

# WYBRANE ASPEKTY WYTRZYMAŁOŚCI POŁĄCZEŃ LUTOWANYCH I KLEJOWYCH BLACH MIEDZIANYCH

## *Selected aspects of strength soldered and adhesive joints od copper sheets*

Anna RUDAWSKA, Izabela MITURSKA

**Streszczenie:** Przeprowadzone badania miały na celu porównanie wybranych aspektów wytrzymałości poszczególnych rodzajów grup połączeń: lutowanych oraz klejowych, wykonanych z blachy miedzianej M1E z4. W przypadku połączeń lutowanych czynnikiem zmiennym był rodzaj zastosowanego topnika, który został wybrany z uwzględnieniem właściwości łączącego materiału, natomiast w przypadku połączeń klejowych czynnikiem zmiennym był rodzaj kleju. Wśród różnych dostępnych topników zastosowano: Fosol, pastę Unifix 3 i kalafonię. Do wykonania połączeń klejowych zastosowano 4 kompozycje klejowe, przygotowane z użyciem żywic epoksydowych Epidian 5 i Epidian 53 oraz utwardzaczy PAC i Z1, w odpowiednich stosunkach stechiometrycznych. W obu grupach połączeń zastosowano również różne rodzaje połączeń. W przypadku lutowania próbki zostały połączone doczołowo, w klejeniu natomiast zakładkowo. Przygotowane połączenia poddano badaniom wytrzymałościowym, na podstawie których określono nośność połączeń. Uzyskane wyniki badań poddano również analizie statystycznej, dzięki której określono grupy jednorodne i oceniono istotne różnice pomiędzy poszczególnymi sposobami wykonania połączeń montażowych. Na podstawie uzyskanych wyników badań zauważono, że w przypadku połączeń lutowanych najwyższą wartość nośności uzyskano dla połączeń, gdzie jako topnik zastosowano pastę Unifix, natomiast najniższą dla połączeń w których wykorzystano Fosol. Najwyższą wartość nośności uzyskano w przypadku połączeń klejowych wykonanych przy użyciu kompozycji E53/PAC/100:80, natomiast najniższą dla połączeń klejowych wykonanych przy pomocy kompozycji klejowej E5/Z1/100:12.

**Słowa kluczowe:** połączenia lutowane, połączenia klejowe, lutowanie miękkie, blacha miedziana, nośność

**Abstract:** In the research was the comparison selected aspects of the individual soldered and adhesive joints strength made of M1E z4copper sheet. In the case of soldered joints, the variable was the type of flux used, which was selected taking into account the properties of the adhered, while in the case of adhesive joints, the variable was the type of adhesive. The available fluxes include: fosol, Unifix 3 paste and rosin. Four adhesive compositions was prepared by using Epidian 5 and Epidian 53 epoxy resins as well and PAC and Z1 hardeners were used to make adhesive joints, in appropriate stoichiometric ratios. In both groups of joints, different types of joints were also used. In the case of soldering, the samples were butt-jointed, while the adhesive joints was overlapped. The prepared joints were subjected to strength tests, on the basis of which the load capacity of joints was determined. Obtained results of the research were also subjected to statistical analysis, thanks to which homogeneous groups were determined and it was possible to assess significant differences between particular methods of making assembly joints. Based on the obtained test results, it was noted that the highest load-bearing capacity was obtained for adhesive joints made using E53/PAC/100:80 compositions, while the lowest for adhesive joints made using E5/Z1/100:12 adhesive composition.

**Keywords:** soldered joints, adhesive joints, soft soldering, sheet copper, capacity

## Wprowadzenie

Połączenia lutowane i klejowe są jednymi z rodzajów połączeń montażowych nierozłącznych, które występują w różnorodnych konstrukcjach [4]. Przynależą do grupy połączeń spajanych, w związku z czym mają pewne charakterystyczne właściwości. Jedną z zasadniczych zalet połączeń lutowanych i klejowych jest możliwość łączenia różnoimiennych materiałów. We współczesnej technice, mimo powstania i rozwoju wielu nowych technologii łączenia metali, lutowanie jest szeroko wykorzystywane, gdyż umożliwia rozwiązywanie najbardziej złożonych problemów materiałowo-konstrukcyjnych. Stosując tę metodę można łączyć elementy o różnym kształcie, wymiarach i właściwościach, wykonane z nowoczesnych materiałów, a więc metali, ceramiki, szkła, a także kompozytów [2, 8, 9, 10, 12]. Obecnie jednym z ważniejszych czynników decydujących o rozwoju tej technologii jest asortyment materiałów dodatkowych do lutowania. Dobór odpowiedniego lutu i topnika ma wpływ na wielkość zużycia tych

materiałów, pracochłonność i energochłonność procesu lutowania, a przede wszystkim na jakość i własności uzyskanych połączeń.

