

# Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

## Modern material technologies in aerospace industry

### Niekonwencjonalne technologie łączenia elementów konstrukcji lotniczych

#### Unconventional technologies of joining elements of aeronautical constructions

Politechnika Lubelska, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Częstochowska, Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk

#### Tytuł rozwiązania innowacyjnego Title of the innovative solution

1. Konstrukcyjne połączenia klejowe metali na bazie klejów epoksydowych z nanonapełniaczami.
2. Przyspieszone badania wytrzymałości oraz trwałości zmęczeniowej na oddzielenie połączeń klejowych metali.
3. Hybrydowe połączenia elementów poszycia samolotu.

1. Structural joints of metals connected by epoxy resins with nanofillers.
2. Research of fatigue strength and fatigue lifetime of adhesive joints subjected to peel.
3. Hybrid joints of shell plating and reinforcement element.

#### Krótki opis rozwiązania Brief description of the solution

1. Konstrukcyjne połączenia klejowe metali na bazie klejów epoksydowych z nanonapełniaczami.

W ramach tego rozwiązania modyfikowano kleje epoksydowe poprzez napełnianie ich nanomateriałami. Stosowano tego celu nanorurki węglowe oraz nanoprozki materiałów ceramicznych takich jak krzemionka oraz tlenek glinu. Stosowane napełniacze przed wprowadzeniem do żywicy epoksydowej poddawano suszeniu. Żywicę podgrzewano w celu zmniejszenia jej lepkości i po dodaniu odpowiedniej ilości napełniacza poddawano mieszaniną mechanicznemu w środowisku ultradźwięków. Po ostudzeniu mieszaniny dodawano utwardzacze. Kompozycję klejową nanosono na metalowe elementy, których powierzchnia poddana została obróbce strumieniowo-ściernej. Prowadzono badania nośności przy statycznej próbie oddzierania (rys. 3, 4) oraz wysoko-cyklowe badania zmęczeniowe (rys. 5, 6). Model próbki stosowanej do badań przedstawiono na rys. 1.

2. Przyspieszone badania wytrzymałości oraz trwałości zmęczeniowej na oddzielenie połączeń klejowych metali.

Cykliczne obciążenie wywołujące stan rozwarstwiania elementów klejowych to częsta przyczyna zniszczeń analizowanych złączy. Tak więc pożądane są wszelkie rozwiązania zapewniające poprawę wytrzymałości przy takich stanach obciążenia. W celu możliwości prowadzenia wysoko-cyklowych badań zmęczeniowych porównawczych dla różnych wariantów, istotnym jest dysponowanie metodyką umożliwiającą prowadzenie względnie szybkich prób zmęczeniowych. W tym celu opracowano metodykę przyspieszonych badań wysoko-cyklowej wytrzymałości zmęczeniowej, które prowadzono na elektrodynamycznym wzbudniku drgań ETS SOLUTION L Series MPA-102-L620M (rys. 2). Badania zmęczeniowe polegały na obciążeniu próbek napięciem zmiennym o stałej amplitudzie przy częstotliwości rezonansowej płytki próbki klejowej. Wartość częstotliwości rezonansowej próbek przyjmowała wartości rzędu (580-620)Hz.

3. Hybrydowe połączenia elementów poszycia samolotu.

W ramach współpracy prowadzonej z firmą PZL Mielec, dobierano klej do połączenia klejowo-zgrzewanego poszycia samolotu z elementem wzmacniającym (rys. 8). W ramach badań opracowano nową technologię połączenia hybrydowego, w której zamiast kleju stosowana jest dwustronna taśma klejąca do łączenia metali. Wprawdzie proponowane rozwiązanie prowadzi do powstania połączenia o niższej wytrzymałości niż połączenie klejowo-zgrzewane, jednakże możliwe jest uzyskanie zadawalającej wytrzymałości. Korzyścią stosowania taśmy samoprzylepnej jest eliminacja procesu utwardzania kleju oraz przyrządów dociskowych stosowanych w klasycznym procesie klejenia.

1. Structural joints of metals connected by epoxy resins with nanofillers.

The tests were carried out on specimens bonded by means of EPIDIAN 57 epoxy compositions with PAC hardener, properties of which were modified by introducing nanometric materials in the form of carbon nanotubes, nanopowders of alumina and silica into epoxy. Research of static strength (fig. 3, 4) and fatigue strength (fig. 5, 6) of joints subjected to peel were conducted.

