

# 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

**Analiza konstrukcji i opracowanie geometrii narzędzi do zgrzewania złączy zakładkowych ze stopów lekkich metodą FSW.**  
The analysis of structure and design of geometry of tools for friction stir welding of overlap joints from lightweight alloys.

Przedmiotem zadania jest analiza istniejących konstrukcji narzędzi do zgrzewania tarczowego z przemieszaniem oraz opracowanie geometrii narzędzi do zgrzewania FSW, optymalnych z punktu widzenia wykonywania złączy zakładkowych.

Głównym celem realizowanego zadania jest uzyskanie informacji jaki wpływ na jakość złączy zakładkowych stopów aluminium serii 6061 ma kształt opory i trzpienia narzędzia.

The subject of this work is the analysis of existing designs of tools for friction stir welding and design of FSW tool that is optimized for producing overlap joints. The main goal of the performed task is acquisition of data about the impact of tool shoulder and pin geometry on the quality of overlap joints made of aluminum series 6061.

Rys. Wymiary i widok narzędzia zastosowanego do zgrzewania stopu aluminium 6061 T6 (nr narzędzia N6) i jego stan po wykonaniu zgrzeiny o długości 1m.

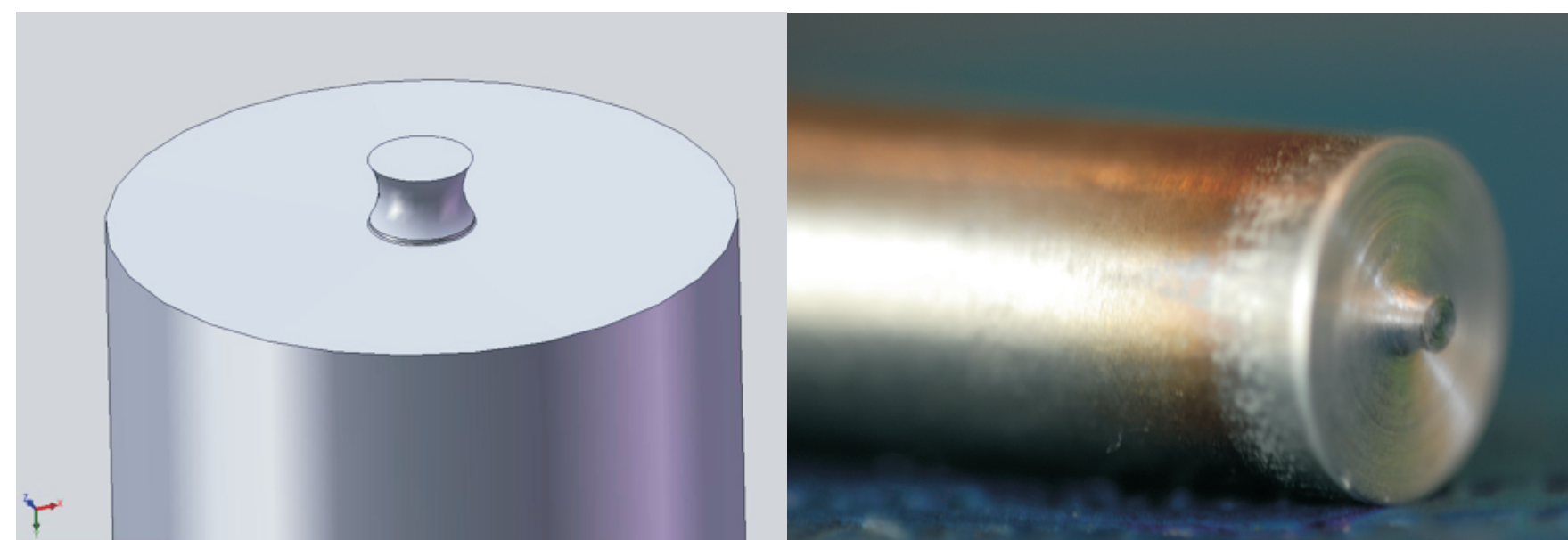


Fig. The dimensions and view of the tool applied for welding of aluminum alloy 6061 T6 (tool number N6) and the tool state after welding at the distance of 1 m.

Nr	Wartości rezydujące						Widok lica zgrzeiny		
	M1	M2	N	V	Z	R			
16	6061	6061	0,8	2	6000	18	1,6	2	
17	6061	6061	0,8	2	6000	18	1,65	2	
18	6061	6061	0,8	2	6000	18	1,7	2	
19	6061	6061	0,8	2	5000	15	1,7	2	
20	6061	6061	0,8	2	6000	18	1,7	2	

Nr	Wartości rezydujące						Widok lica zgrzeiny		
	M1	M2	N	V	Z	R			
11	6061	6061	0,8	2	7000	21	1,65	2	
12	6061	6061	0,8	2	8000	24	1,65	2	
13	6061	6061	0,8	2	8000	21	1,65	2	
14	6061	6061	0,8	2	6000	15	1,65	2	

Rys. Widok lica zgrzeiny złączy zgrzewanych tarczowo z mieszaniem za pomocą narzędzia N6 (średnica trzpienia PD=2mm, średnica opory SD=12mm)

Fig. The view of weld face for friction stir welded joints produced using N6 tool (tool pin diameter PD=2mm; shoulder width SD=12mm)

Rys. Wymiary i widok narzędzia zastosowanego do zgrzewania stopu aluminium 6061 T6 (nr narzędzia N14) i jego stan po wykonaniu zgrzeiny o długości 2m.

