

WPLYW KĄTA ZUKOSOWANIA PRÓBEK NA WYTRZYMAŁOŚĆ POŁĄCZEŃ KLEJOWYCH BLACH ZE STOPU ALUMINIUM EN AW-5754

The influence of samples bevel angle on the strength of bonded joints of aluminum alloy EN AW-5754

Anna RUDAWSKA, Damian CHYLIŃSKI

S t r e s z c z e n i e: Celem przeprowadzonych badań doświadczalnych było określenie wytrzymałości połączeń klejowych sklejonych doczołowo w zależności od kąta ukosowania próbek. Próbkę ze stopu aluminium EN AW – 5754 zostały zukosowane za pomocą obróbki mechanicznej, stosując 5 wariantów kątów zukosowania oraz wykonano próbki referencyjne, w którym zastosowano kąt prosty (90°). Powierzchnie przeznaczone do łączenia zostały przygotowane z użyciem obróbki mechanicznej za pomocą ściernego narzędzia nasypowego P220 oraz odtłuszczenia. Do wykonania połączeń klejowych zastosowano klej epoksydowy dwuskładnikowy Epidian 57/PAC/1:1. Najtrudniejsze w technologii wykonania były połączenia o kącie zukosowania łączonych elementów α równym 15°, a związane było to m.in. z największą powierzchnią klejenia. Połączenia klejowe po procesie utwardzenia poddano próbie na odrywanie na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell 150, zgodnie z normą ISO 4587. W wyniku analizy porównawczej wyników badań wytrzymałościowej połączeń klejowych doczołowych zukosowanych elementów można zaobserwować, że zukosowanie próbek w niewielkim stopniu korzystnie wpływa na ich wytrzymałość na odrywanie w porównaniu do typowych połączeń klejowych doczołowych, przy czym największą wytrzymałość otrzymano w przypadku kąta zukosowania próbek 70° (i także 30°), a najmniejszą w przypadku łączenia elementów zukosowanych pod kątem 15°.

S ł o w a k l u c z o w e: połączenie klejowe, wytrzymałość, blacha ze stopu aluminium, kąt ukosowania

A b s t r a c t: The aim of this experimental research was to determine the strength of butt bonded joints depending on the bevel angle of the samples. Samples of the aluminum alloy EN AW – 5754 are chamfered by mechanical treatment, using 5 variants bevel angles. The reference samples were also made, which have the 90° angle. The mashing process using P220 abrasive tool and degreasing was used as surface treatment for bonding. Epidian 57/PAC/1:1 two-component epoxy adhesive was applied to prepare the bonded joints. The hardest part of the bonding technology was joining the samples with a bevel angle equal to 15°, this was related to the largest surface bonding. After curing process the bonded joints were destructive tested. Zwick/Roell 150 testing machine was used to strength test and the test was carried out according to ISO 4587 standard. Based on the comparison test results of the butt bonded joints strength of beveled elements it can be notice that the chamfering of samples allow to obtain the similar strength as conventional adhesive bonds butt. The highest bonded joints strength was obtained for bonded joints of 70° (and also 30°) bevel angel of samples, but it is the smallest for the case of 15° bevel angle of samples.

K e y w o r d s: adhesive joints, bevel angle sample, strength, aluminium alloy

Wprowadzenie

Wytrzymałość połączeń klejowych zależy od wielu czynników technologicznych, konstrukcyjnych, materiałowych oraz eksploatacyjnych [4-6, 9]. Wykonanie prawidłowego połączenia klejowego wiąże się z koniecznością poznania różnych zagadnień technologii klejenia oraz stosowania się do wytycznych obejmujących konkretny rodzaj przygotowywanego połączenia. Ważne jest, aby poznać właściwości oraz rodzaj łączonych elementów, ponieważ to od nich zależą dalsze czynności procesu klejenia. Czynniki konstrukcyjne, takie jak kształt oraz wymiary konstrukcji połączenia klejowego wpływają na dobór odpowiedniej metody nakładania masy klejowej, wartości nacisku oraz użycia odpowiedniego oprzyrządowania technologicznego [8]. Warunki eksploatacji połączenia klejowego, czyli obciążenia oraz środowisko decydują m.in. o przyjęciu rozwiązania konstrukcyjnego oraz wyborze odpowiedniego kleju. Czynniki konstrukcyjne w istotny sposób wpływają na wytrzymałość połączeń klejowych [1, 3, 4], dlatego ważna jest ich wcześniejsza analiza. W pracach [2, 6] przedstawiono wyniki badań połączeń

