

## WPŁYW MODYFIKACJI FIZYCZNEJ NA WŁAŚCIWOŚCI KLEJU KONSTRUKCYJNEGO

### Streszczenie

W artykule zaprezentowano wyniki badań wpływu fizycznej modyfikacji kleju Epidian 57/Z1 na jego właściwości mechaniczne. Klej modyfikowano poprzez dodanie mikro i nanocząstek takich jak nanorurki węglowe, fulereny, montmorylonit, węglík krzemu, wolfram i mikrobalony. Badaniami walidującymi były statyczna próba rozciągania próbek w której określono współczynnik sprężystości wzdłużnej oraz statyczna próba ściskania gdzie również wyznaczono współczynnik sprężystości wzdłużnej oraz wytrzymałość na ściskanie. W większości przypadków stwierdzono pogorszenie właściwości kleju po dodaniu cząstek bez względu na ich rozmiar i udział procentowy.

### WSTĘP

Pomysł zastosowania klejenia do połączeń części metalowych miał początki w odpowiedniej adaptacji klejów fenolowych stosowanych do spajania drewna, a także w wyniku użycia w metalowych urządzeniach mechanicznych gumowych części wulkanizacyjnych. W roku 1942 zastosowano po raz pierwszy w przemyśle lotniczym (do łączenia części metalowych) klej fenoloformaldehydowy Redux 755 z ulepszczeniem w postaci termoplastycznego proszku z metylalu poliwinylowego, który podniósł wytrzymałość kleju i jego odporność na wpływ środowiska. Klej ten stosowany jest w konstrukcji samolotów (Fokker 100) do dziś. Przełomem w klejeniu części metalowych stało się wprowadzenie na rynek przez szwajcarską firmę CIBA żywic epoksydowych w 1946 r., które znalazły głównie zastosowanie także w przemyśle lotniczym, w szczególności po rozpowszechnieniu się techniki trawienia powierzchni łączonych przy użyciu kwasu chromowego. [1] [2] Połączenia klejowe stosowane są również w innych dziedzinach transportu, np. w kolejnictwie jako izolowane połączenia hybrydowe klejowo-skręcane (połączenia łubkowe) używane w miejscach wymaganych przez system sterowania ruchem kolejowym [3].

Połączenia klejowe konstrukcyjne ulepszone są głównie w celu podniesienia wytrzymałości oraz poprawy odporności na działanie czynników środowiskowych, takich jak temperatura, ciśnienie oraz oddziaływanie płynów eksploatacyjnych, wody i mocznika. Istotnym czynnikiem rzutującym na wytrzymałość złącza klejowego jest przygotowanie powierzchni łączonych elementów. Współcześnie poszukiwane są również nowe sposoby obróbki poprzedzającej klejenie. Mają one na celu oczyszczenie powierzchni (mechaniczne i chemiczne) oraz jej aktywowanie w celu lepszego związania z klejem.

Połączenia klejowe, podobnie jak połączenia nitowe najlepiej przenoszą obciążenia ścinające. Biorąc pod uwagę, że do połączenia kadłuba i poszycia samolotu Boeing 747 stosuje się około 1,5 mln nitów o znacznej masie, zastosowanie połączeń klejowych pozwoliłoby znacznie zredukować masę samolotu, co w konsekwencji poprawi parametry lotne (zwiększenie zasięgu, redukcja zużycia paliwa, zwiększenie ładowności).

Badania klejów ukierunkowane są najczęściej na osiągnięcie optymalnych właściwości poprzez:

- modyfikacje składu kleju;
- badanie adhezji w połączeniu;
- badanie wpływu czynników środowiskowych na trwałość połączenia.

Głównym celem opisywanych badań było zbadanie wpływu modyfikacji fizycznej kleju na właściwości wytrzymałościowe żywicy Epidian 57 z utwardzaczem Z1. Jako badania walidujące zostały wybrane badania statyczne na rozciąganie i ściskanie. Wyniki eksperymentów pozwoliły wyznaczyć parametry wytrzymałościowe utwardzonych żywic oraz określić, jaki wpływ na właściwości mechaniczne kleju wywierają wprowadzone napelniacze.

