

# WYTRZYMAŁOŚĆ POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH BLACH STALOWYCH PO OBRÓBCE MECHANICZNEJ

## *The bonded joints strength of steel sheets after mechanical treatment*

Anna RUDAWSKA, Dominika NOWICKA, Nadežda ČUBOŇOVÁ

**Streszczenie:** Przeprowadzone badania doświadczalne miały na celu określenie wpływu przygotowania powierzchni na wytrzymałość połączeń klejowych blach stalowych. W badaniach przyjęto jedną z możliwych metod obróbki mechanicznej – obróbkę ściernymi narzędziami nasypowymi, ze względu na niski koszt oraz możliwość dobrego rozwinięcia powierzchni, co ma wpływ na wytrzymałość. Wykorzystane zostały papiery o różnej wielkości ziarna tj. P120, P320, P500 oraz P800. Dodatkowo zastosowano dwa warianty przygotowania powierzchni. Pierwszy wariant to obróbka mechaniczna przy pomocy wyznaczonego narzędzia nasypowego, a drugi to obróbka mechaniczna i dodatkowo odtłuszczenie powierzchni próbek. Po przygotowaniu powierzchni próbek zostały one sklejone z użyciem przygotowanego kleju (mieszanka żywicy epoksydowej Epidian 57 oraz utwardzacza Z1 w stosunku 100:10). Po określonym czasie utwardzania próbki były poddane badaniom wytrzymałościowym. Zauważono, że największą wytrzymałość na ścinanie w rozpatrywanych wariantach osiągają połączenia, których powierzchnie zostały przygotowane przy użyciu papieru ściernego P320.

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

**Abstract:** The aim of experimental studies was to determine the influence of surface treatment on the adhesive joints strength of steel sheets. In a study accepted one of the possible methods of machining – abrasive machining grinding tools. This kind of tools was used due to its low cost and the ability to fairly good development of the surface, which affects the strength. The sand papers with different grain size (P120, P320, P500 and P800) were used. Two variants of surface treatment were tested. The first variant was the mechanical treatment by using the tested grinding tools and the second variant consisted mechanical treatment and degreasing by using Loctite 7063 degrease agent. After surface treatment the samples was joined by using the adhesive as a compound of Epidian 57 epoxy resin and Z1 hardener in the ratio of 100:10. After curing the samples were subjected to strength tests. It was noted that the highest shear strength was achieved for samples, which surfaces were prepared using sandpaper P320.

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

### Wprowadzenie

Technologia klejenia znajduje zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, przy czym ważna jest możliwość jej wykorzystania do spajania części w trudno dostępnych miejscach lub też takich, gdzie nie ma możliwości zastosowania innych metod łączenia [2, 4, 8, 12]. Ze względu na istnienie wielu czynników decydujących o wytrzymałości połączeń klejowych, należy skoncentrować się na ich odpowiednim wyborze. Jednym z czynników technologicznych jest przygotowanie powierzchni łączonych materiałów, będących pierwszym etapem technologii klejenia. Wyróżnić można wiele sposobów obróbki materiałów, których celem jest uzyskanie powierzchni o określonej wytrzymałości. Na podstawie licznych publikowanych wyników badań można stwierdzić, że przygotowanie powierzchni do klejenia jest najistotniejszym etapem procesu klejenia, dlatego też stał się on tematem interesującym i jednocześnie cały czas pogłębianym [4, 9, 11].

W artykule zaprezentowano wyniki badań wytrzymałościowych jednozakładkowych połączeń klejowych blach stalowych, w których powierzchnie blach zostały poddane obróbce mechanicznej ściernymi narzędziami nasypowymi o wielkości ziaren: P120, P320, P500, P800. Obróbka

została przeprowadzona w dwóch wariantach: obróbka mechaniczna oraz obróbka mechaniczna i odtłuszczenie. Wyniki badań zostały poddane analizie statystycznej zgodnie z wytycznymi zawartymi w pracach [12, 6].