klejowych jednozakładkowych, wskazujących na to, że kąt ukosowania łączonych próbek korzystnie wpływa na zwiększenie wytrzymałości takich połączeń nawet o 30% (w przypadku połączeń klejowych zakładkowych zukosowanych). Zukosowanie łączonych elementów przyczynia się do zmiany sztywności połączenia w strefie przykrawędziowej, dzięki czemu następuje zmniejszenie spiętrzenia naprężeń w takich połączeniach, co pozytywnie wpływa na wzrost wytrzymałości połączeń zakładkowych. Celem niniejszej pracy jest określenie wpływu kąta zukosowania próbek wykonanych ze stopu aluminium EN AW-5754 o grubości 2 mm na wytrzymałość połączeń klejowych sklejonych doczołowo. Zukosowanie dotyczy zmiany kształtu na szerokości (oraz długości) łączonych próbek.

Badania doświadczalne

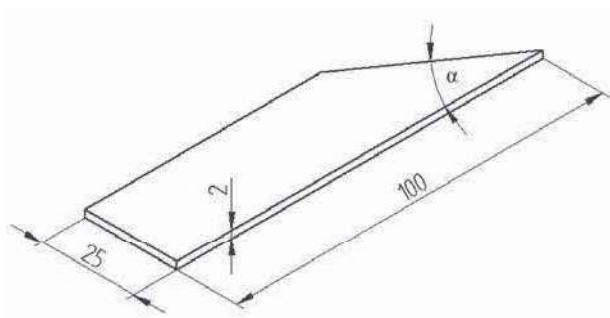
Materiał i kształt łączonych próbek

Do wykonania połączeń klejowych wykorzystano próbki wykonane z blachy ze stopu aluminium EN AW-5754 o grubości $g = 2$ mm, które mają średnią

wytrzymałość na rozciąganie – 209 MPa [10]. Skład chemiczny blach aluminiowych EN AW-5754 przedstawiono w tab. I.

Tabela I. Skład chemiczny blachy ze stopu aluminium [10]
Table I. Chemical composition of aluminium alloys sheet [10]

Gatunek materiału	Zawartość [%]							
	Mg	Cu	Mn	Zn	Si	Fe	Cr	Ti
EN AW-5754	3,50	0,02	0,14	-	0,27	0,25	0,10	0,10



Rys. 1. Kształt i wymiary próbek wykorzystywanych do badań
Fig. 1. The shape and samples dimensions used in experiment

Wymiary geometryczne próbek (rys. 2), przeznaczonych do łączenia, były równe:

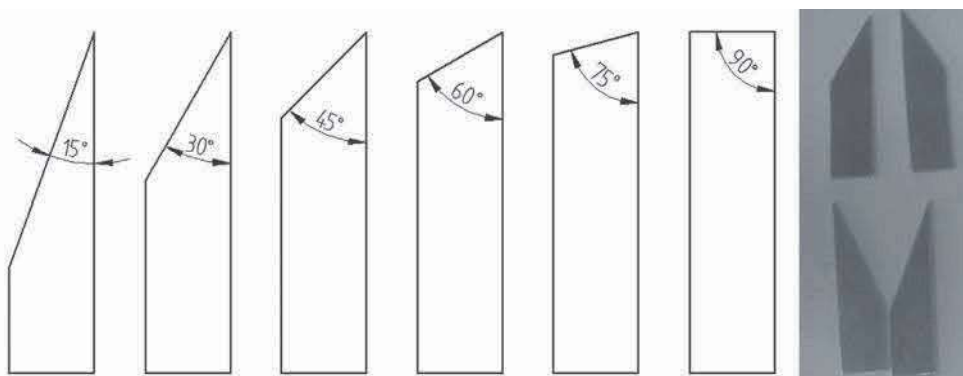
- długość łączonych elementów (długość dłuższego boku): $l = 100$ mm,
- szerokość łączonych elementów: $b = 25$ mm,
- grubość łączonych elementów: $\delta = 2$ mm,
- kąty zukosowania łączonych elementów: $\alpha: 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$.

