

**Janusz Kozak**

**STALOWE  
PANELE  
SANDWICZ  
W KONSTRUKCJACH  
OKRĘTOWYCH**

**Gdańsk 2018**

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO  
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

*Janusz T. Cieśliński*

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

*Michał Szydłowski*

RECENZENCI

*Czesław Szymczak*

*Wojciech Tarnowski*

PROJEKT OKŁADKI

*Wioleta Lipska-Kamińska*

Wydano za zgodą  
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem  
<http://pg.edu.pl/wydawnictwo/katalog>  
zamówienia prosimy kierować na adres [wydaw@pg.edu.pl](mailto:wydaw@pg.edu.pl)

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie  
i w jakikolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej  
Gdańsk 2018

ISBN 978-83-7348-742-0

---

## SPIS TREŚCI

Wykaz skrótów i symboli .....	5
1. WSTĘP .....	9
1.1. Zawartość pracy .....	11
1.2. Struktura pracy .....	12
2. PANELE TYPU SANDWICZ – SPECYFIKA KONSTRUKCJI .....	14
2.1. Idea metalowej struktury dwuwarstwowej .....	17
2.2. Wytwarzanie paneli stalowych spawanych laserowo .....	27
2.3. Korzyści i ograniczenia w stosowaniu paneli w konstrukcji statków .....	31
2.3.1. Zalety konstrukcji panelowej .....	31
2.3.2. Wady konstrukcji panelowych .....	35
2.3.3. Możliwości stosowania paneli .....	36
3. WYBRANE PROBLEMY W MODELOWANIU CECH KONSTRUKCYJNYCH ZŁĄCZA SPAWANEGO LASEROWO .....	37
3.1. Specyfika cech geometrycznych spoin laserowych .....	37
3.1.1. Złącza doczołowe .....	38
3.1.2. Połączenia teowe .....	41
3.2. Geometria i cechy sztywności złącza teowego spawanego laserowo .....	42
3.3. Modelowanie cech materiałowych w obliczeniach numerycznych .....	48
3.4. Własności materiałowe stref spoiny laserowej .....	53
4. WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYK SZTYWNOŚCI ZGINANEGO PANELU SANDWICZ .....	60
4.1. Obliczanie odpowiedzi sprężystej na podstawie kryteriów wytrzymałościowych .....	63
4.2. Wskaźniki sztywności panelu typu I-core .....	65
5. WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYK SZTYWNOŚCI PANELU SANDWICZ PRZY OBCIĄŻENIU SIŁAMI ŚCISKAJĄCYMI .....	68
5.1. Ściskanie panelu w kierunku równoległym do usztywnień .....	69
5.2. Ściskanie panelu w kierunku prostopadłym do usztywnień .....	74
6. ANALIZA SPOSOBU DEFORMACJI ZŁĄCZA TEOWEGO PANELU TYPU SANDWICZ .....	78
6.1. Wyznaczanie współczynnika koncentracji geometrycznej $k_t$ w analizie numerycznej .....	78
6.2. Przykład modelowania karbu w złączu teowym panelu sandwicz .....	82
6.2.1. Wpływ gęstości siatki na wartości naprężeń w rejonie karbu .....	83
6.2.2. Wpływ promienia zaokrąglenia karbu $\rho_f$ na współczynnik koncentracji $k_t$ .....	85
6.3. Własności zmęczeniowe spoin laserowych stalowych paneli typu sandwicz .....	88
6.3.1. Trwałości zmęczeniowe złącza teowego obciążonego w płaszczyźnie poszycia .....	90
6.3.2. Wpływ zmian własności materiału spoiny na trwałość zmęczeniową .....	94

---

7. BADANIA NA ZGINANIE PANELI W SKALI NATURALNEJ .....	96
7.1. Założenia do badań .....	96
7.2. Modele badawcze .....	98
7.3. Program badań .....	102
7.4. Pomiary w trakcie badań i rejestracja danych .....	105
7.5. Wyniki badań pod obciążeniem statycznym .....	108
7.6. Analiza wyników badań .....	111
8. BADANIA W SKALI NATURALNEJ PANELI SANDWICZ DLA ŚCISKANIA OSIOWEGO .....	114
8.1. Cel i program badań .....	114
8.2. Modele badawcze .....	114
8.3. Program badań .....	116
8.4. Dyskusja mechanizmów niszczenia .....	119
9. POŁĄCZENIA KONSTRUKCJI TYPU SANDWICZ .....	123
9.1. Problemy łączenia konstrukcji panelowej .....	123
9.2. Badania zmęczeniowe próbek połączeń paneli sandwich w skali naturalnej .....	125
9.3. Badania połączeń paneli sandwich w skali naturalnej .....	128
9.4. Określenie koncentracji geometrycznej dla wybranych połączeń paneli sandwich .....	132
9.4.1. Przykład wyznaczenia współczynnika koncentracji geometrycznej $k_g$ dla połączenia poprzez nakładki .....	134
9.4.2. Przykład wyznaczenia współczynnika koncentracji geometrycznej $k_g$ dla połączenia za pomocą profilu kwadratowego .....	137
10. ZAMIAST PODSUMOWANIA: PROBLEMY ZASTOSOWANIA PANELI TYPU SANDWICZ W KONSTRUKCJI WYTRZYMAŁOŚCIOWEJ STATKU .....	140
BIBLIOGRAFIA .....	144

