

# Metody łączenia kompozytów włóknistych

Dwie najczęściej stosowane metody łączenia kompozytów włóknistych ze sobą lub z innymi materiałami to klejenie i połączenia sworzniowe.

### **Połączenia klejone**

#### Zalety

- Struktura kompozytu pozostaje nienaruszona.

#### Wady

- Połączenia nierozłączne
- Problemy z kontrolą jakości i certyfikacją
- Konieczność doboru odpowiedniego kleju i przygotowania powierzchni

### **Połączenia sworzniowe**

- Połączenie rozłączne
- Połączenie znane od dawna i certyfikowane
- Niezbędny jest otwór, który narusza ciągłość włókien. Ponadto w czasie jego wykonywania powstają dodatkowe uszkodzenia.

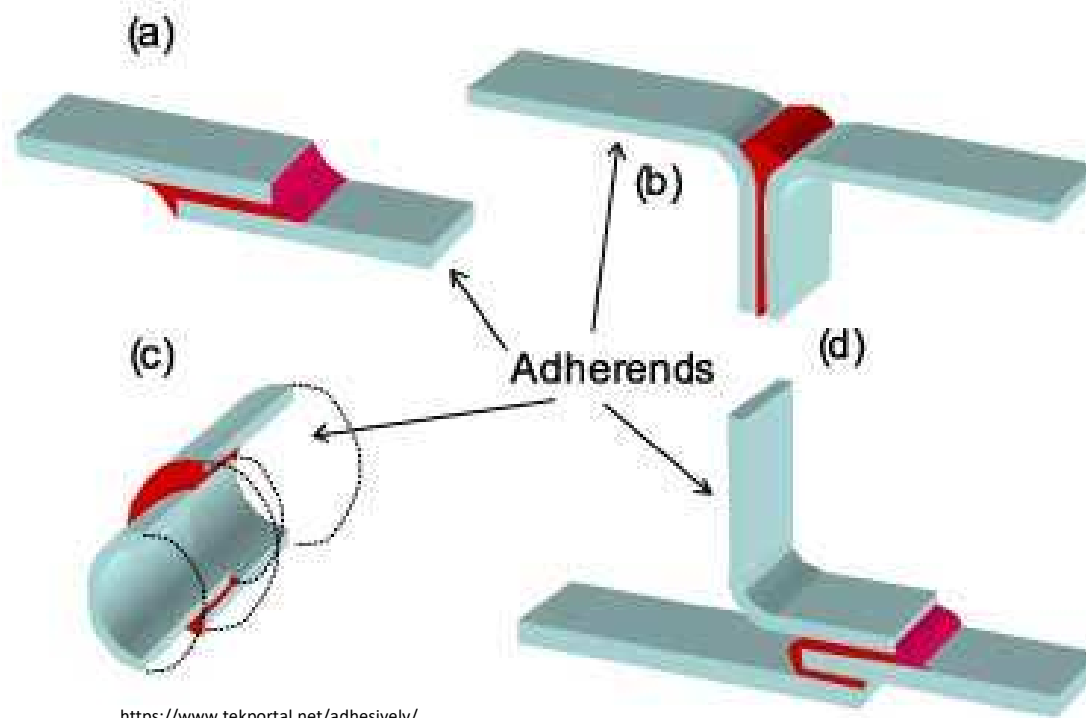
## Połączenia klejone



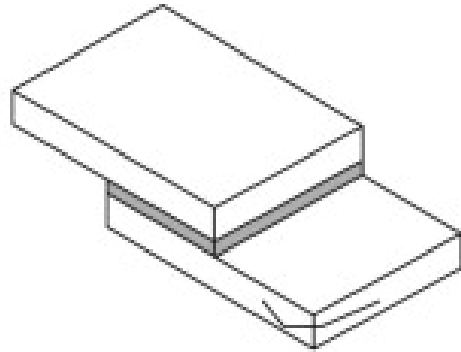
## Połączenia sworzniowe



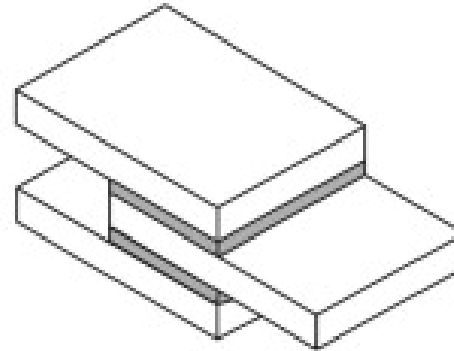
# Połączenia klejone



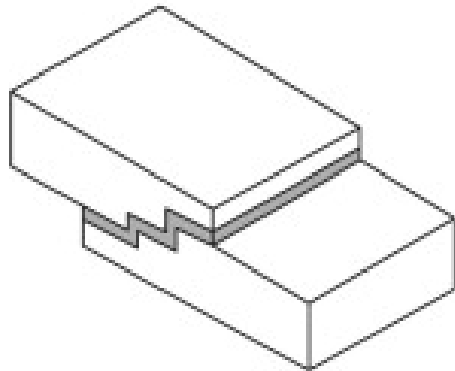
<https://www.tekportal.net/adhesively/>



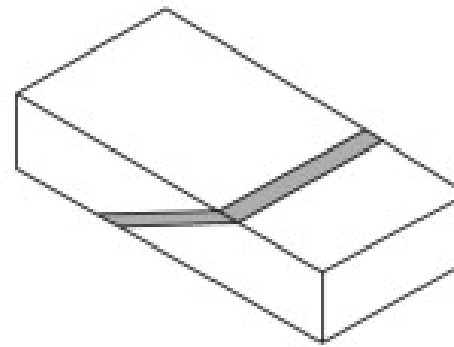
Single-lap joint



Double-lap joint



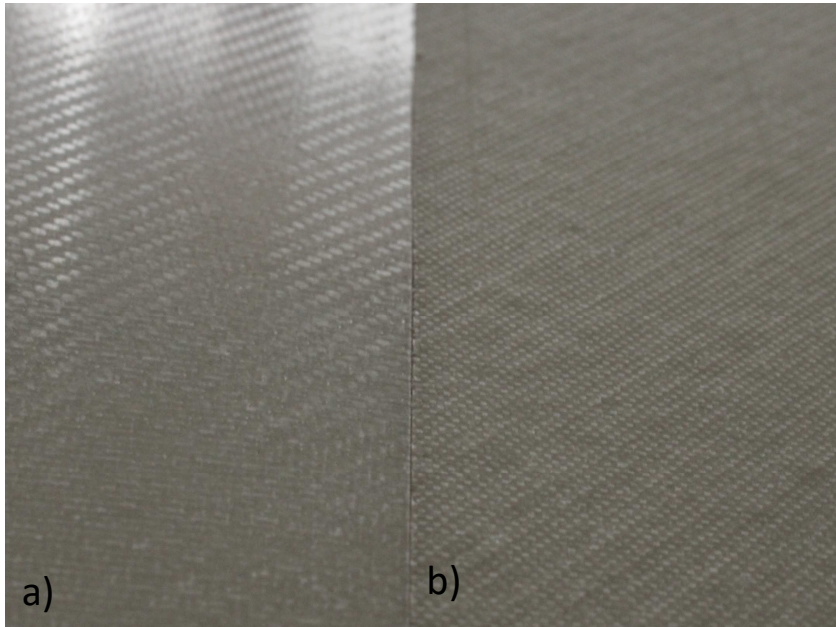
Stepped-lap joint



Scarf joint

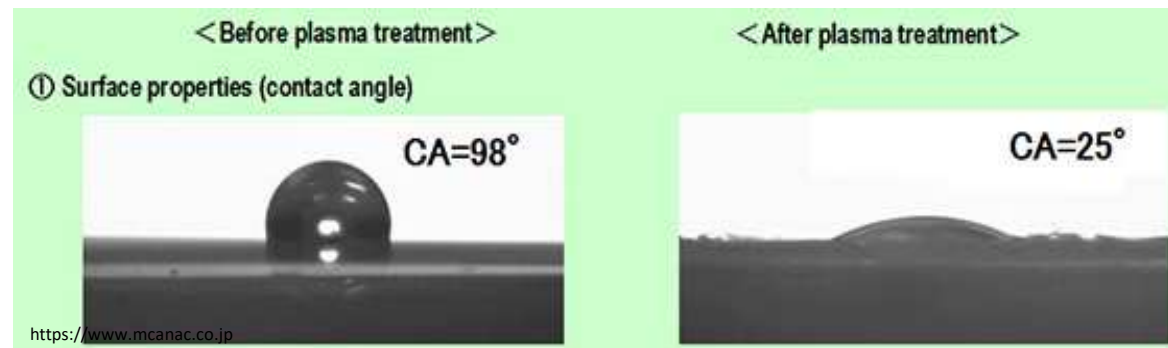
## Przygotowanie powierzchni kompozytu do klejenia:

1. Użycie delaminażu pozwala na uzyskanie czystej i rozwiniętej powierzchni gotowej do klejenia bez konieczności odtłuszczenia



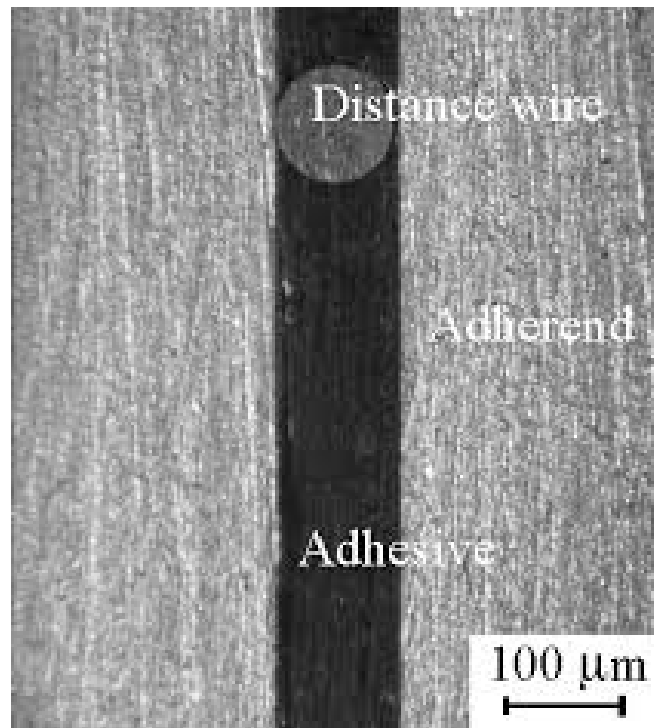
Powierzchnia kompozytu utwardzanego  
a) bez delaminażu i b) z delaminażem

