

# Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

## Modern material technologies in aerospace industry

### Niekonwencjonalne technologie łączenia elementów konstrukcji lotniczych

### Unconventional technologies of joining elements of aeronautical constructions

Politechnika Lubelska, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Częstochowska, Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk

#### Wyniki badań Results

Rozwój techniki lotniczej związany jest ściśle 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 różnorodne. Do budowy nowoczesnych silników lotniczych niezbędne są materiały o temperaturze pracy do około 1200° C. Materiałami, które w znacznej mierze spełniają wymagania dobrej żaroodporności i żarowyttrzymałości, są stopy na osnowie niklu. Wśród tych stopów duże znaczenie posiada produkowany od 1960 r. i ciągle udoskonalany stop na osnowie niklu Inconel 718. Stop ten posiada dobrą odporność na korozję wysokotemperaturową i jest jednym z wiodących stopów stosowanym powszechnie w silnikach lotniczych PW 4000 wytwarzanych przez PWC i silnikach CF6 produkowanych przez GE. Z tego stopu są wytwarzane łopatki kompresora, wały, turbiny, a także spawane części wylotowe spalini i inne elementy. Wyroby z Inconelu 718 są poddawane obróbce cieplnej, utwardzaniu wydzieleniowemu polegającemu na przesyleniu z temperatury ok. 1000°C i dwustopniowym starzeniu w temperaturze 720° C w czasie 8 godzin i w temperaturze 620° w czasie 8 godzin. Taka obróbka cieplna pozwala poprawić właściwości żarowyttrzymałości Inconelu 718.

#### Badania sprawności cieplnej procesu spawania cienkich blach ze stopu Inconel 718 przy użyciu lasera

##### Materiał i metodyka badań

Do określenia sprawności cieplnej spawania blach ze stopu Inconel 718 przy użyciu lasera przygotowano próbki o wymiarach grubości (0,7mm i 0,9mm)x50x250mm. Skład chemiczny Inconelu 718 jest następujący: 19%Cr, 12,5%Fe, 5,2% Nb, 3,2 % Mo, 0,87%Ti, 0,75% Al reszta Ni. Próbki blach z badanego materiału były umieszczone w kalorymetrze przepływowym.

Badania sprawności cieplnej procesu spawania prowadzono przy użyciu TruLaser 5020.

Przyjęto następujące parametry spawania dla blachy o grubości 0,7 mm moc lasera wynosiła P= 400+500 W, prędkość spawania Vs=25mm/s. Natomiast dla blachy o grubości 0,9 mm moc lasera 600 wynosiła P= 400+700 W, prędkość spawania w obydwu przypadkach wynosiła Vs=25mm/s. Przepływ wody przez kalorymetr ustalono na poziomie 6l/min. Przy takim wydatku wody jej przepływ jest laminarny.

##### Wyniki badań i ich analiza

Badania obejmowały pomiar ilości ciepła przejętego przez nadtapiane powierzchniowo próbki blach o grubości 0,7mm, i 0,9mm, ze stopu Inconel 718 określenie energii liniowej strumienia wiązki laserowej oraz określenie sprawności cieplnej spawania i ilości ciepła przejętego przez kalorymetr przepływowy. W tabelach 1,2, zestawiono wyniki tych pomiarów i obliczeń.

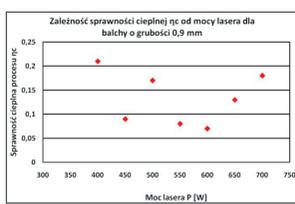
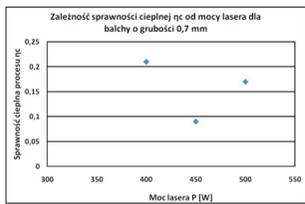
Tabela 1. Parametry nadtapiania (spawania) blach o grubości 0,7mm ze stopu Inconel 718, ilości ciepła, różnice temperatury, sprawność cieplna i energia liniowa.  
Table 1. Parameters fusing (welding) sheet having a thickness of 0.7 mm Inconel 718, heat, temperature differences, heat, and energy efficiency linear.

