

# OPTIMALIZACJA WYTRZYMAŁOŚCI POŁĄCZEŃ KLEJOWO-NITOWYCH

## Strength optimization of adhesive-rivet joints

Adrianna ADAMECZEK, Jan GODZIMIRSKI

**Streszczenie:** Połączenia nitowe dominują w budowie metalowych struktur lotniczych. Klejenie wykorzystywane jest w połączeniach hybrydowych klejowo-nitowych w celu zwiększenia trwałości zmęczeniowej połączeń nitowych lub ich uszczelnienia. Przeprowadzono badania eksperymentalne i obliczenia numeryczne w celu sprawdzenia w jakim stopniu rozmieszczenie nitów w hybrydowym połączeniu klejowo-nitowym wpływa na wytrzymałość doraźną i trwałość zmęczeniową takich połączeń. Badania wykazały większą trwałość zmęczeniową (niemal pięciokrotną) połączeń hybrydowych z nitami zbliżonymi do krawędzi połączenia w stosunku do próbek hybrydowych, w których nity rozmieszczone były zgodnie z zasadami wykonywania połączeń nitowych. Przeprowadzone badania wskazują na potrzebę takiego rozmieszczenia nitów w połączeniach hybrydowych klejowo-nitowych, aby występowało jednoczesne niszczenie obu połączeń.

**Słowa kluczowe:** połączenia klejowo-nitowe, wytrzymałość, trwałość zmęczeniowa, obliczenia numeryczne

**Abstract:** The riveted bonds are mainly used to join aircraft parts. Adhesives are used in hybrid rivet-adhesive joints to increase fatigue life or to seal the bonds. The researches were done to check what rivets layout determine strength and fatigue life of hybrid joints. Experimental tests and numerical calculations were made. The researches proved higher fatigue life (about five times) of hybrid joints with rivets situated close of specimen edges – closer than in typical rivet joints. The rivets should be so situated in hybrid joints to obtain failure both adhesive layer and rivets at the same time.

**Key words:** adhesive-rivet joints, strength, fatigue life, numerical calculation

### Wprowadzenie

W budowie płatowców współczesnych statków powietrznych stosowane są przede wszystkim połączenia: nitowe, spawane i klejowe. Połączenia nitowe dominują przy łączeniu struktur wytwarzanych z wysokowytrzymałych stopów aluminium (durali), które są stopami praktycznie niespawalnymi. Spawanie wykorzystywane jest przy wytwarzaniu stalowych elementów podwozia, elementów instalacji hydraulicznych i pneumatycznych oraz wytwarzaniu części blaszanych ze spawalnych stopów aluminium. Klejenie wykorzystywane jest przy wytwarzaniu struktur przekładkowych oraz w połączeniach hybrydowych klejowo-nitowych, głównie w celu zwiększania trwałości zmęczeniowej połączeń nitowych lub ich uszczelnienia [4]. Z publikacji dotyczących badań połączeń klejowo-mechanicznych [2, 3, 4] wynika, że nie zawsze spoina wzmacnia połączenie mechaniczne, co można tłumaczyć sekwencyjnym niszczeniem połączenia hybrydowego – wcześniejszym niszczeniem spoiny klejowej.

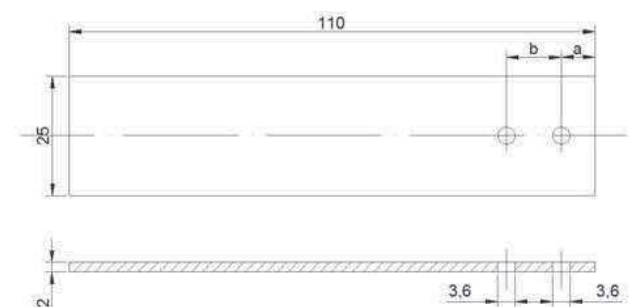
Celem prowadzonych badań było sprawdzenie w jakim stopniu rozmieszczenie nitów w hybrydowym połączeniu klejowo-nitowym wpływa na wytrzymałość doraźną i trwałość zmęczeniową takich połączeń.

