

# WPŁYW OBRÓBKI MECHANICZNEJ POWIERZCHNI NA WYTRZYMAŁOŚĆ POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH BLACH ZE STALI ODPORNEJ NA KOROZJĘ

## *The influence of the mechanical surface treatment on the stainless steel sheets bonded joints strength*

Anna RUDAWSKA, Natalia ŚCIUBA, Dana STANČEKOVÁ

**Streszczenie:** W artykule zaprezentowano fragment badań, związanych z mechanicznym przygotowaniem powierzchni blach ze stali odpornej na korozję do klejenia. Badaniom poddano próbki połączeń klejowych jednozakładkowych, w których powierzchnie blach ze stali nierdzewnej przygotowano przy użyciu obróbki mechanicznej ściernymi narzędziami nasypowymi o różnej ziarnistości (P120, P320, P500) oraz za pomocą odtłuszczenia środkiem odtłuszczającym Loctite 7063. Do klejenia wykorzystano klej epoksydowy dwuskładnikowy Loctite Hysol 9466 A&B. W badaniach doświadczalnych wykonano pomiary chropowatości powierzchni, badania wytrzymałościowe oraz przeprowadzono analizę statystyczną rezultatów badań. Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań stwierdzono, iż największą wytrzymałość połączeń klejowych uzyskano po obróbce ściernym narzędziem nasypowym o wielkości ziarna P120, a najmniejszą po użyciu papieru ściernego P500. Dokonana analiza statystyczna pozwoliła na stwierdzenie, że po obróbce papierami ściernymi P120 i P320 brakuje statystycznie istotnych różnic pomiędzy wartościami wytrzymałości na przyjętym poziomie ufności  $\alpha = 0,05$ . Ponadto zauważono również, że wraz ze wzrostem chropowatości powierzchni, rośnie również wytrzymałość połączenia klejowego.

**Słowa kluczowe:** połączenia klejowe, wytrzymałość, obróbka mechaniczna

**Abstract:** The article shows a fragment of the studies related to the mechanical surface treatment of stainless steel sheet surfaces for bonding. The samples of single lap bonded joints were tested. The stainless steel sheet surfaces were prepared by mechanical treatment using grinding tools of various grain size (P120, P320, P500) and by degreasing using the Loctite 7063 agent degreasing. Loctite Hysol 9466 A&B two-component epoxy adhesive was used for preparing bonded joints. The surface roughness measurements, strength tests was carried out in the experimental studies and statistical analysis the research results was made.

On the basis of the analysis of the test results, it was found that the greatest strength of the bonded joints is obtained after treatment with P120 grinding tool, meanwhile the least – after using P500 grinding tool. Carried out statistical analysis has allowed to find that after P120 and P320 grinding tools treatment is a lack of statistically significant differences between the values of the strength on the accepted confidence  $\alpha = 0.05$ . In addition, it was also noted that with increasing surface roughness, also the strength of the bonded joints was increased.

**Key words:** adhesive joints, strength, mechanical treatment

### Wprowadzenie

Klejenie pozwala na tworzenie połączeń wytrzymałych i funkcjonalnych, a coraz szersze doskonalenie klejów sprawia, że są one częściej stosowane w różnych gałęziach przemysłu [1, 2]. Wytrzymałość jest podstawowym parametrem, charakteryzującym właściwości połączenia klejowego i oznacza zdolność do przenoszenia obciążeń, jakie oddziałują na spoinę klejową. Na wytrzymałość połączeń wpływa wiele czynników konstrukcyjnych, technologicznych oraz eksploatacyjnych. Do czynników konstrukcyjnych można zaliczyć: sposób obciążenia, kształt i wymiar połączenia, a także wielkość spoiny. Do czynników technologicznych wlicza się: sposób przygotowania powierzchni klejonych materiałów, rodzaj kleju i technika jego nanoszenia oraz warunki utwardzania spoiny klejowej [3-5].

W artykule zwrócono uwagę na pierwszy etap technologii klejenia, jakim jest sposób przygotowania powierzchni. Właściwa obróbka powierzchni zwiększa

przyczepność kleju do powierzchni łączonych elementów, dzięki czemu następuje zwiększenie wiązań adhezyjnych. Celem pracy jest określenie wpływu sposobu przygotowania powierzchni blach ze stali odpornej na korozję przez zastosowanie obróbki mechanicznej i odtłuszczenia na wytrzymałość połączeń klejowych tych blach.

