

# Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

## Modern material technologies in aerospace industry

### Metaliczne materiały kompozytowe w aplikacjach lotniczych (w tym materiały typu Glare) Composite metallic materials in aviation applications (including Glare-type materials)

Politechnika Lubelska, Politechnika Rzeszowska, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Politechnika Śląska, Instytut Lotnictwa w Warszawie  
Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk

**Wyniki badań**  
Results

**Kształtowanie plastyczne kompozytów typu GLARE w procesie gięcia**  
Plastic forming of GLARE type composites in bending process

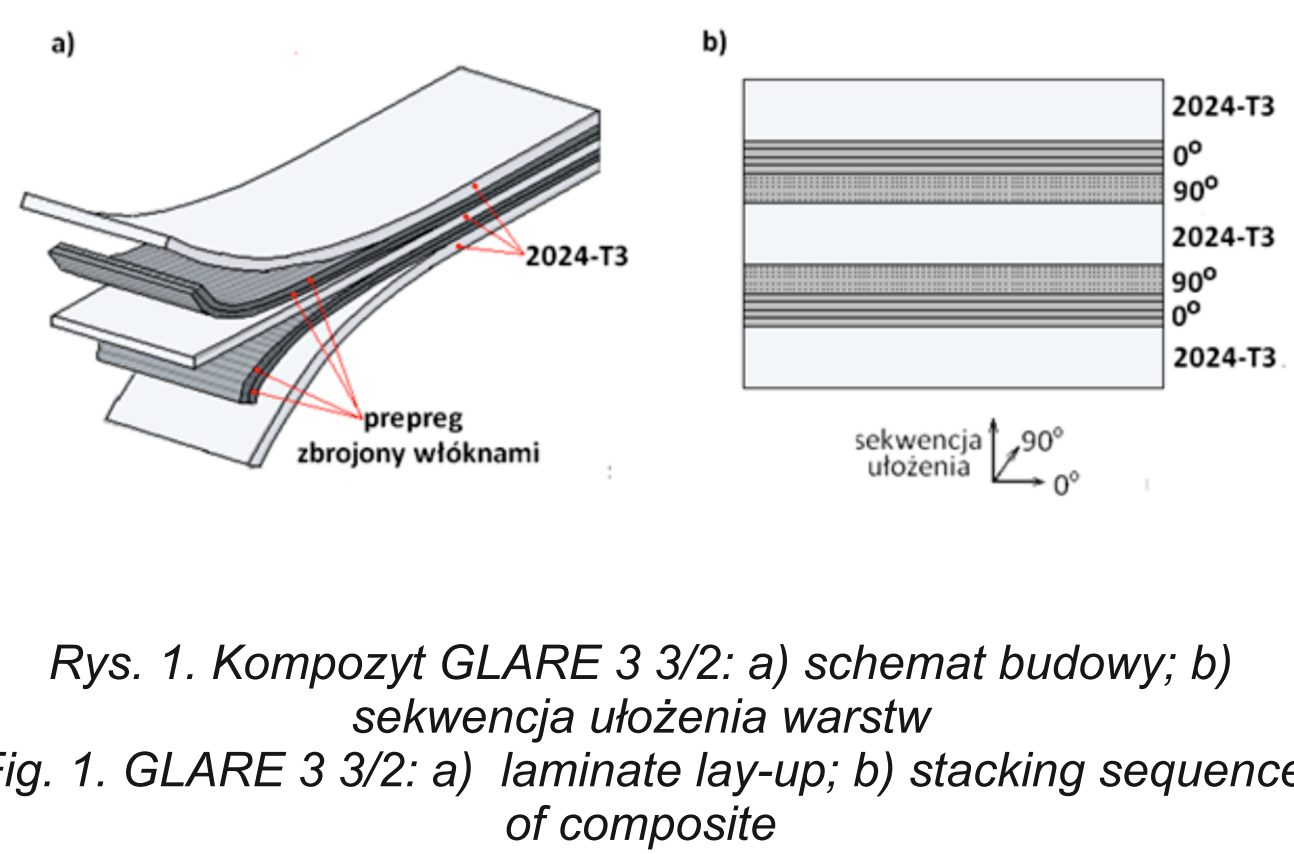
W celu określenia wpływu udziału względnego fazy metalicznej (Metal Volume Fraction) na podatności GLARE do formowania plastycznego, wybrane kompozyty poddano procesowi gięcia.

- Przedstawiono wpływ geometrii ułożenia, doboru linii gięcia oraz ilości i grubości warstw składających kompozytu na efekt kształtowania GLARE.
- Oceny stopnia odkształcalności kompozytów GLARE dokonano na podstawie określenia poziomu kąta sprężynowania kompozytów w połączeniu z oceną struktury giętych elementów.
- Wykazano, że kompozyty GLARE 2 o układzie 2/1 i grubości arkuszy 0,3mm ze stopu 2024-T3, mogą być kształtowane plastycznie i stanowią obiecujący materiał do produkcji profili wzmacniających.
- Kompozyty o układzie 3/2 ze względu na dużą sztywność i bardziej prawdopodobne powstawanie uszkodzeń są materiałem o ograniczonej formowalności.

Materiał do badań stanowiły kompozyty GLARE (Rys.1-2, Tab.1-2) zbudowane z warstw arkuszy stopu 2024-T3 oraz warstw prepregu (na bazie żywicy epoksydowej, grubość pojedynczej warstwy - 0,25mm) zbrojonego włóknem szklanym typu R (Vf -59%). W celach porównawczych przeprowadzono gięcie arkuszy blachy aluminiowej o grubości 0,3 i 0,5 mm z uwzględnieniem różnego kierunku walcowania.

- A series of experiments were performed to examine the effect of metal volume fraction (MVf) on the formability of GLARE.
- The influence of GLARE formability of laminates lay-up, stacking sequence, bend line direction and phases geometries was performed.
- Spring-back amount were measured for estimate the GLARE formability.
- It has been shown that stringers from GLARE 2 2/1 -0,3 can be made without difficulty.
- Laminates (3/2 lay-up) are more stiff and more difficult to bend, damage of structure may occur.

The material examined was GLARE composites (Fig.1-2, Tab.1-2) made of aluminum alloy 2024-T3 and epoxy resin with glass fibres reinforcement (R type). The metal sheet thickness in composite was 0,3 and 0,5 mm.