W czasie realizacji badań sprawdzono wpływ dodatków o różnych właściwościach fizycznych. Do badań wybrano materiały różniące się między innymi: rozmiarem cząstek, gęstością, twardością itp. Wyniki badań pozwoliły na określenie przydatności badanych kompozycji do wykonywania połączeń klejowych w przemyśle.

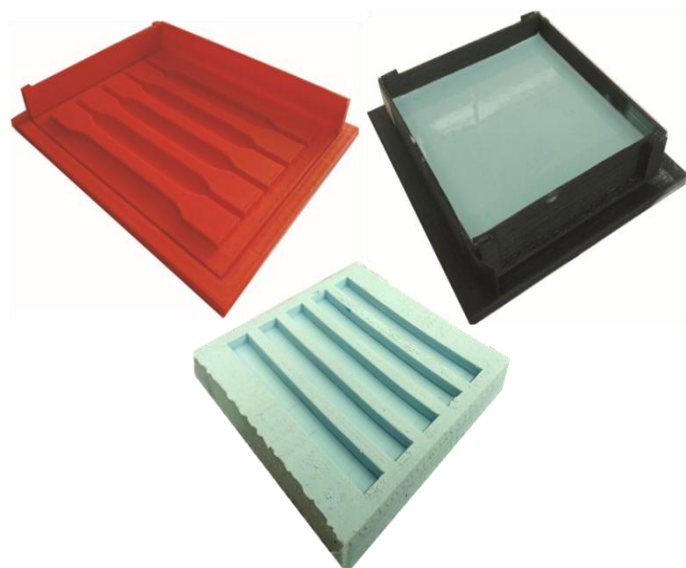
## 1. BADANIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE

### 1.1. Przygotowanie próbek

W trakcie przygotowania do badań wykonano próbki zgodnie z obowiązującymi normami [4, 5]:

Proces produkcji próbek można podzielić na następujące etapy:

- Zaprojektowanie oraz wydruk matryc w technologii 3D,
- Odlanie silikonowych form;
- Przygotowanie próbek w wykonanych formach;



Rys. 1. Etapy przygotowania formy na próbki

Do badań przygotowano jedenaście serii próbek (**Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.** 1), o liczności 5 do rozciągania i 3 do ściskania. Bazowa kompozycja klejowa składała się z żywicy epoksydowej Epidian 57 i utwardzacza Z-1 połączonych w proporcji 10:1 (kompozycja I – bez dodatków).

Udziały objętościowe nanorurek i fulerenów w kompozycjach zostały określone zgodnie z wytycznymi producentów tych materiałów, którzy zalecają stosowanie dodatków w ilościach od 0,5 do 5% całkowitej objętości kompozycji. Przyjęto udział 1% (objętościowo) nanorurek i fulerenów. Następnie udział objętościowy tych dodatków został przeliczony na udział masowy, w wyniku czego otrzymano 1,85% udziału masowego nanomateriałów węglowych w kompozycji. Aby umożliwić porównanie wytrzymałości w poszczególnych badaniach, do pozostałych kompozycji dodano materiały również w ilości 1,85% udziału masowego. Dziesięcioprocentowy udział masowy dodatków został wybrany w celu zbadania w jaki sposób zmieni się wytrzymałość kompozycji wraz ze wzrostem ilości dodatku.

Tab. 1. Udziały poszczególnych faz rozproszonych w kompozycjach [opracowanie własne]

Osnowa	Faza rozproszona									
	II	III	IV	V	VI	VIII				
E-57/Z1	Nanorurki	Fuleny	Montmorillonit MMT	Węgiel krzemowy SiC	Mikrobalony	Wolfram W				
	Udział objętościowy [%]			Udział masowy [%]						
Kompozycja										
	II.1	III.1	IV.1	IV.2	V.1	V.2	VI.1	VI.2	VIII.1	VIII.2
	1	1	10	1,85	10	1,85	10	1,85	10	1,85

Próbki do badania na ściskanie zostały wykonane z wykorzystaniem rurki PVC o średnicy wewnętrznej 14 mm pociętej na odcinki o długości 30 mm (zgodnie z założeniem:  $l < 2,5d$ ).