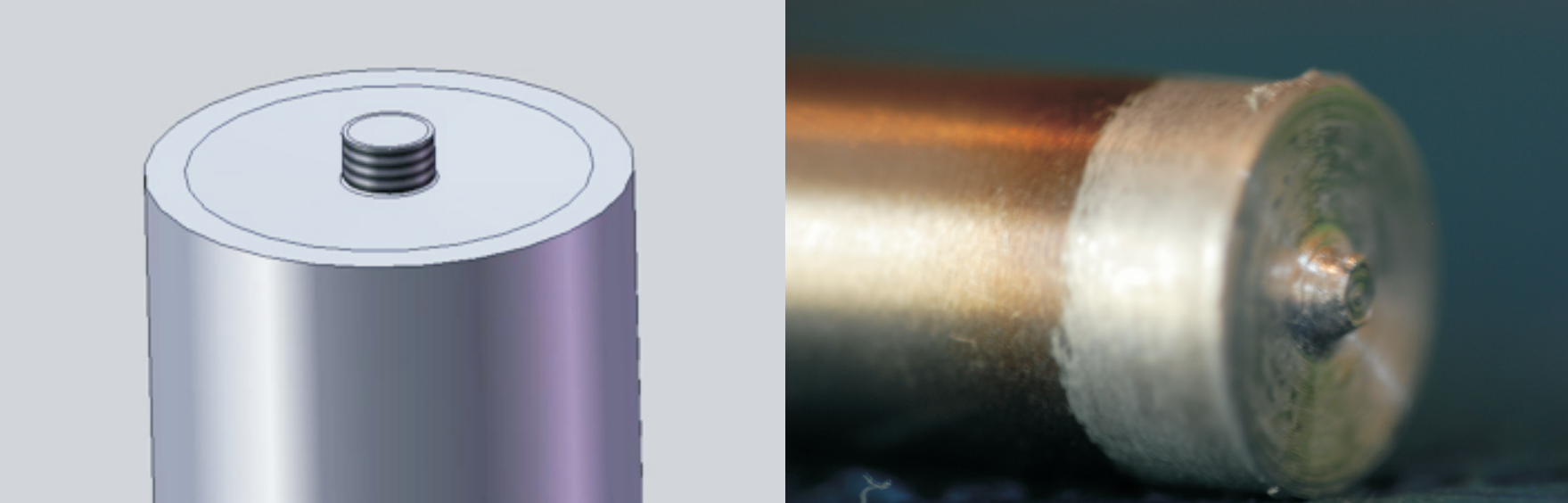


Fig. The dimensions and view of the tool applied for welding of aluminum alloy 6061 T6 (tool number N14) and the tool state after welding at the distance of 2m.

Nr	Wartości rezydujące						Widok lica zgrzeiny		
	M1	M2	N	V	Z	R			
01	6061	6016	0,8	2	6000	18	1,6	0,3	
02	6061	6016	0,8	2	6000	18	1,6	0,3	
03	6061	6016	0,8	2	6000	18	1,5	0,3	
04	6061	6016	0,8	2	6000	18	1,3	0,3	
05	6061	6016	0,8	2	6000	18	1,35	0,3	

Nr	Wartości rezydujące						Widok lica zgrzeiny		
	M1	M2	N	V	Z	R			
06	6061	6016	0,8	2	6000	18	1,4	0,3	
07	6061	6016	0,8	2	6000	18	1,4	0,18	
08	6061	6016	0,8	2	6000	18	1,4	0,1	
09	6061	6016	0,8	2	6000	22	1,4	0,1	
10	6061	6016	0,8	2	6000	20	1,4	0,15	

Rys. Widok lica zgrzeiny złączy zakładkowych zgrzewanych tarczowo z mieszaniem za pomocą narzędzia N14 (średnica trzpienia PD=2,25mm, średnica opory SD=12mm)

Fig. The view of weld face for friction stir welded overlap joints using N14 tool (tool pin diameter PD=2,25mm; shoulder width SD=12mm)

#### Wnioski Conclusions

W wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych i ich analiz założono takie kształtowanie narzędzia tj. kształtu opory i trzpienia, aby spełniały następujące warunki:

- Przy stosowaniu pochylenia narzędzia powierzchnię opory proponuje się wykonać jako gładką bez nacięć z wklęsłym jej zarysem. Im stop metalu będzie bardziej plastyczny tym ilość metalu objęta i zdeformowana przez oporę może zostać powiększona a zatem i objętość wklęsłej przestrzeni opory może ulec zwiększeniu.
- Zastosowanie zerowego pochylenia narzędzia wymusza zastosowanie płaskiej powierzchni opory z nacięciami sferycznymi lub spiralnymi.
- Optymalny stosunek średnicy opory do średnicy trzpienia powinien mieścić się w przedziale 2,5 do 4,0.
- Zwiększenie prędkości obrotowej narzędzia skutkować może nadmiernym nagraniem i w efekcie „rozcieńczeniem” metalu, skutkiem czego obniża się wytrzymałość doraźna złącza. Nadmierna prędkość obrotowa skutkuje również unoszeniem linii styku blach przez wirującą trzpień i generowaniem dużej wartości hooke'a, który jednocześnie obniża wytrzymałość zmęczeniową złącza.

Based on the performed analyses and experimental tests the tool shape, i.e. geometry of tool shoulder and pin, meeting the following requirements was selected:

- In case of tool tilt the surface of tool shoulder should be smooth, without any notches and with concave contour. The more plastic material is, the larger can be the volume of material deformed by tool shoulder. Thus the volume of concave space in the tool shoulder can increase.
- The application of zero tool tilt enforces the application of flat tool shoulder with spherical or spiral notches.
- The optimal ratio of tool shoulder diameter to pin diameter should be in range between 2.5 to 4.0.
- The increase in tool rotational speed can result in overheating and thinning down of material, and consequently in decrease in joint strength. The too high value of rotational speed can lead to the ascent of sheet contact surface caused by spinning tool pin and increase in hooke's value. This decrease fatigue strength of the joint.