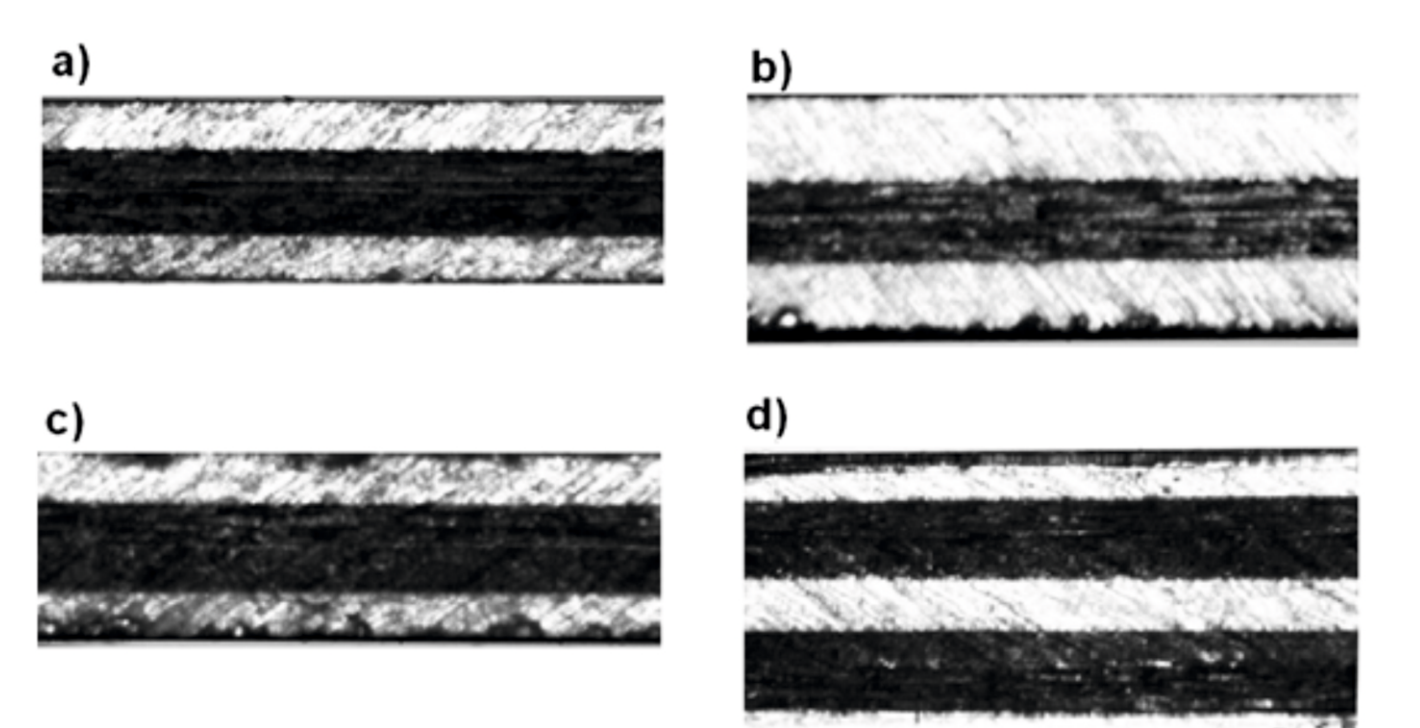


Tablica 1. Kompozyty GLARE użyte do badań  
Table 1. Tested GLARE composites

| Typ GLARE | Warstwa metalu / warstwa prepregu | Grubość blachy ze stopu 2024-T3 [mm] | Sekwencja ułożenia warstw prepregu | Grubość kompozytu [mm] | MVF  |
|-----------|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------|------|
| GLARE 2   | 2/1                               | 0,3                                  | 0°/0°                              | 1,1                    | 0,55 |
|           | 2/1                               | 0,5                                  | 0°/0°                              | 1,53                   | 0,65 |
| GLARE 3   | 3/2                               | 0,3                                  | 0°/90°                             | 1,1                    | 0,55 |
|           | 3/2                               | 0,5                                  | 0°/90°                             | 1,55                   | 0,65 |
| GLARE 6   | 2/1                               | 0,5                                  | +45°/-45°                          | 1,55                   | 0,65 |

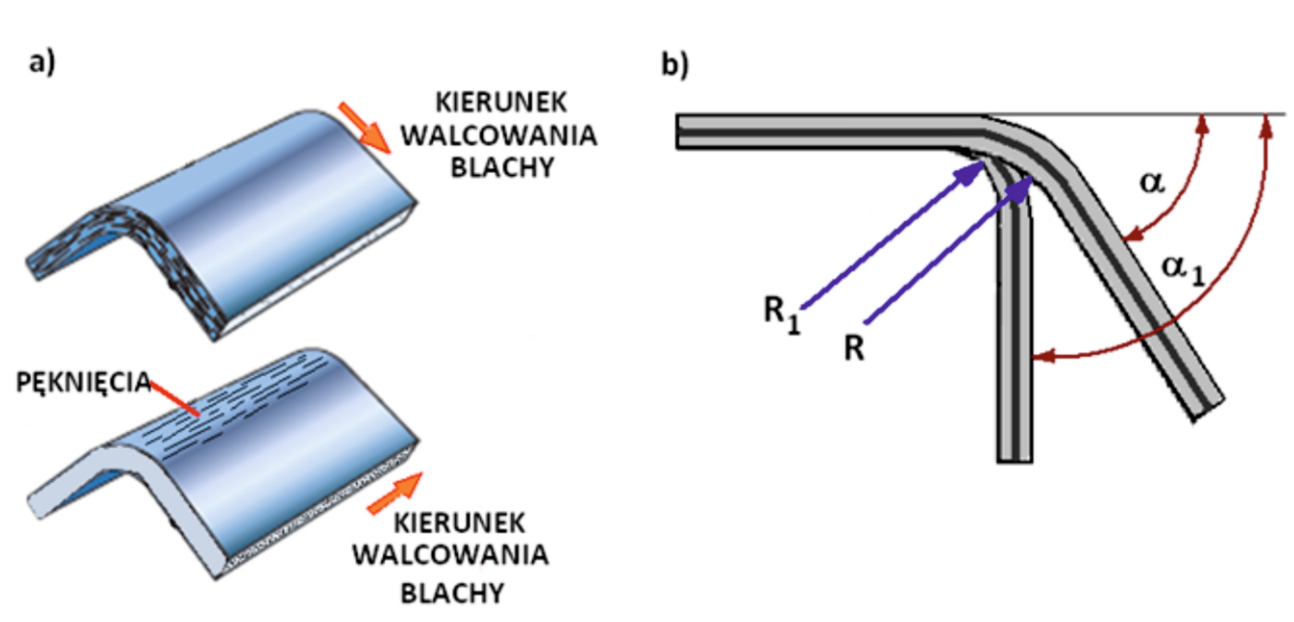
Tablica 2. Skład i właściwości stopu 2024  
Table 2. The property of 2024 aluminum alloy

| Skład stopu 2024                                     |      |           |           |           |     |      |      |      |  |
|--|------|-----------|-----------|-----------|-----|------|------|------|--|
| Si   | Fe   | Cu        | Mn        | Mg        | Cr  | Zn   | Ti   | Zr   |  |
| 0,50   | 0,50 | 3,8 - 4,9 | 0,3 - 0,9 | 1,2 - 1,8 | 0,1 | 0,25 | 0,15 | <0,1 |  |
| Właściwości blachy (0,4 -1,5 mm) ze stopu Al 2024-T3 |      |           |           |           |     |      |      |      |  |
| Min. Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$ [MPa]         | 435  |           |           |           |     |      |      |      |  |
| Moduł Younga E [GPa]                                 | 73,1 |           |           |           |     |      |      |      |  |
| Min. Granica plastyczności $R_{p0,2}$ [MPa]          | 290  |           |           |           |     |      |      |      |  |
| Gęstość [ $g/cm^3$ ]                                 | 2,78 |           |           |           |     |      |      |      |  |

