

# Problemy związane z analizą zachowania się stalowego panelu spawanego laserowo pod obciążeniem ściskającym

## Problems of analysis of axially loaded steel behavior under laser welded panel

JANUSZ KOZAK\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.12.202>

English version available on: [www.mechanik.media.pl](http://www.mechanik.media.pl)

Do praktycznego wdrożenia nowych rozwiązań konstrukcyjnych trzeba dysponować danymi wejściowymi do procesu modelowania zachowania się konstrukcji. Takim nowym elementem jest stalowy, spawany laserowo panel typu sandwich. W pracy przedstawiono wybrane problemy towarzyszące modelowaniu zachowań takiej struktury. Pokazano teoretyczne podstawy wyznaczania sztywności panelu, a następnie omówiono wyniki badań wyboczeniowych serii modeli o zmiennej geometrii.

**SŁOWA KLUCZOWE:** spawanie laserowe, nowy materiał konstrukcyjny, lekkie struktury

*Application of new structural concepts requires obtaining data for modelling processes. Such a new idea is a steel laser welded sandwich panel. The paper presents selected problems concerning to modelling processes of such structure. Theoretical proposals for rigidity coefficients are presented and results of systematic buckling tests of natural scale models are discussed.*

**KEYWORDS:** laser welding, new structural material, light structures

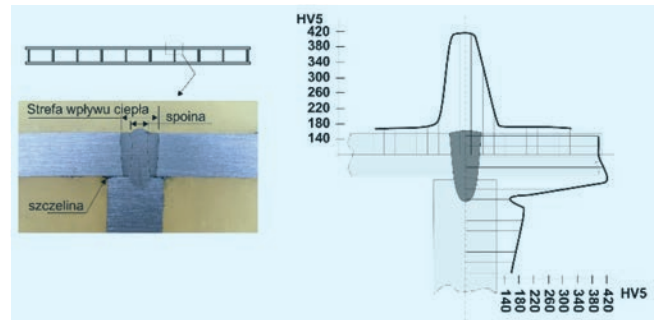
Wśród nowych materiałów konstrukcyjnych są m.in. stalowe panele typu sandwich, spawane laserowo. Można je zdefiniować jako struktury trójwarstwowe, składające się z dwóch cienkich warstw zewnętrznego poszycia z materiału o wysokiej wytrzymałości (decydują one o własnościach wytrzymałościowych), pomiędzy którymi znajduje się grubsza warstwa – zazwyczaj o innych własnościach wytrzymałościowych niż warstwy skrajne. Utrzymuje ona prawidłową geometrię warstw skrajnych, a ponadto kształtuje izolacyjność struktury, odporność akustyczną i termiczną oraz charakterystyki wibracyjne [1].

### Specyfika własności materiałowych spoiny laserowej

Spoiny laserowe stalowych paneli typu sandwich charakteryzują się bardzo dużym gradientem twardości – zarówno w kierunku równoległym, jak i prostopadłym do płaszczyzny panelu (rys. 1). W połączeniu można wyróżnić pięć charakterystycznych stref:

- materiał rodzimy,
- strefę wpływu ciepła,
- spoinę,
- strefę pośrednią między materiałem rodzimym a strefą wpływu ciepła,
- strefę przejściową pomiędzy strefą wpływu ciepła a spoiną.

Wyniki cyklicznych badań zmęczeniowych stalowych paneli typu sandwich przedstawiono na rys. 2.



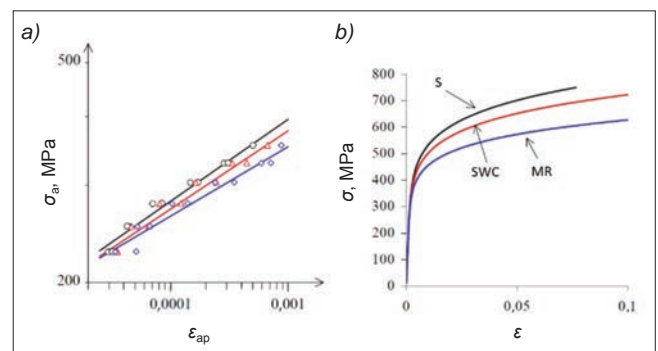
Rys. 1. Strefy materiałowe (po lewej) i zmiany twardości spoiny laserowej (po prawej) [1, 7]