### Badania wytrzymałościowe

#### Trwałość doraźna

Badania polegały na zbadaniu wytrzymałości połączeń jednozakładowych przez doświadczalny pomiar wytrzymałości wytworzonych serii próbek wykonanych ze

stopu aluminium AW 2024T3, połączonych za pomocą klejenia, nitowania oraz klejenia i nitowania. Łączonymi elementami próbek były prostopadłościennymi wykroje z blachy o grubości 2 mm i wymiarach 25×110 mm lub 20×75 mm. Nity stosowane w badaniach były nitami zwykłymi, z łbem trapezowym o średnicy trzonu 3,5 mm i długości 8 mm, których wytrzymałość na ścinanie, określona w trakcie badań wytrzymałościowych, wynosiła ok.  $R_t = 300$  MPa. Do klejenia stosowano klej Epidian57/Z1, utwardzany dwustopniowo – dobowo w temperaturze ok. 18°C i 5 godz. w temperaturze 80°C. Jedną partię próbek sklejono tworzywem adhezyjnym o małej sztywności – uszczelniaczem Raychem. Powierzchnie blach przygotowywano do klejenia metodą piaskowania i przemywania benzyną ekstrakcyjną. Wyłytki kleju usuwano za pomocą brzeszczotu do ciecienia metali i płótna ściernego. Długość zakładki we wszystkich połączeniach była podobna ok. 24,5 mm, a wynikała z zasad rozmieszczania nitów (rys. 1).



Rys. 1. Rozmieszczenie otworów pod nity  $a = 2d = 7$  mm,  $b = 3d = 10,5$  mm

Fig. 1. Rivet holes layout  $a = 2d = 7$  mm,  $b = 3d = 10,5$  mm

Tabela 1. Wartości sił niszczących badane połączenia  
Table 1. Failure forces tested joints

Rodzaj połączenia	Wartość siły niszczącej [kN]
Klejowe c = 25 mm	5,77±0,54
Klejowe c = 20 mm	4,90±0,22
Nitowe c = 20 mm	6,20±0,20
Klejowo-nitowe a = 3,5; c=25	9,48±0,78
Klejowo-nitowe a = 4; c=25	8,41±0,91
Klejowo-nitowe a = 4,5; c=25	9,38±0,66
Klejowo-nitowe a = 7; c=25	6,78±0,61
Klejowo-nitowe a = 7; c=20	6,37 (6,39; 6,51; 6,22)
Klejowo-nitowe a = 4; c=20	8,91 (8,69; 9,07; 8,97)
Klejowo-nitowe a = 7; c=20 Raychem	6,69 (6,71; 6,74; 6,62)



Rys. 2. Krzywe rozciągania próbek z połączeniem hybrydowym: a = 7 mm, c = 20 mm  
Fig. 2. Load-displacement curves for hybrid bonded specimens a = 7 mm, c = 20 mm

W próbkach hybrydowych zmieniano rozstaw nitów – ich odległość od krawędzi łączonych elementów (a = 7; 4,5; 4 i 3,5 mm), nie zmieniając długości zakładki. Badania wytrzymałościowe polegały na rozciąganiu próbek z prędkością 2 mm/min w maszynie wytrzymałościowej Hung Ta HT-2402. Wyniki badań wytrzymałości doraźnej badanych połączeń zestawiono w tab. 1.

Wytrzymałość połączeń klejowych była proporcjonalna do szerokości klejonych elementów (jeśli uwzględnia się przedziały ufności). Próbki hybrydowe, w których nity rozstawione były zgodnie z wymaganiami dotyczącymi połączeń nitowych, cechowała wytrzymałość porównywalna z wytrzymałością połączeń nitowych. Wynikało to z tego, że najpierw następowało zniszczenie spoiny

klejowej (uskok na krzywej rozciągania – rys. 2) a następnie połączenia nitowego. Zbliżenie nitów do krawędzi łączonych elementów powodowało jednoczesne niszczenie spoin i nitów (rys. 3), co skutkowało wzrostem wytrzymałości doraźnej połączeń hybrydowych w stosunku do nitowych o 40%.