Lp.	P[W]	Vs[mm/s]	t[s]	Qc[kJ]	Qk[kJ]	$\Delta T$ [°C]	$\eta_c$ %	E[J/cm]
1	400	25	9	3,6	0,76	0,2	21	3,36
2	450	25	9	4,05	0,38	0,1	9	1,68
3	500	25	9	4,5	0,78	0,2	17	3,36

Tabela 2. Parametry nadtapiania (spawania) blach o grubości 0,9 mm ze stopu Inconel 718 ilości ciepła, różnice temperatury, sprawność cieplna i energia liniowa.  
Table 2. Parameters of fusing (welding) sheet having a thickness of 0.9 mm Inconel 718 heat, temperature differences, heat, and energy efficiency linear.

Lp.	P[W]	Vs[mm/s]	t[s]	Qc[kJ]	Qk[kJ]	$\Delta T$ [°C]	$\eta_c$ %	E[J/cm]
1	400	25	8	3,2	0,67	0,2	21	3,36
2	450	25	8	3,6	0,34	0,1	9	1,68
3	500	25	8	4	0,67	0,2	17	3,36
4	550	25	8	4,4	0,34	0,1	8	1,68
5	600	25	8	4,8	0,34	0,1	7	1,68
6	650	25	8	5,2	0,67	0,2	13	3,36
7	700	25	8	5,6	1,01	0,3	18	5,04

Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono wpływ mocy lasera na sprawność cieplną procesu spawania dla blachy o grubości 0,7 mm oraz 0,9 mm.



Rys 1. Wpływ mocy lasera na sprawność cieplną procesu spawania dla blachy o grubości 0,7 mm.  
Fig 1. Effects of laser power on the thermal efficiency of the welding processor for sheet metal having a thickness of 0.7 mm

Rys 2. Wpływ mocy lasera na sprawność cieplną procesu spawania dla blachy o grubości 0,9 mm.  
Fig 2. Effects of laser power on the thermal efficiency of the welding processor for sheet metal having a thickness of 0.9 mm

#### Wnioski Conclusions

##### Podsumowanie

Dobór parametrów spawania stopu Inconel 718 przy użyciu lasera silnie zależy od współczynnika sprawności cieplnej. O wartości tego współczynnika przy stałej prędkości decyduje moc lasera. Przy różnych parametrach mocy lasera współczynniki sprawności cieplnej oraz wartości energii liniowej E zmieniają się. Dla próbek o grubości 0,7 mm sprawność cieplna zawiera się w przedziale 9÷21%, energia liniowa 1,7÷3,4 J/cm. Natomiast dla próbek o grubości 0,9 mm sprawność cieplna zawiera się w przedziale 8÷21%, energia liniowa 1,7÷5,0 J/cm.

Analizując zależności sprawności cieplnej od mocy lasera można stwierdzić, że:

- Dla 3 pierwszych wartości mocy tj. 400W, 450W, 500W, współczynnik sprawności cieplnej dla blachy o grubości 0,7 i 0,9 przyjmuje taką samą wartość. Wynika to najprawdopodobniej z małej czułości pomiaru różnicy temperatury na wejściu.
- Największą sprawność cieplną spawania uzyskano przy mocy lasera 400W zarówno dla blachy o grubości 0,7 mm jak i 0,9 mm.

##### Komentarz:

Ze względu na małą dokładność pomiaru zmiany temperatury przy dużym wydatku wody chłodzącej (6l/min), dla małych wartości mocy lasera (400-550W), współczynnik sprawności cieplnej obciążony jest dużym błędem stąd na wykresie skokowe zmiany wartości związane z „bezwładnością „kalorymetru.

##### Wnioski:

Przy doborze parametrów spawania stopu Inconel 718 z wykorzystaniem lasera należy przyjmować dokładnie wyznaczone współczynniki sprawności cieplnej;

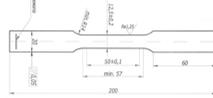
Wyznaczony poprawnie współczynnik sprawności cieplnej pozwoli uzyskać wzrost jakości złączy spawanych konstrukcji wykonywanych ze stopu Inconel 718 wykonanych przy użyciu wiązki laserowej.

#### Wyniki badań Results

#### Badania wytrzymałości na rozciąganie złączy spawanych metodą GTAW oraz przy użyciu lasera

##### Tensile strength test of method GTAW welded joints using a laser

Właściwości mechaniczne cienkich blach ze stopu Inconel 718 określono w statycznej próbie rozciągania, w temperaturze pokojowej oraz po obróbce cieplnej na próbkach według normy PN-EN ISO 6892-1.