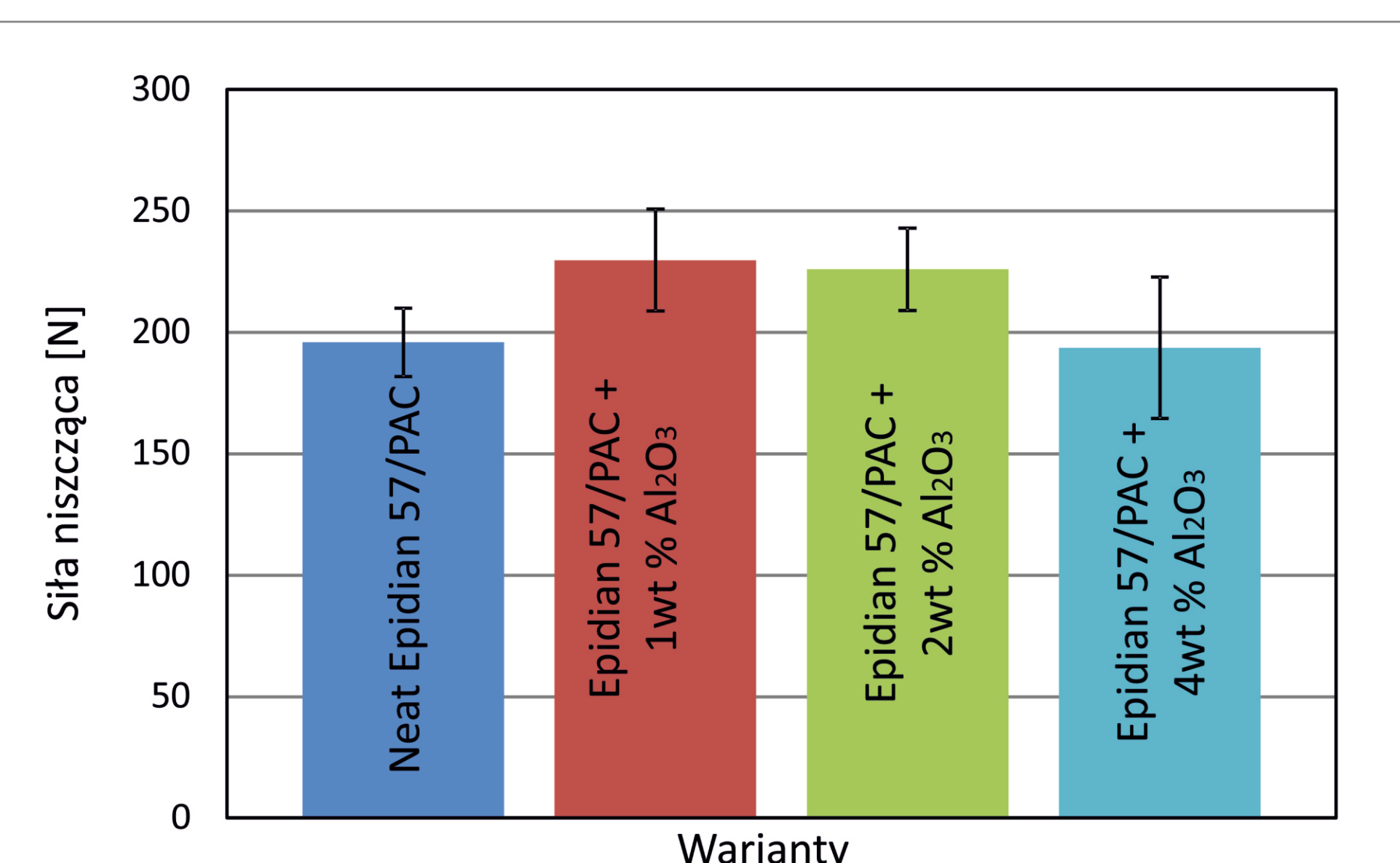
2. Research of fatigue strength and fatigue lifetime of adhesive joints subjected to peel.

The fatigue strength tests were carried out with an electromagnetic vibration inductor ETS SOLUTION L Series MPA-102-L620M. The system offers the possibility to apply loads with harmonic, stochastic, and fast-varying/shock waveforms and has the function of searching for, tracing, and maintaining the resonance frequency. The device generates fast-varying signals with sinusoidal, saw tooth, trapezoid, and rectangular waveforms. The maximum frequency of the generated signals is 4500 Hz. The measuring setup has been additionally equipped with external sensors such as a laser displacement sensor for specimen vibration amplitude measurements and an accelerometer. The whole measuring setup was linked to a PC. A proprietary program developed specifically to support the measurement procedure allowed to control the measurement process which consisted in maintaining the specimen vibration frequency at its resonance value.