1. Odtłuszczenie powierzchni
2. Użycie jednej z następujących metod
  - Papier ścierny/piaskowanie
  - Trawienie chemiczne (np. kwasem siarkowym, azotowym)
  - Modyfikacja powierzchni za pomocą lasera
  - Modyfikacja powierzchni za pomocą plazmy (tlen, argon, azot)

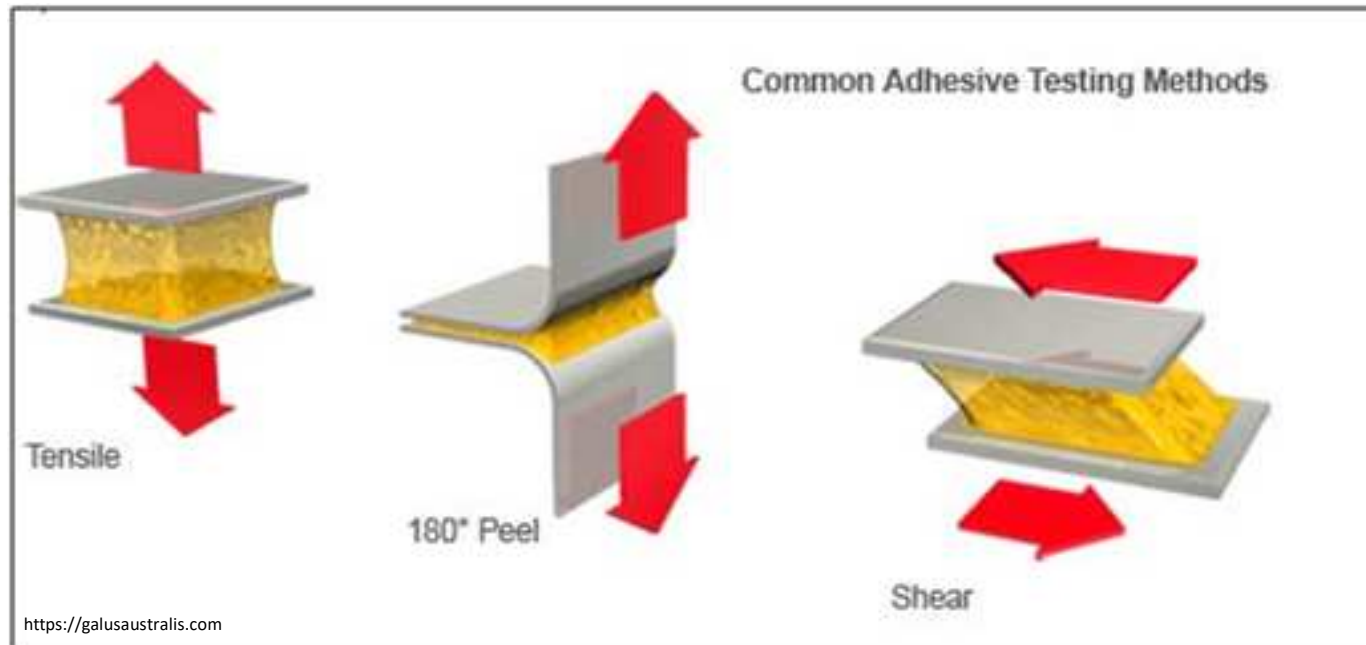


## Wady produkcyjne połączenia klejonego

1. Niedoklejenia
2. Nieprawidłowa grubość

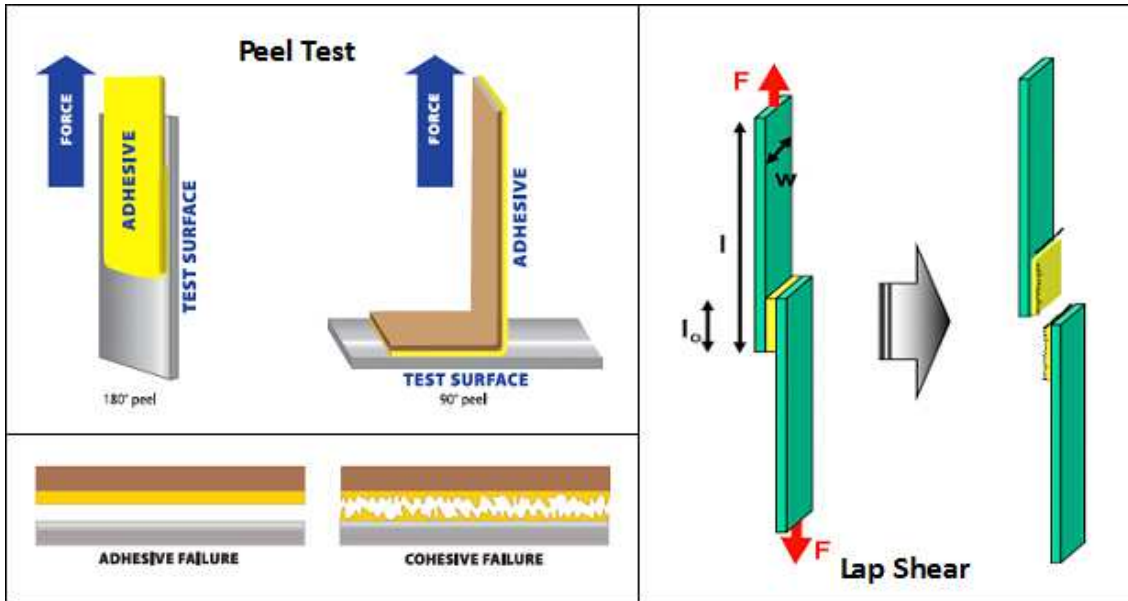


## Główne sposoby pracy połączeń klejonych



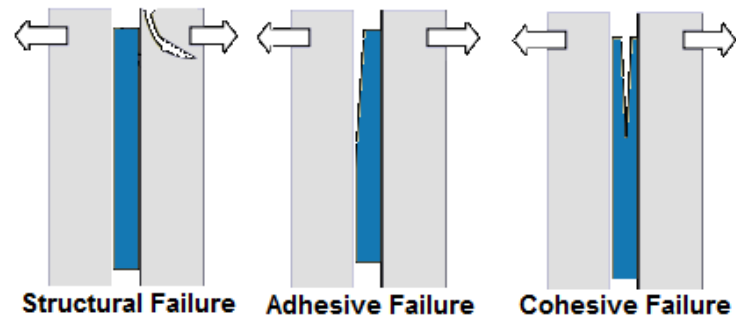


# Badania połączeń klejonych

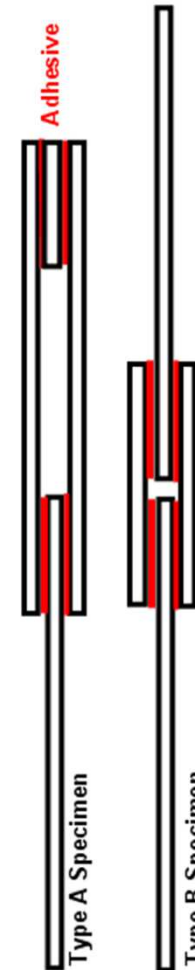