Rys.3. Przykład próbki stosowanej w statycznej próbie rozciągania.  
Fig.3. Example of samples used in the static tensile test

Do badań przyjęto blachy o grubościach 0,55; 0,75; 0,95; 1,15 mm. Rozciągane statycznie próbki przygotowano zarówno z materiału rodzimego jak i po spawaniu ich metodą GTAW i laserem.

Średni skład chemiczny blach ze stopu Inconel 718, określony widmową analizą spektralną 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 i 0,75%Al reszta Ni.

Próby rozciągania blach wykonano przy użyciu maszyny wytrzymałościowej typu Zwick/Roell 100. Badania przeprowadzono w Katedrze Przeróbki Plastycznej na Politechnice Rzeszowskiej. Podstawowymi parametrami były: siła wstępna F=2 MPa, prędkość modułu E =60 MPa/s oraz prędkość badania =0,008 1/s.

Grubość blachy	Wytrzymałość na rozciąganie materiału w stanie dostawy	Wytrzymałość na rozciąganie materiału po spawaniu metodą GTAW	Wytrzymałość na rozciąganie materiału po spawaniu laserowym
0,3-0,6 mm	843 MPa	587 MPa	740 MPa
0,7-0,8 mm	883 MPa	673 MPa	777 MPa
0,9-1,0 mm	866 MPa	774 MPa	809 MPa
1,1-1,2 mm	876 MPa	823 MPa	839 MPa

Tabela 3. Parametry wytrzymałościowe po próbie rozciągania  
Table 3. The parameters on the tensile strength

#### Badania mikrotrwałości złączy spawanych metodą GTAW oraz przy użyciu lasera

Badania mikrotrwałości wykonano na zglądach prostopadłych oraz na złączach spawanych metodą GTAW oraz przy użyciu lasera na mikrotrwałościomierzu Indentec, ZWICK/ROELL z elektroniką pomiarową, metodą statecznego wciśnięcia wgłębnika sposobem Vickersa, przy stałym obciążeniu F=10N (oznaczenie HV 0,2), działającej przez około 10s.

Ze względu na spodziewane małe wartości głębokości utwardzania, pomiarów dokonywano, wykonując odciski, w trzech osobnych ścieżkach zawierających po kilka odcinków. Badania wykonano z trzykrotną powtarzalnością dla blach ze stopu Inconel 718 spawanych metodą GTAW oraz przy użyciu lasera o grubościach 0,5mm; 0,8mm; 0,9mm.

Tabela 4. Pomiar mikrotrwałości w trzech obszarach (MR, SWC, spoina)  
Table 4. Microhardness measurements in three areas (MR, SWC, weld)

	0,5mm	0,7mm	0,8mm	0,8mm	0,9mm	Laser 0,9mm	Tig 1,2 mm	Laser 1,2mm
SWC	364	470	243	237	158	221	358	409
	357	470	262	239	168	213	362	407
	362	441	272	223	173	225	349	396
SPOINA	345	429	231	221	162	249	391	360
	371	483	246	246	163	231	349	383
	358	557	226	248	164	233	358	385
MR	353	349	227	248	169	226	362	376
	364	396	237	252	164	234	376	371
	386	399	241	278	171	228	364	373

#### Wnioski Conclusions

Przy doborze parametrów spawania przy użyciu lasera stopu Inconel 718 należy przyjmować dokładnie wyznaczone współczynniki sprawności cieplnej;

Wyznaczony poprawnie współczynnik sprawności cieplnej pozwoli uzyskać wzrost jakości złączy spawanych konstrukcji wykonywanych ze stopu Inconel 718 przy użyciu lasera;

Wraz ze wzrostem mocy lasera oraz zmianą prędkości spawania, sprawność cieplna procesu rośnie;

Rozkład mikrotrwałości jest różny dla złączy spawanych metodą GTAW oraz przy użyciu lasera. Największe wartości mikrotrwałości w przypadku złączy spawanych GTAW można zaobserwować dla blach o grubości 0,5 mm oraz 0,8 mm w strefie wpływu ciepła.

Natomiast przy użyciu lasera największą mikrotrwałość można zaobserwować dla blach o grubości 0,5 mm oraz 1,2 mm w spoinie;

Na podstawie przedstawionych danych można stwierdzić widoczny wpływ metody spawania na mikrotrwałość złącza.

