska do badania sprawności cieplnej i widok urządzenia z laserem Trudisk 4002 i kalorymetrem przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Schemat stanowiska do badania sprawności cieplnej (a), widok urządzenia z laserem Trudisk 4002 i kalorymetrem przepływowym (b)

Ilość ciepła przejętego przez poddane oddziaływaniu wiązki laserowej blachy obliczono z zależności:

$$Q_k = m_w \cdot c_w \cdot \Delta T \quad (1)$$

gdzie:  $Q_k$  – ilość ciepła przejętego przez nagrzewane blachy, J,  
 $m_w$  – masa wody użytej do chłodzenia blachy, kg,  
 $c_w = 4200 \text{ J/kgK}$ , ciepło właściwe wody,  
 $\Delta T = T_2 - T_1$  – różnica temperatury, między temperaturą wody wypływającej z kalorymetru w punkcie 2, a temperaturą wody w punkcie 1 dopływającej do kalorymetru.

Masę wody o stałym wydatku  $V_{\text{H}_2\text{O}} = 6 \text{ l/min}$  (ok 6 kg/min) użytej do chłodzenia blach w czasie przemieszczania wiązki laserowej wzdłuż linii na drodze  $S=200 \text{ mm}$ , ze stałą prędkością  $V_s = 25 \text{ mm/s}$  obliczono z zależności:

$$m_w = t_s \cdot V_{\text{H}_2\text{O}} \quad (2)$$

gdzie:  $m_w$  – masa wody użytej do chłodzenia blachy, kg,  
 $t_s$  – czas przemieszczania wiązki laserowej, min.

Sprawność cieplną lasera  $\eta_c$  obliczono z ilorazu:

$$\eta_c = \frac{Q_k}{Q_c} \quad (3)$$

gdzie:  $Q_c$  – całkowita ilość ciepła generowana przez laser i wynosząca:

$$Q_c = \frac{P}{v_s} \cdot S \quad (4)$$

gdzie: P – moc lasera, W,

$v_s = 25$  mm/s,

S = 200 mm.

Energiją liniową spawania  $E_L$  blach przy użyciu lasera TruLaser 5020 z uwzględnieniem jego sprawności cieplnej określono z zależności:

$$E_L = \eta_c \cdot \frac{P}{v_s}, J/mm \quad (5)$$

### 3. WYNIKI BADAŃ

W tabelach 1 i 2 zestawiono wyniki pomiarów parametrów cieplnych spawania blach Inconel 718 przy użyciu stanowiska TruLaser 5020. Dla blachy cieńszej o grubości 0,7 mm mierzono parametry cieplne dla trzech mocy lasera 400, 450 i 500 W, a dla blachy grubszej 0,9 mm, parametry te mierzono dla siedmiu mocy lasera od 400 do 700 W, zwiększając moc o 50 W.

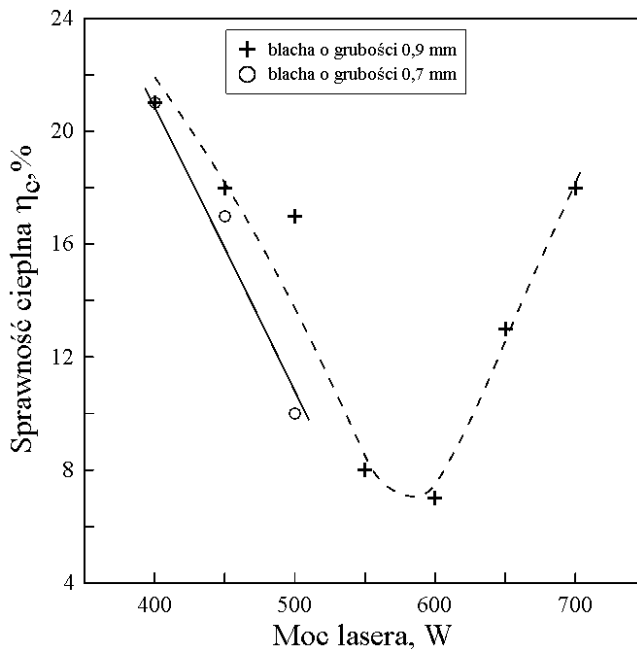
Tabela 1. Parametry spawania, parametry cieplne, sprawność cieplna i energia liniowa spawania  $E_L$  blach ze stopu Inconel 718 o grubości 0,7 mm