#### Wyniki badań Results

**Analiza możliwości wykonania elementu aluminiowego przy użyciu technologii FSW**  
Analysis of possibility of making an aluminum component by FSW technology

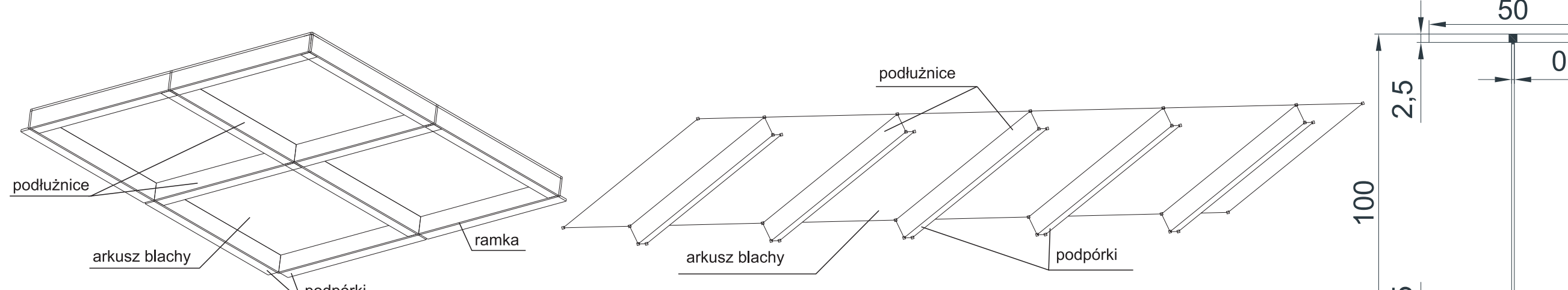
Na podstawie analizy określono rozkład naprężeń oraz ugięcie konstrukcji zginanych. Ocenie poddano dwa rodzaje struktur panelowych zbudowanych z:

- arkusza blachy, ramek, podłużnic, podpórek,
- z arkusza blachy, podłużnic, podpórek,
- z dwuteowej belki. Elementy konstrukcyjne wykonano z aluminium 2017A za pomocą T-owych złączy FSW.

The effective stresses and displacement were analysed. I-section beams and two types of panels structures:

- built of sheet metal, frames, stringers and supports
- built of sheet metal, stringers and supports

were evaluated. Construction components were made from aluminium 2017A and joined by FSW T-joints.



Rys. Schemat budowy struktury panelowej zbudowanej z arkusza blachy, ramek, podłużnic i podpórek

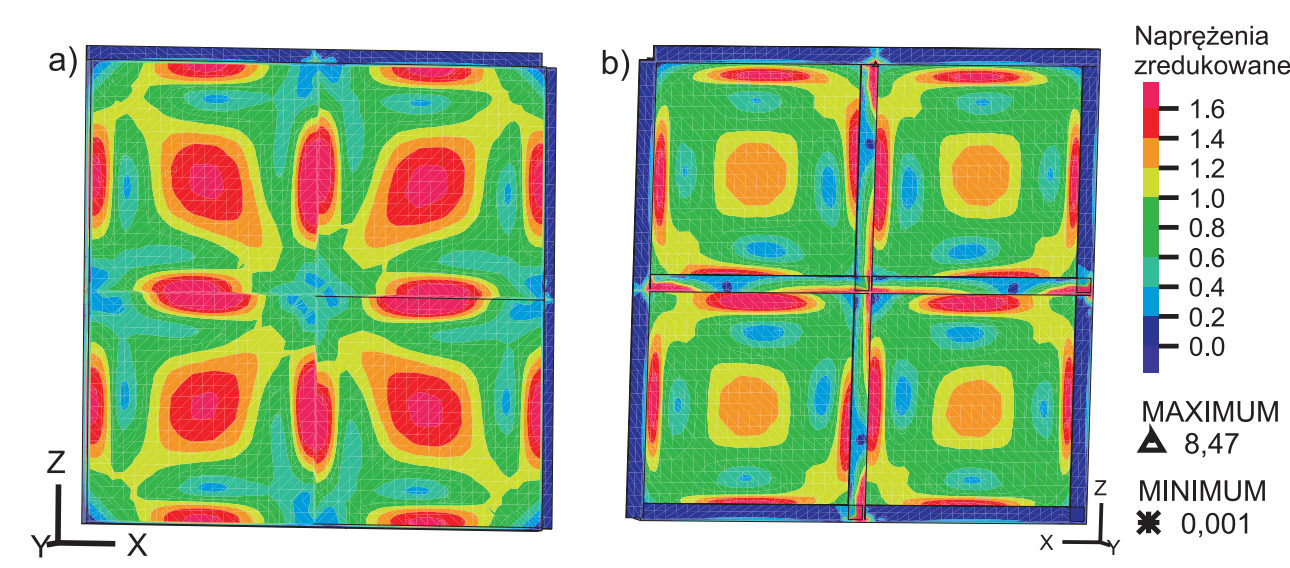
Fig. Schema of panel structure built of sheet metal, frames, stringers and supports

Rys. Schemat budowy struktury panelowej zbudowanej z arkusza blachy, podłużnic i podpórek