**Problemy przy produkcji próbek**

Największym problemem przy produkcji próbek odlewanych jest powstawanie dużych pęcherzy powietrza, które mogą mieć znaczący wpływ na właściwości wytrzymałościowe kleju.

Kolejnym zjawiskiem, które może mieć wpływ na właściwości wytrzymałościowe jest zjawisko sedimentacji a więc proces opadania zawiesziny ciała stałego w cieczy w wyniku działania siły grawitacji lub sił bezwładności. Zjawisko to najbardziej uwidacznia się w procesie produkcji próbek (walcowych) do badania wytrzymałości na ścinanie.

**1.2. Analiza wyników badań wytrzymałościowych**

**Statyczna próba rozciągania**

**Wyznaczanie modułu Younga**

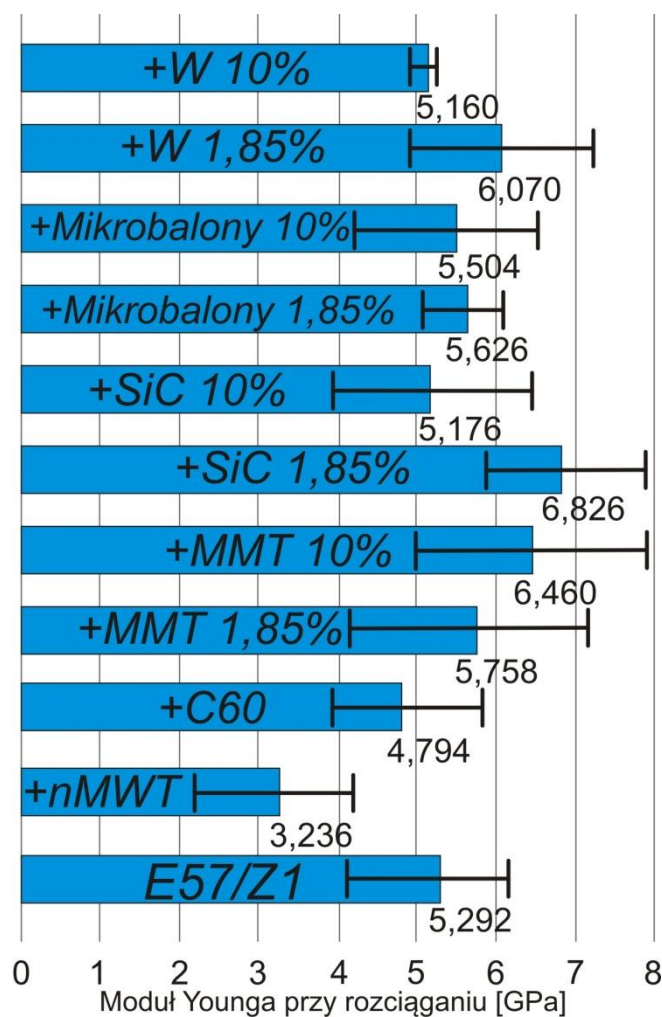
Analizę wyników badań wytrzymałościowych przeprowadzono porównując kompozycje z danym dodatkiem do kompozycji niemodyfikowanej.

Z wykresu (Rys. 3) można wyciągnąć następujące wnioski:

- W większości przypadków nastąpił spadek modułu sprężystości wzdłużnej wraz ze wzrostem udziału procentowego dodatku w kompozycji. Wyjątkiem jest kompozycja z MMT, gdzie przy 10% udziale masowym MMT moduł Younga jest niższy niż w kompozycji z 1,85% MMT.