Podczas badań rejestrowano zmiany odkształceń w strefie złącza i na tej podstawie sporządzono krzywe histerezy, umożliwiające wyznaczenie wartości współczynnika umocnienia i wykładnika w równaniu Ramberga-Osgooda:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + K \cdot \left(\frac{\sigma}{E}\right)^n \quad (1)$$

gdzie:  $\varepsilon$  – odkształcenie,  $\sigma$  – naprężenie,  $E$  – moduł Younga,  $K$  – współczynnik umocnienia,  $n$  – wykładnik umocnienia.

Porównując stałe  $K$  i  $n$  dla spoin laserowych łączących blachy o standardowej grubości (12 mm) oraz spoin laserowych stalowych paneli typu sandwich (zob. tablicę na następnej stronie), można stwierdzić, że wykładniki  $n$  mają zbliżone wartości, natomiast współczynnik umocnienia  $K$  jest znacznie większy w przypadku spoin paneli typu sandwich. Współczynniki umocnienia dla materiału rodzimego spoin laserowych łączących blachy 12 mm i blachy poszyc paneli typu sandwich 2,5 mm były bardzo zbliżone. Współczynnik  $K$  strefy materiałowej spoiny laserowej w przypadku blach 12 mm wzrósł o 4%, a w przypadku blach paneli typu sandwich – o 30%.

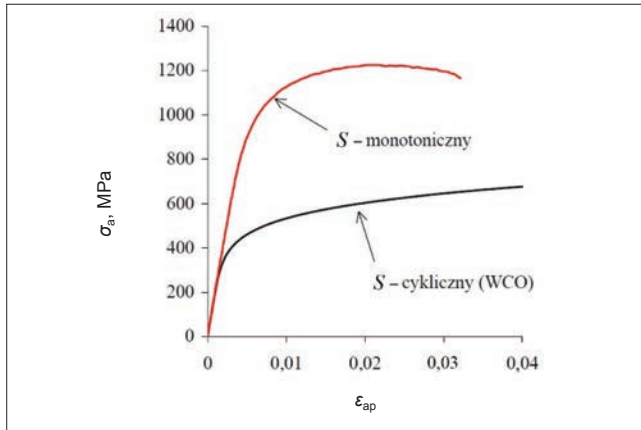


Rys. 2. Wykresy cyklicznego odkształcenia dla stref spoin laserowych: a) w układzie amplituda odkształcenia plastycznego–amplituda naprężenia ( $\varepsilon_{ap}$ – $\sigma_a$ ), b) opisane zależnością Ramberga-Osgooda [2]; oznaczenia: S – spoina, SWC – strefa wpływu ciepła, MR – materiał rodzimy

\* Dr hab. inż. Janusz Kozak, prof. nadzw. (kozak@pg.edu.pl) – Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej

**TABLICA. Cykliczne własności stref materiałowych spoiny laserowej paneli typu sandwich [2]**

Strefa złącza	$n$	$K$ , MPa
Spoina	0,1493	1108
Strefa wpływu ciepła	0,1426	1008
Materiał rodzimy	0,1262	842



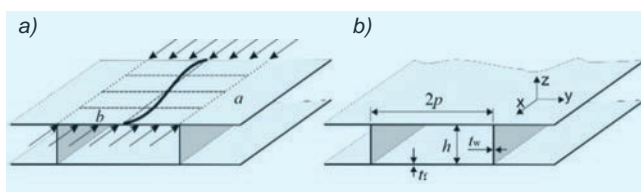
Rys. 3. Wykres monotonicznego rozciągania i cyklicznego odkształcenia dla połączenia laserowego (strefa spoiny) [2]

Podobne zróżnicowanie pokazują wyniki próby rozciągania i cyklicznego odkształcenia (rys. 3).