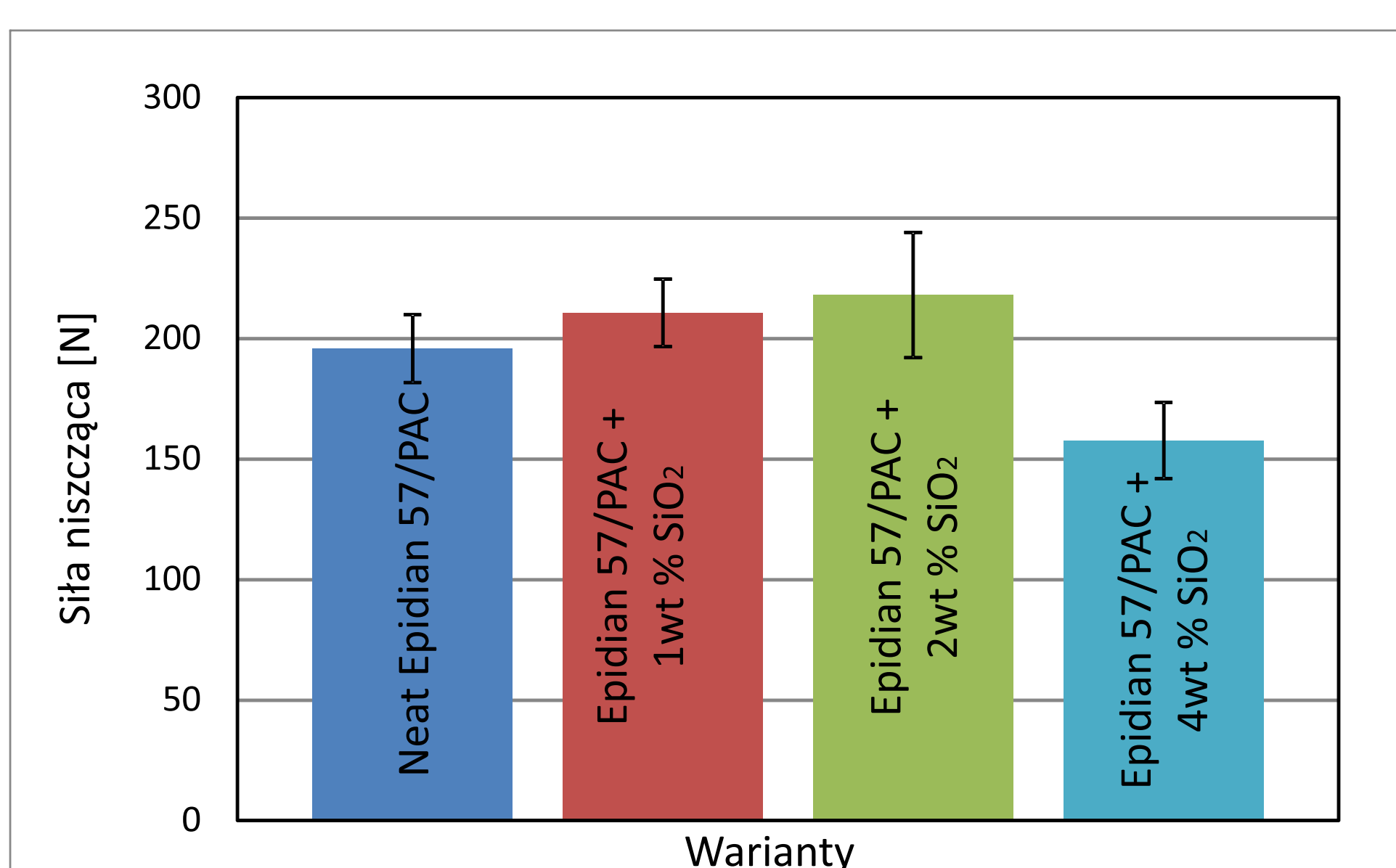
3. Hybrid joints of shell plating and reinforcement elements.

During research of strength of joint of shell plating and reinforcement element [fig. 8] we proposed use of pressure-sensitive adhesive tape instead of adhesive. Despite that strength of this type of joint is lower than in case of traditional method of joining, it was revealed that it is sufficient in

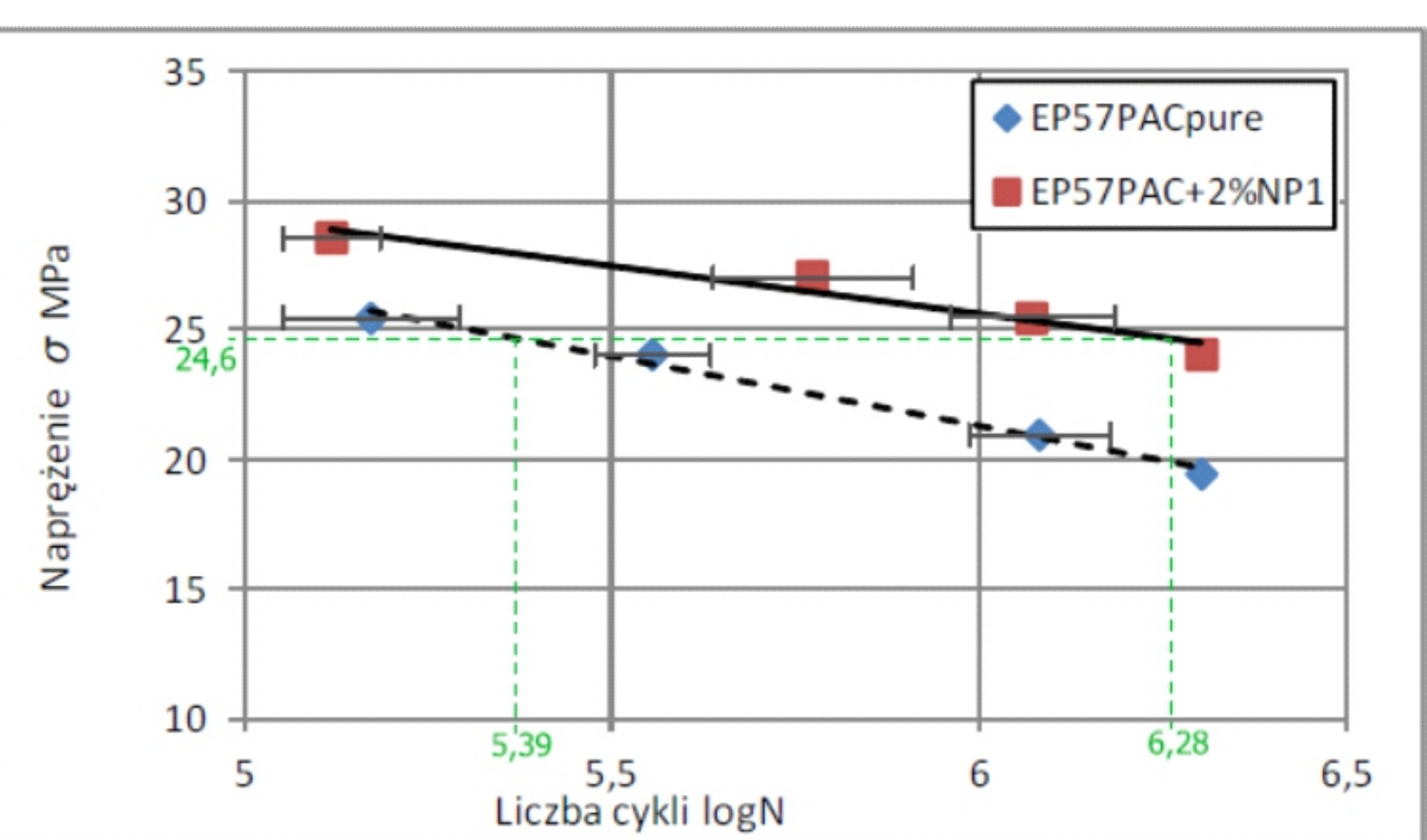
#### Graficzna prezentacja rozwiązania innowacyjnego Visualization of the innovative solution