Klejenie stanowi cenne uzupełnienie innych metod łączenia materiałów konstrukcyjnych. Współcześnie technologia klejenia wykorzystywana jest w wielu gałęziach przemysłu: budownictwie, przemyśle samochodowym, przemyśle lotniczym, w budowie maszyn, produkcji opakowań oraz wielu innych [2, 9]. Łączenie metali za pomocą klejenia jest coraz częściej stosowane ze względu na dużą wytrzymałość połączenia, brak naprężeń w połączeniu oraz niskie koszty jednostkowe wykonania, wynikające głównie z ilości kleju użytego do wykonania pojedynczego połączenia. Zaletami połączeń klejonych są ponadto: zdolność tłumienia drgań, możliwość wykonania połączenia bez stosowania obrabiarek, a także drogich, specjalnych narzędzi i materiałów (choć koszty oprzyrządowania technologicznego mogą być w niektórych przypadkach wysokie), czy też brak zjawisk elektrochemicznych, występujących

zwykle podczas łączenia metali innymi metodami [3, 6].

W pracy przedstawiono wybrane zagadnienia łączenia blachy miedzianej za pomocą lutowania i klejenia. Zastosowano niektóre warunki i parametry wykonywania połączeń, jakie stosowane są w warunkach rzeczywistych. Celem pracy było przeprowadzenie badań doświadczalnych, na podstawie których dokonano analizy wybranych aspektów wytrzymałościowych w poszczególnych grupach wykonanych połączeń montażowych.

### Metodyka badań

Podczas badań eksperymentalnych wykonano połączenia lutowane i klejowe blachy miedzianej M1E z4 (w stanie umocnienia półtwardym). Wybrane właściwości mechaniczne badanej blachy miedzianej przedstawiono w tab. 1.

Materiał ten charakteryzuje się dużą przewodnością elektryczną i cieplną, a także plastycznością i odpornością na korozję. To właśnie dzięki temu jest bardzo często wykorzystywany w przemyśle. Miedziane pręty, blachy, druty, a także szyny doskonale sprawdzają się jako przewodniki prądu i części urządzeń elektrycznych [6].

Tabela 1. Wybrane właściwości mechaniczne blachy miedzianej M1E z4 [6]

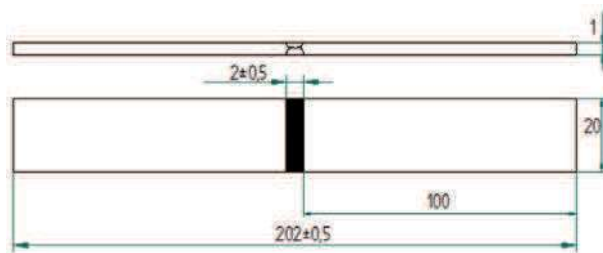
Table 1. Selected mechanical properties of M1E z4 copper sheet [6]

Właściwości	Wartość
$R_e$ [MPa]	24,5–39,3
$R_m$ [MPa]	211,8–235,4
A [%]	40–60
Twardość wg skali Mohsa	3 jednostki
Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	8,87–8,91
Współczynnik wydłużenia cieplnego [1/K]	$16,5 \times 10^{-6}$

### Technologia połączeń lutowanych

Do badań wykorzystano połączenia lutowane doczołowe, których schemat przedstawiono na rys. 1.