---

## WYKAZ SYMBOLI I SKRÓTÓW

### Symbole

$\gamma_{xz}, \gamma_{yz}$	– kąty skręcenia przekroju odpowiednio w płaszczyźnie $xz$ i $yz$
$\varepsilon$	– odkształcenie [-]
$\bar{\varepsilon}$	– odkształcenie zredukowane [-],
$\varepsilon_{sp}$	– sprężysta część odkształcenia [-]
$\varepsilon_U$	– odkształcenia na kierunek osi $U$ [-]
$\varepsilon_V$	– odkształcenia na kierunek osi $V$ [-]
$\varepsilon_{epl}$	– ekwiwalentne odkształcenie plastyczne [-]
$\varepsilon_{1pl}, \varepsilon_{2pl}, \varepsilon_{3pl}$	– główne składowe plastyczne tensora odkształceń [-]
$\bar{\varepsilon}_0^{pl}$	– odkształcenie plastyczne zredukowane dla początku procesu degradacji [-]
$\bar{\varepsilon}_f^{pl}$	– odkształcenie plastyczne zredukowane w momencie zerwania [-]
$\eta$	– współczynnik trójosiowości naprężeń (ang. <i>triaxiality</i> ) [-]
$\lambda$	– długość fali [m]
$\nu_c, \nu_f, \nu_w$	– liczba Poissona dla materiału wypełniacza, poszycia i usztywnień panelu sandwich [-]
$\rho_f, \rho_r$	– fikcyjny i rzeczywisty promień karbu [m]
$\rho^*$	– zastępcza mikrostrukturalna długość podparcia w karbie [m]
$\sigma_{max}, \sigma_{min}, \sigma_a$	– naprężenie maksymalne, minimalne i amplituda naprężenia w cyklu obciążenia [MPa]
$\Delta\sigma$	– zakres zmian naprężenia w cyklu [MPa]
$\sigma_k$	– naprężenie w karbie [MPa]
$\sigma_{max}, \varepsilon_{max}$	– naprężenie i odkształcenie maksymalne (w dnie karbu) [MPa]
$\sigma_n, \varepsilon_n$	– naprężenie i odkształcenie nominalne (poza karbem) [MPa]
$\sigma$	– naprężenie [MPa]
$\sigma_0$	– granica plastyczności [MPa]
$\sigma_{eq}$	– rzeczywiste naprężenia zredukowane [MPa]
$\sigma_{Y0}$	– maksimum naprężeń na krzywej rozciągania [MPa]
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	– naprężenia główne [MPa]
$\sigma_{kr}$	– naprężenia krytyczne wyoboczenia [MPa]
$\sigma_{max}, \sigma_{min}, \sigma_a$	– naprężenie maksymalne, minimalne i amplituda naprężenia w cyklu obciążenia zmęczeniowego [MPa]
$2p$	– odstęp usztywnień panelu [m]
$A_5$	– wydłużenie przy zerwaniu [%]
$D$	– stopień zniszczenia materiału [-]
$d_c$	– gęstość wypełniacza panelu sandwich [kg/m <sup>3</sup> ]
$D_{qx}, D_{qy}$	– współczynniki sztywności panelu sandwich na poprzeczne ścinanie względem osi $x$ i $y$ – odpowiednio [MPa·m <sup>4</sup> ]
$D_x, D_y$	– współczynniki sztywności panelu sandwich na zginanie względem osi $x$ i $y$ – odpowiednio [MPa·m <sup>4</sup> ]
$D_{xy}$	– współczynniki sztywności panelu sandwich na skręcanie [MPa·m <sup>4</sup> ]
$E$	– moduł odkształcalności liniowej albo moduł sprężystości podłużnej (Younga) – stała materiałowa [MPa]