www.adhesives.org

## Sposoby zniszczenia

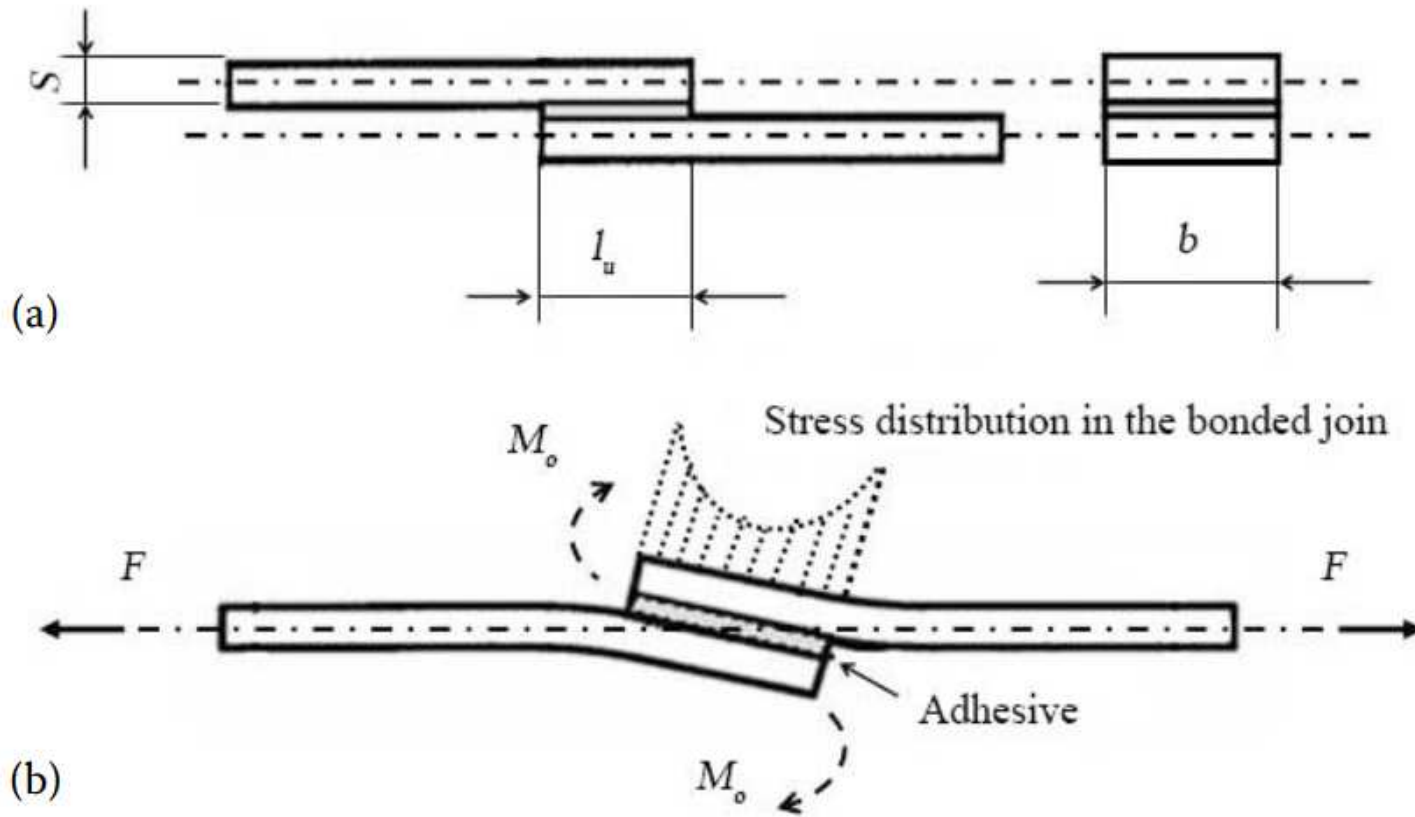


www.wheelfanatyk.com

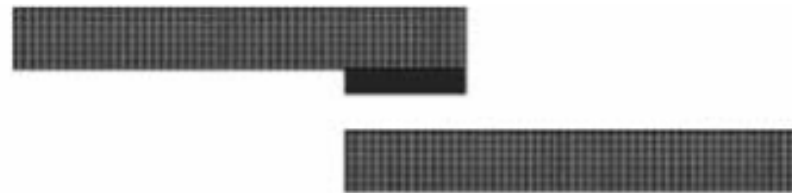


www.ptli.com

## Double Lap Shear



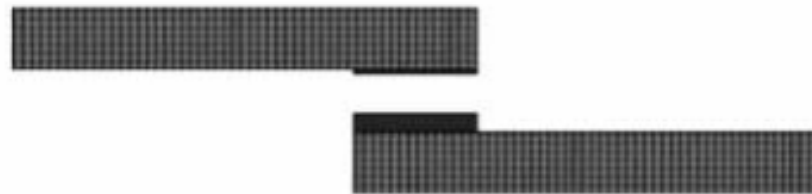
## Sposoby zniszczenia połączenia klejonego



a) Adhesive failure



b) Cohesive failure



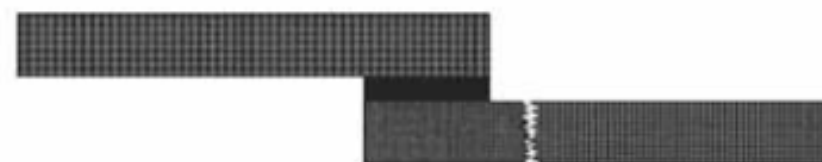
c) Thin-layer cohesive failure



d) Fiber-tear failure

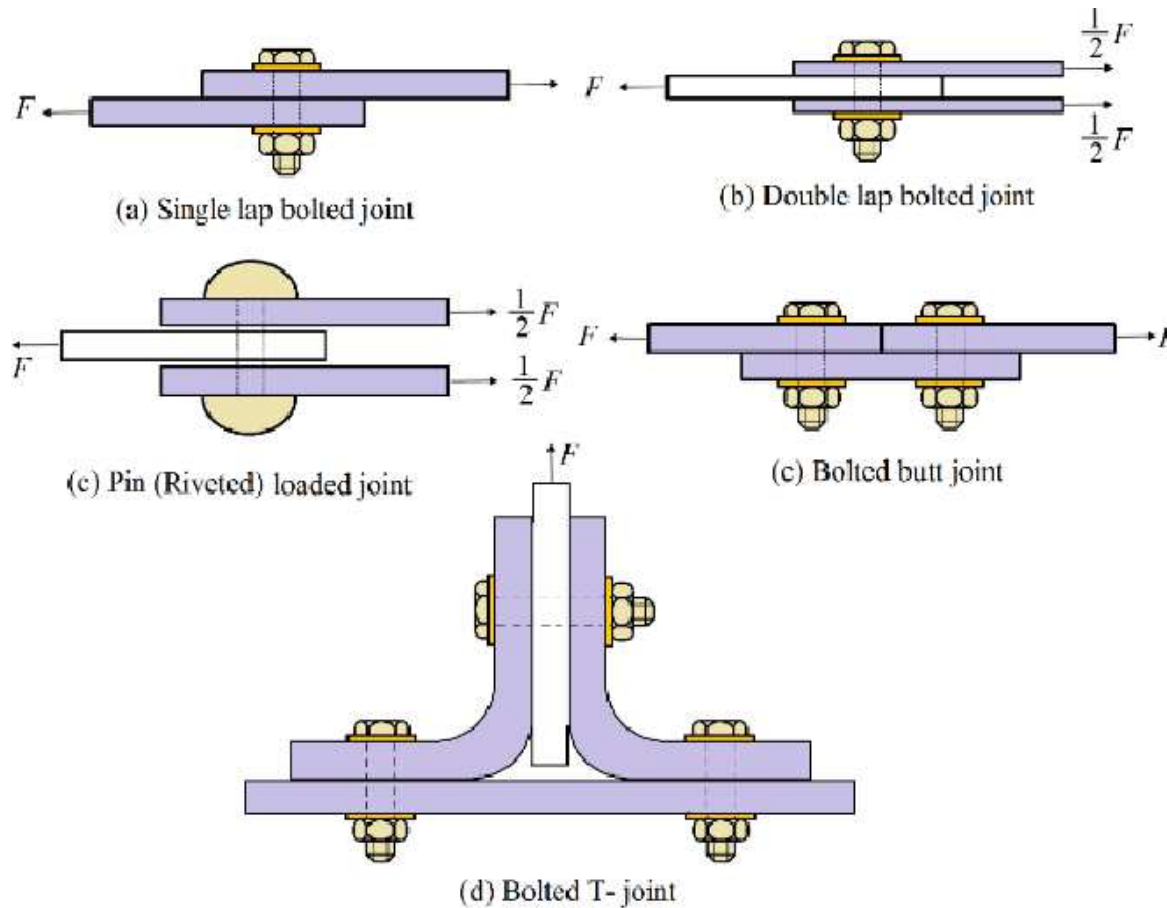


e) Light-fiber-tear failure

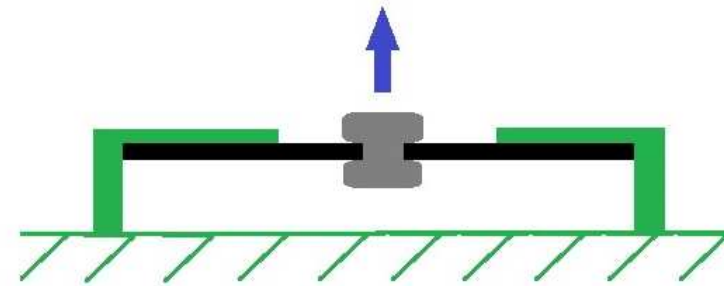
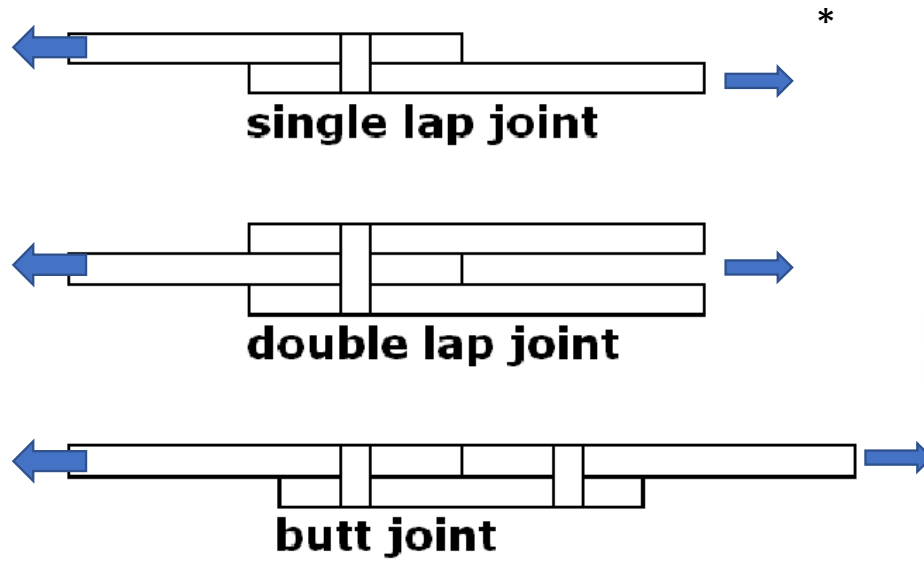