Fig. Schema of panel structure built of sheet metal, stringers and supports

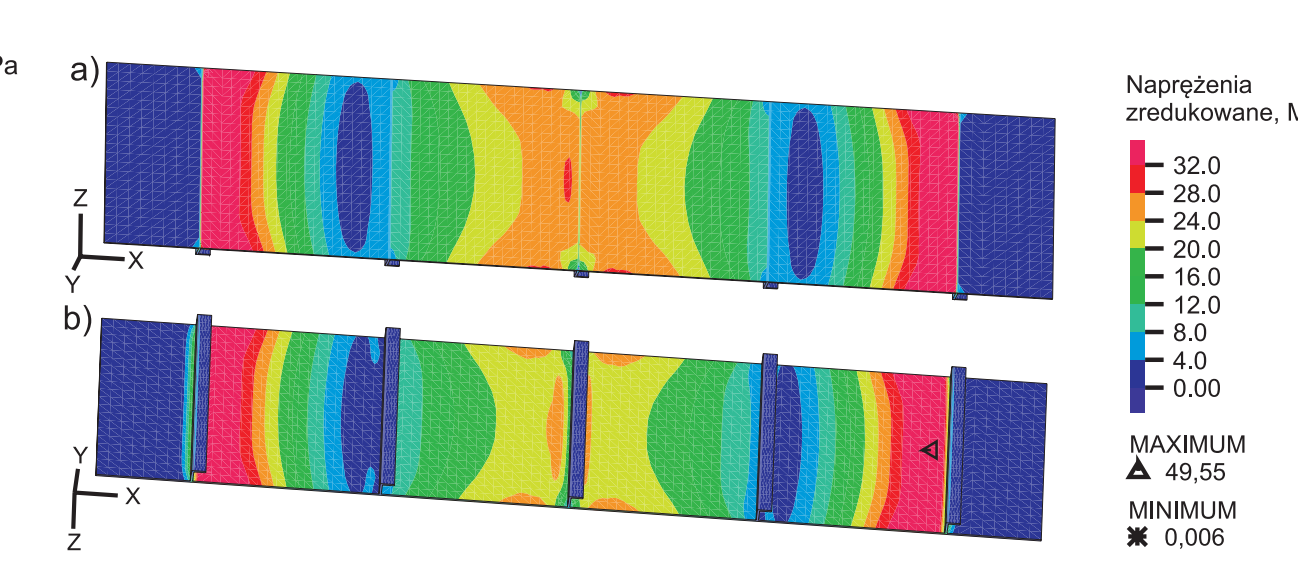
Rys. Przekrój belki

Fig. Beam section



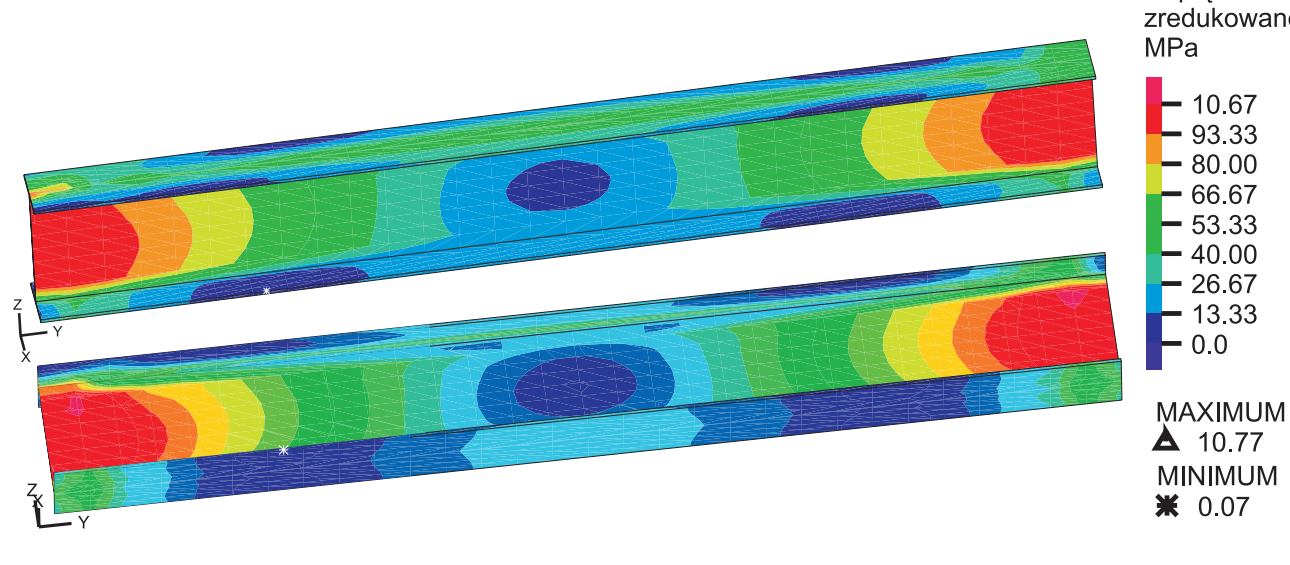
Rys. Rozkład naprężeń zredukowanych struktury panelowej zbudowanej z arkusza blachy, ramek, podłużnic i podpórek, MPa

Fig. Effective stress distribution in panel structure built of sheet metal, frames, stringers and supports, MPa