Połączenia lutowane zostały wykonane metodą lutowania miękkiego, z wykorzystaniem lutownicy elektrycz-



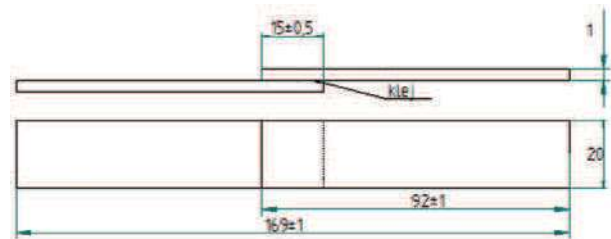
Rys. 1. Schemat połączenia lutowanego  
Fig. 1. Scheme of soldered joint

nej, której temperatura pracy wynosiła ok. 400°C. Wykorzystano 3 rodzaje topników: fosol, pastę Unifix 3 oraz kalafonię. Próbkki zostały połączone obustronnie za pomocą lutu w postaci pręta, typu Cyna (LC60). Wykonane połączenia były utwardzane w temperaturze pokojowej, wynoszącej 21,5°C. Wykonano po 8 próbek dla każdego rodzaju topnika. Przed gruntowaniem powierzchni próbek przeznaczonych do łączenia, poddano je zabiegowi mechanicznej obróbki ścierniej z użyciem narzędzia nasypowego o gradacji P100.

Wykonane połączenia lutowane zostały poddane niszczącym badaniom wytrzymałościowym, zgodnie z normą DIN EN 1465 [1], dzięki którym w próbie rozciągania określono nośność.

### Technologia połączeń klejowych

W drugiej części badań wykonano połączenia klejowe jednozakładkowe, gdzie długość zakładki wynosiła  $l_z = 15$  mm. Schemat połączenia oraz jego wymiary przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat połączenia klejowego  
Fig. 2. Scheme of adhesive joint

Do wykonania połączeń klejowych wykorzystano cztery kompozycje klejowe, przygotowane z dwóch rodzajów żywic epoksydowych oraz dwóch rodzajów utwardzaczy, stosując odpowiednie zalecenia dotyczące właściwego stosunku stechiometrycznego określonej żywicy i utwardzacza. Ich zestawienie, a także ilość wykonanych próbek do każdego zestawienia przedstawiono w tab. 2.

Tabela 2. Rodzaje kompozycji klejowych zastosowanych w badaniach

Table 2. Types of adhesive compositions used in the research

Składniki: Żywica/ Utwardzacz	Stosunek stechiometryczny [%]	Oznaczenie kleju	Ilość wykonanych próbek
Epidian 5/PAC	100:80	E5/ PAC/100:80	6
Epidian 5/Z1	100:12	E5/ Z1/100:12	6
Epidian 53/PAC	100:80	E53/ PAC/100:80	6
Epidian 53/Z1	100:10	E53/ Z1/100:10	6

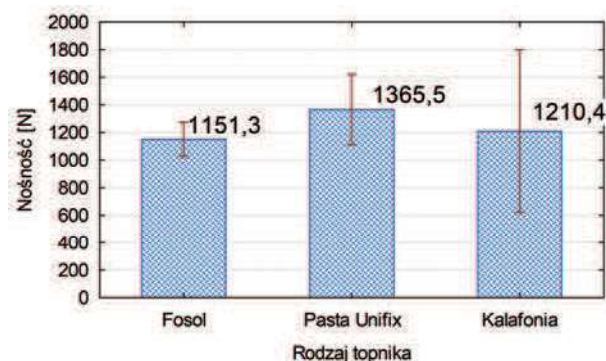
Przed wykonaniem procesu klejenia, powierzchnie próbek blach miedzianych zostały poddane obróbce mechanicznej papierem ściernym o ziarnistości P100, po czym zostały oczyszczone i odtłuszczone środkiem Loc-tite 7061. Przygotowane kompozycje klejowe nanoszone były ręcznie na jedną z łączonych powierzchni. Jednakową grubość spoiny klejowej uzyskano w procesie utwardzania stosując odpowiednie oprzyrządowanie. Badania zostały przeprowadzone w temperaturze 28°C i 29% wilgotności powietrza. Próbki były utwardzane w temperaturze otoczenia przez 8 dni, pod obciążeniem 2 kg. Po upływie tego czasu połączone próbki poddano badaniom wytrzymałościowym zgodnie z normą DIN EN 1465, przeprowadzając statyczną próbę ścinania i określając nośność poszczególnych połączeń.