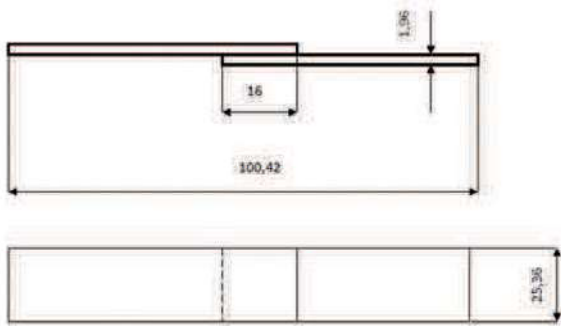
### Metodyka badań

#### Połączenie klejowe

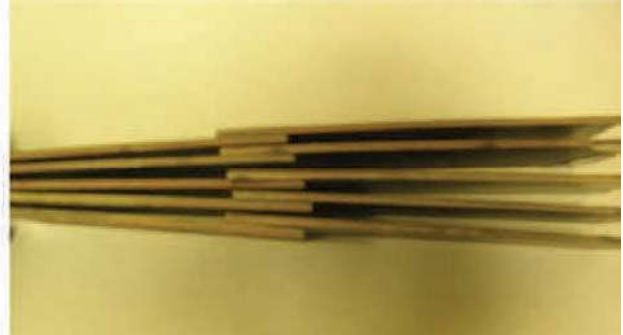
Przedmiotem badań były próbki jednozakładkowe połączeń klejowych, wykonane z blach stalowych S235 JR o grubości  $g = 2,0 \pm 0,04$  mm, szerokości  $b = 25 \pm 0,25$  mm i długości  $100 \pm 42$  mm. Długość zakładki spoiny klejowej wynosiła 16 mm. Na rys. 1 przedstawiono schemat analizowanego połączenia.

Do wykonania połączeń klejowych wykorzystano klej epoksydowy dwuskładnikowy Epidian 57/Z1/100:10, składający się z żywicy epoksydowej Epidian 57 i utwardzacza Z1 (w stosunku 100:10). Sposób przygotowania kleju oraz jego zalety opisano m.in. w pracy [10]. Klej utwardzany był jednostopniowo w temperaturze otoczenia  $25 \pm 3^\circ\text{C}$ , przy wilgotności powietrza  $35 \pm 3\%$ . Kompozycję klejową użytą do połączenia blach sporządzono tuż przed nałożeniem jej na przygotowaną powierzchnię.

a)



b)



Rys. 1. Połączenie klejowe: a) kształt i wymiary, b) widok  
Fig. 1. The bonded joint: a) shape and dimensions, b) view

Podczas wykonywania połączeń stosowano obciążenie 1 kg, a czas utwardzania każdej serii wynosił 7 dni.

Po utwardzeniu połączenia klejowe poddano próbie niszczącej na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z150, zgodnie z normą DIN EN 1465 [3], przy prędkości badania 5 mm/min. Wykonanie tych badań miało na celu określenie wytrzymałości analizowanych połączeń klejowych na ścinanie.

#### Przygotowanie powierzchni

Powierzchnie próbek przeznaczonych do sklejenia zostały przygotowane za pomocą obróbki mechanicznej. Wykorzystano narzędzia nasypowe o ziarnistości: P120, P320, P500 oraz P800 w postaci papieru ściernego w formie arkusza. Przed przystąpieniem do procesu obróbki za pomocą wybranego papieru ściernego z płytek stalowych usunięto wszelkiego rodzaju zadziory występujące na brzegach oraz widoczne zgrubienia. Po zakończeniu tego etapu próbki poddano obróbce przygotowującej ich powierzchnie do klejenia. Analizowano dwa rodzaje przygotowania powierzchni – obróbkę mechaniczną oraz obróbkę mechaniczną wraz z odtłuszczeniem.

Obróbka mechaniczna była realizowana ręcznie ruchem okrężnym (40–50 ruchów) w różnych kierunkach za pomocą specjalnego uchwytu. Po zakończeniu tego procesu przygotowująca część próbek była oczyszczana z powstałych po obróbce papierem ściernym zanieczyszczeń przy użyciu suchego ręcznika papierowego. W drugim wariantcie przygotowania powierzchni po zakończeniu obróbki mechanicznej zastosowano środek odtłuszczający Loctite 7063, a sposób odtłuszczenia opisano w pracach [12, 9].