#### Trwałość zmęczeniowa (w cyklu rozciągania odzerowo-tętniętego)

W pierwszym etapie badań porównano trwałość zmęczeniową próbek o szerokości c = 20 mm: nitowanych i hybrydowych, w których nity umieszczone były w odległości 4 mm od krawędzi łączonych elementów.



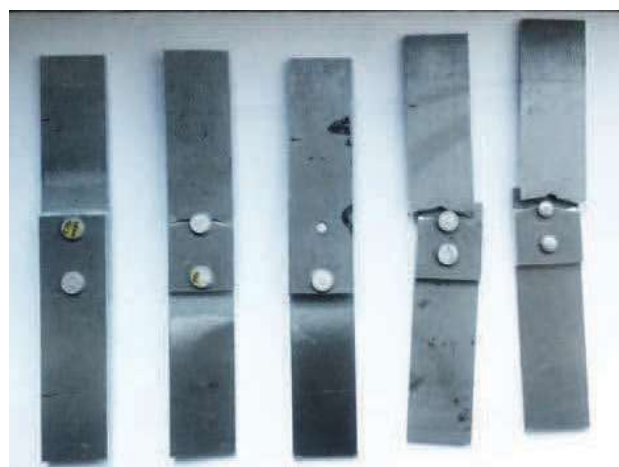
Rys. 3. Krzywe rozciągania próbek z połączeniem hybrydowym: a = 4 mm, c = 20 mm  
 Fig. 3. Load-displacement curves for hybrid bonded specimens a = 4 mm, c = 20 mm

Próbki obciążano cyklami odzerowotętniającymi, a zasadniczo tętniającymi o małej wartości obciążenia minimalnego równego 200 N. Wyniki badań przedstawiono w tab. 2.

Tabela 2. Wyniki badań zmęczeniowych próbek o szerokości c = 20 mm  
 Table 2. Results of fatigue tests of specimens with width c = 20 mm

Próbki nitowane			
Nr próbki	Obciążenie [N]	Liczba cykli	Rodzaj zniszczenia
1	200–3200	135 000	Pęknięcie blachy
	200–4200	30 700	
2	200–4200	82 500	Pęknięcie blachy
3	200–5200	28 356	Pęknięcie blachy
Próbki klejowo-nitowe			
1.	200–4200	160 000	Nie uległa zniszczeniu
2	200–5200	20 420	Pęknięcie blachy
3	200–5200	27 719	Ścięcie jednego nitu, oderwanie zakawki drugiego

Celem wyeliminowania pęknięcia blach podczas badań zmęczeniowych i sprawdzenia czy odległość nitów od krawędzi blachy zwiększa istotnie trwałość zmęczeniową przeprowadzono dodatkowe badania. Badaniom



Rys. 4. Sposób niszczenia próbek o grubości c = 2 mm  
 Fig. 4. Failure modes of specimens with c = 2 mm

poddano dwa rodzaje próbek – z połączeniami hybrydowymi i klejone klejem Epidian 57, w których odległość nitów od krawędzi blachy wynosiła 7 mm lub 4 mm. Blachy użyte do tych badań miały wymiary 110 × 25 × 2 mm. Próbki poddano cyklom odzerowotętniającym o wartości maksymalnej 5200 N. Wyniki badań wraz z opisem zniszczenia umieszczono w tab. 3.