### Metodyka badań

#### Przedmiot badań

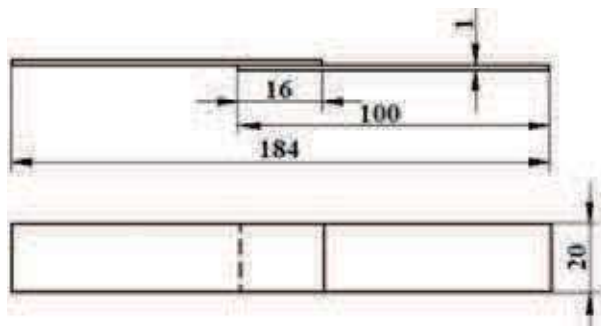
Badania przeprowadzono na próbkach wykonanych ze stali odpornej na korozję, wg normy PN-EN 10088, o oznaczeniu X5CrNi1810/1.4301 [6]. Jest to jedna z najczęściej używanych gatunków stali odpornej na korozję ze względu na liczne zalety [7]. W tab. 1 przedstawiono właściwości mechaniczne stali X5CrNi1810 [6].

Przedmiotem badań były połączenia klejowe jednozakładkowe blach ze stali odpornej na korozję, których schemat przedstawiono na rys. 1.

Tabela 1. Właściwości mechaniczne stali odpornej na korozję X5CrNi1810 [6]

Table 1. Mechanical properties of X5CrNi1810 stainless steel [6]

Właściwości mechaniczne	Oznaczenie	Wartość
Granica plastyczności	$R_{p0,2}$	230 MPa
Wytrzymałość na rozciąganie	$R_m$	540–750 MPa
Wydłużenie przy zerwaniu	A	45%
Twardość	-	215 HB



Rys. 1. Połączenie klejowe jednozakładkowe blach ze stali odpornej na korozję

Fig. 1. The single-lap bonded joint of stainless steel sheets

Grubość blach wynosiła 1 mm, szerokość 20 mm, długość 100 mm, natomiast długość zakładki połączenia klejowego przyjęto na 16 mm.

#### Charakterystyka sposobu przygotowania powierzchni

Powierzchnie próbek zostały poddane obróbce mechanicznej ściernym narzędziem nasypowym o wielkości ziaren P120, P320 i P500 oraz odtłuszczeniu środkiem odtłuszczającym Loctite 7063, wykonanym po obróbce mechanicznej. Chropowacenie powierzchni papierami ściernymi polegało na wykonaniu na każdej z próbek trzydziestu okrężnych ruchów. Następnie przeprowadzono odtłuszczenie środkiem odtłuszczającym Loctite 7063, które miało na celu oczyszczenie i odtłuszczenie powierzchni próbek przed procesem klejenia. Odtłuszczenie pozwoliło na usunięcie pozostałości we wgłębieniach, powstałych na skutek obróbki ściernymi narzędziami nasypowymi.

Odtłuszczenie przebiegało w kilku etapach:

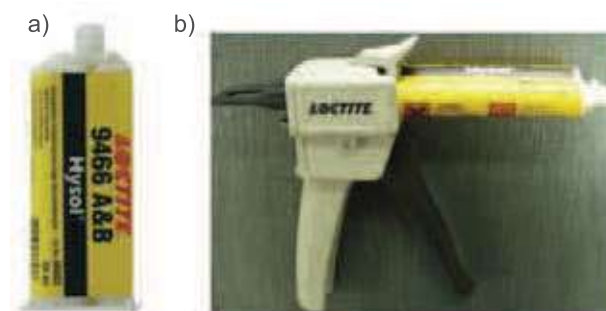
- rozpylono środek odtłuszczający w miejscu przeznaczonym do klejenia,
- oczyszczono wilgotne powierzchnie czystym ręcznikiem do sucha w celu usunięcia zanieczyszczeń,
- czynności te powtórzono dwukrotnie, przy czym po ostatnim nałożeniu odtłuszczacza pozostawiono środek do odparowania (ok. 1 min).