f) Stock-break failure

# Połączenia sworzniove

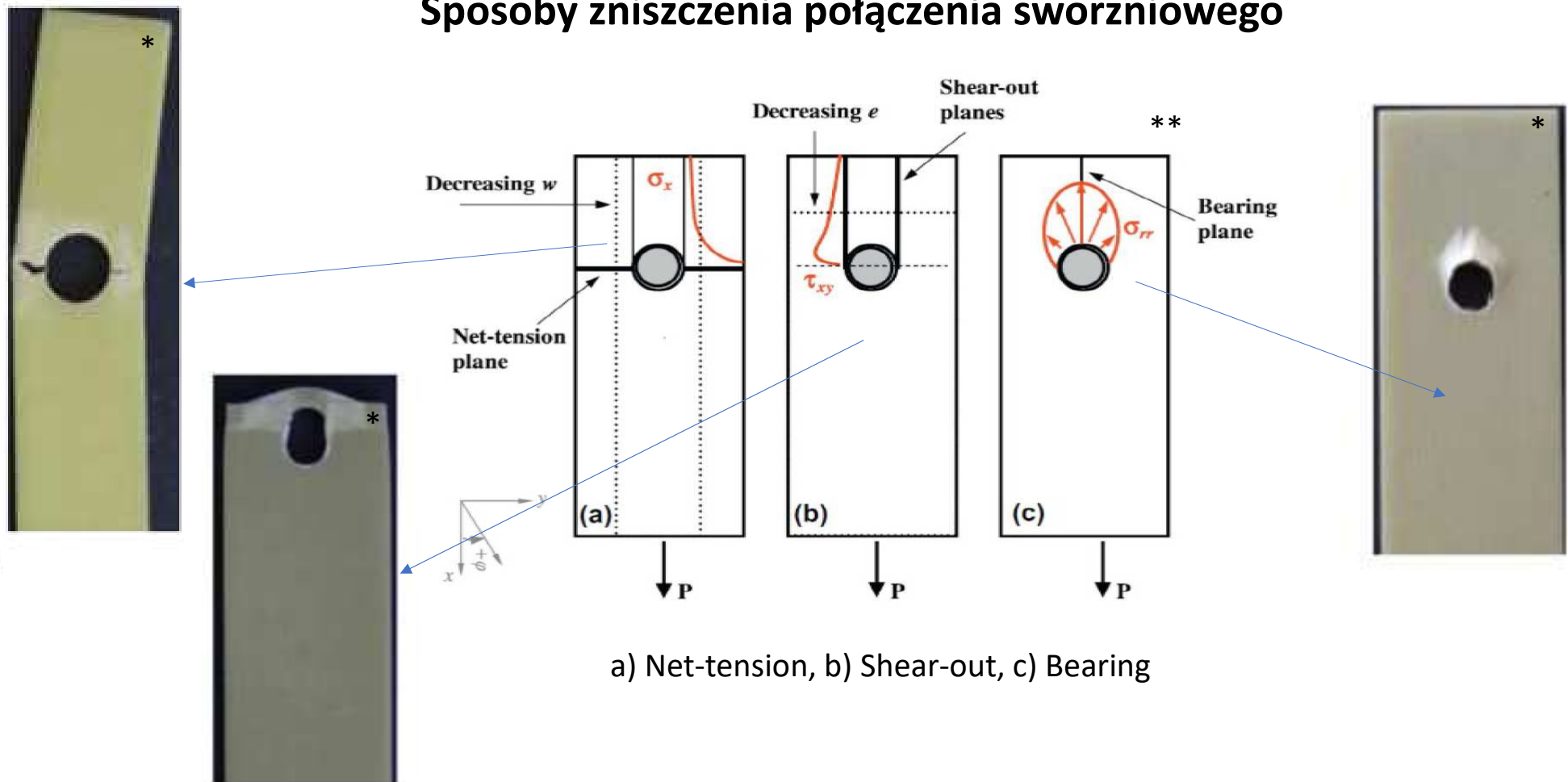


# Badania połączeń sworzniowych



Pull-out test

## Sposoby zniszczenia połączenia sworznowego



a) Net-tension, b) Shear-out, c) Bearing

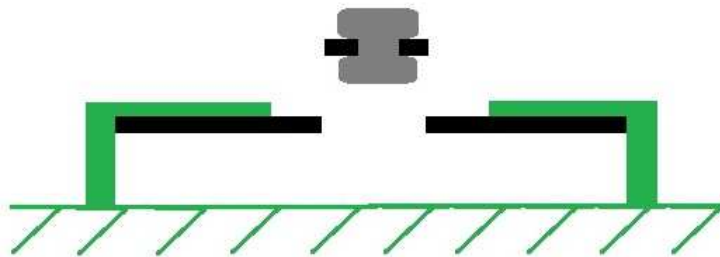
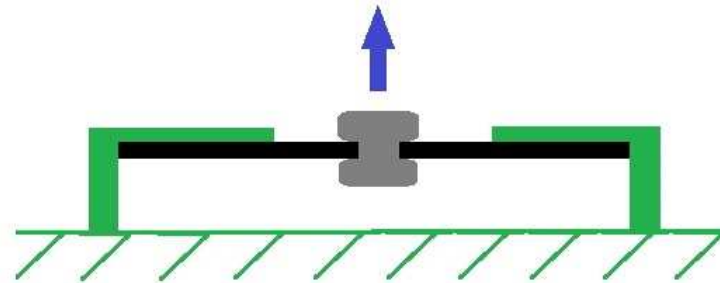
Zazwyczaj połączenia projektuje się w ten sposób, żeby ulegały one zniszczeniu przez naciski (bearing), bo wtedy zniszczenie jest stopniowe i jest czas na naprawę.

\* S. Zu, Z. Zhou, J. Zhang, Numerical simulation of pin-loaded joints of fiber metal laminate, Iranian Polymer Journal, vol. 28, p. 145-155, 2019

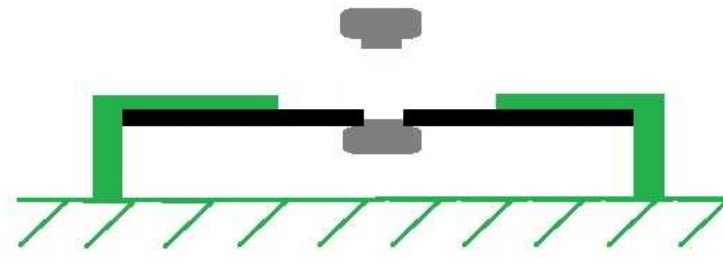
\*\* Atas, A.; Soutis, C. Subcritical damage mechanisms of bolted joints in CFRP composite laminates. *Compos. Part B Eng.* 2013, 54, 20-27

# Badania połączeń sworzniowych

Sposoby zniszczenia



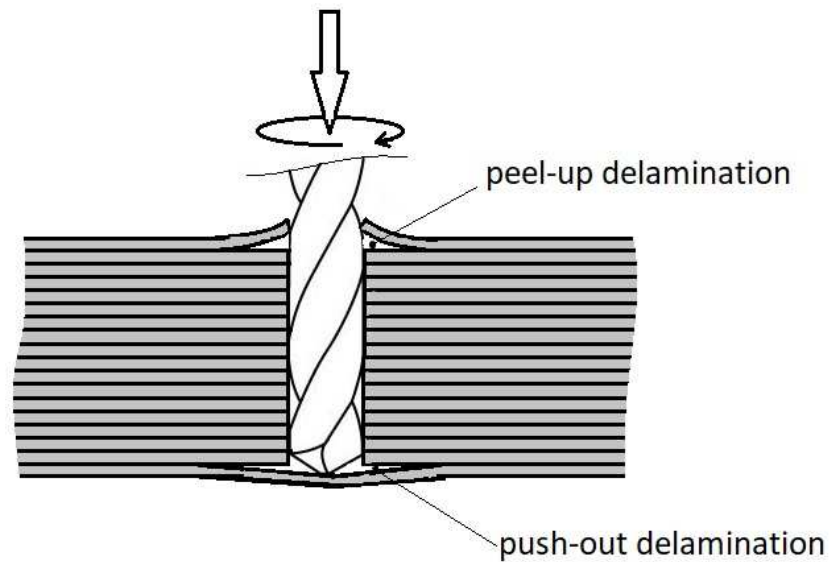
Zniszczenie materiału



Zniszczenie sworznia

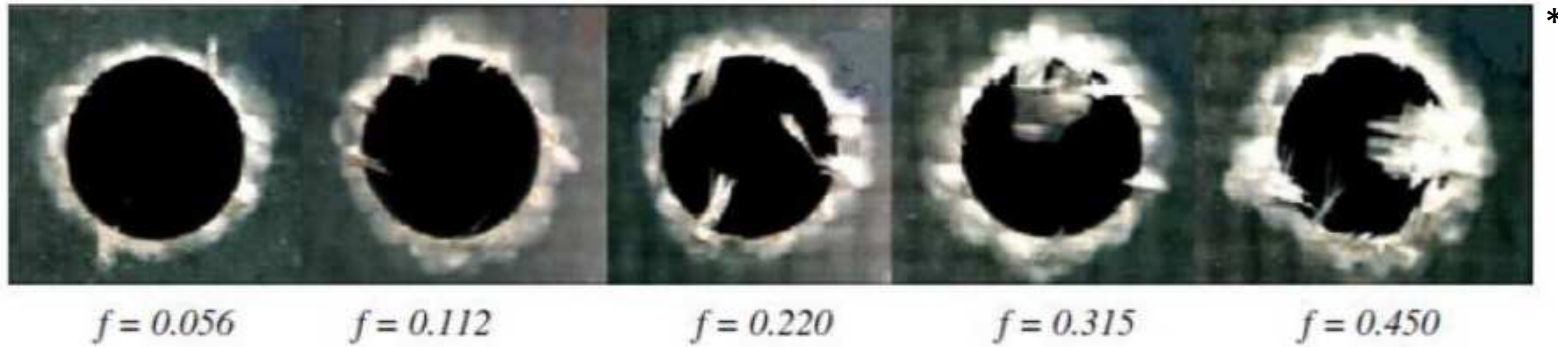
## Uszkodzenia kompozytu wywołane wierceniem otworów