Długość krótszego boku próbki była uzależniona od zastosowanego kąta zukosowania.

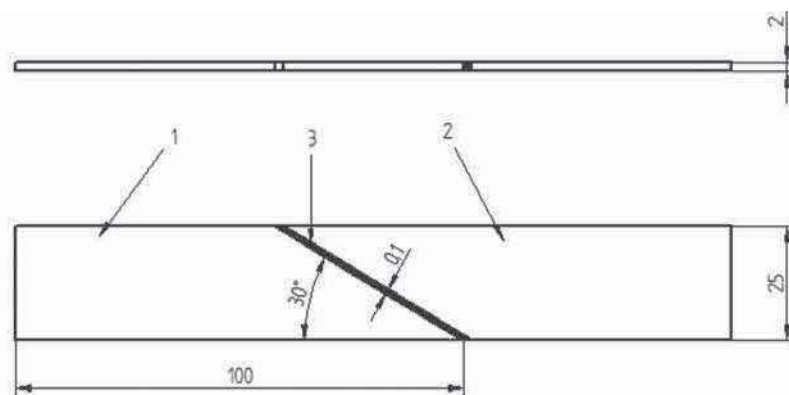
Próbki o przyjętych wymiarach zostały wycięte z arkusza blachy ze stopu aluminium EN AW-5754 przy pomocy gilotyny ręcznej do blach. Wykonane próbki zostały podzielone na 6 grup w zależności od kąta ukosowania próbek.

Połączenia klejowe

W badaniach wykonano 6 serii (w każdej od 7 do 10 sztuk) połączeń klejowych, w których elementy zukosowano pod różnymi kątami, przy czym jedna seria dotyczyła połączeń elementów o kącie prostym – klasycznych połączeń doczołowych. Wymiary geometryczne połączeń klejowych były uzależnione od serii badawczej.



Rys. 2. Kąty zukosowania próbek
Fig. 2. The samples bevel angle



Rys. 3. Schemat połączenia klejowego o kącie zukosowania próbek, wynoszącym 30° : 1, 2 – próbki ze stopu aluminium EN AW-5754, 3 – spoina klejowa kleju epoksydowego Epidian 57/PAC/1:1

Fig. 3. Scheme of the bonded joint with bevel angle of 30° of the samples: 1, 2 – EN AW-5754 aluminum alloy sample, 3 – adhesive layer of Epidian 57/PAC/1:1 epoxy adhesive



Rys. 4. Przykładowe połączenie klejowe wykorzystywane w badaniach o kącie zukosowania próbki wynoszącym 30°
Fig. 4. Examples of the bonded joint used in the study with bevel angle of 30° of the sample

Na rys. 3 i 4 przedstawiono schemat oraz widok przykładowego połączenia klejowego o kącie zukosowania łączonych elementów wynoszącym 30°.

Warunki wykonania połączeń klejowych

Proces klejenia rozpoczęto od przygotowania powierzchni, które polegało na obróbce mechanicznej za pomocą ściernego narzędzia nasypowego P220, a następnie powierzchnie odtłuszczono za pomocą środka Loctite 7063. Powierzchnia została odtłuszczona trzykrotnie, a operacja ta miała na celu usunięcie różnego rodzaju zanieczyszczeń powstałych po obróbce mechanicznej.

Do wykonania połączeń wykorzystano klej epoksydowy dwuskładnikowy, zawierający żywicę epoksydową Epidian 57 oraz utwardzacz PAC (Epidian 57/PAC/1:1). Składniki kleju wymieszano mechanicznie za pomocą mieszadła, zgodnie z parametrami oraz procedurą przedstawioną w pracy [7]. Klej nakładano szpachelką wykonaną z tworzywa polimerowego tuż po przygotowaniu kleju. Zwrócono szczególną uwagę na grubość i równomierność grubości spoiny na całej powierzchni sklejenia, dostosowując ją do grubości zalecanych w literaturze (0,05 mm–0,15 mm [4]). Wszystkie połączenia zostały przygotowywane w temperaturze otoczenia $24\pm 1^\circ\text{C}$ oraz wilgotności powietrza $24\pm 1\%$.