Po przygotowaniu powierzchni wyschnięciu środka odtłuszczającego, przystąpiono do aplikacji kleju oraz

wykonania czynności montażowych – odpowiedniego ustalenia obu łączonych elementów, wykorzystując przyrząd ustalający [8].

#### Klej

Do łączenia blach ze stali odpornej na korozję, wykorzystano klej dwuskładnikowy Loctite Hysol 9466 A&B [9] (rys. 2).



Rys. 2. a) Klej Loctite Hysol 9466 A&B, b) klej umieszczony w dozowniku

Fig. 2. a) Loctite Hysol 9466 A&B adhesive, b) adhesive placed in feeder

Klej Loctite Hysol 9466 A&B jest umieszczony w podwójnym opakowaniu (2 kartuszach), które dostosowano do urządzenia dozującego w formie pistoletu. Dzięki temu można precyzyjnie odmierzać odpowiednie proporcje żywicy i utwardzacza oraz przygotować klej przed użyciem. Do mieszania kleju użyto mieszadła statycznego. Następnie po dokładnym wymieszaniu jego składników (żywicy i utwardzacza), klej nakładano na jedną z łączonych powierzchni. W trakcie wykonywania połączenia dostosowano się do zaleceń producenta odnośnie czasu przydatności przygotowanego kleju, w którym klej nie zmienia swoich właściwości.

#### Warunki wykonania i badania połączeń klejowych

Warunki technologiczne, w których wykonano połączenia klejowe były następujące:

- temperatura otoczenia:  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ ,
- wilgotność względna powietrza: 31–32%,
- nacisk podczas utwardzania: 0,03 MPa.

Utwardzanie próbek odbywało się w takiej samej temperaturze i wilgotności jak podczas ich klejenia. Czas ten wyniósł 48 godz. Następnie przeprowadzono badania wytrzymałościowe, dzięki którym określono wytrzymałość połączeń na ścinanie.

Badania doświadczalne, w których połączenia klejowe jednozakładkowe uległy zniszczeniu, przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z150, zgodnie z normą DIN EN 1465 [10], przy prędkości badania 5 mm/min. Próbki umocowano w specjalnym uchwycie maszyny wytrzymałościowej, co zobrazowano na rys. 3.



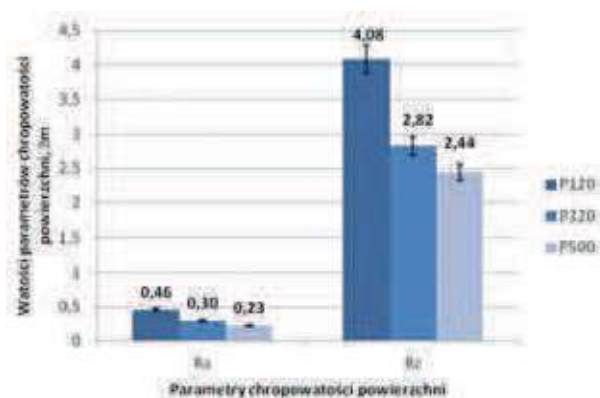
Rys. 3. Zamocowane połączenie klejowe w maszynie wytrzymałościowej

Fig. 3. Bonded joint fixed in the strength device

Badaniom wytrzymałościowym poddano od 8 do 12 połączeń klejowych w 3 seriach dla każdego sposobu przygotowania powierzchni.

#### Badania chropowatości powierzchni

W celu określenia parametrów struktury geometrycznej powierzchni przeprowadzono pomiary wybranych parametrów chropowatości powierzchni. Do oceny chropowatości powierzchni wykorzystano 9 próbek ze stali nierdzewnej. Pomiaram poddano 3 serie po 3 próbki, przy czym każda z tych serii została poddana obróbce mechanicznej ściernym narzędziem nasypowym P120, P320 i P500. Następnie dokonano pomiarów na każdej z tych próbek, łącznie po 9 z każdej partii, stosownie do sposobu przygotowania powierzchni. Pomiary wybranych parametrów chropowatości powierzchni wykonano z wykorzystaniem profilografometru Perthometr 2 firmy Mahr.