Badania wykazały co najmniej pięciokrotny wzrost trwałości zmęczeniowej próbek klejowo-nitowych ze zmodyfikowanym rozstawem nitów w porównaniu z nitowymi, obciążanymi w zakresie do 4200 N. Zniszczenie połączeń polegało głównie na pękaniu łączonych blach



Tabela 3. Wyniki porównawczych badań zmęczeniowych połączeń hybrydowych z różnym rozstawem nitów (szerokość próbek  $c = 25$  mm)

Table 3. Comparative results of fatigue tests of hybrid joints with different rivets layout (specimens width  $c = 25$  mm)

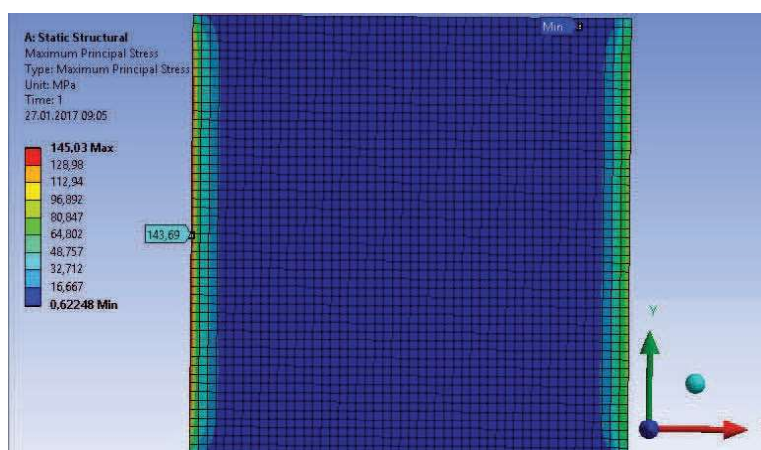
Nr próbki	Obciążenie, N	Liczba cykli	Rodzaj zniszczenia
Próbki klejowo-nitowe $a = 7$ mm			
1	200–5200	10 437	Ścięcie nitów
2	200–5200	25 483	Ścięcie nitów
Próbki klejowo-nitowe $a = 4$ mm			
3	200–5200	92 700	Pęknięcie blach
4	200–5200	147 000	Pęknięcie blach

spowodowanym ich zginaniem. Zwiększenie szerokości próbek wyeliminowało pęknięcie blach w wypadku nitów oddalonych od krawędzi o 7 mm oraz wykazało znacznie większą trwałość zmęczeniową próbek hybrydowych z nitami odległymi o 4 mm od krawędzi połączenia

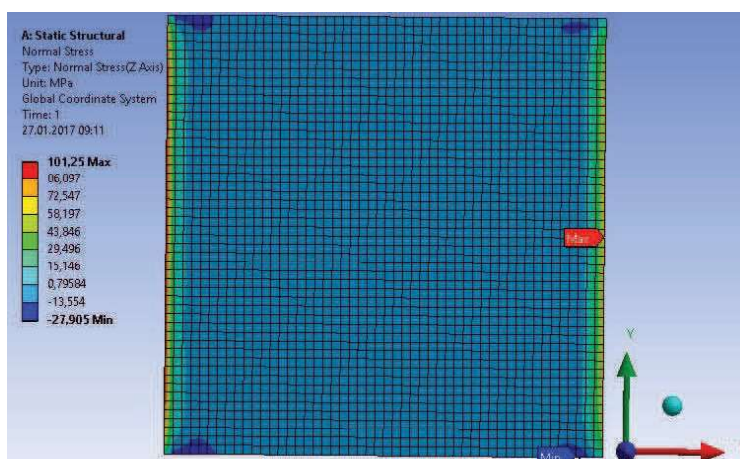
w stosunku do próbek hybrydowych, w których nity rozmieszczone były zgodnie z zasadami wykonywania połączeń nitowych.