Rys. 2. Jedna z serii próbek

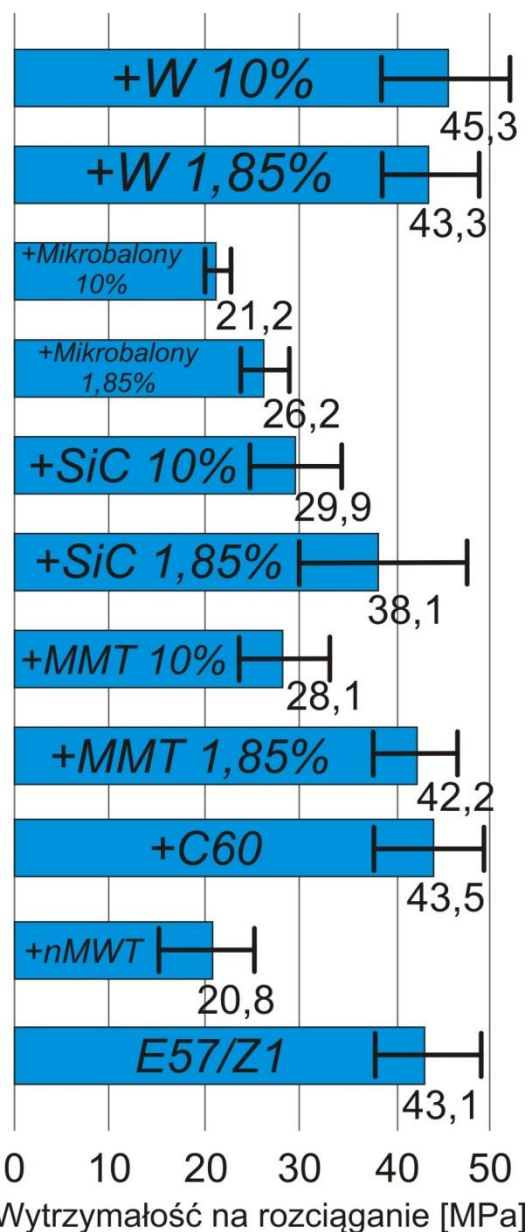


Rys. 3. Średnia wartość modułu Younga przy rozciąganiu

- Największy spadek modułu Younga wystąpił w przypadku kompozycji, w której jako dodatek zastosowano nanorurki węglowe i był on równy 39%.

- Najwyższy wzrost modułu Younga (o 29%) wystąpił w przypadku zastosowania węgliku krzemu (SiC) w udziale masowym 1,85%.
- Istotnego wpływu na zmianę wartości modułu Younga w trakcie rozciągania nie miało zwiększenie udziału masowego mikrobalonów.
- Najmniejszy rozrzut wyników otrzymano w badaniu kompozycji zawierającej 10% udziału wolframu.

## Wytrzymałość na rozciąganie



Rys. 4. Wytrzymałość na rozciąganie badanych próbek

Analizując wykres (Rys. 4) można wyciągnąć wniosek, że żaden z zastosowanych dodatków nie spowodował istotnego wzrostu wytrzymałości na rozciąganie. Zauważalny jest znaczny spadek wytrzymałości na rozciąganie dla kompozycji z nanorurkami (spadek o prawie 52%), w pozostałych przypadkach spadek wynosił od 12% do 50%.