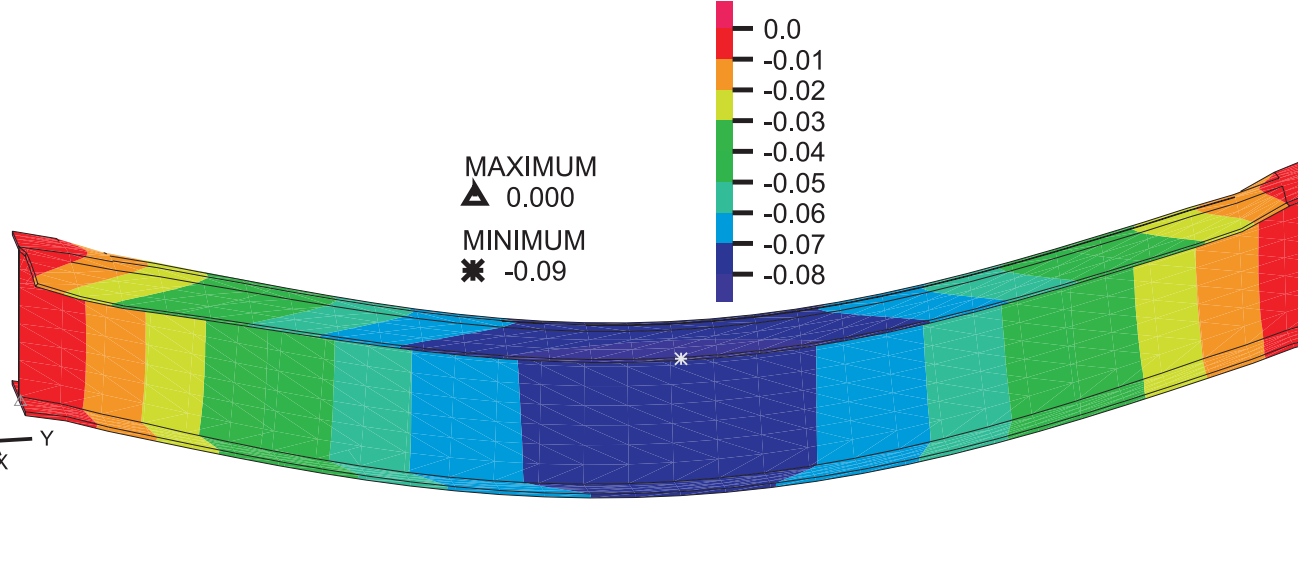
Rys. Rozkład naprężeń zredukowanych struktury panelowej zbudowanej z arkusza blachy, podłużnic i podpórek, MPa

Fig. Effective stress distribution in panel structure built of sheet metal, stringers and supports, MPa



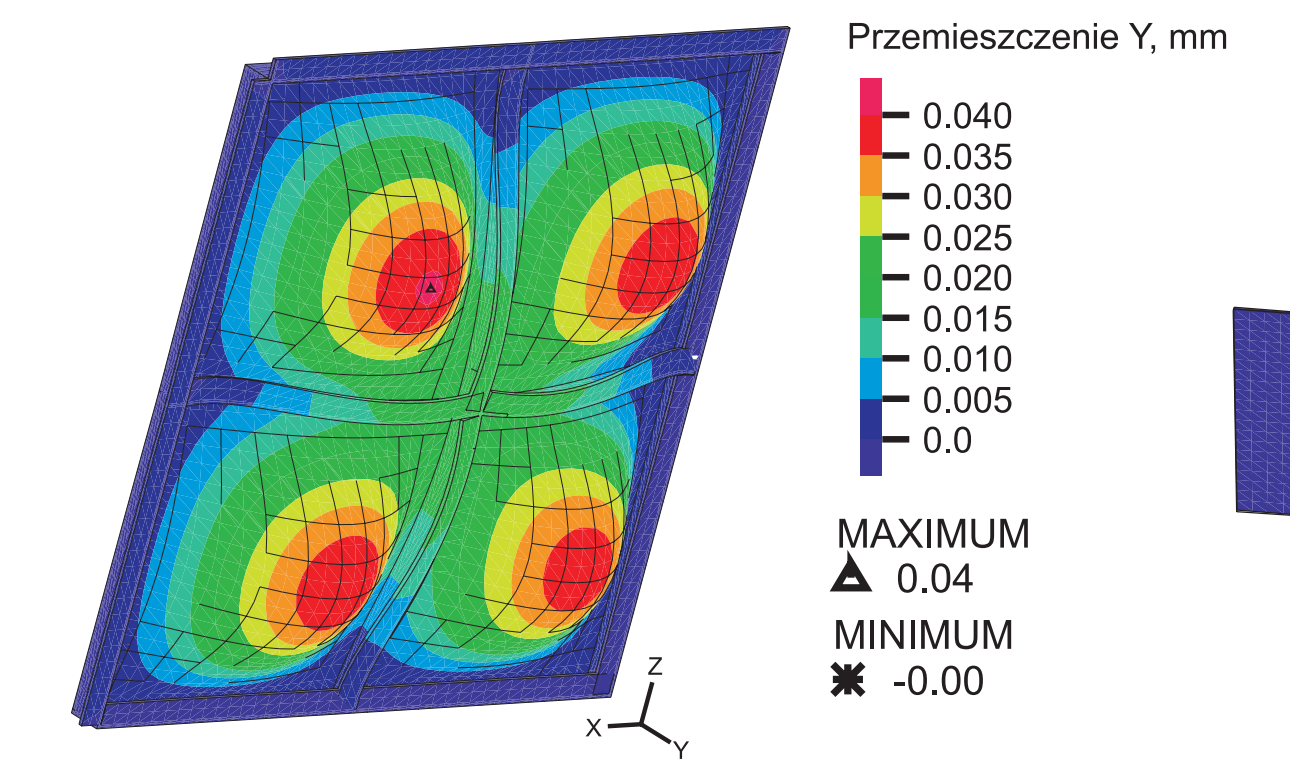
Rys. Rozkład naprężeń zredukowanych w belce, MPa