### Wyniki badań

Na podstawie przeprowadzonych badań wytrzymałościowych określono nośność połączeń lutowanych oraz klejowych, uwzględniając zmienne czynniki technologiczne (rys. 3–4).

### Wyniki badań wytrzymałościowych połączeń lutowanych

Uzyskane wyniki badań wytrzymałościowych połączeń lutowanych przedstawiono na rys. 3. Dzięki nim zaobserwowano, że najniższą wartość nośności wykazały połączenia lutowe wykonane z użyciem topnika Fosol – 1151,3 N, jednak w tym przypadku połączenia wykazały najlepszą powtarzalność. Największy rozrzut wyników uzyskano w połączeniach w których zastosowano kalafonię. Najwyższą wartość nośności odnotowano w przypadku połączeń wykonanych z użyciem pasty Unifix – 1365,5 N.



Rys. 3. Wyniki badań wytrzymałościowych połączeń lutowanych  
Fig. 3. Results of strength tests of soldered joints

Jednak, aby możliwa była kompleksowa ocena i analiza porównawcza uzyskanych rezultatów, konieczne było przeprowadzenie analizy statystycznej uzyskanych wyników. W pierwszym etapie, przy wykorzystaniu testu normalności Shapiro-Wilka S-W, sprawdzono dopasowanie uzyskanych wyników badań empirycznych analizowanych zmiennych do rozkładu normalnego.

rozróżnionych pod względem rodzaju zastosowanego topnika, przy założonym poziomie istotności  $\alpha=0,05$ . Wyniki testu normalności zestawione w tab. 3 wskazują, że rozkład uzyskanych wyników jest zgodny z rozkładem normalnym.

Tabela 3. Wyniki testu normalności dla połączeń lutowanych  
Table 3. Results of the normality test for soldered joints

Rodzaj połączenia – Rodzaj topnika	N	Statystyka Shapiro-Wilka W	Poziom prawdopodobieństwa p
Połączenia Lutowane – Fosol	8	0,915358	0,393342
Połączenia Lutowane – Pasta Unifix	8	0,960110	0,811151
Połączenia Lutowane – Kalafonia	8	0,887366	0,221140

Aby możliwe było określenie istotnych różnic pomiędzy poszczególnymi grupami, przeprowadzono analizę ANOVA. Zastosowano test post-hoc – Tukeya dla różnych liczebności próbek w poszczególnych grupach, w celu określenia istotnych różnic. Wyniki tego testu przedstawiono w tab. 4.

Tabela 4. Wyniki testu grup jednorodnych Tukeya dla różnych N  
Table 4. Tukey's homogeneous test results for different N

	Rodzaj połączenia	Wartość średnia uzyskanych wyników	Grupa jednorodna
			b
1	Połączenia Lutowane – Fosol	1 151,3 N	*
2	Połączenia Lutowane – Pasta Unifix	1 365,5 N	*
3	Połączenia Lutowane – Kalafonia	1 210,4 N	*

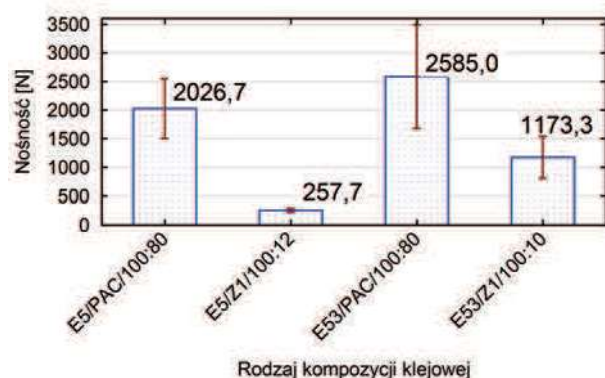
Na podstawie uzyskanych wyników badań można zauważyć, że w przypadku połączeń lutowanych, dla każdego rodzaju topnika, nie określono istotnych różnic przy poziomie istotności  $\alpha=0,05$ , a wszystkie grupy mieszczą się w jednej grupie jednorodnej (b). Oznacza to więc, że rodzaj stosowanego topnika nie wpływa istotnie na wytrzymałość wykonanych połączeń lutowanych.