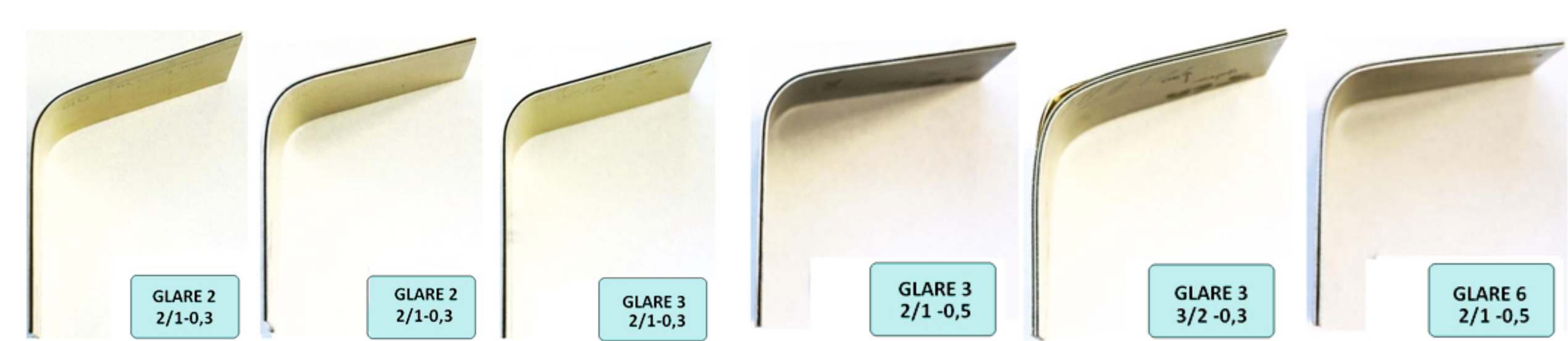


Rys. 2. Budowa wybranych kompozytów GLARE: a) GLARE 2 2/1 -0,3; b) GLARE 2 2/1 -0,5; c) GLARE 3 2/1 -0,3; d) GLARE 3 3/2 -0,3  
Fig. 2. The structure of GLARE composites: a) GLARE 2 2/1 -0,3; b) GLARE 2 2/1 -0,5; c) GLARE 3 2/1 -0,3; d) GLARE 3 3/2 -0,3

Linia gięcia badanych próbek przebiegała odpowiednio równolegle i prostopadłe do kierunku walcowania arkuszy metalu w kompozycie (Rys.3). Proces gięcia przeprowadzono w warunkach stałej temperatury i ze stałą szybkością procesu. Stanowisko do procesu gięcia stanowiła prasa manualna oraz osprzęt komputerowy rejestrujący siłę nacisku oraz przemieszczenie stempla (matryca) i stempeł w kształcie litery „V” o kącie 90o) (Rys.4). W trakcie trwania procesu rejestrowano siłę nacisku stempla oraz przemieszczenie (drogę stempla).



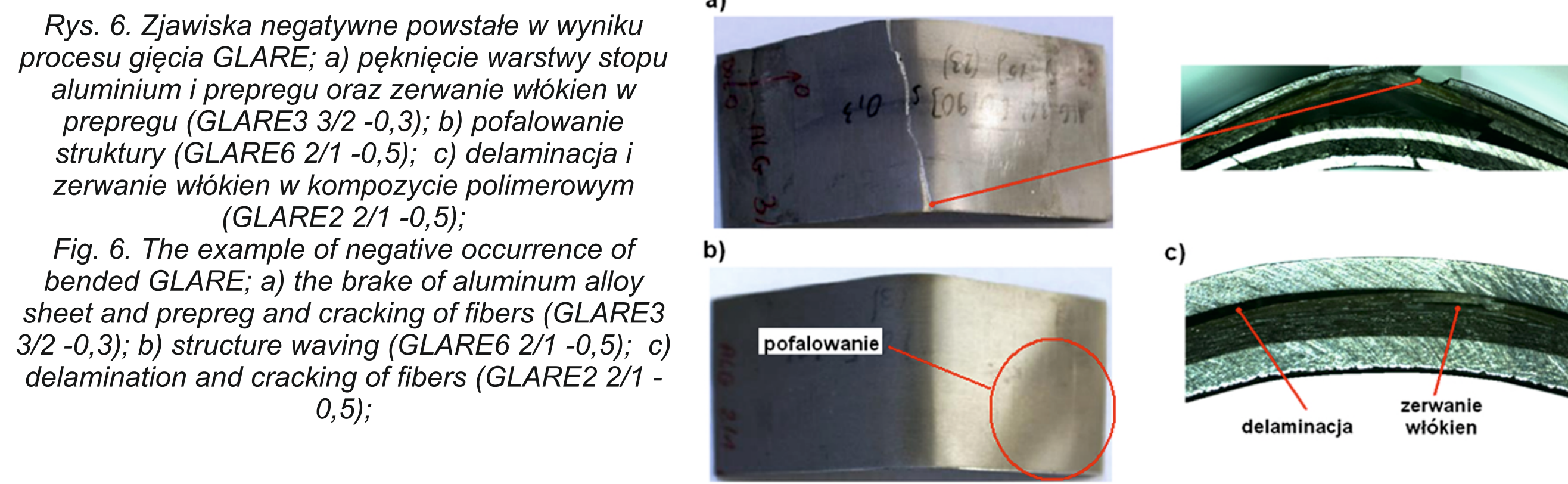
Rys. 3. Schemat gięcia GLARE: a) dobór linii gięcia kompozytu; b) zjawisko sprężynowania giętego arkusza (R – promień giętego laminatu,  $R_1$  – promień gięcia,  $\alpha$  – kąt giętego kompozytu,  $\alpha_1$  – kąt gięcia,  $g$  – grubość kompozytu)  
Fig. 3. The scheme of GLARE bending: a) bend line possibilities; b) scheme of spring-back ( $R$  – bend radii of laminate,  $R_1$  – bending radius,  $\alpha$  – composite angle,  $\alpha_1$  – bending angle,  $g$  – thickness of composite)



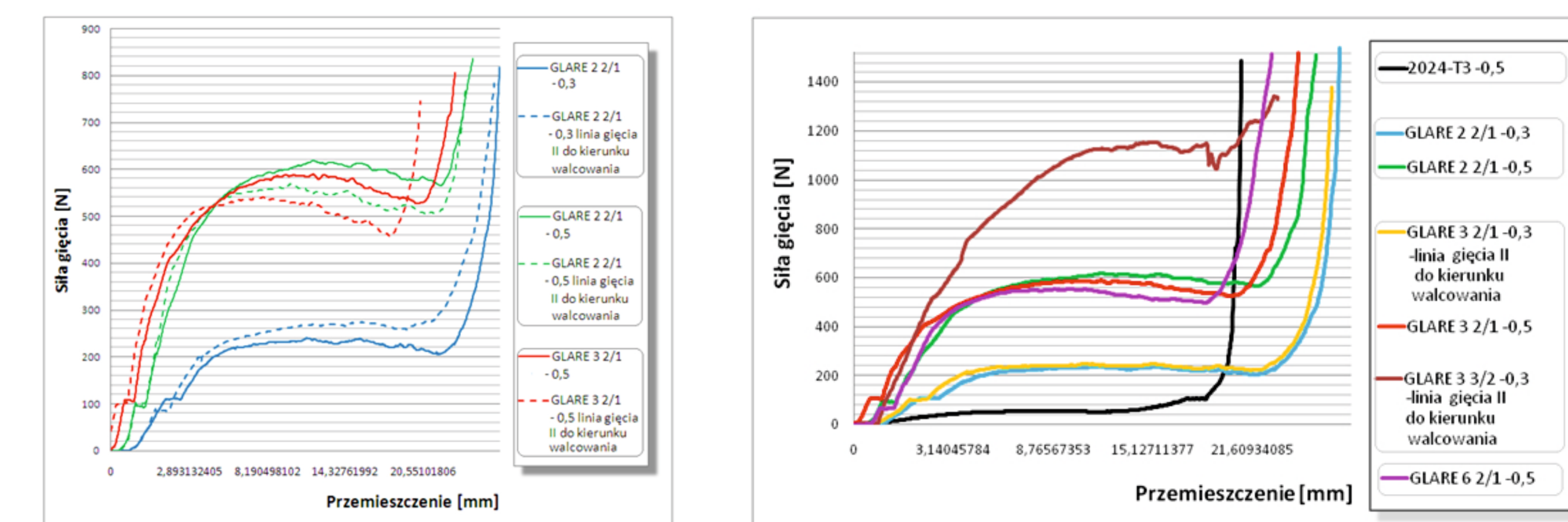
Rys. 5. Zdjęcia wygiętych próbek z wybranych kompozytów GLARE (linia gięcia prostopadła i równoległa do kierunku walcowania blachy)  
Fig. 5. The bended samples of GLARE composites (the bending line parallel and perpendicular to aluminum rolling direction)