Można się spodziewać, że omówione cechy spoin w teowych złączach spawanych laserowo (dotyczące zarówno geometrii, jak i charakterystyk odkształceniowych) wpływają na sztywność i własności wytrzymałościowe złącza. Metodyka modelowania własności spoin laserowych stalowych paneli typu sandwich powinna uwzględniać różnorodność materiałową i geometryczną analizowanych złączy. W porównaniu ze spoinami klasycznymi spoiny laserowe wykazują bowiem znacznie większe różnice własności materiałowych między poszczególnymi strefami połączenia.

### Modelowanie odkształceń paneli typu sandwich obciążonych wzdłuż usztywnień

Kolsters i Zenkert [3] przedstawili model teoretyczny wyoboczenia sprężystego panelu z wypełniaczem, obciążonego wzdłuż usztywnień. W rozważaniach przyjmowali różne modele proponowane przez innych autorów, do analizy wybrali zaś model pokazany na rys. 4. W założeniach płytę poszycia pomiędzy dwoma usztywnieniami potraktowali jako prostokątną powłokę na ciągłym podłożu sprężystym, podpartą na nieobciążonych krawędziach.

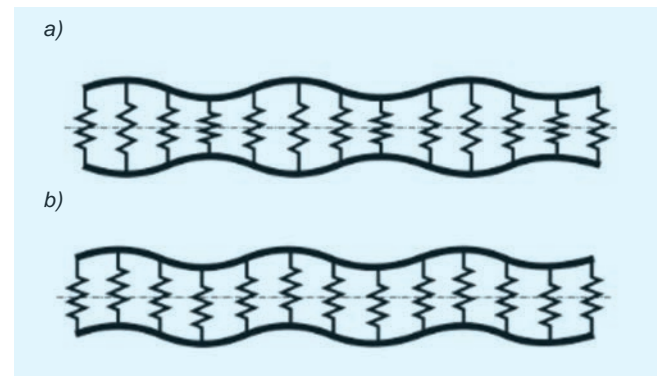


Rys. 4. Wyoboczenie od ściskania w płaszczyźnie poszycia (a) oraz wymiary charakterystyczne (b) panelu spawanego laserowo

Dla takiego obciążenia proponowane podejścia różnią się sposobem modelowania podparcia sprężystego, co z kolei determinuje sposób zamodelowania mechanizmu rozprzodzenia naprężeń porzecznym w wypełniaczu. Szeregując podejścia różnych autorów, można wyróżnić: model Winklera (bez przenoszenia naprężeń tnących),

dwuparametryczny model podparcia Pasternaka (liniowy zanik naprężeń tnących) oraz sprężysty model z rozkładem wykładniczym.

W związku z tym w procesie modelowania ważna jest możliwość oddzielnego modelowania udziału naprężeń rozciągająco-ściskających i tnących oraz rozróżnienia pomiędzy symetrycznym i antysymetrycznym pofalowaniem poszycia (rys. 5).



Rys. 5. Symetryczne (a) i antysymetryczne (b) wyoboczenie (model Winklera)

Podejście zgodne z zaproponowanym przez Winklera skutkuje najprostszym modelem podparcia [4], w którym wypełniacz modeluje się jako tablicę równomiernie rozłożonych sprężyn, powodujących symetryczne wyoboczenie w stosunku do płaszczyzny środkowej (rys. 5). W przypadku antysymetrycznym sprężyny pozostają nieobciążone nawet po wyoboczeniu. Ponieważ odkształcenia stykowe wypełniacza nie są uwzględniane, model Winklera jest nieodpowiedni dla wypełniaczy o wysokim module sprężystości i pofalowaniach poszycia o małej długości fali.

Dla paneli I-core wyrażenia na współczynniki sztywności były rozwijane przez Kolstersa i in. [5]. Tym tematem zajmowali się także Kujala i Klanac [6]. Dla wybranych geometrii panelu bez wypełniacza można wyprowadzić analityczne wyrażenia na składowe współczynniki sztywności.