Po nałożeniu kleju powierzchnie próbek złączono i ustalono w specjalnym przyrządzie ustalającym, po czym połączenia zostały poddane procesowi utwardzania. Proces utwardzania był przeprowadzony na zimno, w temperaturze otoczenia ($24\pm 1^\circ\text{C}$) i wilgotności $24\pm 1\%$, w czasie 14 dni. Próbkę po procesie utwardzania zostały poddane kontroli poprawności wykonania.

Najtrudniejsze w technologii wykonania były połączenia o kącie zukosowania α równym 15° , co było związane z największą powierzchnią klejenia. Najłatwiejsze do wykonania pod względem technologicznym były połączenia doczołowe o kącie ukosowania $\alpha = 90^\circ$, o najmniejszej powierzchni sklejenia.

Wyniki badań i ich omówienie

Po procesie utwardzania i kontroli wymiarowo-kształtowej poprawności wykonania połączeń klejowych, zostały one poddane próbie wytrzymałościowej, zgodnie z normą ISO 4587, na maszynie wytrzymałościowej firmy

Zwick/Roell Z150. Wybrane rezultaty badań wytrzymałości połączeń klejowych poddano analizie statystycznej, wykorzystując analizę statystyczną ANOVA oraz program Statistica.

Pole sklejenia

Poniższy rysunek (rys. 6) prezentuje wpływ kąta zukosowania łączonych próbek na pole powierzchni sklejenia. Można dostrzec, że wraz ze wzrostem kąta zukosowania próbek maleje pole połączenia klejowego.



Rys. 6. Wpływ kąta zukosowania próbek na pole sklejenia
Fig. 6. The influence of bevel angle of samples on bonding field

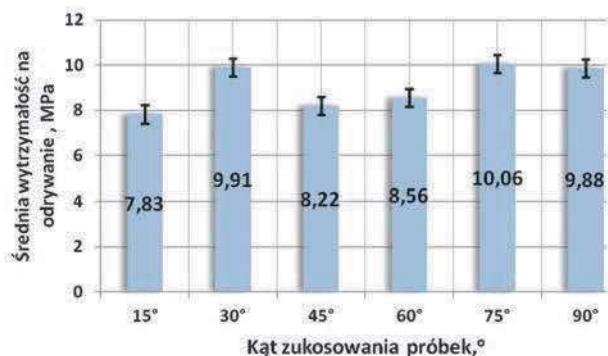
Największe pole sklejenia uzyskano stosując kąt zukosowania próbek wynoszący 15° – $188,16\text{ mm}^2$, a najmniejsze dla kąta α równego 90° – $49,19\text{ mm}^2$. Średnia grubość spoiny klejowej wyniosła ok. $0,10\pm 0,02\text{ mm}$.

Wytrzymałość połączeń klejowych

Wyniki badań wytrzymałościowych, przedstawione na rys. 7, poddano analizie porównawczej wytrzymałości na odrywanie połączeń klejowych doczołowych o różnych kątach zukosowania łączonych próbek.

Na podstawie analizy wytrzymałościowej badanych połączeń klejowych można zaobserwować, że zukosowanie łączonych próbek korzystnie wpływa na ich wytrzymałość na odrywanie. W przeprowadzonych badaniach największą wytrzymałość na odrywanie uzyskano stosując kąty zukosowania 75° oraz 30° , która wyniosła odpowiednio $10,06\text{ MPa}$ oraz $9,91\text{ MPa}$. Natomiast najmniejszą wartość wytrzymałości na odrywanie uzyskano stosując

kąt zukosowania próbki 15°, która wyniosła 7,83 MPa, co stanowi 78% największej wartości wytrzymałości połączeń klejowych, w których kąt zukosowania klejonych elementów wyniósł 75°. Równie małą wytrzymałość na odrywanie uzyskało połączenie o kącie ukosowania 45° – 8,22 MPa (rozzrut wyników wynosi 2,23 MPa, co stanowi 22%).