W wyniku działania naprężeń ściskających oraz rozciągających w trakcie procesu gięcia w wybranych kompozytach pojawiły się zjawiska negatywne (Rys.6).

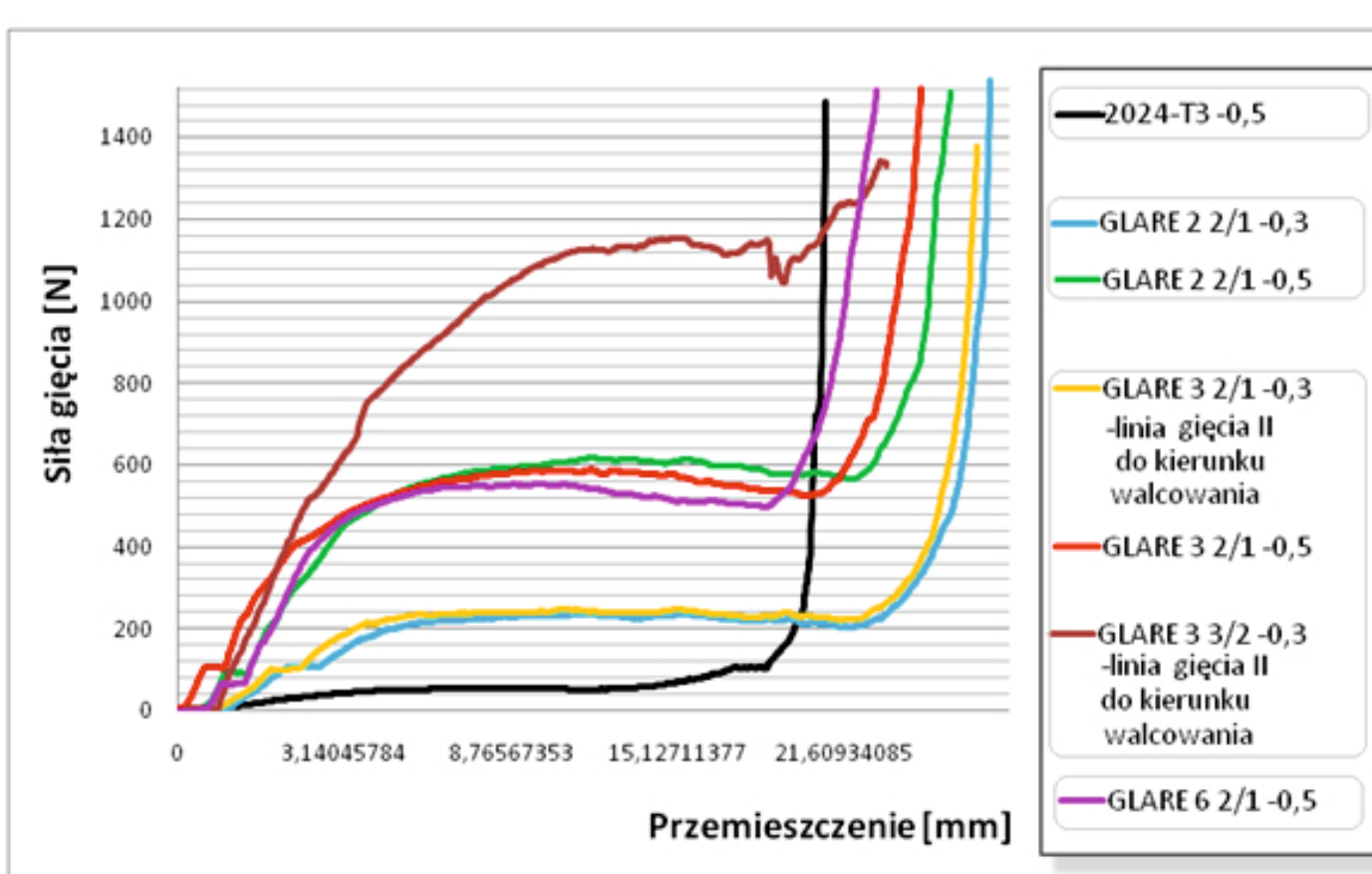
- delaminacja
- pofalowanie struktury kompozytu
- pocienienie warstwy metalu
- pęknięcie prepregu
- zerwanie włókien w kompozycie polimerowym
- pęknięcie blachy



Rys. 6. Zjawiska negatywne powstałe w wyniku procesu gięcia GLARE: a) pęknięcie warstwy stopu aluminium i prepregu oraz zerwanie włókien w prepregu (GLARE3 3/2 -0,3); b) pofalowanie struktury (GLARE6 2/1 -0,5); c) delaminacja i zerwanie włókien w kompozycie polimerowym (GLARE2 2/1 -0,5);  
Fig. 6. The example of negative occurrence of bended GLARE: a) the brake of aluminum alloy sheet and prepreg and cracking of fibers (GLARE3 3/2 -0,3); b) structure waving (GLARE6 2/1 -0,5); c) delamination and cracking of fibers (GLARE2 2/1 -0,5);