#### Pomiary chropowatości powierzchni

Pomiary wybranych parametrów chropowatości powierzchni wykonano z wykorzystaniem profilografometru Perthometr 2 firmy Mahr (wg PN-EN ISO 4287 [7]). Średnie arytmetyczne poszczególnych parametrów zostały wyliczone na podstawie dziewięciu wyników: pomiary wykonywano w trzech miejscach na każdej z trzech próbek,

poddanych obróbce zastosowanym papierom ściernym (P120, P320, P500 oraz P800). Analizie poddano parametry wysokościowe (amplitudowe) chropowatości powierzchni [2, 1, 5].

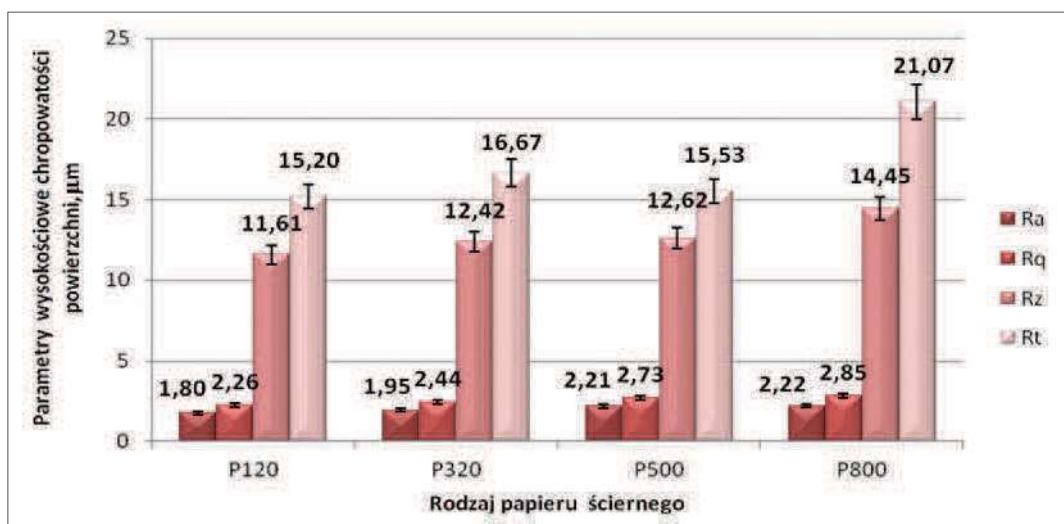
#### Wyniki badań

##### Chropowatość powierzchni

Wyniki wybranych parametrów wysokościowych chropowatości powierzchni przedstawiono na rys. 2. Na podstawie wyznaczonych średnich wartości wybranych parametrów wysokościowych chropowatości powierzchni zauważono, że największe wyniki chropowatości osiągnięte zostały po obróbce ściernym narzędziem nasypowym P800. Nie można jednak wyłonić jednego papieru ściernego, po zastosowaniu którego wszystkie z wybranych parametrów (rys. 2) w porównaniu do pozostałych są najmniejsze.

Wyniki badań chropowatości powierzchni dla średniego odchylenia arytmetycznego profilu chropowatości ( $R_a$ ) pokazują, że najwyższą wartość tej wielkości uzyskano po obróbce papierem ściernym P800, natomiast najniższą po użyciu papieru ściernego P120. W odniesieniu do parametru  $R_a$  zauważono niewielką różnicę pomiędzy wartościami tego parametru uzyskanymi po przygotowaniu powierzchni papierem P500 oraz P800 i wynosi ona 0,01  $\mu\text{m}$ . Średnie wartości parametru  $R_t$  dla powierzchni poddanych obróbce mechanicznej papierem ściernym P120, P320, P500 oraz P800 (rys. 2) mieszczą się w zakresie od 15,20  $\mu\text{m}$  do 21,07  $\mu\text{m}$ , zatem różnica pomiędzy najwyższym a najniższym średnim wynikiem całkowitej wysokości profilu wynosi 5,87  $\mu\text{m}$ .