1. Delaminacje (rozwarstwienia)
2. Pęknięcia
3. Przegrzania (temperatura kilkaset stopni)

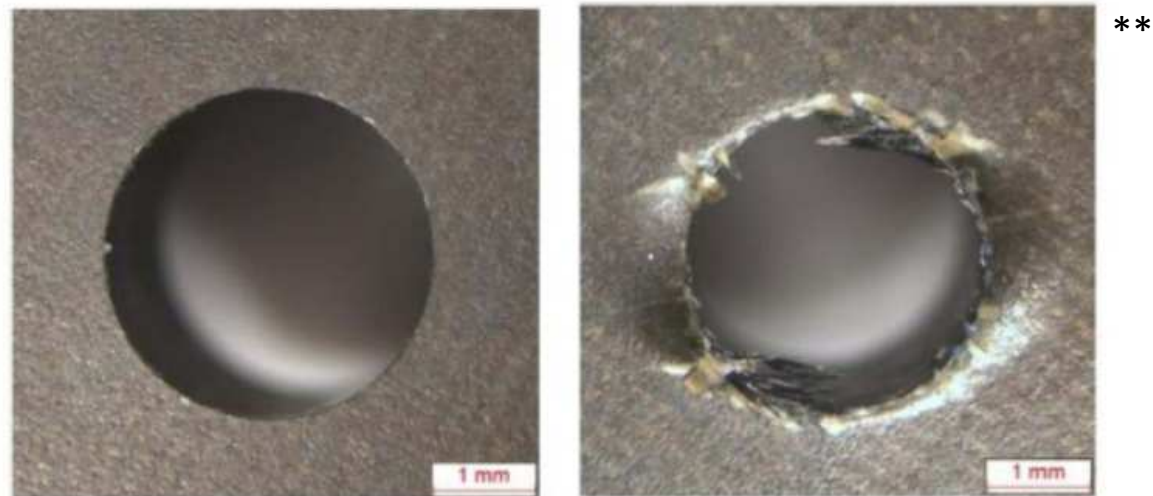


Mechanizm powstawania delaminacji





Wpływ prędkości posuwu ( $f$  [mm/obr]) [101]



Otwór wykonany wiertłem nowym i zużytym [89]

\* Khashaba, U.A.; El-Sonbaty, I.A.; Selmy, A.I.; Megahed, A.A. Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: Part I—Effect of machining parameters. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* **2010**, *41*, 391–400

\*\* Fernandez-Perez, J.; Cantero, J.L.; Diaz-Alvarez, J.; Miguelez, M.H. Influence of cutting parameters on tool wear and hole quality in composite aerospace components drilling. *Compos. Struct.* **2017**, *178*, 157–161

## Nitośrubki (fastenery)

Korozja galwaniczna – korozja wywołana kontaktem dwóch materiałów przewodzących o różnym potencjale elektrycznym, połączonych ze sobą w sposób ciągły w obecności elektrolitu

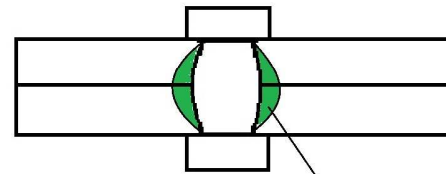
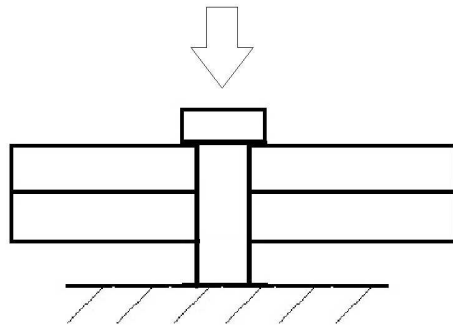
Ponieważ włókno węglowe jest materiałem przewodzącym i tworzy ogniwa galwaniczne ze stopami aluminium i stalą, do łączenia kompozytów zbrojonych włóknem węglowym stosuje się najczęściej fastenery wykonane ze stopów tytanu.



## Nitośrubki (fastenery)

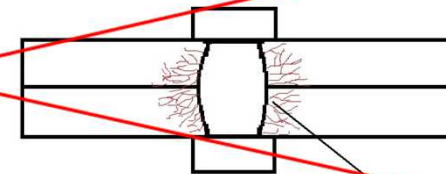
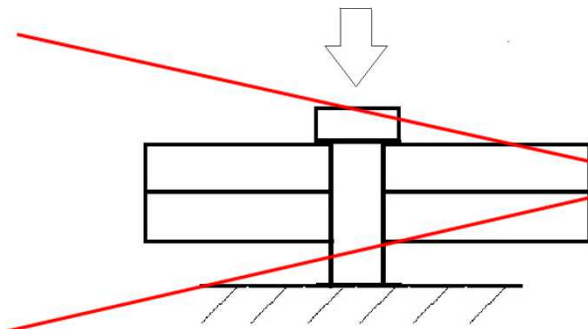
Do łączenia kompozytów nie należy stosować tradycyjnego nitowania.

Nitowanie metali



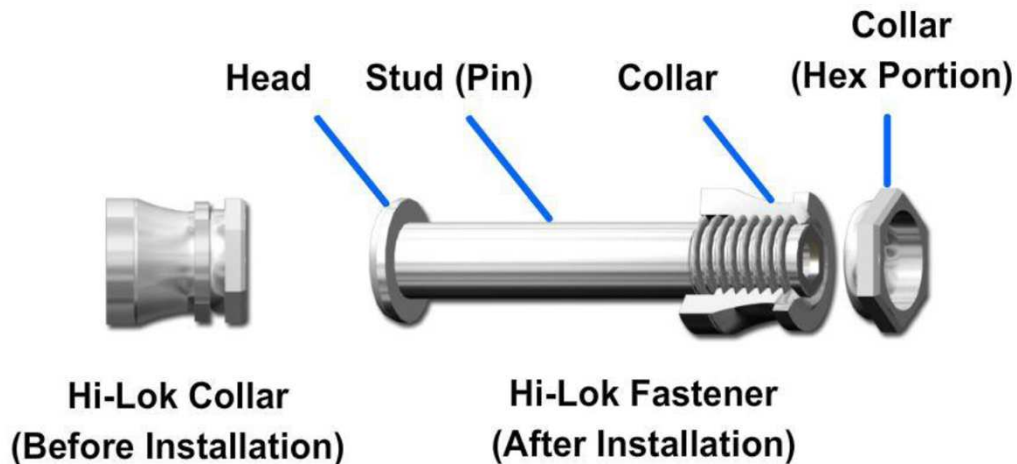
Korzystne naprężenia reszkowe

Nitowanie kompozytów



Pękanie kompozytu

## Nitośrubki (fastenery)



Hi-loks – strukturalne

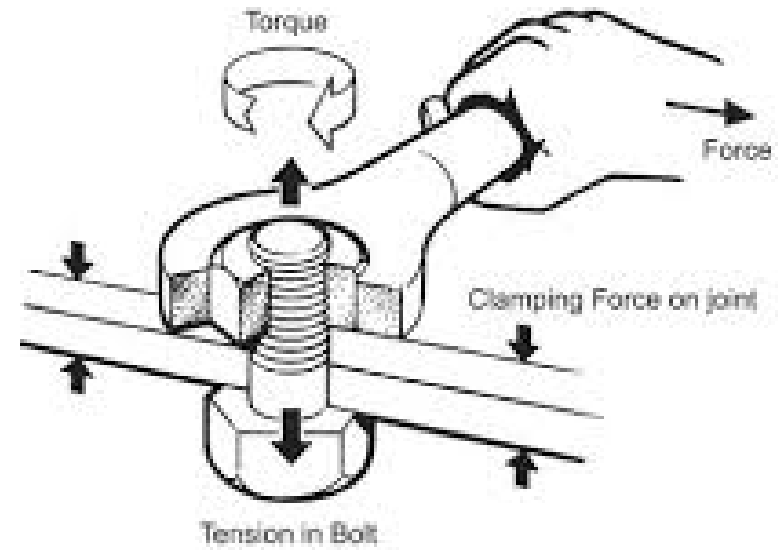
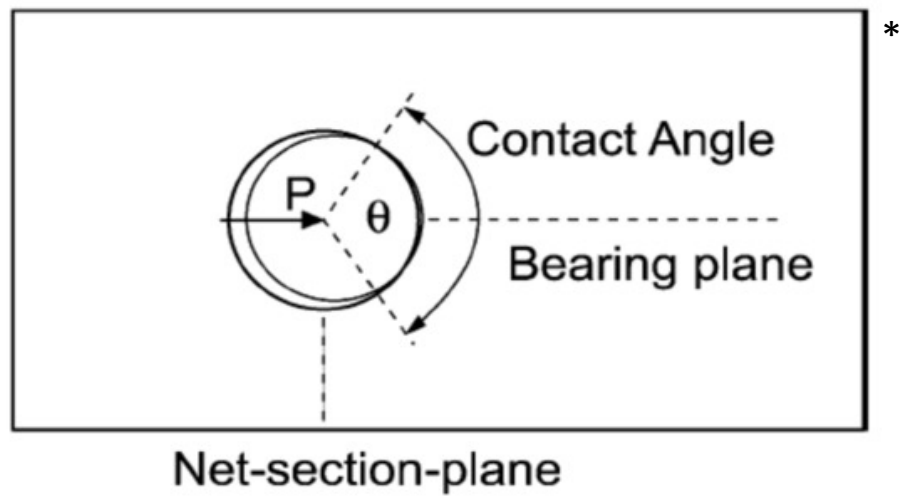
CUTM Courseware – Chapter 6: Aircraft hardware