$E_c, E_f, E_w$	– moduł sprężystości podłużnej materiału wypełniacza, poszycia i usztywnień panelu sandwich [MPa]
$f$	– częstotliwość zmian obciążenia [Hz]
$f_w$	– współczynnik podparcia [–]
$G_c$	– moduł odkształcalności postaciowej albo moduł sprężystości poprzecznej (Kirchhoffa) wypełniacza – stała materiałowa [MPa]
$h$	– odległość środków ciężkości płyt poszycia panelu (kierunek z) [m]
$h_w$	– wysokość usztywnienia panelu [m]
HV	– jednostki twardości w metodzie Vickersa [–]
$J_x$	– moment bezwładności przekroju zginanego [m <sup>4</sup> ]
$k$	– współczynnik wybożenia (zależny od definicji podparcia) [–]
$k_f$	– efektywny współczynnik koncentracji naprężeń [–]
$k_{f\_exp}$	– eksperymentalny (rzeczywisty) efektywny współczynnik koncentracji naprężeń wg koncepcji naprężeń lokalnych w karbie [–]
$k_{f\_obl}$	– obliczeniowy efektywny współczynnik koncentracji naprężeń wg koncepcji naprężeń lokalnych w karbie [–]
$k_g$	– geometryczny współczynnik koncentracji naprężeń w złączu [–]
$k_t$	– geometryczny (teoretyczny) współczynnik koncentracji naprężeń
$K$	– współczynnik umocnienia w zależności Ramberga-Osgooda [–]
$l$	– długość boku siatki elementu skończonego [m]
$m$	– współczynnik nachylenia krzywej $\sigma-N$ [–]
$n$	– wykładnik umocnienia plastycznego w zależności Ramberga-Osgooda [–]
$N$	– liczba cykli obciążenia [–]
$N_c$	– całkowita liczba cykli obciążenia do zniszczenia [–]
$N_i$	– liczba cykli obciążenia do inicjacji pęknięcia [–]
$p$	– ciśnienie hydrostatyczne w materiale [MPa]
$q$	– naprężenia zredukowane [MPa]
$R$	– współczynnik asymetrii obciążenia zmęczeniowego (stosunek naprężeń minimalnych do maksymalnych w cyklu obciążenia) [–]
Re	– granica plastyczności [MPa]
$R_{eH}$	– górna wartość granicy plastyczności [MPa]
Rm	– granica wytrzymałości na rozciąganie [MPa]
$R_{p0,2}$	– umowna granica plastyczności [MPa]
$s$	– współczynnik redukcyjny przy wyznaczaniu zastępczego promienia karbu [–]
$t_f, t_w$	– grubość płyty poszycia i usztywnienia panelu [m]
$W_x$	– wskaźnik wytrzymałości przekroju zginanego [m <sup>3</sup> ]

## Skróty

3D	– przestrzeń trójwymiarowa
ANSYS	– rodzina programów do obliczeń metodą elementów skończonych (MES)
CEV	– równoważnik węgla (ang. <i>Carbon Equivalence</i> )
GMAW	– metoda spawania łukowego w osłonie gazowej (ang. <i>Gas Metal Arc Welding</i> )
GTA	– metoda spawania elektrodą nietopliwą w osłonie gazów aktywnych (ang. <i>Gas Tungsten Active</i> )
I-core	– określenie panelu sandwich o usztywnieniach wykonanych z płaskownika
IIW	– International Institute of Welding – organizacja zajmująca się tematyką spawalnictwa
LES	– metoda pomiaru odkształceń (Laserowa Ekstensometria Siatkowa)
MAG	– metoda spawania łukiem elektrycznym w osłonie gazu aktywnego (ang. <i>Metal Active Gas</i> )
MES	– Metoda Elementów Skończonych, numeryczna metoda obliczeniowa
MIG	– metoda spawania łukiem elektrycznym w osłonie gazu obojętnego (ang. <i>Metal Inert Gas</i> )

---

MMA	– metoda spawania ręcznego elektrodą otuloną (ang. <i>Manual Metal Arc</i> )
MR	– materiał rodzimy
NASA	– Narodowa Agencja Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej (ang. <i>National Aeronautics and Space Administration</i> )
PE	– polietylen
PU	– poliuretan
PVC	– polichlorek winylu
Ro-Ro	– oznaczenie statku o poziomym systemie przeładunku (ang. <i>Roll On-Roll Off</i> )
SAW	– metoda spawania łukiem krytym pod topnikiem (ang. <i>Submerged Arc Welding</i> )
SCS	– rodzaj panelu sandwich z wypełniaczem betonowym (ang. <i>Steel Concrete Steel</i> )
SPS	– rodzaj panelu sandwich z wypełniaczem elastomerowym (ang. <i>Sandwich Plate System</i> )
USS	– oznaczenie okrętu wojennego marynarki Stanów Zjednoczonych (ang. <i>United States Ship</i> )
V-core	– określenie panelu sandwich o usztywnieniach wykonanych z profili falistych