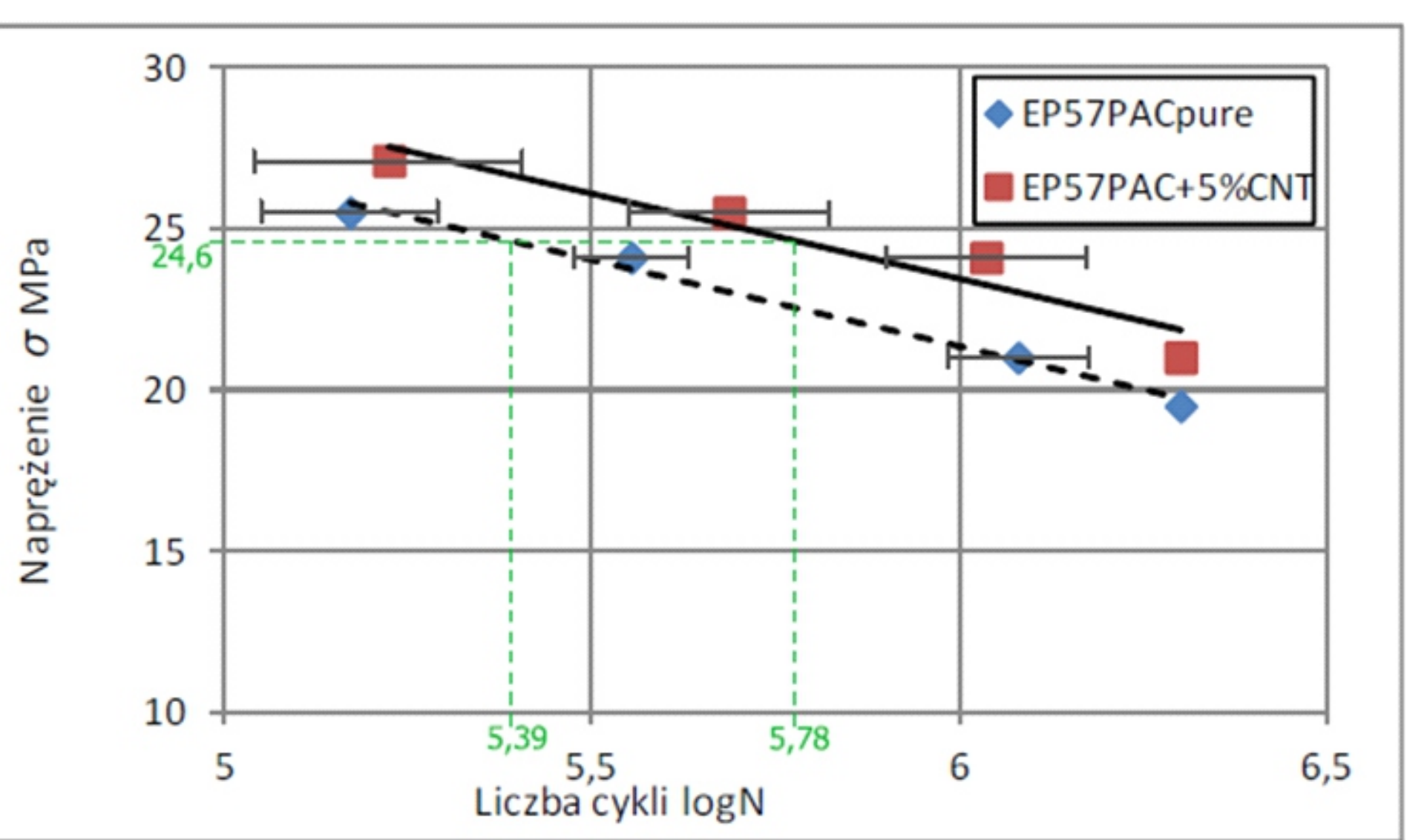
Rys.3. Wyniki badań nośności przy statycznej próbie oddzierania dla próbek klejonych kompozycją Epidian 57/PAC w wariantach podstawowym oraz z 1%, 2% oraz 4% zawartością wagową nanoprozisku tlenku glinu