store.skybolt.com

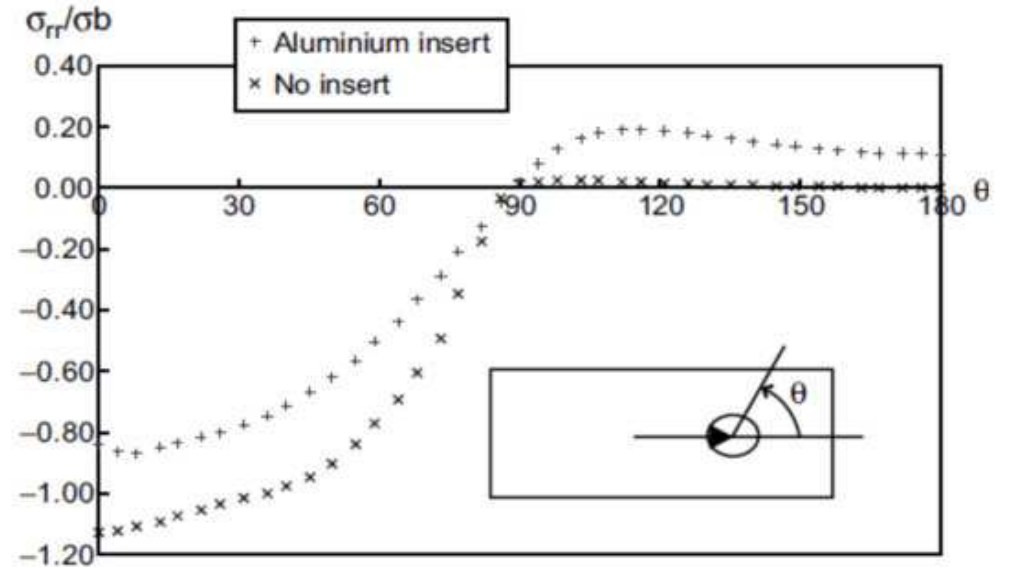
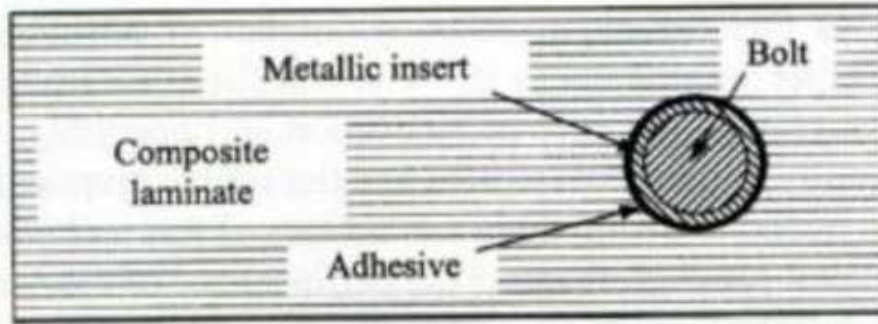
Camlocks – niestrukturalne, używane do montowania części, które nie przenoszą dużych obciążeń, za to często się je demontuje, np. otwory inspekcyjne, owiewki

## Tolerancja otworu i siła dociskająca



[www.system22fast.com/](http://www.system22fast.com/)

## Sposoby zwiększania wytrzymałości połączeń sworzniovych: Klejone wkładki



Rozkład naprężeń normalizowanych wokół otworu ze sworzniem z wkładką i bez wkładki

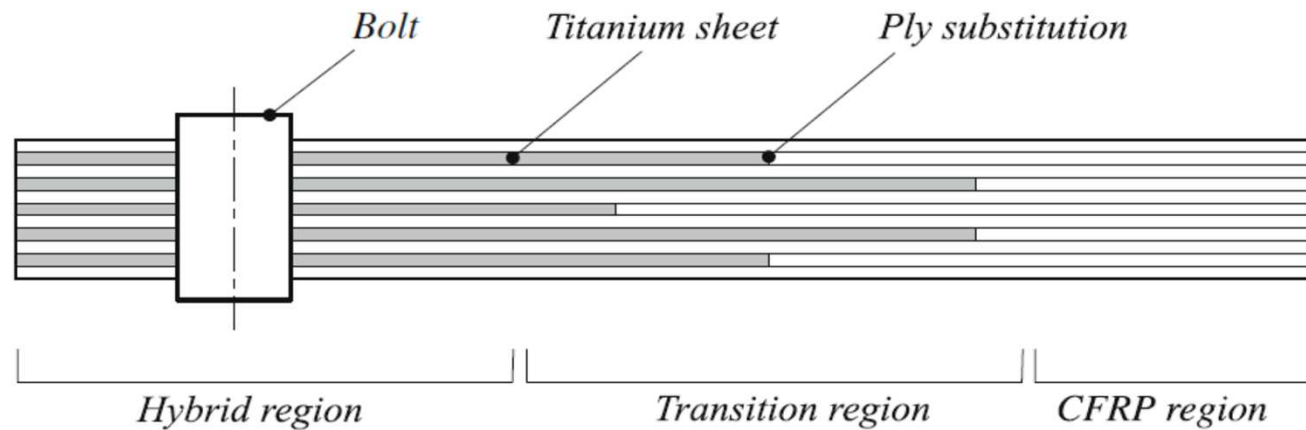
Zalety:

- Korzystniejsza dystrybucja obciążeń wokół otworu – wzrost wytrzymałości połączenia
- Dodatkowa ochrona materiału wokół otworu

Wady:

- Wzrost masy

## Sposoby zwiększania wytrzymałości połączeń sworzniovych: Folia tytanowa



Zastąpienie w kompozycie wokół otworu niektórych warstw folią tytanową

Zalety:

- Wzrost wytrzymałości połączenia

Wady:

- Wzrost masy
- Komplikacja procesu produkcji

## Sposoby zwiększania wytrzymałości połączeń sworzniowych: Dodatkowe zbrojenie



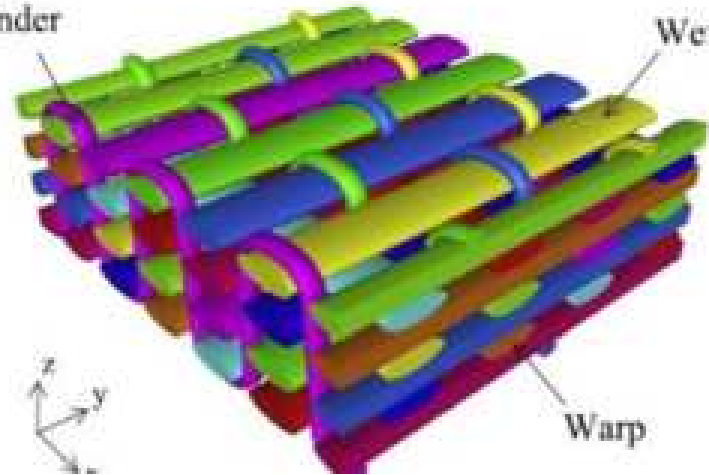
\*

(a)

Binder

\*\*

Weft



Warp

Zniszczenie kompozytu bez pinów i z pinami przez naciski

Zalety:

- Wzrost wytrzymałości połączenia

Wady:

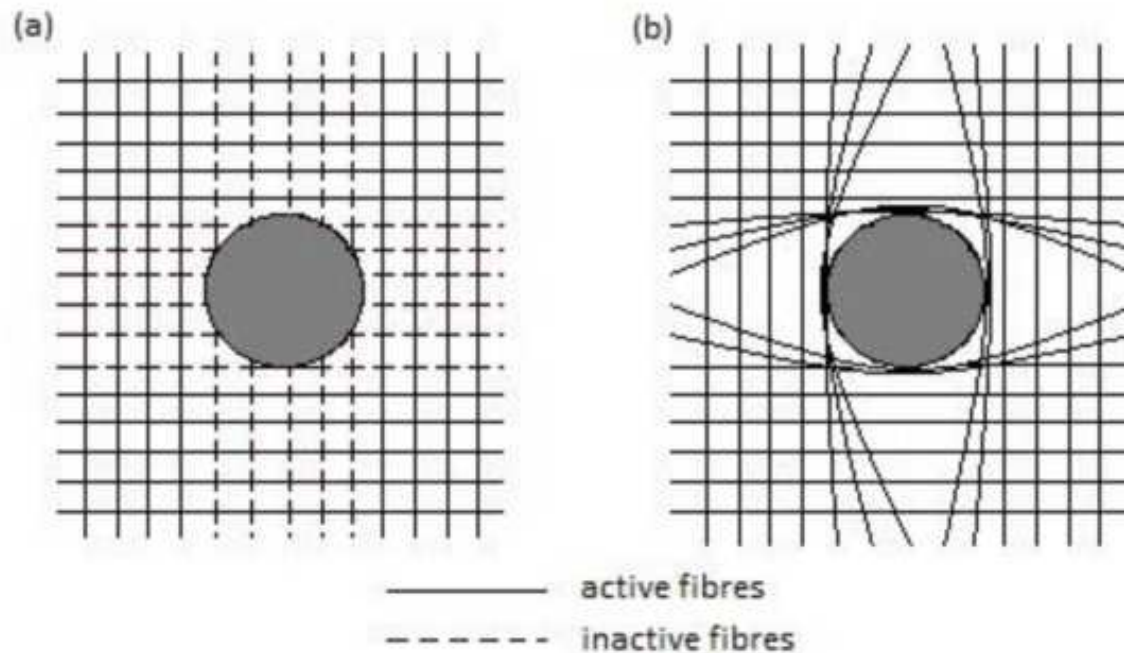
- Komplikacja procesu produkcji

\* Li, R.; Huong, N.; Crosky, A.; Mouritz, A.P.; Kelly, D.; Chang, P. Improving bearing performance of composite bolted joints using z-pins. *Compos. Sci. Technol.* **2009**, *69*, 883–889

\*\* Dai, S.; Cunningham, P.R.; Marshall, S.; Silva, C. Open hole quasi-static and fatigue characterisation of 3D woven composites. *Compos. Struct.* **2015**, *131*, 765–774