Uwzględniając parametr  $R_t$  po wykonaniu badań chropowatości dla próbek przygotowanych z użyciem poszczególnych papierów ściernych zauważyć można, że największą wartość uzyskano po zastosowaniu papieru ściernego P800. Analizując profilogram powierzchni po tej obróbce zauważono pojawienie się na niektórych fragmentach powierzchni nierówności o znacznych wysokościach i głębokościach (różniących się od pozostałych, których przyczyną mogłyby być też nierówności



Rys. 2. Parametry wysokościowe chropowatości powierzchni próbek po obróbce papierem ściernym P120, P320, P500 oraz P800  
Fig 2. The surface roughness parameters of samples after P120, P320, P500 and P800 sandpaper treating

powierzchni przed obróbką), które mogły przyczynić się do uzyskania takiego wyniku, przy czym odchylenie standardowe parametru Rt w przypadku tej obróbki jest największe.

### Wytrzymałość połączeń klejowych

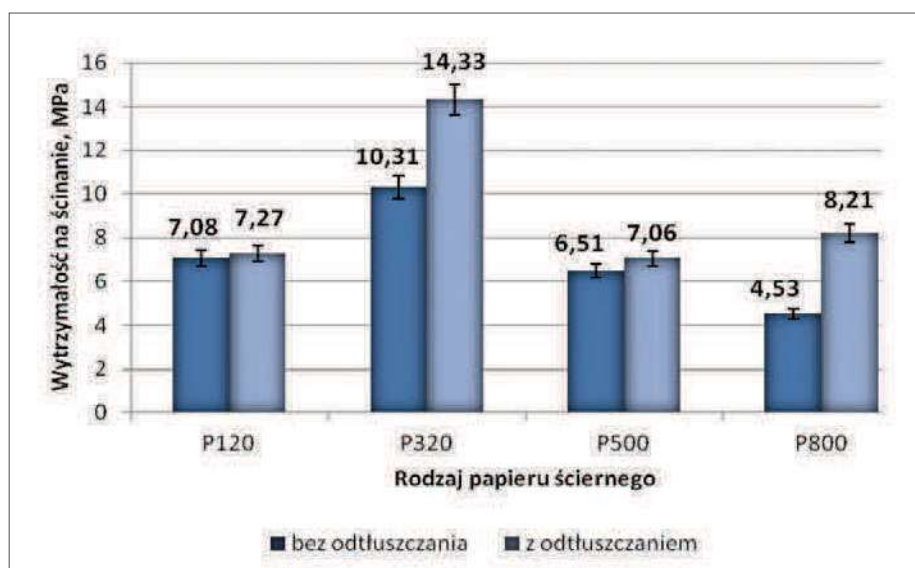
Zestawienie rezultatów wytrzymałości analizowanych połączeń klejowych zaprezentowano na rys. 3.

Średnie wartości wyników z przeprowadzonych badań dla poszczególnych papierów ściernych wraz z podziałem na wariant z użyciem środka odtłuszczającego oraz na wariant bez dodatkowego oczyszczania środkiem

odtłuszczającym pozwala zauważyć, że największą wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych uzyskano w przypadku, gdy do obróbki powierzchni łączonych elementów zastosowano narzędzia o wielkości ziarna P320 wraz z użyciem środka odtłuszczającego, która wyniosła 14,33 MPa, a najmniejszą po obróbce papierem P800 bez odtłuszczania równą 4,53 MPa.

### Analiza statystyczna rezultatów badań

Analiza statystyczna dotyczyła porównania średniej wartości wytrzymałości połączeń klejowych w dwóch rozpatrywanych wariantach przygotowania powierzchni.



Rys. 3. Wytrzymałości na ścinanie połączeń klejowych, w których powierzchnie blach przygotowano z użyciem papierów ściernych: P120, P320, P500, P800 bez odtłuszczania oraz z zastosowaniem środka odtłuszczającego

Fig. 3. The shear strength of adhesive joints in which surfaces were treated by using P120, P320, P500, P800 sandpapers without degreasing, and using a degreasing agent