W przypadku panelu o geometrii typu I-core, zdefiniowanej na rys. 4b, oraz przy założeniu, że  $E_c$ ,  $E_f$ ,  $E_w$  są odpowiednio modułami sprężystości materiału wypełniacza, poszycia i usztywnień, a  $\nu_c$ ,  $\nu_f$ ,  $\nu_w$  – liczbami Poissona materiału wypełniacza, poszycia i usztywnień, sztywność na zginanie w kierunku równoległym do usztywnień wyraża się wzorem [4, 5]:

$$D_x = \frac{E_f \cdot h^2 \cdot t_f}{2} + \frac{E_w \cdot I_{wx}}{2p} \quad (2)$$

gdzie:

$$I_{wx} = \frac{t_w \cdot (h - t_f)^3}{12} \quad (3)$$

Sztywność na zginanie w kierunku poprzecznym do usztywnień wyraża się jako:

$$D_y = \frac{E_f \cdot h^2 \cdot t_f}{2} \quad (4)$$

natomiast sztywność skrętna:

$$D_{xy} = G_f \cdot h^2 \cdot t_f \quad (5)$$

gdzie:

$$G_f = \frac{E_f}{2 \cdot (1 + \nu_f)} \quad (6)$$

Sztywność na ścinanie w kierunku równoległym do usztywnień opisana jest zależnością:

$$D_{qx} = \frac{G_w \cdot h \cdot t_w}{2p} \quad (7)$$

gdzie:

$$G_w = \frac{E_w}{2 \cdot (1 + \nu_w)} \quad (8)$$

Sztywność na ścinanie w kierunku poprzecznym do usztywnień:

$$D_{qy} = \frac{1}{\frac{(p - \frac{t_w}{2})^3}{6E_f I_f p} + \frac{ph}{12E_w I_w} \left[ \left(\frac{t_f}{h}\right)^3 - 3\left(\frac{t_f}{h}\right) + 2 \right]} \quad (9)$$

gdzie:

$$I_f = \frac{t_f^3}{12} \quad (10)$$

$$I_w = \frac{t_w^3}{12} \quad (11)$$

Współczynniki sztywności dla paneli o geometrii I-core z wypełniaczem piankowym podali Kolsters i Zenkert [3]. Dla tego typu paneli wskaźniki sztywności na zginanie  $D_x$ ,  $D_y$  i  $D_{xy}$  są praktycznie takie same jak dla paneli pustych (co pokazano wcześniej).

Sztywność na ścinanie w kierunku równoległym do usztywnień określa się następująco:

$$D_{qx} = \frac{h}{2p} (G_w \cdot t_w + G_c \cdot (2p - t_w)) \quad (12)$$

gdzie:

$$G_c = \frac{E_c}{2 \cdot (1 + \nu_c)} \quad (13)$$

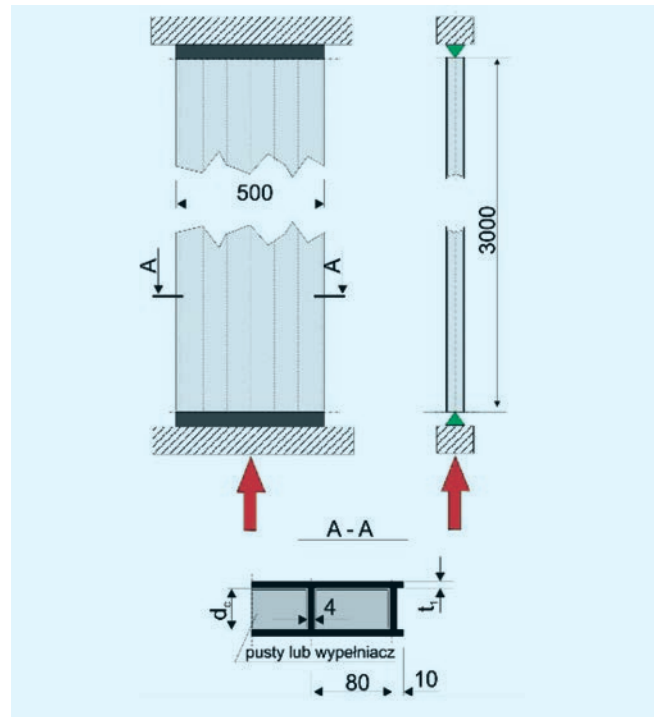
Sztywność na ścinanie w kierunku poprzecznym do usztywnień:

$$D_{qy} = \frac{1}{\frac{(p - \frac{t_w}{2})^3}{6E_f I_f p} + \frac{ph}{12E_w I_w} \left[ \left(\frac{t_f}{h}\right)^3 - 3\left(\frac{t_f}{h}\right) + 2 \right] + \frac{1}{G_c(h - t_f)}} \quad (14)$$