In selecting parameters using a laser welding Inconel 718 should be taken exactly set the coefficients of thermal efficiency;

Properly designated factor allows for an increase in the quality of welded joints in structures made of Inconel 718 made using a laser;

With the increase of laser power and welding speed change, increasing the thermal efficiency of the process;

Microhardness distribution is different for GTAW welds and method using a laser. The highest values of microhardness for GTAW welded joints can be observed for plates with a thickness of 0.5 mm and 0.8 mm in the heat affected zone. However, when a laser greatest microhardness can be observed for plates with a thickness of 0.5 mm and 1.2 mm in the weld;

On the basis of the data presented, it can be concluded visible effect on the microhardness welding methods connector.

#### Wskaźniki realizacji celów projektu Indicators of the project

Przeprowadzone badania sprawności cieplnej, badania wytrzymałości na rozciąganie oraz badania mikrotrwałości złączy spawanych pozwalają na wyciągnięcie pewnych wniosków, które mają posłużyć jako podstawa do opracowania nowej zintegrowanej technologii spawania laserowego. Nadzającym celem jest realizacja programu badań dotyczących opracowania możliwości zastąpienia dotychczas, stosowanych zabiegów cięcia mechanicznego, czyszczenia powierzchni i spawania metodą GTAW przez użycie jednego lasera impulsowego przy zmiennym oprzyrządowaniu co umożliwi znaczący wzrost wydajności. Elementem takiego rozwiązania byłoby uzyskanie porównywalnych lub lepszych właściwości mechanicznych złączy spawanych do metod obecnie stosowanych.

Badania te wskazują na możliwość takiego rozwiązania. Nowo opracowana technologia pozwoli na wzrost wydajności przy zachowaniu porównywalnych właściwości wytrzymałościowych. Znaczącą wartość mają tu badania sprawności cieplnej, których wyniki znajdują się w niniejszym opracowaniu. Ważną częścią, która posłuży do analizy są próby wysokotemperaturowego pelzania.

Przeprowadzone badania oraz analiza otrzymanych wyników mogą z pewnością zostać zaimplementowane do użycia w przemyśle a w szczególności w przemyśle lotniczym gdzie Inconel jest popularnym stopem stosowanym na różne elementy lotnicze.

Opracowane parametry spawania mogą zostać wykorzystane do spawania przemysłowego.

The study of thermal efficiency, research on tensile strength and micro-hardness testing of welded joints allow some conclusions, which are to be used as a basis for the development of new integrated laser welding technology. The ultimate goal is to implement a program of research on the development of the possibility of replacing previously used mechanical cutting treatments, surface cleaning and GTAW welding by using a pulsed laser with varying instrumentation to enable a significant increase in performance. The result of such a solution would be to provide comparable or better mechanical properties of welded joints to the methods currently used.

These studies indicate the possibility of such a solution. The newly developed technology will allow for increased productivity while maintaining comparable strength properties. Significant value here are the thermal performance testing, the results of which can be found in this study. An important part of that will be used for the analysis of high-temperature creep tests are.

The study and analysis of the results can certainly be implemented for use in industry, especially in the aerospace industry where Inconel alloy used is popular in different parts of an aircraft.

Developed welding parameters can be used for industrial welding

#### Wyniki badań Results

#### Prototyp urządzenia do wykonywania złączy w technologii FCS The prototype device to perform FCS technology connectors

Prace badawcze oraz testy doprowadziły do budowy prototypu urządzenia niezbędnego do wykonywania złączy w technologii FCS ( Fast Curing System ). Urządzenie zostało przetestowane w ramach prac badawczych oraz rzeczywistych warunkach gdzie zostały wykonane próbne złącza.

Cele jakie zostały założone prototypowi zostały osiągnięte ale będą prowadzone dalsze prace w celu jeszcze lepszego przygotowania do komercjalizacji urządzenia oraz całego procesu technologicznego.

Urządzenie zostało zaprezentowane podczas Targów KOMOZYT EXPO gdzie wstępnie została wykazana chęć zakupu dwóch licencji wraz z urządzeniami do polskich zakładów produkujących kompozyty.

Research and trials led to the construction of a prototype device to perform the necessary connectors technology FCS (Fast Curing System). It has been tested in the context of research and real-world conditions where connections are made trial.

Goals that were established prototype have been achieved but further work will be carried out in order to have a better preparation for commercialization of the device and the whole process.

The device was presented during the Fair KOMOZYT -EXPO been demonstrated where the initial desire to purchase two licenses with the means to Polish plants producing composites. owinny być czonką 18 pkt. z wyśrodkowaniem względem rysunku. Treści zawarte w podpisach powinny być napisane w języku polskim oraz angielskim jak we wzorze poniżej.