Rys. 4. Średnie wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni stali odpornej na korozję po obróbce mechanicznej

Fig. 4. Mean value of selected surface roughness parameters of stainless steels after mechanical treatment

#### Analiza statystyczna

W oparciu o właściwe hipotezy i testy statystyczne zawarte w literaturze [11] przeprowadzono analizę statystyczną uzyskanych wyników wytrzymałościowych. Obliczono średnie wartości wytrzymałości po odrzuceniu skrajnych wartości. Do porównania wartości średnich badanej cechy w dwóch populacjach generalnych użyto testów istotności, w których brany jest pod uwagę błąd pierwszego rodzaju. Błąd ten nazywany jest poziomem istotności. W przeprowadzonej analizie wynosi on  $\alpha = 0,05$ . Istota tych testów opiera się na odrzuceniu sprawdzanej hipotezy, jeżeli jest ona prawdziwa. Badania przeprowadzono dla prób zawierających po 8–12 elementów. Do przeprowadzenia analizy wykorzystano test F-Snedecora, t-Studenta, C-Cochrana i Coxa oraz właściwe modele statystyczne [11].

#### Wyniki badań

##### Rezultaty badań chropowatości powierzchni

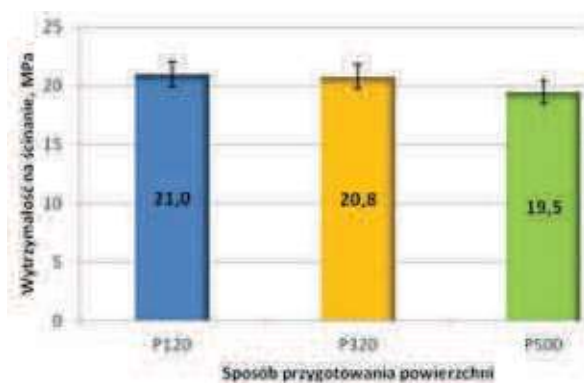
Wyniki pomiarów wybranych parametrów chropowatości powierzchni zaprezentowano na rys. 4. Analizując wyniki tych badań stwierdzono, że zastosowanie obróbki narzędziem nasypowym o wielkości ziaren P120, pozwala na uzyskanie największych wartości średnich parametrów chropowatości powierzchni Ra ( $0,46 \pm 0,06 \mu\text{m}$ ) oraz Rz ( $4,08 \pm 0,53 \mu\text{m}$ ). W przypadku wartości parametrów chropowatości powierzchni po obróbce papierem ściernym P320, można zauważyć zmniejszenie wartości parametrów chropowatości względem poprzedniej obróbki. Stosując papier ścierny P320 otrzymano wartości średnie Ra =  $0,30 \pm 0,04 \mu\text{m}$  i Rz =  $2,82 \pm 0,41 \mu\text{m}$ . Natomiast najniższe wartości parametrów chropowatości powierzchni otrzymano przy obróbce papierem ściernym P500 (Ra =  $0,23 \pm 0,03 \mu\text{m}$  i Rz =  $2,44 \pm 0,17 \mu\text{m}$ ). Również w tym wariancie przygotowania powierzchni otrzymano dobrą powtarzalność wyników chropowatości.

##### Wytrzymałość połączeń klejowych

Otrzymane wyniki badań wytrzymałości na ścinanie połączeń klejowych blach ze stali odpornej na korozję, których powierzchnie poddano trzem wybranym badaniom obróbki mechanicznej, zamieszczono na rys. 5.

Rozpatrując wyniki badań przedstawionych na rys. 5 zauważono, że:

- 1) w przypadku obróbki papierem ściernym P120 średnia wytrzymałość na ścinanie wynosi 21,0 MPa, natomiast odchylenie standardowe 0,75 MPa, przy czym jest to największa uzyskana wartość wytrzymałości spośród badanych wariantów przygotowania powierzchni,
- 2) drugą co do wartości wytrzymałością charakteryzowały się próbki, których powierzchnie poddano



Rys. 5. Średnia wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych blach ze stali odpornej na korozję po obróbce ściernymi narzędziami nasypowymi: P120, P320 oraz P500

Fig. 5. The shear strength of stainless steel sheets bonded joints after treatment of P120, P320 and P500 grinding tools

obróbce papierem ściernym P320, wartość wytrzymałości na ścinanie wyniosła  $20,8 \pm 0,85$  MPa,

- stosując obróbkę mechaniczną papierem ściernym P500, otrzymano najmniejszą wytrzymałość równą  $19,5 \pm 0,77$  MPa.