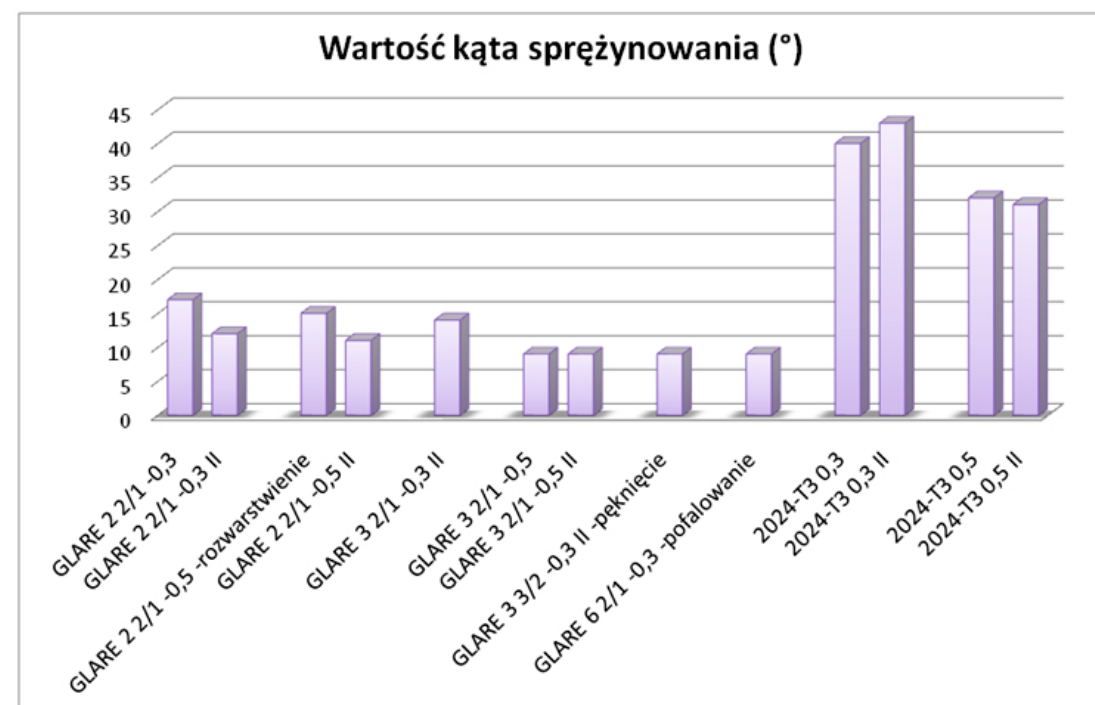


Rys. 7. Wykres zależności siły nacisku prasy od drogi stempla dla kompozytów GLARE 2 i GLARE 3 giętych równoległe i prostopadłe do kierunku walcowania arkusza ze stopu 2024-T3  
Fig. 7. Relationship between bending force and punch displacement for GLARE 2 and GLARE 3 composites of bend line parallel or perpendicular to roll direction of 2024-T3 sheet

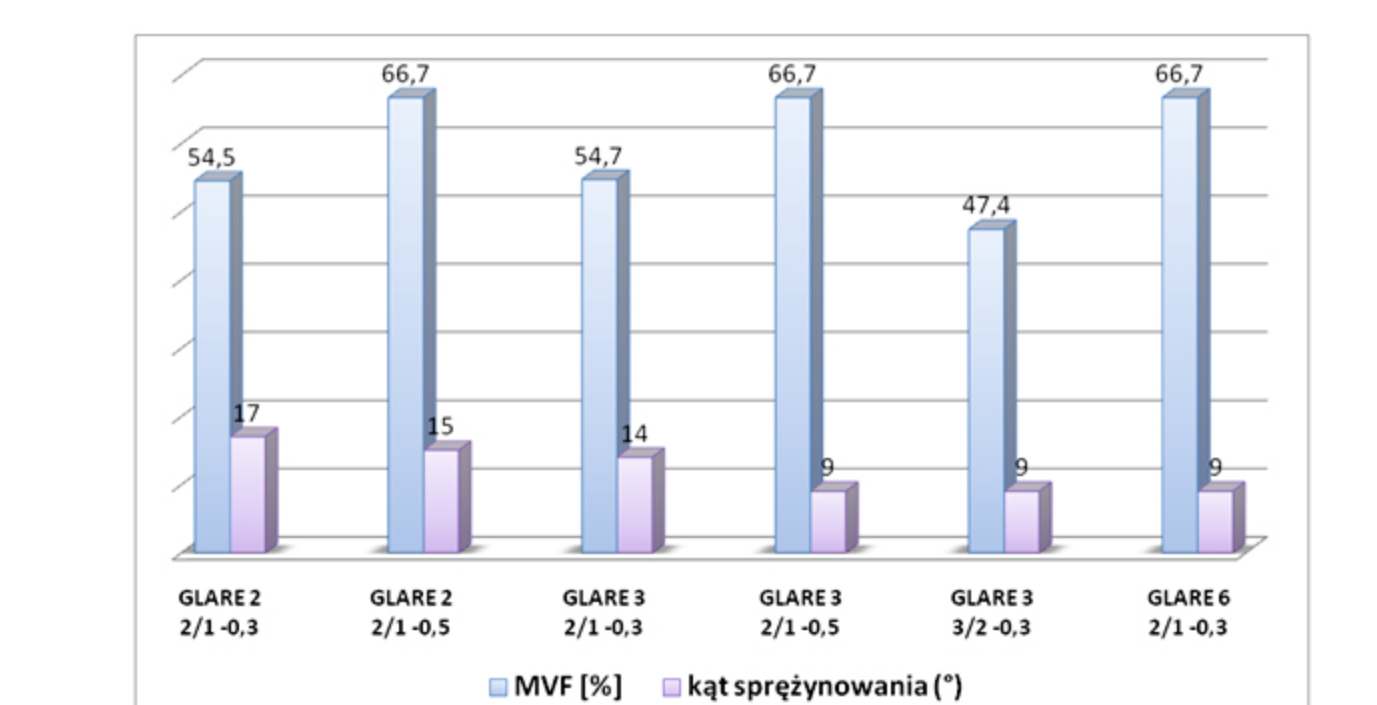


Rys. 8. Wykres zależności nacisku prasy [N] a drogą stempla [mm] uzyskany w procesie gięcia blachy ze stopu 2024-T3 oraz kompozytów GLARE 2 i GLARE 3 i GLARE 6  
Fig. 8. Relationship between bending force according punch displacement for 2024-T3 sheet and GLARE 2, GLARE 3 and GLARE 6 composites

Wartości kąta sprężynowania dla kompozytów GLARE 2 zbudowanych z dwóch warstw arkuszy stopu o grubości 0,3 i 0,5mm różnią się nieznacznie i są porównywalne do wartości kąta sprężynowania kompozytu GLARE 3 zawierającego arkusze o grubości 0,3mm. Kompozyty GLARE 6 2/1-0,3, GLARE 3 2/1 -0,5 oraz GLARE 3 3/2 -0,3 wykazują porównywalne wartości kąta sprężynowania. Dla kompozytów tego samego typu, ale o różnym doborze linii gięcia zauważalny jest wzrost sztywności materiału giętego równoległe do kierunku walcowania blachy (Rys.9).



Rys. 9. Wartość współczynnika sprężynowania dla giętych kompozytów GLARE oraz blach ze stopu 2024-T3  
Fig. 9. The spring-back factors measured for GLARE composites and 2024-T3 aluminum sheets



Rys. 10. Porównanie kąta sprężynowania dla GLARE o różnym udziale względnym fazy metalicznej (MVf) w kompozycie  
Fig. 10. The comparison of spring-back amount for GLARE composites with various MVf level