Tabela. Wyniki analizy statystycznej  
Table. The statistical analysis results

Rodzaj papieru ściernego	Wartość statystyki $F_{obl}$	Wartość statystyki $F_{\alpha}$	Wniosek	Wartość statystyki $T_{obl}$	Wartość statystyki $F_{\alpha}$	Wniosek
P120	4,16	9,28	$S_1^2 = S_2^2$	0,350	1,782	$m_1 = m_2$
P320	1,89	9,28	$S_1^2 = S_2^2$	7,182	1,782	$m_1 \neq m_2$
P500	2,77	9,28	$S_1^2 = S_2^2$	1,965	1,782	$m_1 \neq m_2$
P800	3,54	9,28	$S_1^2 = S_2^2$	8,764	1,782	$m_1 \neq m_2$

gdzie:  $S^2$  – wariancja,  $m$  – średnia

W tab. zamieszczono rezultaty testów t-Studenta oraz F-Snedecora – Fishera, które zostały obliczone w odniesieniu do wyników wytrzymałości połączeń klejowych z użyciem do obróbki powierzchni papierów ściernych P120, P320, P500 oraz P800, przedstawionych na rys. 3. Porównywane pary to połączenia klejowe, w których łączone próbki poddano tylko obróbce mechanicznej oraz które poddano zarówno obróbce mechanicznej zastosowanymi rodzajami papieru ściernego, jak i odtłuszczeniu.

Analiza wyników wytrzymałościowych pozwala zauważyć, że w jednym przypadku – obróbki papierem ściernym P120 – zauważono brak statystycznie istotnych różnic w rozpatrywanych wartościach średnich wytrzymałości połączeń klejowych, w których powierzchnia po obróbce mechanicznej została poddana odtłuszczeniu oraz w których nie zastosowano odtłuszczenia powierzchni łączonych elementów.

Ponadto przeprowadzono analizę statystyczną dla par próbek przygotowanych bez użycia odtłuszczacza oraz z zastosowaniem odtłuszczenia po obróbce różnym rodzajem papieru ściernego. W przypadku wariantu przygotowania powierzchni, który polegał tylko na obróbce mechanicznej zauważono, że jedynie dla par próbek po przygotowaniu powierzchni z użyciem papierów ściernych P120 oraz P500 średnie są statystycznie równe. Pozostałe warianty wykazują statystycznie istotne różnice. Rozpatrując wariant przygotowania z zastosowaniem odtłuszczenia stwierdzono, że w wariantach P120 – P500, P120 – P800, po przeprowadzeniu testu statystycznego t-Studenta, można stwierdzić równość średnich. Pozostałe warianty wykazują statystycznie istotne różnice.

Zaobserwowane różnice w wynikach otrzymanych po zastosowaniu testów statystycznych oraz odpowiednich modeli wykazują statystycznie istotne różnice pomiędzy porównywanymi średnimi wynikami wytrzymałości w poszczególnych wariantach obróbki na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ .

#### Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych oraz analizy uzyskanych wyników można sformułować następujące wnioski:

- w wielu przypadkach operacja odtłuszczenia po obróbce ściernym narzędziem nasypowym wpływa korzystnie na wzrost wartości wytrzymałościowych połączeń klejowych analizowanych blach stalowych,
- we wszystkich rozpatrywanych wariantach przygotowania powierzchni (porównując wytrzymałość połączeń klejowych, w których łączone elementy poddano procesowi odtłuszczenia po obróbce mechanicznej oraz w których zastosowano tylko obróbkę mechaniczną klejonych elementów), większą wytrzymałością charakteryzowały się te połączenia, w których po obróbce mechanicznej papierem ściernym zastosowano środek odtłuszczący, co potwierdzono także na podstawie wyników analizy statystycznej (poza jednym przypadkiem), stąd też zaleca się zastosowanie operacji odtłuszczenia po obróbce mechanicznej w celu uzyskania większej wytrzymałości połączeń klejowych,
- rozwinięcie powierzchni w wyniku zastosowania narzędzia nasypowego, którym był papier ścierny o różnej wielkości ziarna pozwala uzyskać zróżnicowane wyniki wytrzymałości połączeń klejowych,
- największymi parametrami chropowatości powierzchni charakteryzują się elementy poddane obróbce ściernym narzędziem nasypowym P800,
- największą wytrzymałość na ścinanie w rozpatrywanych wariantach przygotowania powierzchni osiągają połączenia, których powierzchnie zostały przygotowane przy użyciu papieru ściernego P320. Można zatem stwierdzić, że ta wielkość ziarna jest najodpowiedniejsza do osiągnięcia względnie wysokiej wytrzymałości, przy zachowaniu określonych parametrów obróbki,
- zauważyć można, że im drobniejsze ziarno ściernych narzędzi nasypowych podczas przygotowywania powierzchni łączonych elementów, tym średnia wytrzymałość połączeń klejowych jest coraz mniejsza (pomijając papier ścierny P320, po zastosowaniu którego podczas obróbki mechanicznej powierzchni uzyskano największą wytrzymałość połączeń klejowych), pomimo wzrostu parametrów chropowatości powierzchni. Można więc przypuszczać, że istnieje pewien korzystny stopień schropowacenia