Fig. Effective stress distribution in the beam, MPa



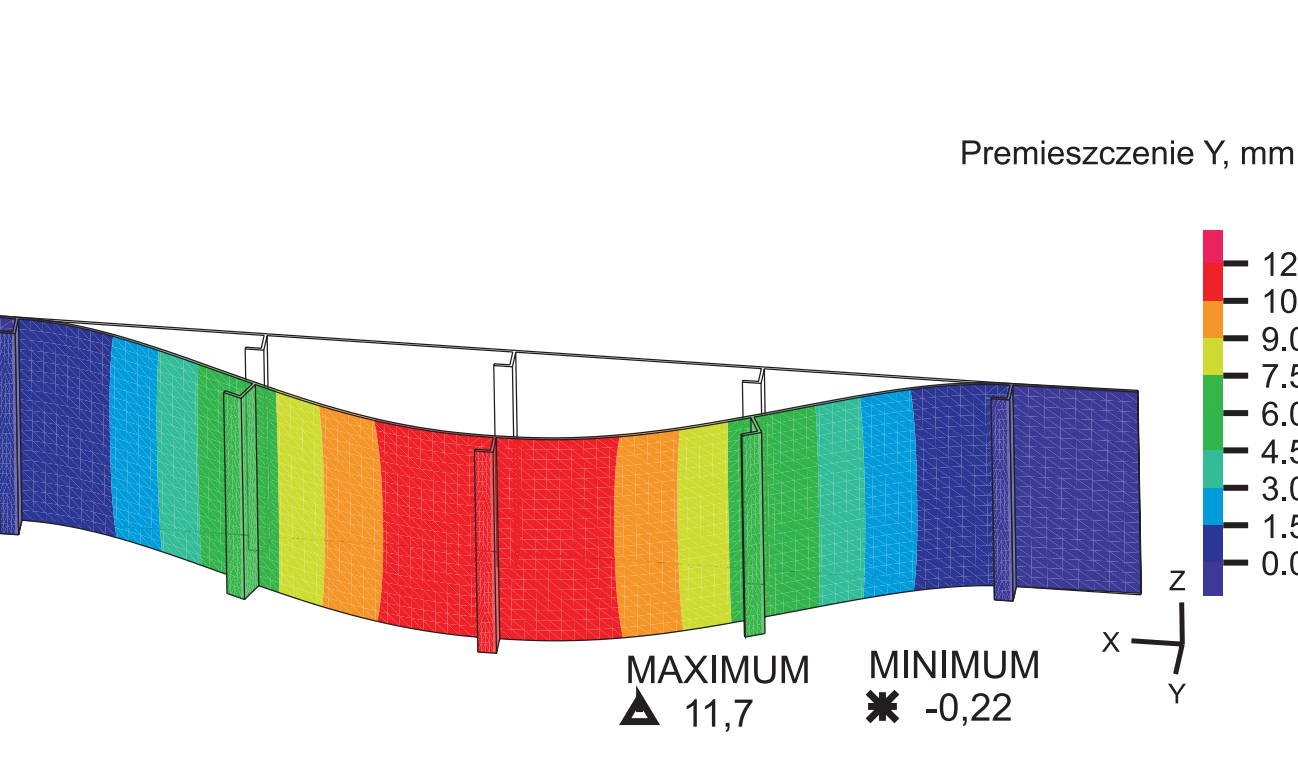
Rys. Przemieszczenie belki względem osi Z, mm

Fig. Distribution of Z-axis displacement in the beam, mm



Rys. Przemieszczenie struktury panelowej zbudowanej z arkusza blachy, ramek, podłużnic i podpórek względem osi Y, mm

Fig. Distribution of Y-axis displacement in panel structure built of sheet metal, frames, stringers and supports, mm



Rys. Przemieszczenie struktury panelowej zbudowanej z arkusza blachy, podłużnic i podpórek względem osi Y, mm

Fig. Distribution of Y-axis displacement in panel structure built of sheet metal, stringers and supports, mm

#### Wnioski Conclusions

Konstrukcje panelowe oraz belkowe można wykonać za pomocą zgrzewania tarczowego z przemieszaniem materiału przy użyciu połączeń T-owych, przy uwzględnieniu geometrii struktur oraz rozmieszczenia zgrzeiny

The panel structures and I-section beams could be made by T-joints using Friction Stir Welding. A suitable construction geometry and location of the joints have to be considered.

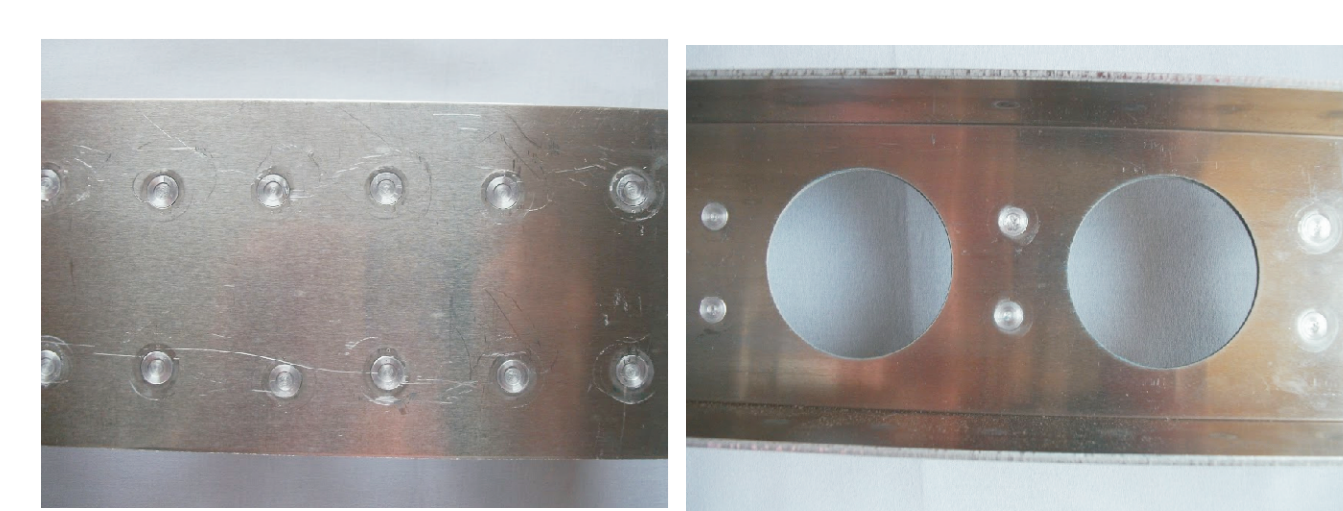
#### Przykłady zastosowania w lotnictwie Examples of application in aviation