Rys.4. Wyniki badań nośności przy statycznej próbie oddzierania dla próbek klejonych kompozycją Epidian 57/PAC w wariantach podstawowym oraz z 1%, 2% oraz 4% zawartością wagową nanoprozisku krzemionki

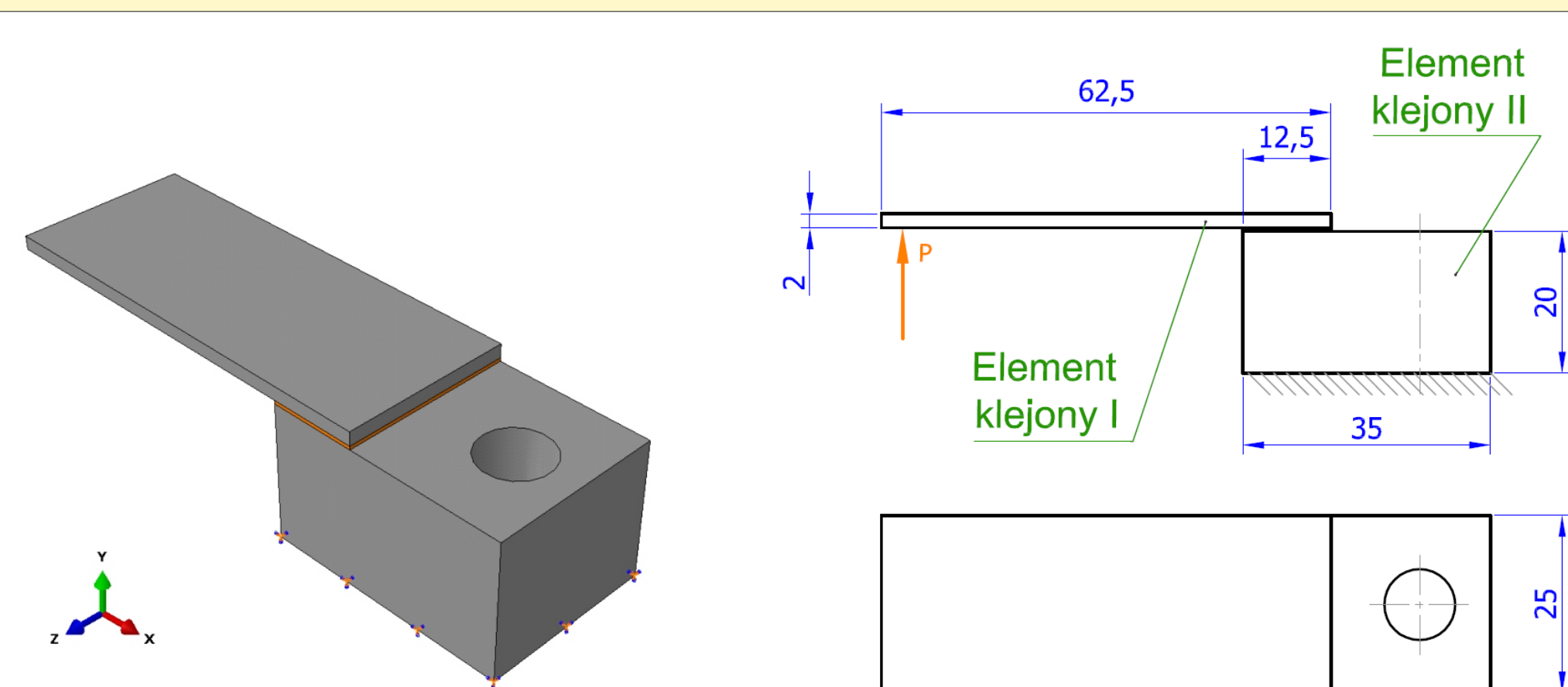


Rys.5. Porównanie krzywych zmęczeniowych dla próbek klejonych kompozycją Epidian 57/PAC w wariantach podstawowym oraz z 2% zawartością wagową nanoprozisku krzemionki