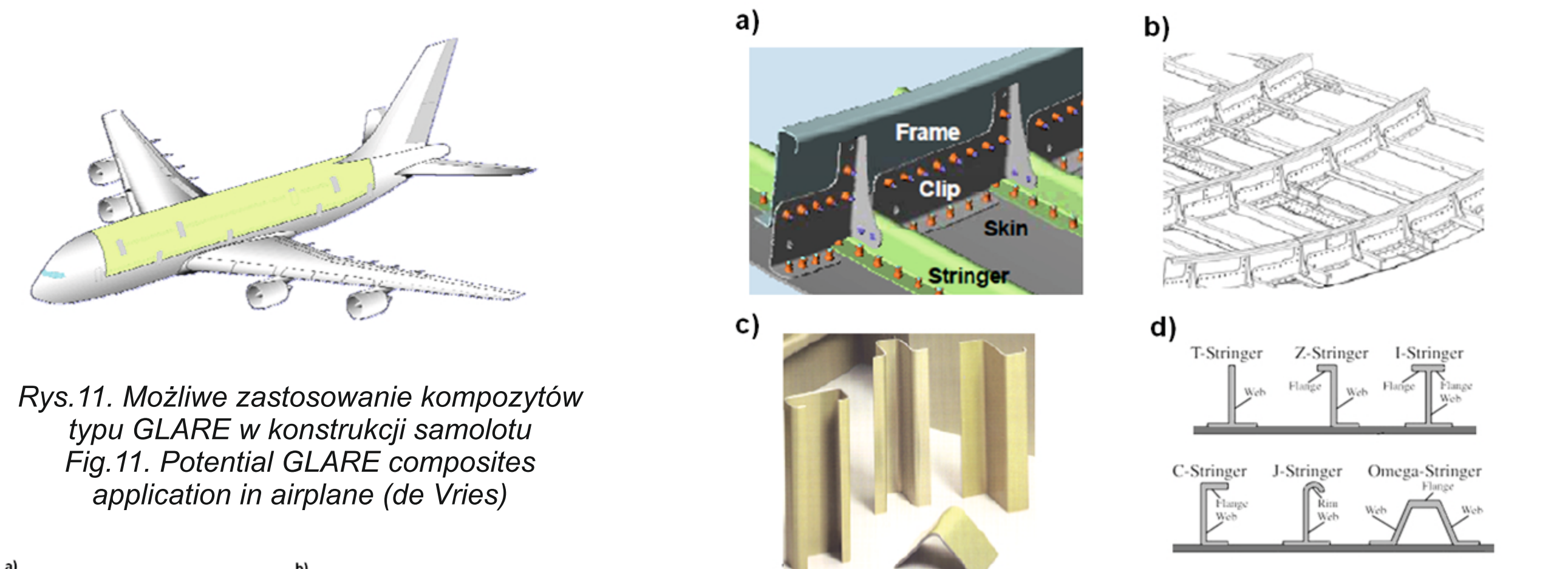
Różnice w poziomie wartości kąta sprężynowania są widoczne dla kompozytów tego samego typu, ale o różnej zawartości fazy metalicznej. Wraz ze zwiększeniem wartości MVf widoczne jest obniżenie wartości kąta sprężynowania (zmniejszenie własności plastycznych kompozytu) (Rys.10).

**Wnioski**  
Conclusions

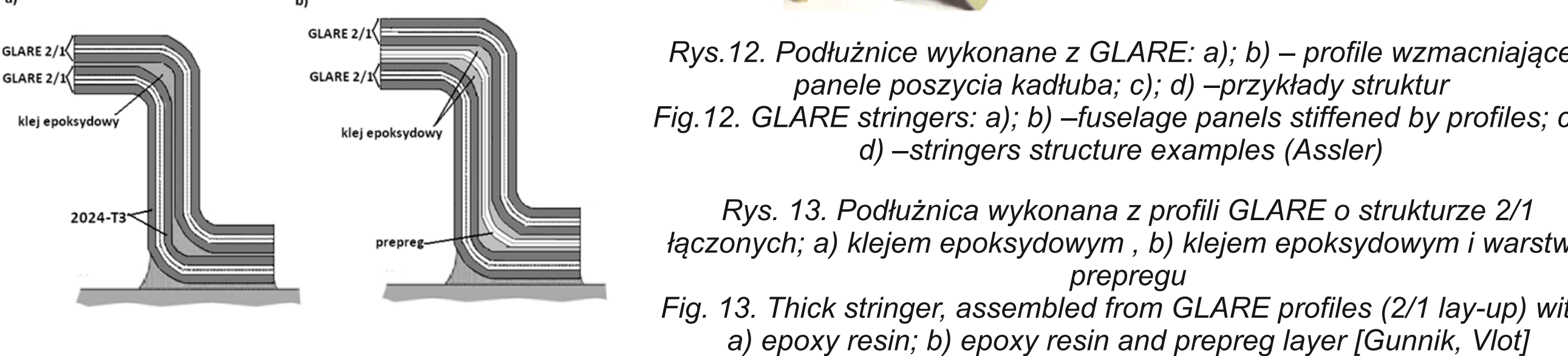
- Formowanie kompozytów GLARE w procesie gięcia w kształcie „V” w matrycy zamkniętej w celu otrzymania profili wzmacniających jest możliwe dla kompozytów GLARE 2 o ułożeniu warstw 2/1 i grubości arkuszy aluminium 0,3mm.
- Kształtowanie plastyczne kompozytów zbudowanych z grubszych blach metalu oraz większej liczby warstw wiąże się ze wzrostem sztywności kompozytów, co skutkuje występowaniem zjawisk negatywnych w formowanych GLARE.
- Znajomość poziomu sprężynowania materiału oraz charakteru odkształcenia w procesie gięcia umożliwia dobór parametrów procesu oraz projektowanie geometrii stempla i matrycy w celu otrzymania elementów GLARE o określonym kącie gięcia, co umożliwiła produkcję wybranych struktur profili wzmacniających.

- The GLARE stringers forming during bending is feasible for GLARE 2 2/1 -0,3.
- Forming of thicker and more stiff laminates leads to negative occurrences.
- The knowledge about spring-back amount and formability of several GLARE composites enable to better designing of bending process parameters for producing selected stringers structure.

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



Rys. 11. Możliwe zastosowanie kompozytów typu GLARE w konstrukcji samolotu  
Fig. 11. Potential GLARE composites application in airplane (de Vries)



Rys. 12. Podłużnice wykonane z GLARE: a) i b) – profile wzmacniające panela poszycia kadłuba; c) i d) – przykłady struktur GLARE stringers: a) i b) – fuselage panels stiffened by profiles; c) i d) – stringers structure examples (Assler)  
Rys. 13. Podłużnica wykonana z profili GLARE o strukturze 2/1 łączonych; a) klejem epoksydowym, b) klejem epoksydowym i warstwą prepregu  
Fig. 13. Thick stringer, assembled from GLARE profiles (2/1 lay-up) with: a) epoxy resin; b) epoxy resin and prepreg layer [Gunnik, Vlot]