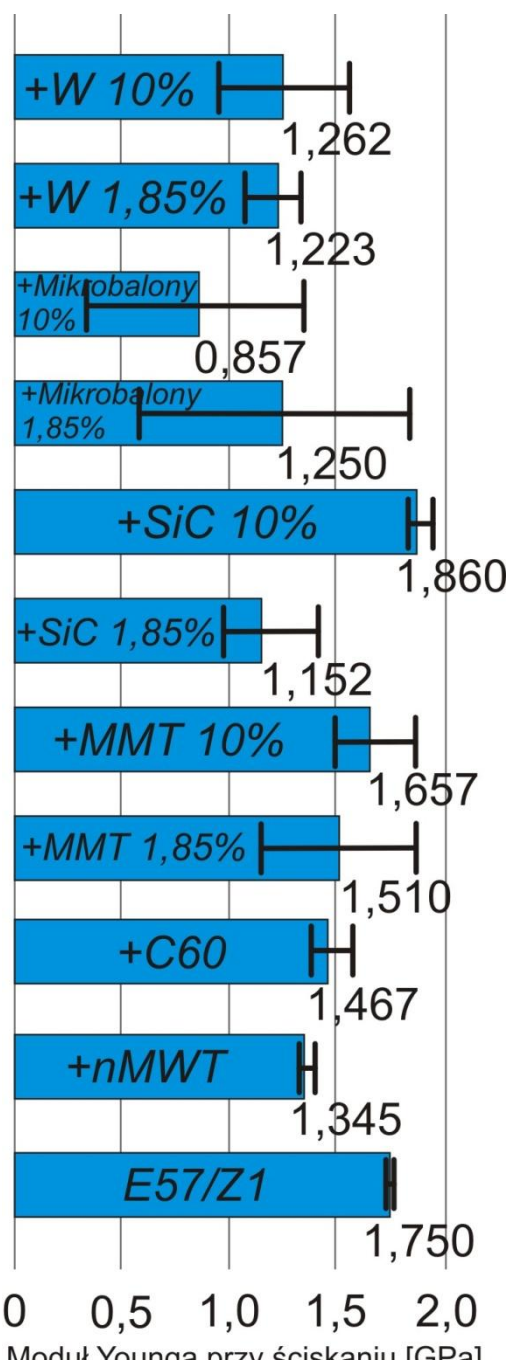
## Statyczna próba ściskania

Opracowanie wyników statycznej próby ściskania przeprowadzono w sposób podobny jak dla wyników wytrzymałości przy próbie rozciągania.

### Wyznaczanie modułu Younga

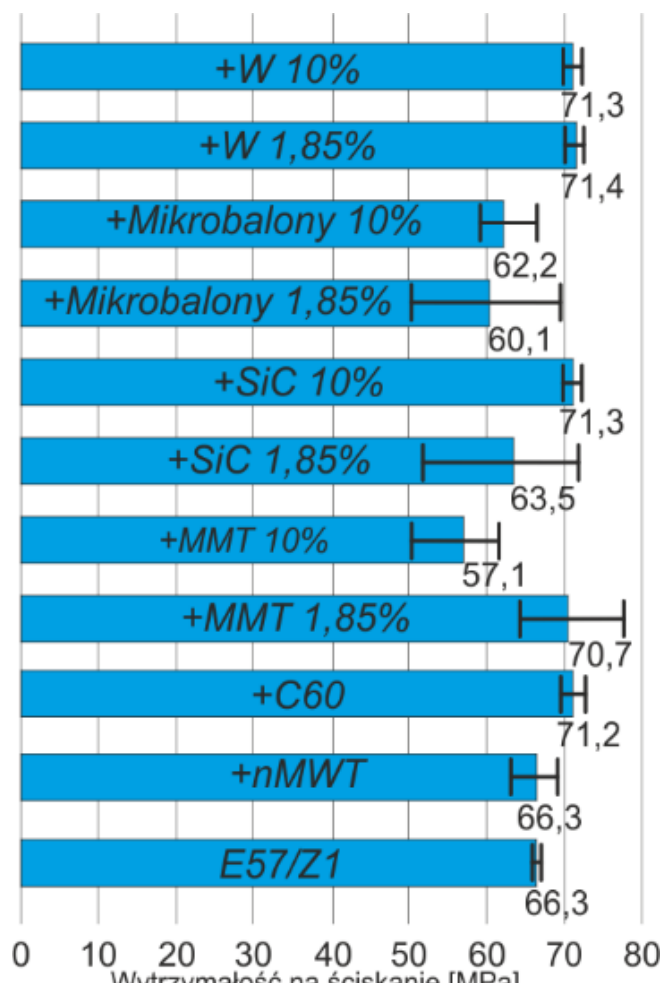
Po przeprowadzeniu analizy wykresu (Rys. 5) można zauważyć, że:

- Tylko kompozycja zawierająca węgiel krzemu w udziale masowym 10% charakteryzuje się większą wartością modułu Younga niż kompozycja bazowa, natomiast wszystkie pozostałe wypełniacze spowodowały spadek wartości modułu nawet do 51%.
- W większości przypadków wzrost zawartości dodatku wywołał wzrost modułu Younga.