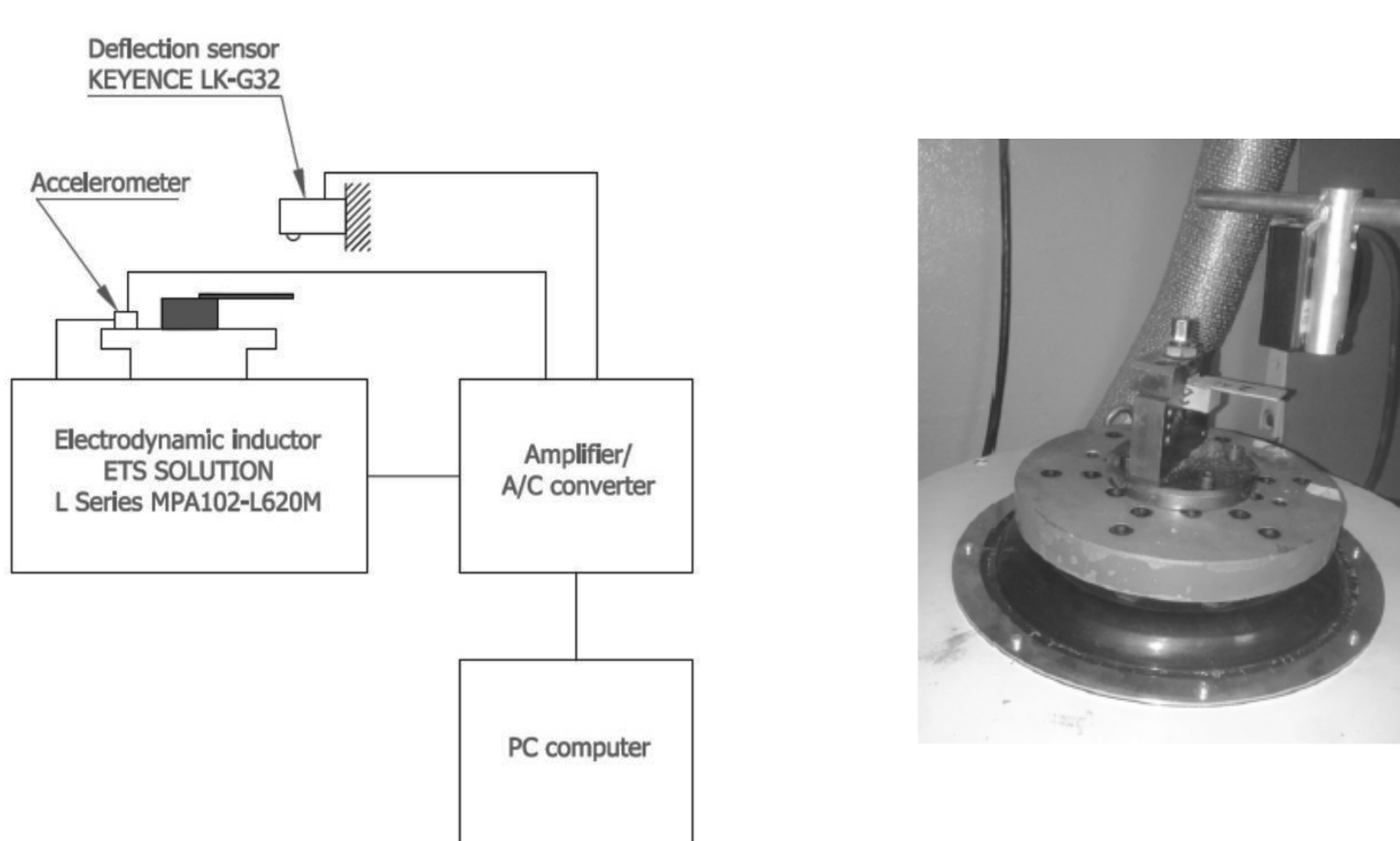


Rys.6. Porównanie krzywych zmęczeniowych dla próbek klejonych kompozycją Epidian 57/PAC w wariantach podstawowym oraz z 2,5% zawartością nanorurek węglowych

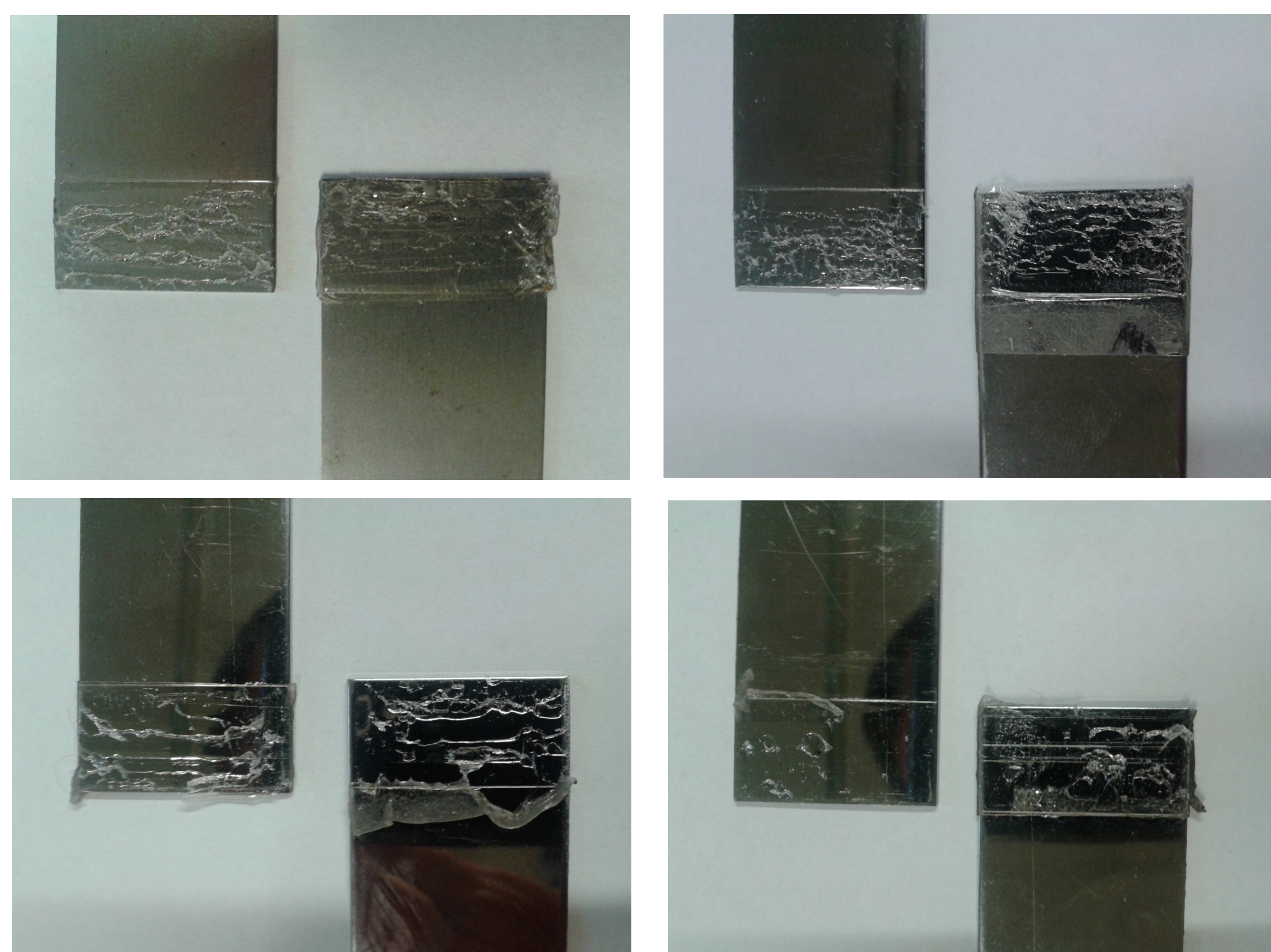
#### Graficzna prezentacja rozwiązania innowacyjnego Visualization of the innovative solution