### Wyniki badań wytrzymałościowych połączeń klejowych

Otrzymane wyniki badań wytrzymałościowych połączeń klejowych, wykonanych przy użyciu wybranych kompozycji klejowych zestawiono na rys. 4. Na podstawie uzyskanych wyników badań można zauważyć, że najwyższą wartość nośności uzyskano dla połączeń klejowych wykonanych przy użyciu kompozycji



E53/PAC/100:80 – 2585 N, a jednocześnie w tym przypadku zaobserwowano największy rozrzut wyników, natomiast najniższą dla połączeń klejowych wykonanych przy pomocy kompozycji klejowej E5/Z1/100:12 – 257,7 N.



Rys. 4. Wyniki badań wytrzymałościowych połączeń klejowych  
Fig. 4. Results of strength tests of adhesive joints

Podobnie jak w przypadku wyników dotyczących połączeń lutowanych przeprowadzono analizę statystyczną uzyskanych wyników. Sprawdzone normalność rozkładu dla każdej grupy próbek, rozróżnionej pod względem rodzaju zastosowanej kompozycji klejowej, przy założonym poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Wyniki testu normalności zestawiono w tab. 5. Wyniki te wskazują, że rozkład uzyskanych wyników jest zgodny z rozkładem normalnym.

Tabela 5. Wyniki testu normalności dla połączeń klejowych  
Table 5. Results of the normality test for adhesive joints

Rodzaj połączenia – Rodzaj kompozycji klejowej	N	Statystyka Shapiro-Wilka W	Poziom prawdopodobieństwa p
Połączenia klejowe – E5/PAC/100:80	6	0,809759	0,071810
Połączenia klejowe – E5/Z1/100:12	6	0,937777	0,518511
Połączenia klejowe – E53/PAC/100:80	6	0,919523	0,501931
Połączenia klejowe – E53/Z1/100:10	6	0,826505	0,158871

Następnie w celu określenia istotnych różnic pomiędzy poszczególnymi grupami, przeprowadzono analizę ANOVA. Zastosowano test post-hoc – Tukeya dla różnych liczebności próbek w poszczególnych grupach i określono grupy jednorodne, a wyniki tego testu przedstawiono w tab. 6.

Na podstawie uzyskanych wyników analiz statystycznych można zaobserwować, że połączenia klejowe, które wykazały najwyższą wartość nośności (E53/PAC/100:80), znajdują się w jednej grupie jednorodnej (c) z połączeniami klejowymi E5/PAC/100:80 oraz nie zaobserwowano

Tabela 6. Wyniki testu grup jednorodnych Tukeya dla różnych N  
Table 6. Test results of Tukey's homogeneous groups for different N

	Rodzaj połączenia	Wartość średnia uzyskanych wyników	Grupa jednorodna		
			a	b	c
1	Połączenia klejowe – E5/PAC/100:80	2 026,7 N		*	*
2	Połączenia klejowe – E5/Z1/100:12	257,7 N	*		
3	Połączenia klejowe – E53/PAC/100:80	2 585,0 N			*
4	Połączenia klejowe – E53/Z1/100:10	1 173,3 N		*	

pomiędzy nimi istotnych różnic. Najniższą wartość nośności uzyskano dla połączeń klejowych wykonanych klejem E5/Z1/100:12, które znajdują się w odrębnej grupie jednorodnej (a), przy czym wynik ten znacznie różni się od pozostałych. W przypadku dwóch grup połączeń klejowych – E53/PAC/100:80 oraz E53/Z1/100:10, nie określono istotnych różnic przy przyjętym poziomie istotności.

#### Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań połączeń lutowanych można zaobserwować, że poprzez zastosowanie różnych topników, takich jak: Fosol, pasta Uni-fix 3 i kalafonia można stwierdzić, że na właściwości wytrzymałościowe połączeń lutowanych przygotowanych w wyżej wymienionych warunkach i temperaturze, nie ma wpływu rodzaj zastosowanego topnika. Minimalnie różniące się wyniki poszczególnych grup mieszczą się w jednej grupie jednorodnej.