## Sposoby zwiększania wytrzymałości połączeń sworzniowych: Otwory laminowane



### Zalety:

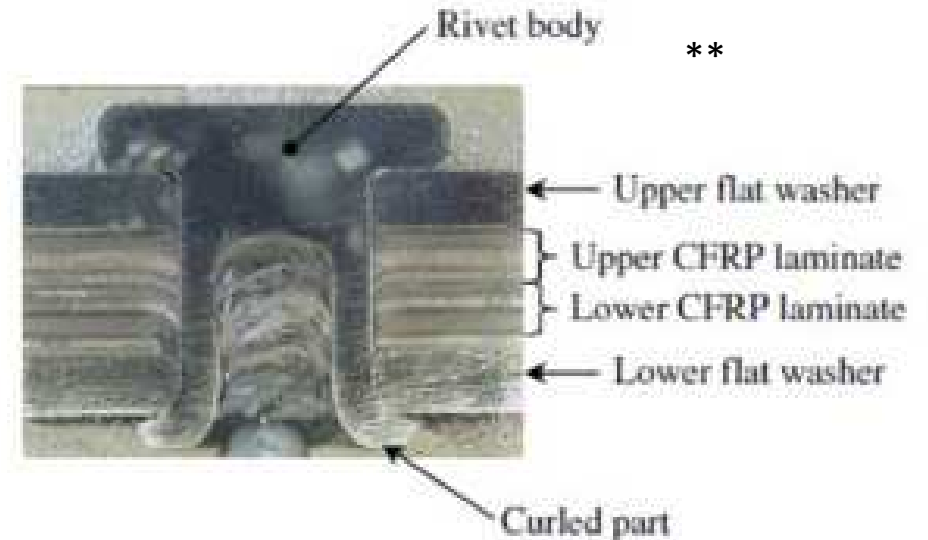
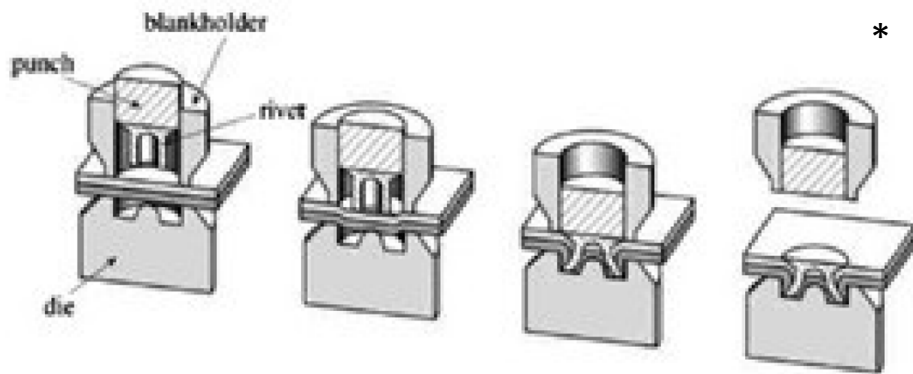
- Wzrost wytrzymałości połączenia przy braku wzrostu masy
- Eliminacja procesu wiercenia otworu

### Wady:

- Komplikacja procesu produkcji
- Problemy z pozycjonowaniem otworów

Inne sposoby łączenia kompozytów

## Self-piercing riveting



Zalety:

- Szybkość i automatyzacja procesu
- Eliminacja procesu wiercenia otworu

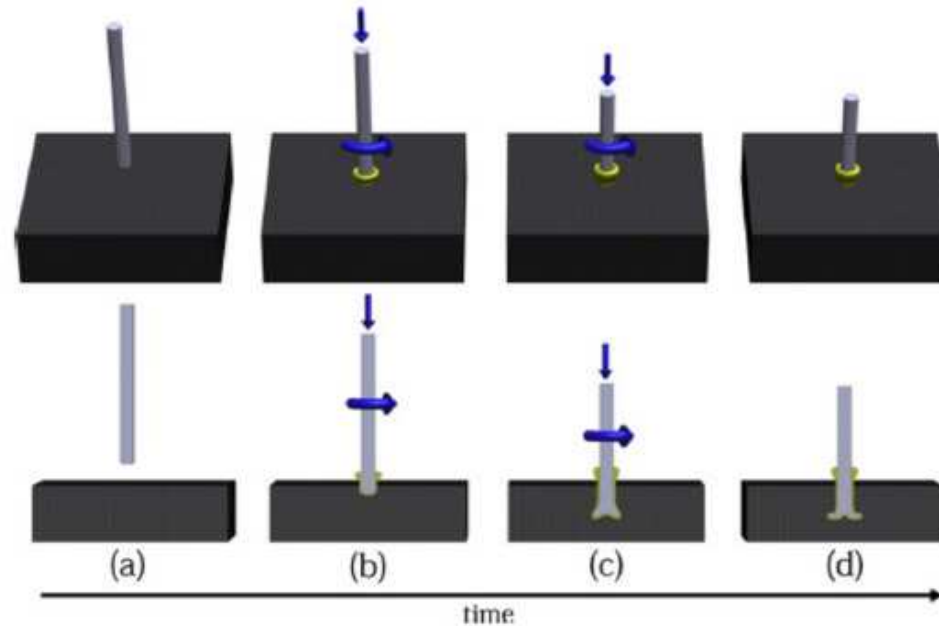
Wady:

- Duże zniszczenia w kompozycie
- Połączenie nierozłączne

\* di Franco, G.; Fratini, L.; Pasta, A. Influence of the distance between rivets in self-piercing riveting bonded joints made of carbon fiber panels and AA2024 blanks. *Mater. Des.* **2012**, *35*, 342–349

\*\* Ueda, M.; Miyake, S.; Hasegawa, H.; Hirano, Y. Instantaneous mechanical fastening of quasi-isotropic CFRP laminates by a self-piercing rivet. *Compos. Struct.* **2012**, *94*, 3388–3393

## Friction riveting



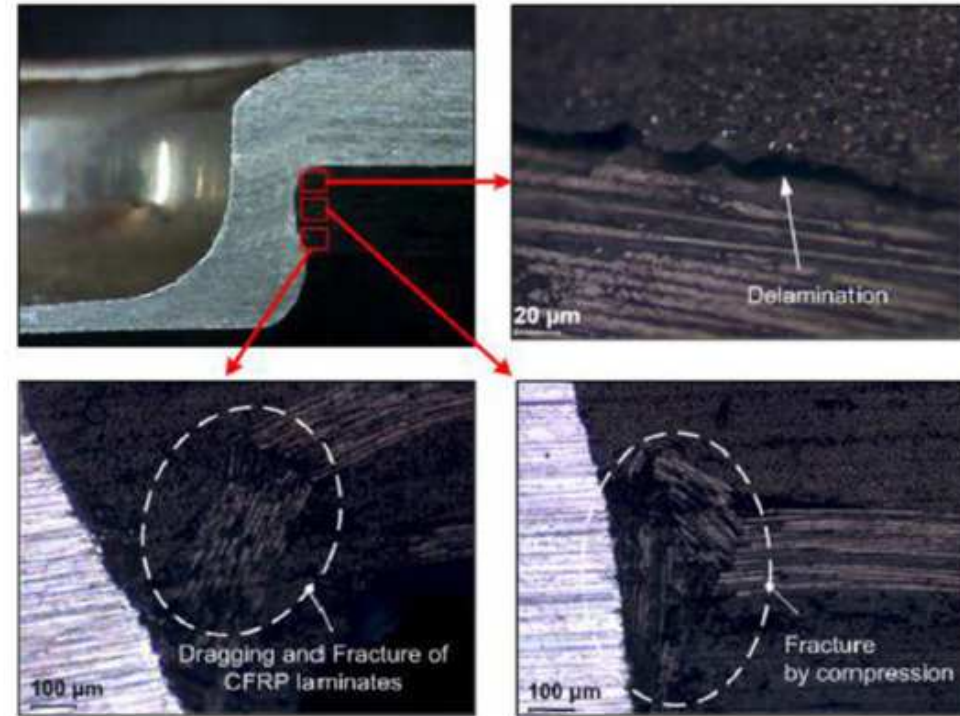
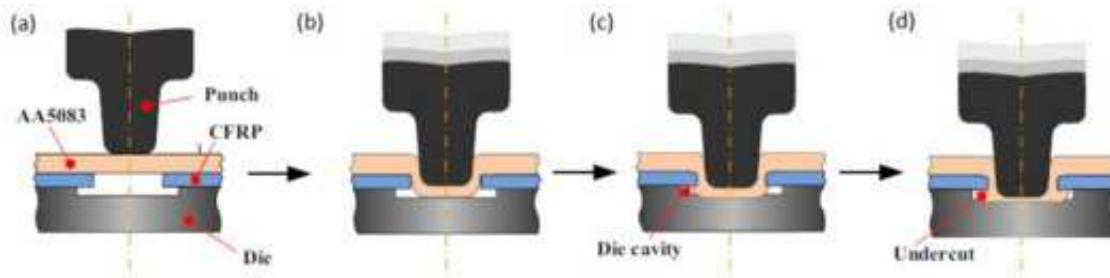
### Zalety:

- Szybkość i automatyzacja procesu
- Eliminacja procesu wiercenia otworu
- Połączenie rozłączne

### Wady:

- Możliwość stosowania tylko przy spoiwie termoutwardzalnym
- Możliwość przegrzania spoiwa