powierzchni pod względem wytrzymałości. Wyniki te stanowią także potwierdzenie informacji przedstawianych w literaturze.

Podsumowując można zauważyć, że zastosowanie obróbki mechanicznej w wielu przypadkach może być wystarczającym sposobem na uzyskanie wymaganej wytrzymałości połączeń klejowych. Należy jednak opracować właściwą technologię przygotowania powierzchni, gdyż (jak wykazały badania) obróbkę mechaniczną korzystnie jest połączyć z odłuszczeniem powierzchni. Wzrasta wówczas wytrzymałość połączeń klejowych w odniesieniu do wytrzymałości połączeń, w których powierzchnie łączonych elementów poddano tylko obróbce mechanicznej. Ponadto należy określić zalecane wartości parametrów chropowatości powierzchni (uwzględniając wytrzymałość połączeń) w odniesieniu do łączonych materiałów, zarówno wysokościowe (pionowe), jak i odległościowe (poziome) w celu pełnego wskazania korzystnej struktury geometrycznej klejonych materiałów, także w aspekcie adhezji mechanicznej.

## LITERATURA

- [1] Adamczak A. 2008. „Pomiary geometryczne powierzchni”. Warszawa: WNT.
- [2] Czaplicki J. i in. 1987. „Klejenie tworzyw konstrukcyjnych”. Warszawa: WKŁ.
- [3] DIN EN 1465. Adhesives. Determination of tensile lap-shear strength of bonded joints.
- [4] Godzimirski J. 2002. „Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych”. Warszawa: WNT.
- [5] Grzesik W. 2015. „Wpływ topografii powierzchni na właściwości eksploatacyjne części maszyn”. *Mechanik* (8-9): 587–593.
- [6] Krysicki W. i in. 1999. „Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach. Cz. II. Statystyka matematyczna”. Warszawa: PWN.
- [7] Norma PN-EN ISO 4287 Specyfikacja geometrii wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni i metoda profilowa. Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
- [8] „Poradnik inżyniera i technika”. Pod red. Charles V. Cagle’a „Kleje i klejenie”. Warszawa: WNT, 1977.
- [9] Rudawska A., M. Chruściel. 2011. „Wpływ sposobu przygotowania powierzchni na wytrzymałość połączeń klejowych lotniczego stopu aluminium”. *Technologia i Automatykacja Montażu* (2): 42–46.
- [10] Rudawska A., K. Głogowska. 2014. „Analiza porównawcza wytrzymałości połączeń klejowych wykonanych przy użyciu klejów epoksydowych”. *Przetwórstwo Tworzyw* (4): 320–325.
- [11] Rudawska A., M. Łukaszewicz. 2008. „Wpływ obróbki mechanicznej na wytrzymałość połączeń klejowych wybranych materiałów konstrukcyjnych”. *Przeгляд Spawalnictwa* (98): 27–30.
- [12] Rudawska A. 2013. „Wybrane zagadnienia konstruowania połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych”. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej.

---

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

mgr inż. Dominika Nowicka – absolwentka Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej

prof. ing. Nadežda Čuboňová, PhD. – Katedra Automatykacji i Systemów Produkcyjnych Wydziału Mechanicznego Uniwersytetu Technicznego w Žilinie (Słowacja), Univerzita 8215/1, 010 26 Žilina