Ponadto można zauważyć, iż dla rozpatrywanych wariantów przygotowania powierzchni otrzymano dobrą powtarzalność wyników wytrzymałości. Można sądzić, że zastosowana technologia przygotowania powierzchni oraz inne czynniki technologiczne pozwolą na uzyskanie zbliżonych wartości wytrzymałości. Ze względu na niewielkie różnice otrzymanych wartości wytrzymałości, wyniki poddano analizie statystycznej.

#### Omówienie wyników badań

##### Omówienie pomiarów chropowatości powierzchni

W wyniku analizy (rys. 4) rezultatów stwierdzono, że wraz ze zmniejszeniem się wielkości ziarna zmniejsza się chropowatość. Po obróbce ściernym narzędziem nasypowym P120 jest ona dwa razy większa, niż w przypadku chropowatości po obróbce ściernym narzędziem nasypowym P500. Im większa jest chropowatość, tym zostają

bardziej zwilżone wgłębienia nierówności powierzchni, dzięki czemu połączenie jest bardziej trwałe, tak jak pokazują uzyskane w tej pracy wyniki badań wytrzymałości na ścinanie. Należy zwrócić uwagę na przedstawione w pracy [2] informacje, że zbyt duże schropowacenie powierzchni może wywołać wzrost koncentracji naprężeń, a następnie wpłynąć negatywnie na wytrzymałość połączenia.

Badania wykazały, że po zastosowaniu obróbki mechanicznej nastąpiło zwiększenie chropowatości próbek, przez co powiększyła się rzeczywista powierzchnia zwilżania, a zagadnienie to opisane jest m.in. w pracach [1, 2]. Otrzymana struktura ma znaczący wpływ na wnikanie masy klejowej w powstałe nierówności oraz w rezultacie wpływa na wytrzymałość połączenia klejowego.

#### Wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych

Po przeanalizowaniu wyników zaprezentowanych na rys. 5 można zauważyć, że największą wytrzymałość na ścinanie wykazują połączenia klejowe, w których powierzchnie łączonych elementów zostały poddane obróbce mechanicznej ściernym narzędziem nasypowym o ziarnistości P120. Jednak zauważa się, że w badanych przypadkach obróbki ściernymi narzędziami nasypowymi, różnice w uzyskanych wynikach wytrzymałości są niewielkie. Wytrzymałość połączeń klejowych po obróbce ściernym narzędziem nasypowym P500, stanowi prawie 93% wytrzymałości połączeń po obróbce ściernym narzędziem nasypowym P120. Ze względu na niewielkie różnice wartości wytrzymałości przeprowadzono analizę statystyczną wyników badań, której wyniki zamieszczono w tab. 2.

Na podstawie uzyskanych wyników analizy statystycznej można stwierdzić, iż wytrzymałość połączeń klejowych po obróbce papierem ściernym P120 i P320 nie wykazuje statystycznie istotnych różnic na przyjętym poziomie ufności  $\alpha = 0,05$ . Natomiast wytrzymałość połączeń klejowych po obróbce ściernym narzędziem nasypowym P500 statystycznie różni się od pozostałych. W oparciu o uzyskane wyniki można stwierdzić, iż korzystne jest wykorzystanie narzędzia nasypowego o wielkości ziarna P120 oraz P320 do obróbki

Tabela 2. Wyniki analizy statystycznej uzyskanych wyników badań  
Table 2. Statistical analysis of test results

Nr	Wartość statystyki $F_{obl}$	Wartość statystyki $F_{\alpha}$	Wniosek	Wartość statystyki $T_{obl}$	Wartość statystyki $F_{\alpha}$	Wniosek
1–2	1,78	3,18	$\sigma_1^2 = \sigma_2^2$	0,531	1,734	$m_1 = m_2$
2–3	1,22	3,18	$\sigma_2^2 = \sigma_3^2$	3,427	1,734	$m_2 \neq m_3$
1–3	1,95	3,18	$\sigma_1^2 = \sigma_3^2$	4,201	1,734	$m_1 \neq m_3$

gdzie:

$\sigma^2$  – wariancja,

$m$  – średnia.

mechanicznej stali nierdzewnej w celu uzyskania znacznej wytrzymałości połączenia.

### Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań można stwierdzić, iż największą wytrzymałość połączenia uzyskano po obróbce ściernym narzędziem nasypowym o wielkości ziarna P120, natomiast najmniejszą po użyciu papieru ściernego P500. Zauważono jednak, że pomiędzy wynikami nie występują duże rozbieżności, gdyż wytrzymałość po obróbce ściernym narzędziem nasypowym P500, stanowi 93% wytrzymałości po obróbce papierem ściernym P120. Po przeprowadzeniu analizy statystycznej stwierdzono, że po obróbce papierami ściernymi P120 i P320 nie ma istotnych różnic pomiędzy wartościami wytrzymałości na przyjętym poziomie ufności  $\alpha = 0,05$ . W każdym wariancie przygotowania powierzchni zauważono dobrą powtarzalność wyników, co świadczy o tym, iż zastosowanie obróbki mechanicznej papierem ściernym, umożliwi otrzymanie porównywalnych wartości, co uzależnione jest także od przyjętej technologii tej obróbki. Zauważono także, że wraz ze wzrostem chropowatości, rośnie również wytrzymałość połączenia, co potwierdza wpływ przygotowania powierzchni na wytrzymałość połączeń.

Podsumowując, przygotowanie powierzchni przy użyciu mechanicznej obróbki ściernymi narzędziami nasypowymi korzystnie wpływa na wytrzymałość połączeń klejowych blach ze stali odpornej na korozji. Przedstawione wyniki uzyskano dla określonego rodzaju kleju (klej epoksydowy Loctite Hysol 9466 A&B) i materiału (stal odporna na korozję) oraz przyjmując dane warunki wykonywania połączeń.

Na wyniki badań wpływa wiele czynników, dlatego podczas ich wykonywania wskazane jest minimalizowanie błędów, które mogą przyczynić się do rozbieżności wyników. Ważne jest również, aby podczas wykonywania połączeń stosować się do zaleceń stosowania klejów, środków odtłuszczających czy warunków utwardzania spoiny.

### LITERATURA

- [1] Czaplicki J., J. Ćwikliński, J. Godzimirski, P. Konar. 1987. „Klejenie tworzyw konstrukcyjnych”. Warszawa: WKiŁ.
- [2] DIN EN 1465. Adhesives. Determination of tensile lap-shear strength of bonded joints.
- [3] Godzimirski J. 2002. „Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych”. Warszawa: WNT 81–82, 97–115.
- [4] <http://www.loctite.pl>, data pobrania 5.01.2015
- [5] <http://www.stalkwasoodporna.pl>, data pobrania 22.12.2015.
- [6] „Kleje i klejenie. Poradnik inżyniera i technika”. 1977. Praca zbiorowa pod red. Charles V.Cagle'a. Warszawa: WNT.
- [7] Krysicki W. i in. 1999. „Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach. Cz. II. Statystyka matematyczna”. Warszawa: PWN. 85–94.
- [8] Mirski Z., T. Piwowarczyk. 2008. „Podstawy klejenia, kleje i ich właściwości”. *Przegląd Spawalnictwa* (8): 12–21.
- [9] PN-EN 10088-1: 2007.
- [10] Rudawska A., Ł. Dzwonkowski. „Przyrząd do ustalania próbek połączeń klejowych, zwłaszcza powierzchni płaskich”. Zgłoszenie patentowe P403112. Biuletyn Urzędu Patentowego (19): 40–41.
- [11] Rudawska A. 2013. „Wybrane zagadnienia konstytuowania połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych”. Lublin: Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej 40–45, 70–72, 83–93.

---

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

Mgr inż. Natalia Ściuba – absolwentka Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej

Doc. Ing. Dana Stančeková, PhD – Katedra Obróbki i Technologii Produkcyjnych Wydziału Mechanicznego Uniwersytetu Technicznego w Žilinie, Univerzita 8215/1, 010-26 Žilina