Lp.	P, W	$v_s$ , mm/s	$t_s$ , s	$Q_c$ , kJ	$Q_k$ , kJ	$\Delta T$ , °C	$\eta_c$	$E_L$ , J/mm
1	400	25	8	3,2	0,76	0,2	0,21	3,36
2	450			3,6	0,62	0,2	0,17	3,06
3	500			4,0	0,38	0,1	0,10	2,00

Tabela 2. Parametry spawania, parametry cieplne, sprawność cieplna i energia liniowa spawania blach ze stopu Inconel 718 o grubości 0,9 mm

Lp.	P, W	$v_s$ , mm/s	$t_s$ , s	$Q_c$ , kJ	$Q_k$ , kJ	$\Delta T$ , °C	$\eta_c$	$E_L$ , J/mm
1	400	25	8	3,2	0,67	0,2	0,21	3,36
2	450			3,6	0,67	0,2	0,18	3,24
3	500			4,0	0,68	0,2	0,17	3,40
4	550			4,4	0,34	0,1	0,08	1,68
5	600			4,8	0,34	0,1	0,07	1,68
6	650			5,2	0,67	0,2	0,13	3,36
7	700			5,6	1,01	0,3	0,18	5,04

Wyniki obliczeń sprawności cieplnej  $\eta_c$  spawania wiązką laserową cienkich blach ze stopu żaroodpornego na osnowie niklu Inconel 718 w funkcji mocy lasera przedstawiono wykreślnie na rysunku 2.



Rys. 2. Wpływ mocy lasera Trudisk 4002 na sprawność cieplną spawania blach cienkich ze stopu Inconel 718 o grubości 0,7 mm i 0,9 mm

#### 4. DYSKUSJA WYNIKÓW BADAŃ

Dobór parametrów spawania laserem powinien być prowadzony tak, aby maksymalizować sprawność cieplną spawania. Sprawność cieplna lasera na stanowisku TruLaser 5020 zależy silnie od mocy zastosowanej do spawania. Z przedstawionych badań wynika, że sprawność tego lasera w zastosowaniu do spawania blach cienkich ze stopu na osnowie niklu Inconel 718 zmienia się w szerokim zakresie, od około 21% do 7%. Największe sprawności spawania uzyskiwano przy mocy 400 – 450 W i 650 – 700 W. Moce lasera w zakresie 500-600 W dawały najmniejsze sprawności spawania.

Ilość ciepła pochłoniętego przez materiał w punkcie padania wiązki laserowej zależy między innymi od współczynnika pochłaniania (absorpcji), o którym decyduje struktura geometryczna powierzchni (SGP) (chropowatość powierzchni). Powierzchnie blach ze stopu Inconel 718 były przed spawaniem poddane czyszczeniu (matowieniu) i posiadały takie same parametry SGP.

Mała sprawność cieplna lasera uzyskana w zakresie mocy 500-600 W mogła być efektem tego, że nagrzewanie laserowe blach odbywało się w powietrzu bez stosowania atmosfery ochronnej. Tworzące się tlenki metalu spawanego mogły wywołać zmianę absorpcyjności padającej wiązki laserowej, zmniejszając jej sprawność cieplną.

**LITERATURA**

- [1] Dul I.: *Zastosowanie i przetwarzanie stopów niklu w przemyśle lotniczym*, Przegląd Spawalnictwa, 7-8, 2009, s. 62-67.
- [2] Jędrusik A.: *Technologia cięcia, oczyszczania i spawania laserowego cienkich blach ze stopu Inconel 718*, praca doktorska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Rzeszów 2015.
- [3] Orłowicz A.W., Mróz M., Trytek A., Tupaj M., Betlej J., Płoszaj F.: *Kalorymetr przepływowy do pomiarów cieplnych w procesach spajania*, Patent nr P-384759, 2012.

DOI: 10.7862/rf.2021.pfe.4

Received: 16.03.2021

Accepted: 14.09.2021