W przypadku połączeń klejowych, w oparciu o uzyskane wyniki można postawić następujące wnioski:

1. W grupie połączeń klejowych najwyższą wartość nośności uzyskały połączenia wykonane z użyciem kleju E53/PAC/100:80.
2. Ze względu na właściwości wytrzymałościowe połączeń klejowych można stwierdzić, że dużo korzystniejszym wyborem do łączenia elementów miedzianych jest wybór kleju zawierającego utwardzacz PAC, niezależnie od rodzaju zastosowanej żywicy. Dzięki zastosowaniu utwardzacza PAC możliwe jest uzyskanie spoiny elastycznej, co jest bardzo ważne w przypadku materiałów, jakim jest miedź. Powyższe sformułowanie zostało potwierdzone poprzez analizę statystyczną uzyskanych wyników badań, która wskazuje na brak istotnych różnic pomiędzy grupami połączeń klejowych E5/PAC/100:80, a E53/PAC/100:80.
3. Najniższą wartość nośności odnotowano w przypadku połączeń klejowych, wykonanych przy użyciu kleju E5/Z1/100:12, a spoina klejowa charakteryzowała się znaczną sztywnością.

Podsumowując, należy stwierdzić, że w obu przypadkach wykonywanych połączeń ważne jest właściwe przygotowanie powierzchni, które jest jednym z podstawowych warunków prawidłowego wykonania połączenia, a dodatkowo w przypadku klejenia – wybór kleju zapewniającego lepsze właściwości wytrzymałościowe. Przedstawione informacje mogą mieć istotny wpływ na projektowanie technologii połączeń lutowanych i klejowych analizowanego materiału konstrukcyjnego. Można wnioskować, że zmiana sposobu przygotowania powierzchni w przypadku połączeń lutowanych, a w odniesieniu do połączeń klejowych wybór innego rodzaju kompozycji klejowych, pozwoliłaby uzyskać korzystniejsze wyniki.

## LITERATURA

- [1] DIN EN 1465: 2009 – Kleje – Oznaczanie wytrzymałości na ścinanie przy rozciąganiu połączeń na zakładkę.
- [2] Godzimirski J., A. Komorek. 2008. „Trwałość zmęczeniowa zakładkowych i czołowych połączeń klejowych”. *Przegląd Mechaniczny* (12): 40–44.
- [3] Godzimirski J. i in. 1997. „Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
- [4] Guth K. et. al. 2010. “New assembly and interconnects beyond sintering methods”. *Proceedings of PCIM* (5): 232–237.
- [5] Kuczmaszewski J. 1995. „Podstawy konstrukcyjne i technologiczne oceny wytrzymałości adhezyjnych połączeń metali”. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej.
- [6] Kurski K. 1967. „Miedź i jej stopy techniczne”. Katowice: Wydawnictwo Śląsk.
- [7] Maciołka P. 2010. „Wykorzystanie nośności powierzchni do uzyskania charakterystyki styku pomiędzy przedmiotem i ustalaczem położenia”. *Inżynieria Maszyn* (15): 53–66.
- [8] Mirski Z. i in. 2009. „Lutowanie miękkie aluminium z miedzią”. *Przegląd Spawalnictwa* (11): 15–19.
- [9] Pocica A., A. Nowak. 2004. „Lutowanie miękkie aluminium z miedzią”. *Zeszyty Naukowe. Mechanika. Politechnika Opolska* (78): 279–282.
- [10] Rendler L. et. al. 2017. “Ultra-soft wires for direct soldering on finger grids of solar cells”. *Energy Procedia* (124): 478–483.
- [11] Rudawska A. 2013. „Wybrane zagadnienia konstytuowania połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych”. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej.
- [12] Rudawska A., J. Cisek, L. Semotiuk. 2012. „Wybrane aspekty wytrzymałości połączeń klejowych oraz lutowanych stosowanych w konstrukcjach lotniczych”. *Technologia i Automatyzacja Montażu* (2): 61–66.
- [13] Siwek B. 2002. „Połączenia spawane, zgrzewane, lutowane i klejone”. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.

---

dr hab. inż. Anna Rudawska, prof. PL – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lubli, e-mail: a.rudawska@pollub.pl

mgr inż. Izabela Miturska – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lubli, e-mail: i.miturska@pollub.pl