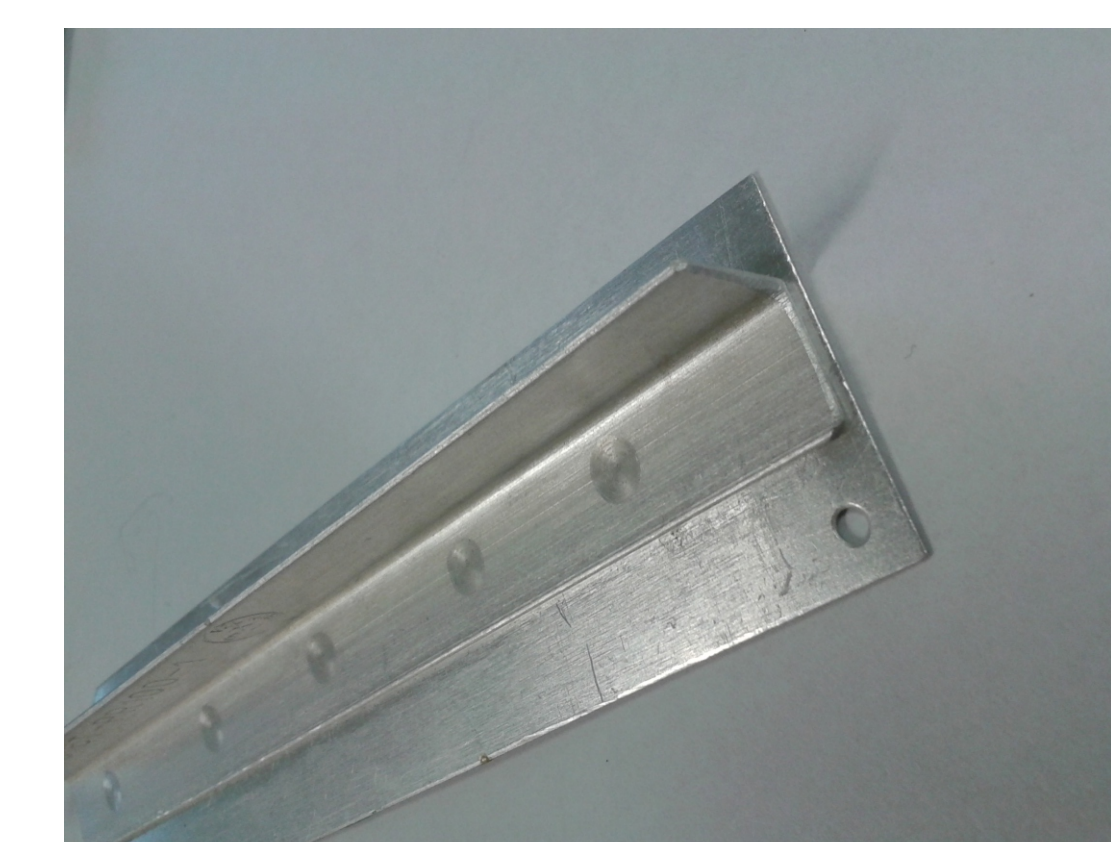
Rys.1. Próbką złącza klejowego używana do badań wytrzymałościowych



Rys.2. Schemat stanowiska do badań wytrzymałości zmęczeniowej oraz zdjęcie próbki zamontowanej na stole wzbudnika



Rys.7. Powierzchnie złomów połączeń uzyskanych przy użyciu samoprzylepnych taśm do metali. Badania prowadzono dla stopu aluminium 2024 oraz stali kwasoodpornej AISI 304



Rys.8. Próbką do badań połączenia hybrydowego poszycia samolotu z elementem wzmacniającym

#### Zalety i ograniczenia rozwiązania innowacyjnego Advantages and restrictions of innovative solution

1. Konstrukcyjne połączenia klejowe metali na bazie klejów epoksydowych z nanonapełniaczami.

- Zalety:**
- wzrost nośności połączenia klejowego przy statycznych próbach obciążenia na oddzielenie (maks. ok. 14%),
  - wzrost wysoko-cyklowej wytrzymałości zmęczeniowej połączeń klejowych na oddzielenie (maks. ok.16%) ,
  - znaczący wzrost trwałości zmęczeniowej połączeń klejowych (maks. ok. 600%),
  - wzrost temperatury zeszklenia kompozycji klejowej z nanonapełniaczami (maks. ok. 20%),
  - ww. zmiany uzyskane bez wzrostu masy kompozycji klejowej.