**Przykłady współpracy z przemysłem lotniczym**  
Collaboration with aviation industry

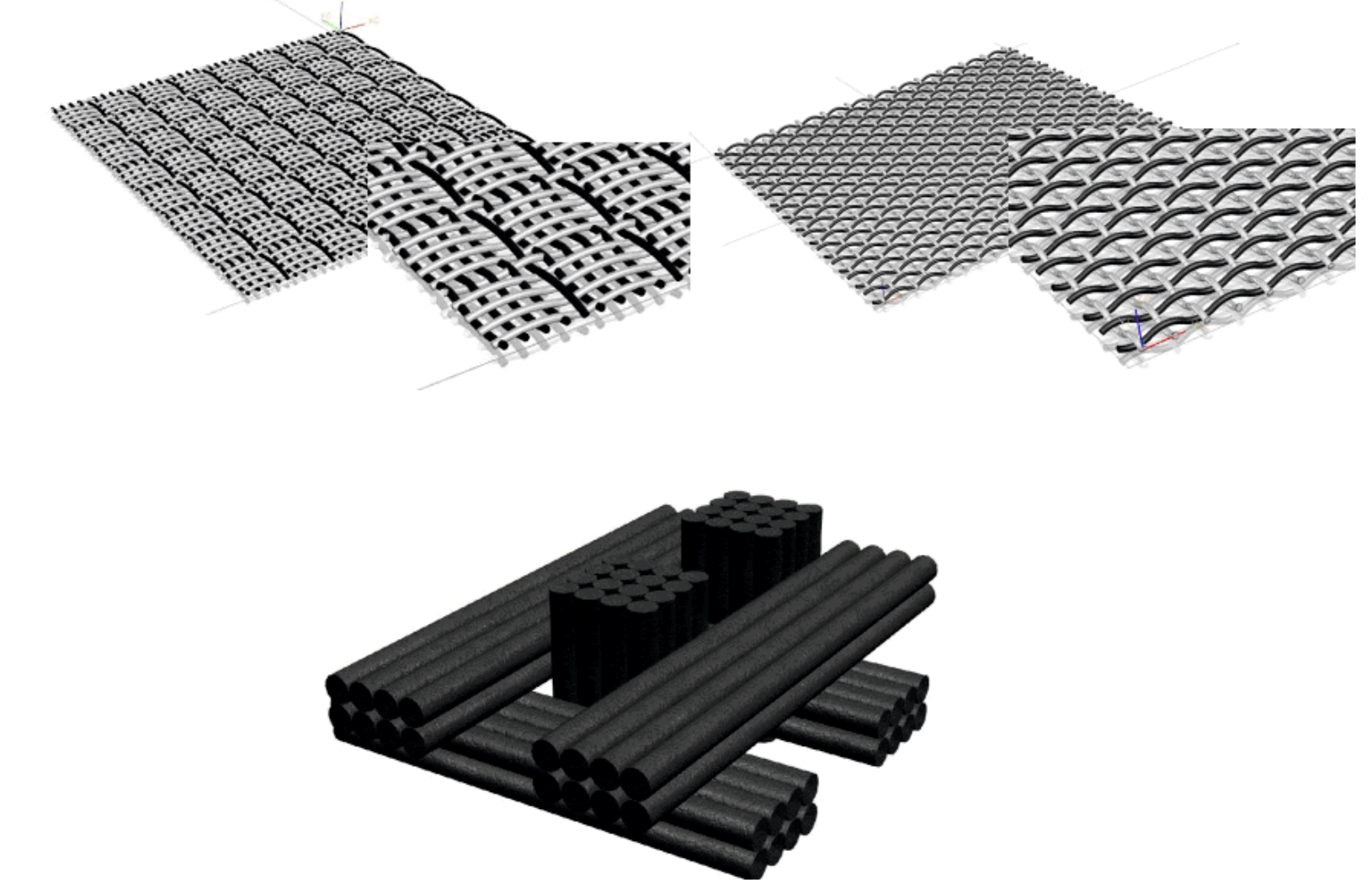
Oferta współpracy z PZL Mielec

**Wyniki badań**  
Results

**Materiały kompozytowe wzmacniane włóknami:**

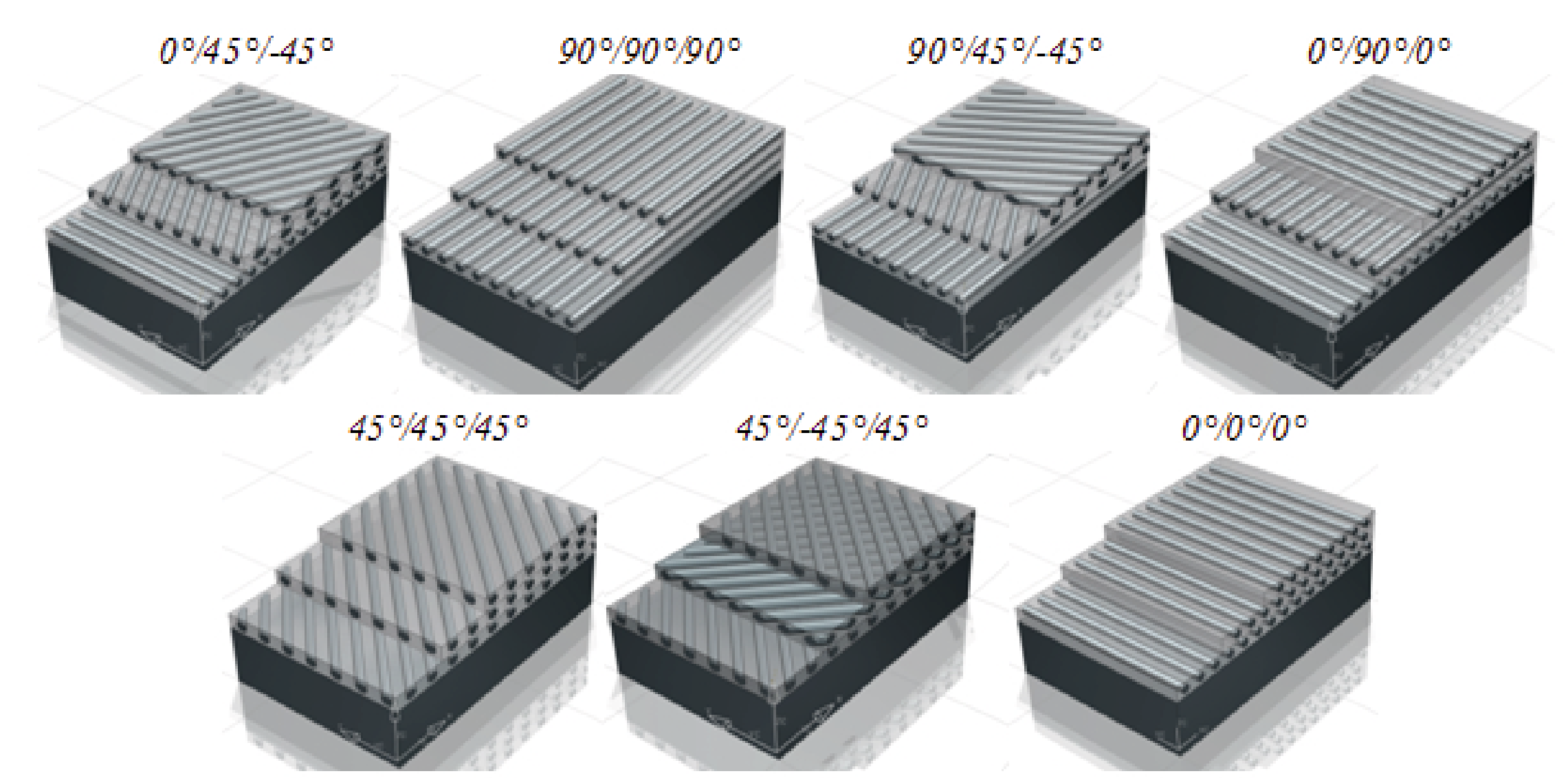
Materiały kompozytowe to materiały składające się z min. dwóch składników przy czym ich połączenie zachodzi na poziomie makroskopowym. Wpływ na kształtowanie właściwości mechaniczno wytrzymałościowych mają:

Rodzaj materiału wzmocnienia: włókna węglowe, włókna szklane, włókna keowlarowe itp..  
Rodzaj matrycy: metalowa, ceramiczne, polimerowa  
Układ włókien – w obszarze pojedynczej warstwy. Wyróżniamy dwie podstawowe grupy materiały jednokierunkowe i wielokierunkowe ( istnieje bardzo wiele układów splotowych, układ prosty, koszykowy, pojedynczy, podwójny, trójkierunkowy itp.. )Układy włókien w ramach poszczególnych warstw zostały przedstawione poniżej.