Rys. 5. Średnia wartość modułu Younga przy ściskaniu





Rys. 6. Wytrzymałość na ściskanie badanych próbek

### Wytrzymałość na ściskanie

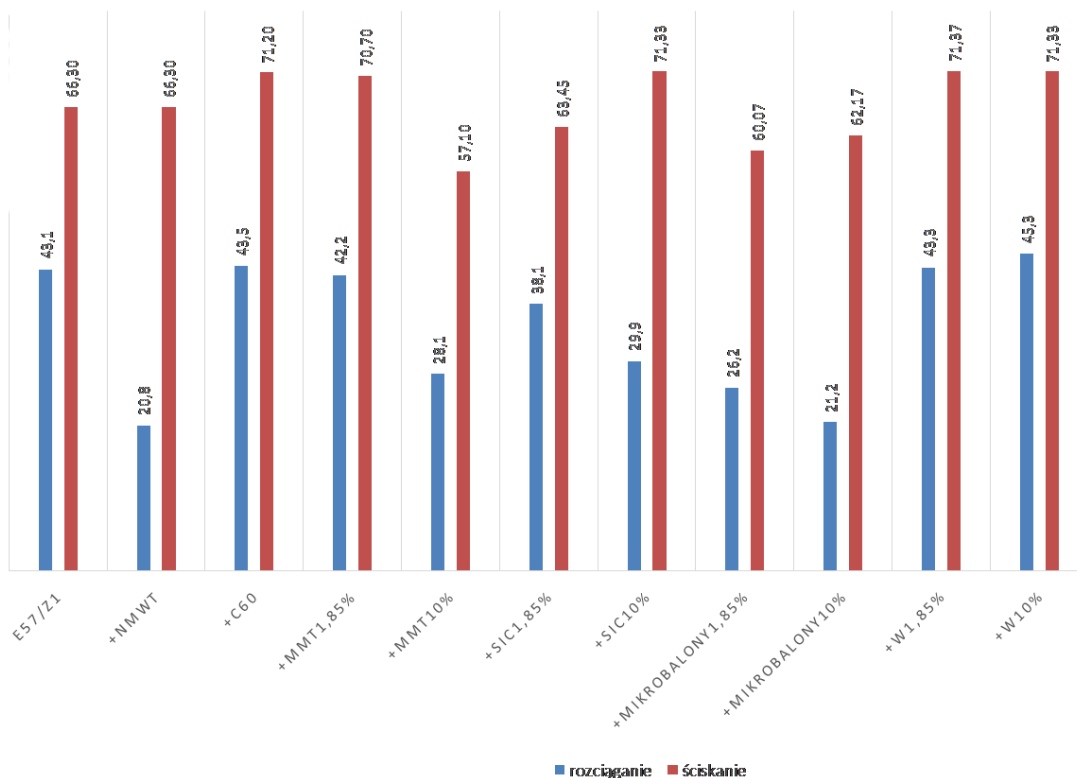
Analiza wykresu (Rys. 6) prowadzi do następujących wniosków:

- W czterech kompozycjach – z dodatkiem fulerenów, węgla krzemu 10%, wolframu 1,85% oraz wolframu 10% – uzyskano bardzo zbliżone wyniki, wyższe o około 7% od wyników dla kompozycji bazowej.
- Największy spadek naprężeń maksymalnych (o 14%) uzyskano dla kompozycji z MMT o udziale masowym 10%.
- Dla każdego z zastosowanych mikroaddatów wzrost ilości napelnacza spowodował niewielkie zwiększenie wytrzymałości na ściskanie lub utrzymanie jej na tym samym poziomie.