- Ograniczenia:**
- wybrane nanonapełniacze, jak nanorurki węglowe, są kosztowne/trudne do uzyskania,
  - trudności w uzyskaniu powtarzalności cech kompozycji klejowej z nanonapełniaczami,
  - reżim przechowywania nanomateriałów, ich wysoka wrażliwość na wilgoć sprawia, że łatwo ulegają aglomeracji tracąc unikalne właściwości nanoobjektów, określenie czy doszło do aglomeracji wymaga dodatkowych badań.

2. Przyspieszone badania wytrzymałości oraz trwałości zmęczeniowej na oddzielenie połączeń klejowych metali.

- Zalety:**
- szybka metodyka zmęczeniowych prób wysoko-cyklowych,
  - możliwość sprawnej weryfikacji umocnienia różnymi metodami połączenia klejowego przy obciążeniach zmiennych.
- Ograniczenia:**
- badania prowadzone są przy częstotliwościach niespotykanych w rzeczywistych konstrukcjach klejowych, co może generować nieuwzględniane zjawiska,
  - ograniczenia ze względu na rozmiary oraz geometrię próbek.

3. Hybrydowe połączenia elementów poszycia samolotu.

- Zalety:**
- dzięki zastosowaniu taśmy samoprzylepnej łatwość wykonania połączenia, brak stosowania przyrządów ustalających i dociskowych,
  - eliminacja czasochłonnego procesu utwardzania spoiny klejowej,
  - pewność co do wypełnienia szczeliny pomiędzy elementami łączonymi.
- Ograniczenia:**
- badania prowadzone są przy częstotliwościach niespotykanych w rzeczywistych konstrukcjach klejowych, co może generować nieuwzględniane zjawiska,
  - ograniczenia ze względu na rozmiary oraz geometrię próbek.

1. Structural joints of metals connected by epoxy resins with nanofillers.

- Advantages:**
- increase of static strength of adhesive joints subjected to peel
  - increase of fatigue strength of adhesive joints subjected to peel
  - significant increase of fatigue lifetime of adhesive joints subjected to peel
  - improvement of strength properties without increase of weigh of joint.

- Restrictions:**
- some nanofillers are expensive and manufacturing process is complicated,
  - regime of storage of nanomaterials, some nanopowders are very sensitive on moisture, and and it is reason of agglomeration forming.

2. Research of fatigue strength and fatigue lifetime of adhesive joints subjected to peel.

- Advantages:**
- fast methodology of high-cyclic fatigue research,
  - possibilities of quickly verification of reinforcement of joints subjected to dynamic load.
- Restrictions:**
- high frequency of test is possible reason of induce some additional effects in joints that are not exist in real conditions of work,
  - connected with overall dimensions of specimens.

3. Hybrid joints of shell plating and reinforcement element.

- Advantages:**
- facility of perform of joint using pressure-sensitive adhesive tape,
  - elimination of positioning fixture and prolonged time of curing,
  - pressure-sensitive adhesive tape ensure filling of gap between adherends.
- Restrictions:**
- considerably lower static strength that for traditional adhesive (bonded/bolted) joint.
  - unrecognized behaviour of joint under dynamic load and changeable conditions of environment.

#### Możliwe zastosowania w lotnictwie i innych gałęziach gospodarki Examples of application in aviation and other branches

Kompozycje klejowe z nanonapełniaczami mogą być stosowane do wzmocnienia konstrukcji klejonych. Wymaga to opracowania technologii mieszania żywicy możliwej do stosowania w warunkach przemysłowych i zapewniającej powtarzalność stopnia dyspersji nanoobjektów w strukturze kleju.

Połączenia przy użyciu taśm samoprzylepnych mogą być stosowane do wstępnego ustalania elementów w procesach produkcyjnych oraz mogą być stosowane alternatywnie wobec połączeń klejowych w węzłach konstrukcyjnych o niskich wymaganiach wytrzymałościowych. Samoprzylepne taśmy klejące do metali mogą być z powodzeniem stosowane w połączeniach hybrydowych wzmacniając połączenia zgrzewane lub nitowe.

#### Oferta dla przemysłu The offer for industry

1. Metodyka przygotowania kompozycji klejów epoksydowych z nanonapełniaczami.
2. Badania wytrzymałości statycznej oraz zmęczeniowej połączeń klejowych.
4. Analiza numeryczna MES połączeń klejowych.
5. Badania wytrzymałościowe połączeń hybrydowych.
6. Technologia połączeń hybrydowych z zastosowaniem taśm samoprzylepnych oraz badania tego typu złączy.

1. Methodology of preparation of adhesive epoxy with nanofillers.
2. Research of static strength and fatigue strength of adhesive joints subjected to peel.
3. FEM analysis of adhesive joints.
4. Research of hybrid joints.
5. Technology of hybrid joints connected by means of pressure-sensitive adhesive tapes.