# Clinching



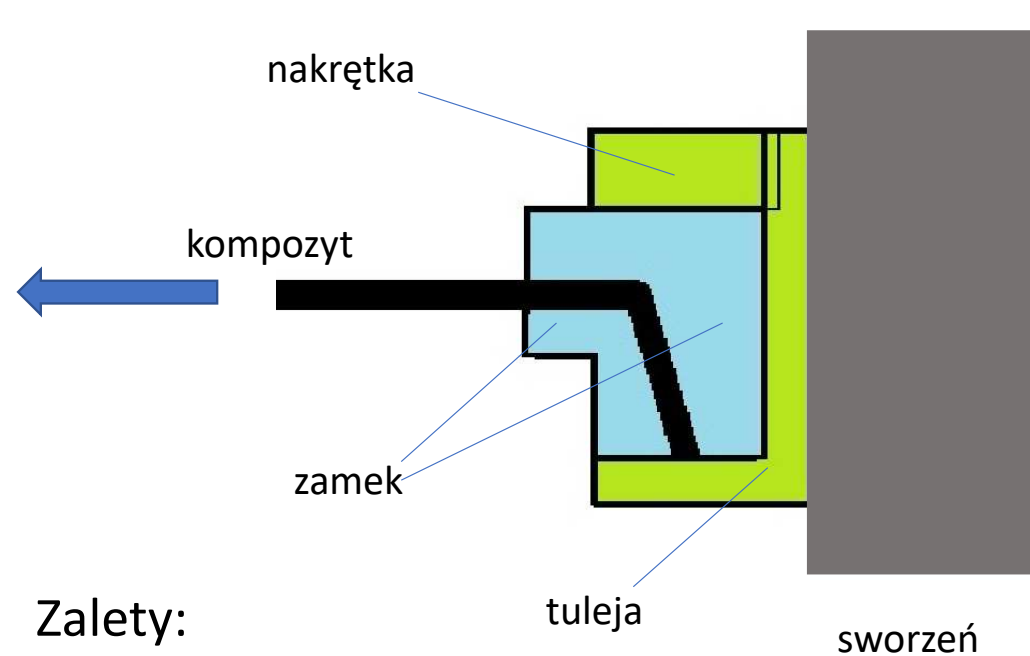
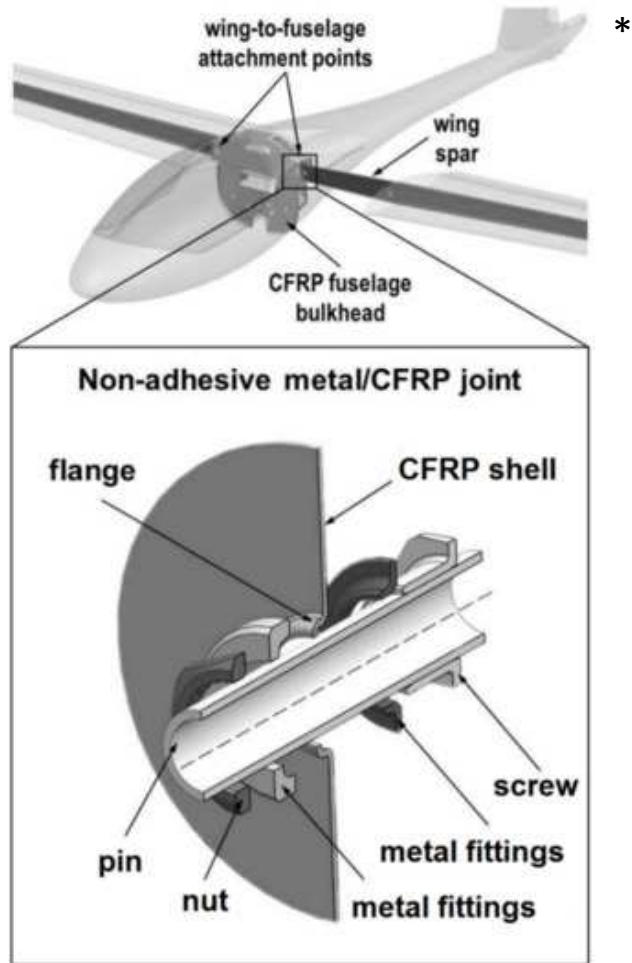
## Zalety:

- Szybkość i automatyzacja procesu

## Wady:

- Duże zniszczenia w kompozycie
- Połączenie nierozłączne

## Bezadhezyjne połączenia labiryntowe



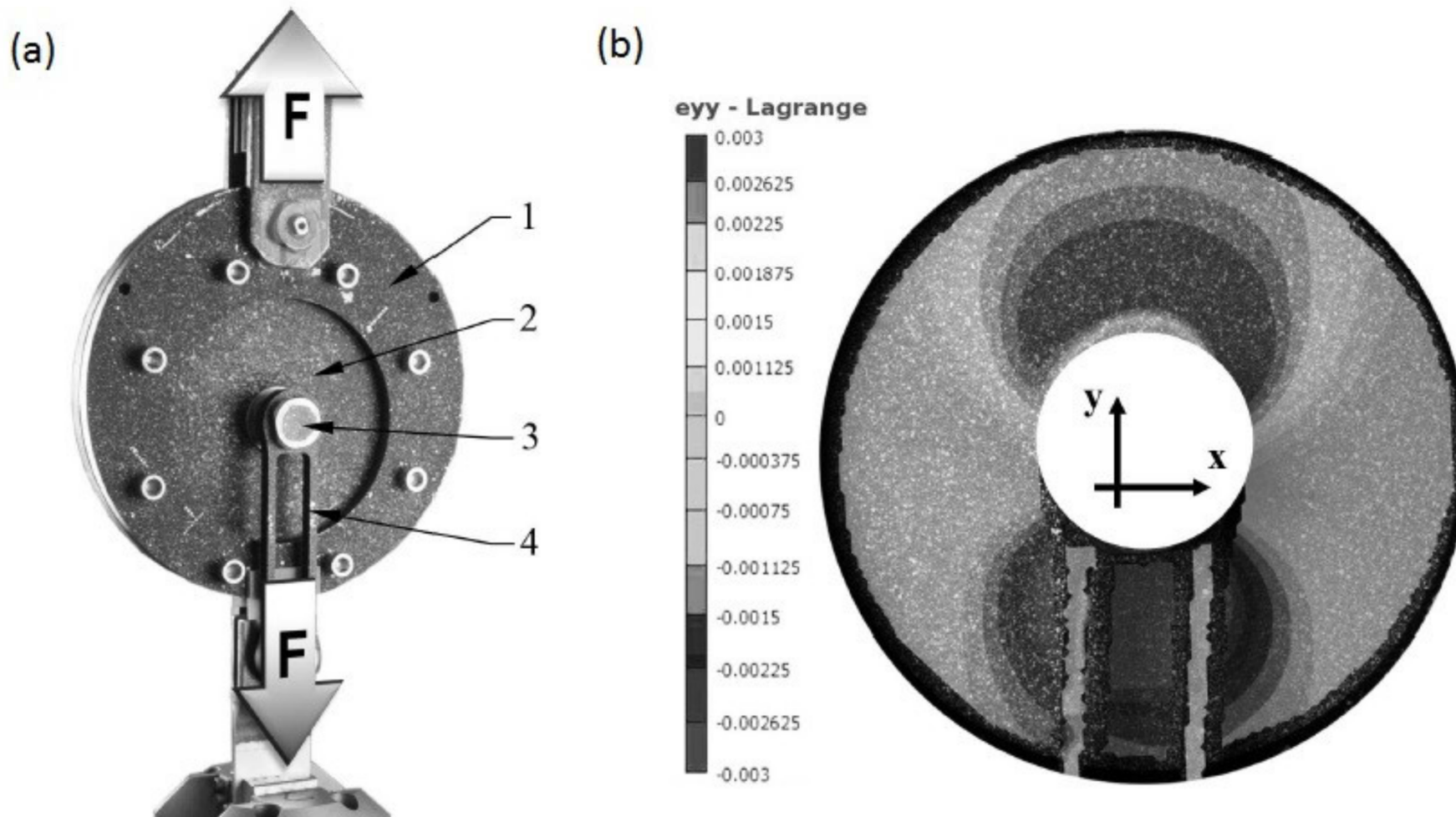
### Zalety:

- Eliminacja procesu wiercenia otworu i uszkodzeń z nim związanych
- Połączenie rozłączne

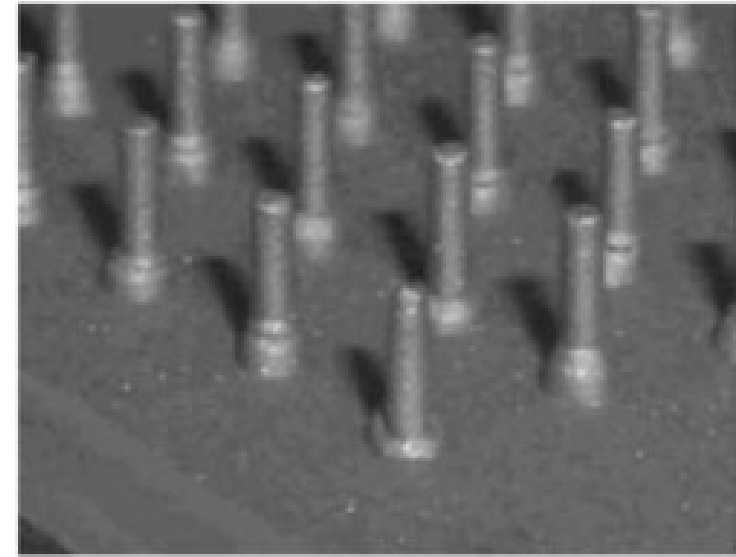
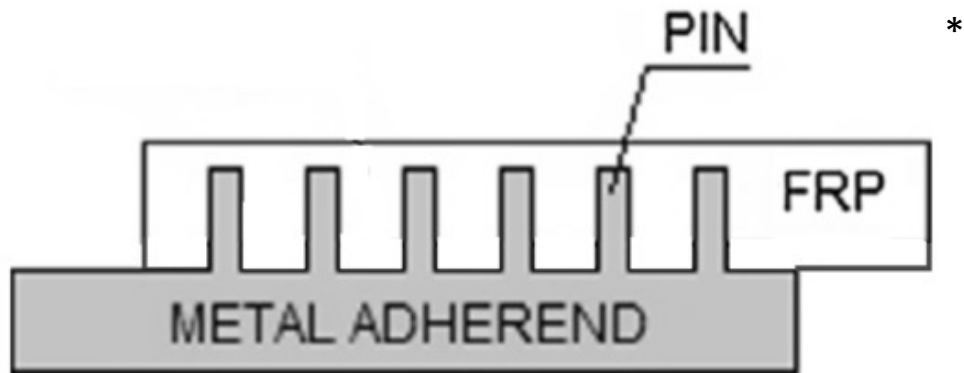
### Wady:

- Masywne i skomplikowane połączenie stosowane do wprowadzenia dużych sił skupionych

## Bezadhezyjne połączenia labiryntowe



## Pin joining



### Zalety:

- Eliminacja konieczności wykonywania otworów i zniszczeń w kompozycie
- Nienaruszenie włókien

### Wady:

- Komplikacja procesu produkcji
- Połączenie nierozłączne

\* Graham, D.P.; Rezaei, A.; Baker, D.; Smith, P.A.; Watts, J.F. The development and scalability of a high strength, damage tolerant, hybrid joining scheme for composite-metal structures. *Compos. Part. A Appl. Sci. Manuf.* **2014**, *64*, 11–24

\*\* Uscnik, S.; Scheerer, M.; Zaremba, S.; Pahr, D.H. Experimental investigation of a novel hybrid metal-composite joining technology. *Compos. Part. A Appl. Sci. Manuf.* **2010**, *41*, 369–374