Rys. 7. Średnia wytrzymałość na odrywanie połączeń klejowych dla poszczególnych kątów zukosowania łączonych próbek
Fig. 7. The average tearing strength of the bonded joints for various bevel angles of the samples

W celu przeprowadzenia analizy statystycznej ANOVA ($n > 2$), sprawdzono normalność rozkładu, na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, wykorzystując test Shapiro-Wilka. W przypadku grupy próbek połączeń klejowych, z kątem zukosowania 60°, rozkład wyników nie jest zgodny z rozkładem normalnym. W związku z powyższym oraz z powodu różnej liczby prób w danej grupie (N), przeprowadzono test statystyki nieparametrycznej – test Tukeya istotnych różnic dla grup połączeń o różnej liczbie oraz zbadano grupy jednorodne testem post-hoc – HSD Tukeya przy zadanym przedziale ufności. Na podstawie uzyskanych wyników (tab. II) można stwierdzić, że pomiędzy poszczególnymi grupami nie występują istotne różnice.

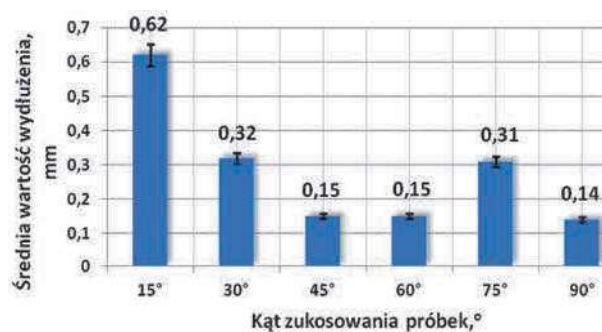
Tabela II. Wyniki analizy statycznej rezultatów przedstawionych na rys. 7
Table II. Statistical results of results presented in fig. 7

Nr podkl.	HSD (nierówne N); zmienna Wytrzymałość na ścinanie przy rozciąganiu [MPa] Grupy jednorodne, alfa = ,05000 Błąd: MS międzygrupowe = 3,3852, df = 14,000		
	Kąt zukosowania próbek	Wytrzymałość na ścinanie przy rozciąganiu [MPa] Średnie wartości	Oznaczenie grup jednorodnych
1	15°	7,83	****
3	45°	8,22	****
4	60°	8,56	****
6	90°	9,88	
2	30°	9,91	
5	75°	10,06	

Na podstawie otrzymanych rezultatów można stwierdzić, iż najmniej odpowiednie jest stosowanie kąta ukosowania 15° podczas kształtowania elementów łączących w połączeniach klejowych. Pod względem wytrzymałości połączeń klejowych w większości przypadków korzystne jest wykorzystywanie kątów większych od 45°. Zbyt mały kąt ukosowania połączenia klejowego doczołowego niekorzystnie wpływa na wytrzymałość takiego połączenia oraz na technologię wykonania tego rodzaju połączeń. Najkorzystniej jest stosować kąty ukosowania 75° (także 30°), choć zbliżoną wytrzymałość uzyskano w przypadku zastosowania połączenia doczołowego (o prostopadłych powierzchniach łączonych elementów), wykazano brak statystycznie istotnych różnic wartości wytrzymałości pomiędzy tymi trzema grupami połączeń, na przyjętym poziomie ufności – tab. II.

Wydłużenie

Analizie poddano także wydłużenie rozpatrywanych połączeń klejowych (rys. 8).