Spawanie laserowe łopatek aparatu kierującego sprężarką: połączenie łopatek z wieńcem aparatu na całym obwodzie eliminuje drogi i złożony proces lutowni próżniowego.

Laser welding of blades of compressor stators: junction between blade and stator crown along the whole circumference eliminates expensive and complex vacuum brasig.

Element struktury lotniczej wykonanej przy użyciu technologii punktowego zgrzewania tarczowego z mieszaniem (FSSW).

Part of aircraft structure made by friction stir spot welding (FSSW)



#### Wyniki badań Results

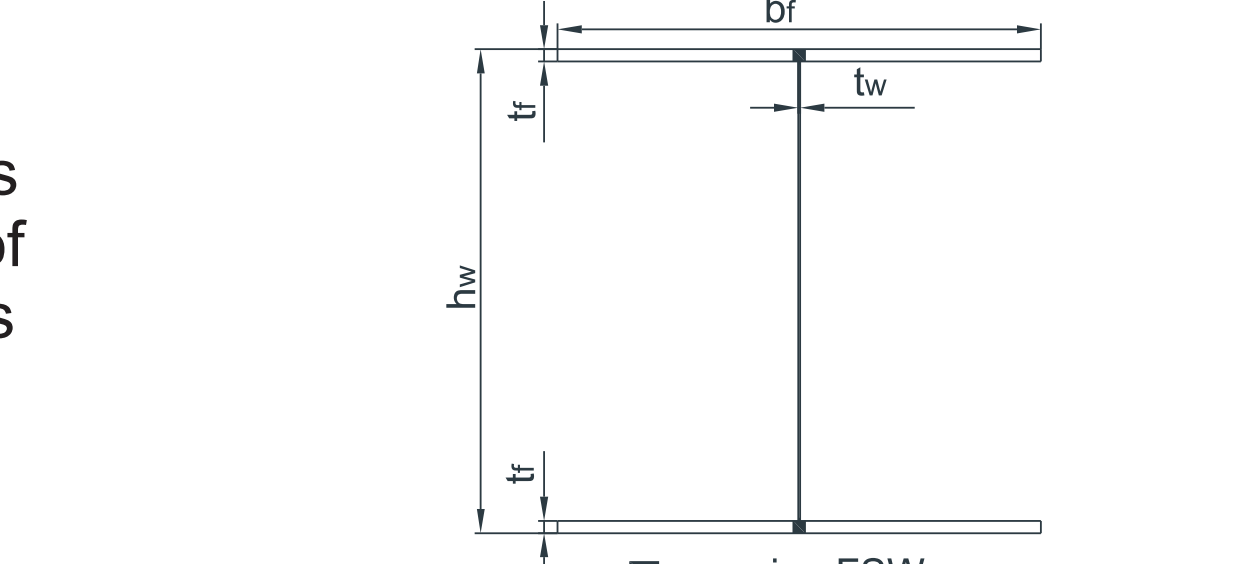
**Opracowanie koncepcji elementu konstrukcji aluminiowej przy użyciu technologii FSW**  
Design of the component of the aluminium structure joined by FSW technology

Celem było uzyskanie informacji o możliwościach zastosowania konstrukcji wykonywanych przy użyciu technologii FSW oraz optymalizacja konstrukcji przy uwzględnieniu czynników decydujących, takich jak wytrzymałość i masa.

Ocenie poddano przekroje belek dwuteowych. Struktury wykonano z blach zgrzanych złączami T-owymi. Analizowano cztery grupy belek, różniących się wymiarami przekroju poprzecznego.

A goal of the work was to obtain the information about application possibilities of the constructions produced by FSW technology, and optimization of the constructions taking into account such factors as: bearing capacity and mass.

I-section beams were analysed. Structures were made of aluminium sheets joined by FSW T-joints. Four groups of beams with different cross-sections were analysed.



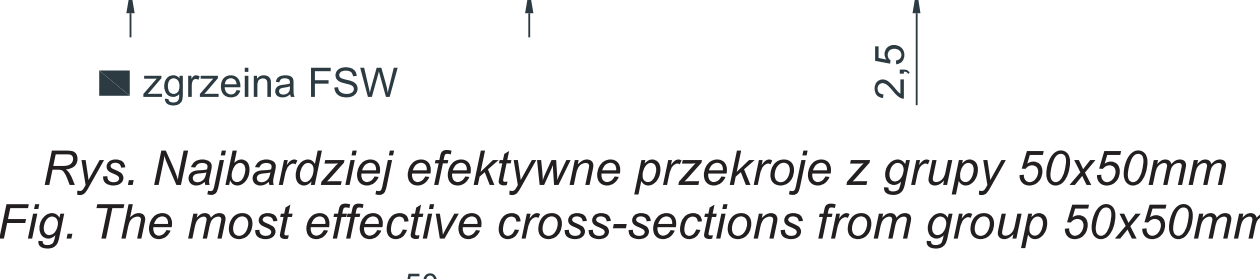
Rys. Oznaczenia wymiarów przekroju belki dwuteowej