### Analiza numeryczna

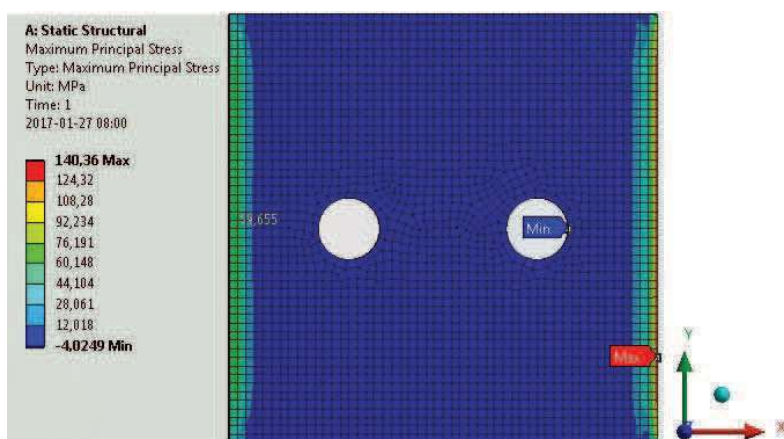
Obliczenia numeryczne wykorzystywane są powszechnie do analizy naprężeń w różnego typu połączeniach, w tym również klejowych i hybrydowych [1, 3, 5, 6]. W programie ANSYS zamodelowano zakładkowe połączenia: klejowe i klejowo-nitowe z dwoma nitami  $d = 4$  mm, odsuniętymi od krawędzi połączenia o 8 lub 4 mm. Połączenia składały się z dwóch płytek ze stopu aluminium o grubości 2 mm, szerokości 25 mm i długości zakładki  $l = 24,5$  mm (rys. 5). Zadeklarowano moduł sprężystości wzdłużnej kleju  $E_k = 2000$  MPa i blach ze stopu aluminium  $E_{Al} = 72000$  MPa oraz odpowiednio współczynniki Poissona  $\nu_k = 0,35$  i  $\nu_{Al} = 0,3$ . W modelach obliczeniowych próbek stosowano kontakty: bonded (między spoiną i blachami), no separation (między trzonem nitu i otworem) oraz friction (między łbami nitów i blachami). Połączenia obciążono jednakową siłą 5000 N i obliczono naprężenia w spoinach (rys. 5-8).



Rys. 5. Naprężenia maksymalne główne w spoinie klejowej połączenia zakładkowego  
Fig. 5. Distribution of maximum principal stress in adhesive layer of lap joint

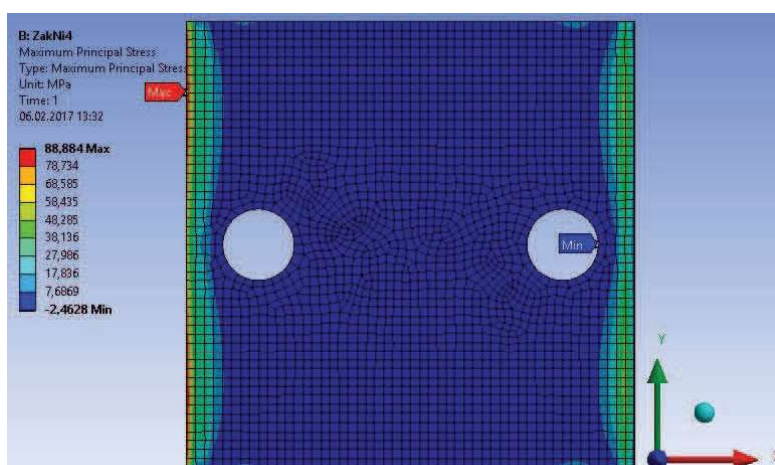


Rys. 6. Naprężenia normalne prostopadłe do powierzchni spoiny połączenia zakładkowego  
Fig. 6. Distribution of normal stress perpendicular to adhesive layer in adhesive of lap joint



Rys. 7. Naprężenia maksymalne główne w spoinie klejowej połączenia zakładkowego hybrydowego (nity oddalone od krawędzi blach o 8 mm)

Fig. 7. Distribution of maximum principal stress in adhesive layer of hybrid lap joint (rivets remote 8 mm from specimen edge)



Rys. 8. Naprężenia maksymalne główne w spoinie klejowej połączenia zakładkowego hybrydowego (nity oddalone od krawędzi blach o 4 mm)