Jak można zauważyć na wykresie (Rys. 7), wytrzymałość na ściskanie w przypadku kompozycji z nanorurkami jest nawet 3 razy większa od wytrzymałości na rozciąganie. W pozostałych przypadkach wytrzymałość na rozciąganie jest również znacznie mniejsza od wytrzymałości na ściskanie, co wynika głównie z kruchości badanych materiałów.

### PODSUMOWANIE

- Fizyczna modyfikacja kompozycji klejowej na bazie żywicy epoksydowej Epidian 57 powoduje zmianę jej właściwości mechanicznych.
- W większości przypadków właściwości kompozycji klejowej ulegają pogorszeniu po dodaniu napelnacza.
- Każdy z zastosowanych dodatków (z wyjątkiem wolframu) spowodował spadek wytrzymałości na rozciąganie wraz ze wzrostem ilości udziału masowego napelnacza.
- Wytrzymałość na ściskanie zbadanych próbek nie wykazała znacznych zmian w przypadku kompozycji zastosowanych do badań.
- Analizując otrzymane wyniki, można uważać, że ilość napelnia-



Rys. 7. Porównanie wytrzymałości na rozciąganie i ściskanie badanych materiałów

cza, dzięki której zostaną uzyskane najbardziej optymalne pa-

rametry dla kompozycji może znajdować się pomiędzy 2, a 10% udziału masowego napelnacza – co jednak należy zweryfikować w dalszych badaniach.

- Sedymentacja w modyfikowanej kompozycji klejowej może istotnie zmieniać wyniki badań eksperymentalnych.
- Problematicznym zjawiskiem związanym z produkcją próbek metodą odlewania jest wprowadzenie do kompozycji klejowej dużych ilości powietrza w postaci pęcherzy.

### BIBLIOGRAFIA

1. Marek Piekarczyk Zastosowanie połączeń klejonych w konstrukcjach metalowych, Wydawnictw Politechniki Krakowskiej 1-B/2012.
2. Dillard D.A., „Advances in Structural Adhesive Bonding”, Woodhead Publishing Limited, Oxford, Cambridge, New Delhi, 2010.
3. Ireneusz Mikłaszewicz: Wykonywanie i badanie kolejowych złączy szynowych, Problemy Kolejnictwa, tom 57, zeszyt nr 158 (2013), str. 35...49.
4. PN-EN ISO 527-2:1998 (próbki do badania wytrzymałości na rozciąganie);
5. PN-EN ISO 604:2003 (próbki do badania na ściskanie).

## INFLUENCE OF PHYSICAL MODIFICATION ON ADHESIVE PROPERTIES

### *Abstract*

*Paper discussed the impact of physical modification of the adhesive (Epidian 57/Z1) on mechanical properties of the adhesive. Adhesive was modified by additions of micro and nanoparticles, such as fullerenes, carbon nanotubes, montmorillonite, silicon carbide, tungsten and microballoons. Particular attention was paid to the influence of composition of the adhesive and nanoparticles (nanotubes and fullerenes). As a result, the experiment found that most additives deteriorate the strength properties of obtained adhesive.*

Autorzy:

dr inż. Andrzej **Komorek** – Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych w Dęblinie, Katedra Awioniki i Systemów Sterowania, a.komorek@wsosp.pl.

mgr inż. Dawid **Zmyślony** – Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych w Dęblinie, Katedra Awioniki i Systemów Sterowania.

inż. Rafał **Bieńczak** – Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych w Dęblinie, Katedra Awioniki i Systemów Sterowania, r.bieniczak@wsosp.pl.

mgr inż. Rafał **Kowalik** – Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych w Dęblinie, Katedra Awioniki i Systemów Sterowania, r.kowalik@wsosp.pl.