Fig. Designation of I-beam cross-sectional dimensions

Tab. Grubość blach dla przekroju 50x50mm

Tab. Thickness of sheets for 50x50mm section

nr	01	02	03	04	05	06	07	08
bf mm	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
h mm	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
tw mm	0,40	0,40	0,40	0,40	0,80	0,80	0,80	0,80
tf mm	0,80	1,00	2,00	2,50	0,80	1,00	2,00	2,50
Jy cm <sup>4</sup>	5,22	6,37	11,85	14,42	5,60	6,74	12,18	14,72
Wy cm <sup>3</sup>	0,21	0,26	0,47	0,58	0,22	0,27	0,48	0,59
A mm <sup>2</sup>	99,36	119,20	218,40	268,00	118,72	138,40	236,80	286,00
WYA	0,2101	0,2138	0,2171	0,2152	0,1888	0,1948	0,2057	0,2099



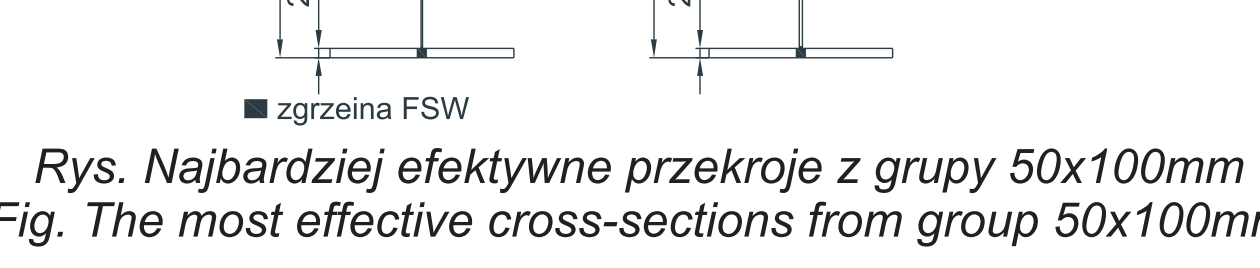
Rys. Najbardziej efektywne przekroje z grupy 50x50mm

Fig. The most effective cross-sections from group 50x50mm

Tab. Grubość dla przekroju 50x100mm

Tab. Thickness of sheets for 50x100mm section

nr	11	12	13	14	15	16	17	18
bf mm	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
h mm	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
tw mm	0,40	0,40	0,40	0,40	0,80	0,80	0,80	0,80
tf mm	0,80	1,00	2,00	2,50	0,80	1,00	2,00	2,50
Jy cm <sup>4</sup>	22,88	27,64	50,98	62,28	26,03	30,78	53,92	65,14
Wy cm <sup>3</sup>	0,48	0,55	1,02	1,25	0,52	0,62	1,08	1,28
A mm <sup>2</sup>	119,38	139,20	238,40	288,00	158,72	178,40	276,80	326,00
WYA	0,3830	0,3971	0,4278	0,4325	0,3280	0,3450	0,3986	0,3996



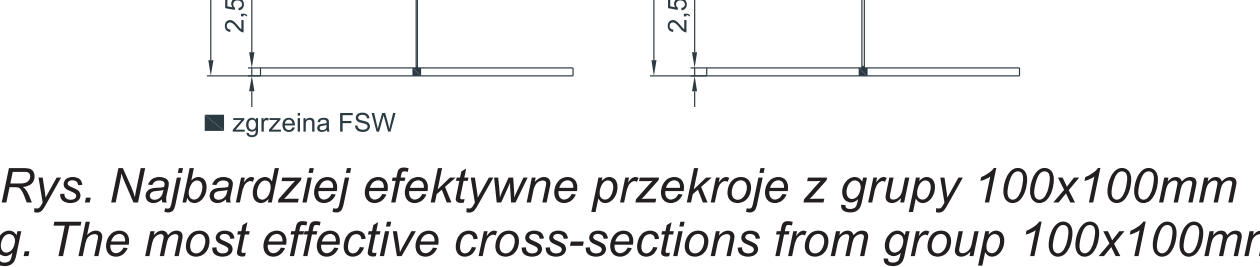
Rys. Najbardziej efektywne przekroje z grupy 50x100mm

Fig. The most effective cross-sections from group 50x100mm

Tab. Grubość blach dla przekroju 100x100mm

Tab. Thickness of sheets for 100x100mm section

nr	21	22	23	24	25	26	27	28
bf mm	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
h mm	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
tw mm	0,40	0,40	0,40	0,40	0,80	0,80	0,80	0,80
tf mm	0,80	1,00	2,00	2,50	0,80	1,00	2,00	2,50
Jy cm <sup>4</sup>	42,54	52,14	99,00	121,71	45,72	55,38	101,95	124,57
Wy cm <sup>3</sup>	0,85	1,04	1,98	2,43	0,91	1,11	2,04	2,48
A mm <sup>2</sup>	199,38	239,20	438,40	538,00	238,72	278,40	476,80	576,00
WYA	0,6268	0,6262	0,6317	0,6252	0,5830	0,5971	0,6278	0,6252



Rys. Najbardziej efektywne przekroje z grupy 100x100mm

Fig. The most effective cross-sections from group 100x100mm

Tab. Grubość blach dla przekroju 100x200mm

Tab. Thickness of sheets for 100x200mm section

nr	31	32	33	34	35	36	37	38
bf mm	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
h mm	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00
tw mm	0,40	0,40	0,40	0,40	0,80	0,80	0,80	0,80
tf mm	0,80	1,00	2,00	2,5				