### Badania laboratoryjne dotyczące nośności paneli typu sandwich obciążonych wzdłuż usztywnień

Celem testów wytrzymałości modeli typu sandwich na obciążenie ściskające, działające w płaszczyźnie modelu i przyłożone do krótszych krawędzi, było znalezienie relacji pomiędzy geometrią modeli i parametrami wypełniacza a mechanizmem niszczenia konstrukcji. Badania prowadzono na grupie modeli o różnych kombinacjach geometrii i wysokości usztywnień, grubości płyt poszycia oraz gęstości materiału wypełniającego (rys. 6). W modelach zastosowano stały rozstaw usztywnień równy 80 mm i stałą grubość usztywnień – 4 mm. Jako parametry zmienne przyjęto:

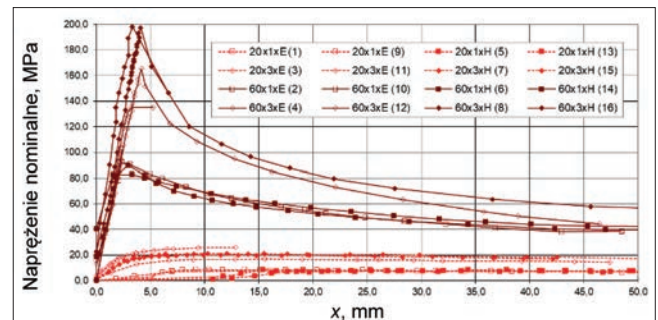
- grubość płyt poszycia  $t_f$  – 1 mm i 3 mm,
- wysokość usztywnień  $h$  – 20 mm i 60 mm,
- wypełnienie: puste (E) i o wysokiej gęstości wypełniacza (H).



Rys. 6. Geometria modeli do badań na ściskanie [7]

### Podsumowanie

Pokazano że poprawne modelowanie własności połączenia spawanego laserowo wymaga starannego uwzględnienia geometrii i cech materiałowych każdej z jego stref. Na przykładzie niszczenia konstrukcji rzeczywistej (rys. 7) widać, że zależnie od geometrii modelu niszczenie przebiega według dwóch odrębnych mechanizmów – wyboczenia bądź globalnego zginania.



Rys. 7. Odształcenie wzdłużne modelu w funkcji naprężenia ściskającego [7]. Przykładowo zapis 20×1×E oznacza: wysokość usztywnienia 20 mm, grubość poszycia 1 mm, E – brak wypełnienia

### LITERATURA

1. Boroński D., Kozak J. "Research on deformations of laser-welded joint of a steel sandwich structure model". *Polish Maritime Research*. 2(40), 11 (2004).
2. Boroński D., Szala J. "Tests of local strains in steel laser-welded sandwich structure". *Polish Maritime Research*. Special issue 2006/S1 (2006).
3. Kolsters, H., Zenkert, D. "Buckling of laser-welded sandwich panels. Part 1: Elastic buckling parallel to the webs". *Journal of Engineering for the Maritime Environment (Part M)*. 220, 2 (2006): s. 69–79.
4. Zenkert D. "An Introduction to Sandwich Construction". Engineering Materials Advisory Services, 1995.
5. Kujala P. "Previous Development and Applications of Laser Welded all Metal Sandwich Panels 2". Helsinki: Internal Report of Sandwich Project, Helsinki University of Technology, Ship Laboratory, 2000.
6. Kujala P., Tuhkuri J. "All steel corrugated core sandwich panels for ship structures". *Paper read at Sandwich Construction Conference*, Southampton, 1995.
7. Kozak J. "Problemy oceny wybranych własności wytrzymałościowych stalowych, dwupowłokowych struktur okrętowych". Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2005.