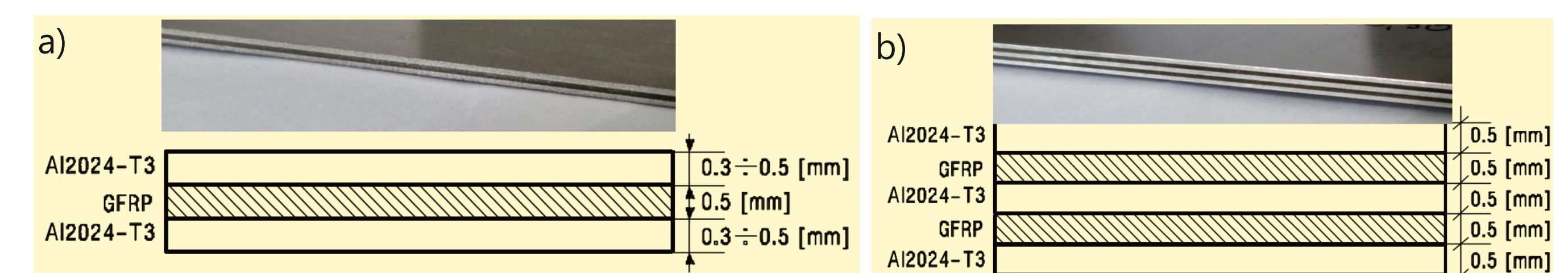
Rys. 1. Aranżacja geometryczna różnych typów laminatów węglowych: a) warstwa o splotie prostym; b) warstwa o splotie koszykowym; c) kompozyt wielokierunkowy  
Fig. 1. The geometric arrangement of the different types of lamina. The geometric arrangement of the different types of laminates of carbon: a) a layer of plain weave, b) the layer of plain basket, c) the composite multidirectional. a) a layer of plain weave, b) the layer of plain basket, c) the composite multidirectional.

Dalsze modyfikacje możliwe są poprzez różnorodną orientację geometryczną pomiędzy laminami. Wszystkie te elementy wpływają na końcowe właściwości materiałów kompozytowych. Powodują jednak diametralną zmianę ich właściwości skrawnych



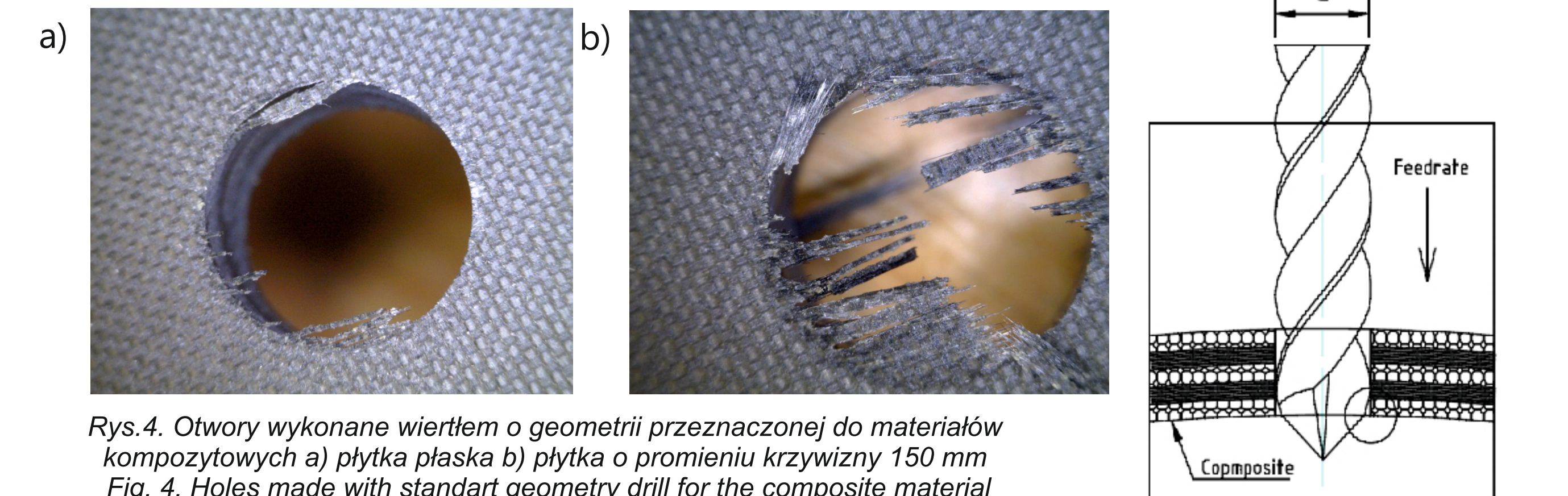
Rys. 2. Geometryczny układ wzajemnej orientacji kierunku włókien w poszczególnych laminach kompozytu węglowego typu CFRP  
Fig.2 Mutual orientation of the geometrical arrangement of CFRP Composite type.

Możliwe są również modyfikacje polegające na łączeniu dwóch grup materiałowych tak jak włókna szklane lub węglowe i materiały niemetaliczne np. stopy aluminium. Materiały tego typu noszą nazwę materiały typu GLARE. Przykładowa aranżacja geomietryczna została pokazana na poniższym rysunku.



Rys. 3. Próbkę wykonaną z materiału typu GLARE  
Fig.3. Samples made os material GLARE

Dodatkowa trudność podczas obróbki skrawaniem sprawiają bardzo skomplikowane kształty elementów wykorzystywanych w lotnictwie. Bardzo często konieczne jest wykonywanie otworów w powierzchniach niepłaskich oraz powierzchniach skośnych. Zmiana wzajemnego położenia pomiędzy krawędzią skrawającą a powierzchnią wierconego elementu jak również kierunkiem przebiegu włókien, wymusza konieczność stosowania specjalnych geometrii wiertel.



Rys. 4. Otwory wykonane wiertłem o geometrii przeznaczonej do materiałów kompozytowych a) płytka płaska b) płytka o promieniu krzywizny 150 mm  
Fig. 4. Holes made with standart geometry drill for the composite material a) a flat plate b) plate having a radius of curvature of 150 mm

Rys. 5. Wzajemne położenie lamin kompozytu w stosunku do krawędzi skrawającej wiertła  
Fig. 5. Composite laminae relative position in relation to the cutting edge of the drill

**Wnioski**  
Conclusions

W.W. właściwości materiałów kompozytowych wymuszają praktycznie każdorazowe dostosowanie geometrii wiertła do danego typu kompozytu.

**Wskaźniki realizacji celów projektu**  
Indicators of the project

**Publikacje**  
1. Wilk M., Śliwa R.E.: **Wpływ fazy metalicznej na efekt kształtowania plastycznego kompozytów typu GLARE**, Rudy i Metale Nieżelazne, nr 12, 2012, str. 839 -845.

**Prace mgr, dr, hab.**  
**Praca doktorska w realizacji**  
Małgorzata Wilk, **Kształtowanie elementów konstrukcji lotniczych z kompozytów typu GLARE**, promotor; R.E Śliwa