Fig. 8. Distribution of maximum principal stress in adhesive layer of hybrid lap joint (rivets remote 4 mm from specimen edge)

Obliczenia wykazały, że w spoinie klejowej o zadeklarowanych wymiarach i właściwościach mechanicznych praktycznie obciążone są tylko krawędzie spoin oraz że naprężenia normalne prostopadłe do powierzchni spoiny są istotnym składnikiem tensora naprężeń (rys. 6). W związku z tym wzmocnienie połączenia klejowego nitami powinno zmniejszyć wartość tych naprężeń i spowodować wzrost wytrzymałości połączenia.

Obliczenia wykazały, że wzmocnianie spoiny nitami odsuniętymi od krawędzi blach o 8 mm praktycznie nie zmniejszało wartości maksymalnych naprężeń w spoinie. Zbliżenie nitów do krawędzi spoiny na odległość 4 mm spowodowało 39% spadek naprężeń maksymalnych, co dobrze koreluje z wynikami badań eksperymentalnych.

#### Wnioski

- W połączeniu klejowym zakładkowym największe naprężenia występują w spoinach przy krawędziach zakładki.

- Zbliżenie nitów do krawędzi blach na odległość 4 mm spowodowało wzrost wytrzymałości doraźnej połączenia hybrydowego o 40% przez zmniejszenie efektu oddzierania spoin klejowych.
- Badania wykazały znaczny, bo aż pięciokrotny, wzrost trwałości zmęczeniowej próbek klejowo-nitowych ze zmodyfikowanym rozstawem nitów w porównaniu z nitowymi, obciążanymi w zakresie do 4200 N. Zniszczenie połączeń polegało głównie na pękaniu łączonych blach spowodowanym ich zginaniem.
- Badania wykazały również większą trwałość zmęczeniową (ok. pięciokrotną) próbek hybrydowych w stosunku do próbek hybrydowych, w których nity rozmieszczone były zgodnie z zasadami wykonywania połączeń nitowych.
- Przeprowadzone badania wskazują na potrzebę takiego rozmieszczenia nitów w połączeniach hybrydowych klejowo-nitowych, aby występowało jednoczesne niszczenie obu połączeń.

## LITERATURA

- [1] Balewender T., T. Sadowski, M. Kneć. 2011. "Technological problems and experimental investigation of hybrid: clinched-adhesively bonded joint". *Archives of Metallurgy and Materials* vol. 56 (2): 439–446.
- [2] Matwijenko W.A. 1994. „Wpływ czynników konstrukcyjno-technologicznych na wytrzymałość zmęczeniową połączeń klejowo-nitowych”. *Technologia i Automatykacja Montażu* (2): 33–35.
- [3] Perłowski R. 2000. „Analiza teoretyczna rozkładu naprężeń w połączeniu klejowym i klejowo-nitowym”. *Technologia i Automatykacja Montażu* (4): 35–38.
- [4] Rudawska A., M. Błazian. 2011. „Analiza porównawcza siły niszczącej połączenia klejowe, klejowo-nitowe oraz nitowe stopu tytanu”. *Technologia i Automatykacja Montażu* (4): 40–44.
- [5] Sadowski T., E. Zarzeka-Raczkowska. 2012. "Hybrid Adhesive Bonded and Riveted Joints – Influence of Rivet Geometrical Layout o Strength of Joints". *Archives of Metallurgy and Materials* vol. 57 (4): 1127–1135.
- [6] Sadowski T., M. Kneć, P. Godlewski. 2010. "Experimental investigations and numerical modeling of steel adhesive joints reinforced by rivets". *International Journal of Adhesion and Adhesives* (30): 338–346.

---

prof. dr hab. Inż. Jan Godzimirski – Wydział Mechatroniki i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej, ul. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49,  
e-mail: jan.godzimirski@wat.edu.pl

inż. Adrianna Adameczek – studentka studiów magisterskich Wydziału Mechatroniki i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej, ul. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49