Rys. 8. Średnia wartość wydłużenia połączeń klejowych dla poszczególnych kątów zukosowania łączonych próbek
Fig. 8. The average value of the bonded joints elongation for various bevel angles of the samples

Największym średnim wydłużeniem charakteryzują się połączenia klejowe, w których sklejono elementy zukosowane pod kątem 15° . Może być to związane z największym polem powierzchni sklejenia, które wyniosło $188,16 \text{ mm}^2$ i połączenie było poddane największej sile niszczącej – $1464,84 \text{ N}$. Dla tego połączenia średnia wartość wydłużenia wyniosła $0,62 \text{ mm}$. Najmniejszym wydłużeniem średnim charakteryzują się połączenia klejowe o kącie zukosowania 90° (połączenia doczołowe) – $0,14 \text{ mm}$. Średnie pole powierzchni sklejenia takiego połączenia było najmniejsze – $49,19 \text{ mm}^2$. Równie małym wydłużeniem wyróżniają się połączenia klejowe o kątach ukosowania 45° oraz 60° – $0,15 \text{ mm}$. Wydłużenie rośnie dla kątów ukosowania zarówno mniejszych, jak i większych od 45° . Wydłużenie połączeń klejowych w przypadku próbek zukosowanych pod kątem 45° oraz 60° stanowi 24% wydłużenia połączeń klejowych, w których próbki zukosowano pod kątem 15° .

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań, dokonanej analizie porównawczej wytrzymałości na odrywanie oraz wydłużenia i analizy statycznej uzyskanych wyników można stwierdzić, że najbardziej korzystne jest stosowanie kąta ukosowania 75° . Wytrzymałość takich połączeń jest największa. Równie dobre właściwości wytrzymałościowe wykazuje połączenie o kącie ukosowania 30° , a także połączenie doczołowe (kąt 90°). W wyżej wymienionych rodzajach połączeń brak jest statystycznie istotnych różnic średnich wartości wytrzymałości na przyjętym poziomie ufności. Najmniej korzystne okazało się łączenie próbek mających zukosowanie wynoszące 15° . Takie połączenia charakteryzują się niższą wytrzymałością od pozostałych połączeń. Na podstawie przeprowadzonych badań można zaobserwować, że kąt zukosowania łączonych elementy nie wpływa znacząco na poprawę wytrzymałości połączeniach klejowych, przy czym wpływ ten zależy jest od wartości kąta ukosowania. Należy podkreślić, że ukosowanie próbek wzdłuż szerokości w pewnym zakresie kątów zukosowania pozwala uzyskać niewielki wzrost wytrzymałości, jednak nie należy stosować małych kątów zukosowania, gdyż wytrzymałość takich połączeń jest mniejsza, a ponadto występują trudności technologiczne w ich wykonaniu.

Przedstawione wyniki badań oraz wnioski dotyczą materiału wykorzystywanego do badań doświadczalnych, czyli blach ze stopu aluminium EN AW – 5754 oraz zaprezentowanych warunków technologicznych.

LITERATURA

- [1] Adams R.D., J.A. Harris. 1987. "The influence of local geometry on the strength of adhesive joints". *International Journal of Adhesion and Adhesives* (7): 69–80.
- [2] Adams R.D., J. Comyn, W.C. Wake. 1997. "Structural Adhesive Joints in Engineering Book" 2nd edition, United Kingdom, *Springer*.
- [3] Da Silva L.F.M. et. al. 2009. "Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints". *International Journal of Adhesion and Adhesives* (29): 621–632.
- [4] Godzimirski J. i in. 1997. „Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
- [5] Godzimirski J. 2002. „Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- [6] Kuczmaszewski J. 1995. „Podstawy konstrukcyjne i technologiczne oceny wytrzymałości adhezyjnych połączeń metali”. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej.
- [7] Rudawska A., J. Kuczmaszewski. 2012. „Badania porównawcze efektów modyfikacji żywic epoksydowych napełniaczami o dużym stopniu rozdrobnienia dla wybranych utwardzaczy”. *Przetwórstwo Tworzyw* (5): 500–504.
- [8] Rudawska A. 2015. "Pressure during curing and the strength of 2024, 2017A and 1050 aluminium alloy sheet adhesive joints". *Advances in Science and Technology Research Journal* (9): 96–103.
- [9] Szabelski J. 2014. „Badania wpływu obróbki cieplnej doczołowych połączeń klejowych na ich wytrzymałość statyczną”. Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej.
- [10] <http://www.sebros.eu/aluminium/aluminium-EN-AW-5754>, dostęp 01.2017.

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

inż. Damian Chyliński – absolwent Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej