

ANALIZA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA KONKURENCYJNYCH EKONOMICZNIE I EKOLOGICZNYCH METOD OBRÓBKI DO SKUTECZNEGO KLEJENIA STALI 316L

Mariusz KŁONICA, Józef KUCZMASZEWSKI

Streszczenie: W pracy przedstawiono wybrane wyniki badań dotyczących oszacowania liczebności próby, chropowatości powierzchni, swobodnej energii powierzchniowej oraz wytrzymałości jednozakładkowych połączeń klejowych stali 316L po różnych sposobach przygotowania warstwy wierzchniej. Stan energetyczny warstwy wierzchniej stali 316L jest szczególnie trudny do konstytuowania w warunkach technologii uważanych za ekologiczne. Jest to stal o podwyższonej odporności na korozję i szczególnych właściwościach wytrzymałościowych, stosowana w specjalistycznych urządzeniach w przemyśle. Niektóre technologie związane z montażem elementów wykonanych z tej stali wymagają kształtowania odpowiedniego stanu energetycznego warstwy wierzchniej, w tym dla potrzeb klejenia, hermetyzacji czy nakładania powłok. W pracy analizowano wpływ różnych sposobów obróbki na stan energetyczny warstwy wierzchniej tej stali. Uzyskane wyniki z przeprowadzonych badań opracowano statystycznie z zachowaniem właściwych standardów naukowych.

Słowa kluczowe: stal 316L, analiza statystyczna, chropowatość powierzchni, swobodna energia powierzchniowa, wytrzymałość połączeń klejowych.

1. Wprowadzenie

Stale o podwyższonej odporności na korozję są trudne do klejenia, hermetyzacji czy nakładania powłok, a więc technologii, w których adhezja odgrywa bardzo istotną rolę w kształtowaniu oczekiwanych właściwości i efektów procesu. Wzrost wartości swobodnej energii powierzchniowej jest możliwy poprzez odpowiednią obróbkę „rozwijającą” strukturę geometryczną powierzchni oraz w wyniku kształtowania odpowiedniej struktury warstwy wierzchniej [1-4]. Z reguły jest to konstytuowanie odpowiednich tlenków, wysokoenergetycznych oraz silnie związanych z podłożem, wzbogaconych o aktywne grupy funkcyjne i wolne rodniki, zmieniające cechy chemisorpcyjne powierzchni. Tworzenie takich cech w materiałach o podwyższonej odporności na korozję z reguły odbywa się w warunkach obróbki chemicznej lub elektrochemicznej w silnie kwaśnych lub zasadowych kąpielach. Są to technologie kosztowne w aplikacji i utylizacji. Prace skoncentrowano na wyeliminowaniu tzw. „mokrej” chemii z tego procesu. Skoncentrowano uwagę na kształtowaniu odpowiedniej struktury geometrycznej, a więc na technologii „mechanicznej”, w niektórych sytuacjach wspomaganą ozonowaniem, jako technologią ekologiczną a jednocześnie silnie reaktywną, a więc skutecznie utleniającą powierzchnię [6-9, 11, 13].

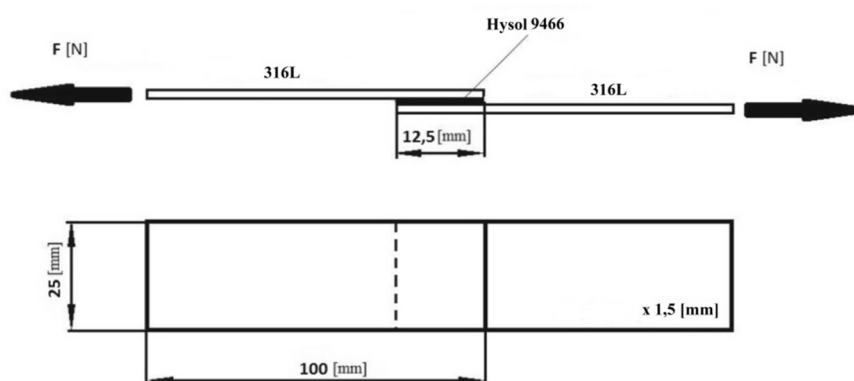
2. Metodyka badań

2. 1. Materiały użyte w badaniach

Badania prowadzono z użyciem następujących materiałów:

1. Stal 316L,
2. Klej epoksydowy Hysol H 9466,
3. Środki pomocnicze: narzędzia nasypowe o ziarnistości P320, środek odtłuszczający Loctite 7061, woda destylowana, diiodometan.

Ze stali 316L wykonano próbki, jako jednozakładkowe połączenie klejowe. Grubość warstwy kleju $g_k=0,1$ mm, pozostałe wymiary przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Próbka jednozakładkowa – schemat połączenia klejowego

W celu rozwinięcia powierzchni geometrycznej oraz usunięcia warstwy fizysoorpcyjnej część badanych próbek poddano obróbce mechanicznej szlifierką oscylacyjną (Hilti WFO 280) narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 w czasie 30 sekund. Wszystkie próbki oczyszczono środkiem odtłuszczającym Loctite 7061. W tabeli 1 przedstawiono skład chemiczny stali 316L, a w tabeli 2 wybrane właściwości wymienionej stali.

Tabela 1. Skład chemiczny stali 316L

Stal 316L									
Pierwiastek	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N
Wartość, %	0,011	0,54	1,03	0,040	0,001	10,18	16,71	2,05	0,020

Tabela 2. Wybrane właściwości stali 316L

Stal 316L		
Wytrzymałość na rozciąganie Rm [MPa]	Umowna granica plastyczności Rp0,2 [MPa]	Twardość [HV]
592	290	148

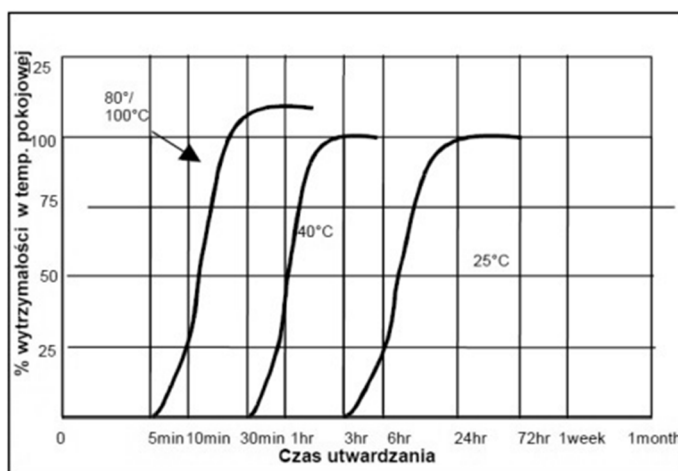
Przedstawiona stal należy do grupy stali o strukturze austenitycznej. Ze względu na dobre własności antykorozyjne stal austenityczna jest najczęściej stosowaną stalą w przemyśle chemicznym, maszynowym, papierniczym, spożywczym i wielu innych.

Technologię przygotowania powierzchni (stosowane warianty) przedstawiono w tab. 3.

Tabela 3. Metody przygotowania warstwy wierzchniej pod połączenia klejowe

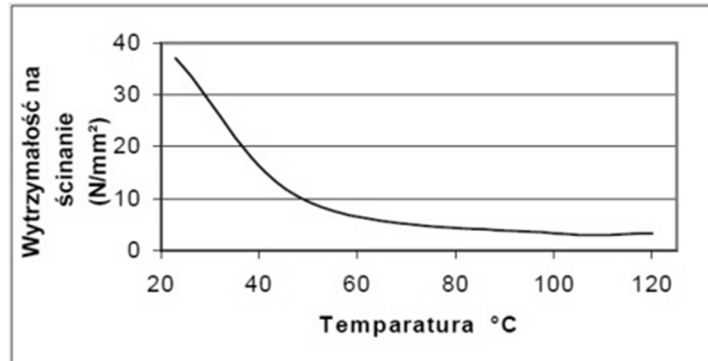
316L	
T1	Bez obróbki mechanicznej, po odtłuszczeniu Loctite 7061
T2	Obróbka narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 oraz po odtłuszczeniu Loctitem 7061
T3	Obróbka narzędziem nasypowym o ziarnistości P320, odtłuszczenie Loctitem 7061 oraz ozonowanie: 20g O ₃ /m ³ w czasie 30 minut
T4	Obróbka narzędziem nasypowym o ziarnistości P320, odtłuszczenie Loctitem 7061 oraz ozonowanie: 50g O ₃ /m ³ w czasie 45 minut

W badaniach wykorzystano klej Hysol 9466 utwardzony w temperaturze otoczenia wynoszącej 20 - 22°C, przy wilgotności względnej (35 - 40)%. Wartość ciśnienia jednostkowego wywieranego na powierzchni próbek w procesie klejenia wynosiła 0,2 MPa. Czas utwardzania ustalono na poziomie 120 godzin. Klej Hysol 9466 osiąga w temperaturze pokojowej wysoką wytrzymałość po 24 godzinach. W celu przyspieszenia utwardzania można zastosować wyższe temperatury. Na rysunku 2 przedstawiono wpływ temperatury i czasu utwardzania na wytrzymałość na ścinanie stalowych połączeń klejowych (przy grubości skleiny 0,05 mm). Badania prowadzono zgodnie z normą DIN EN 1465 [14].



Rys. 2. Wytrzymałość na ścinanie w zależności od czasu utwardzania [15]

Na rysunku 3 przedstawiono zależność wytrzymałości na ścinanie połączenia klejowego w funkcji temperatury.



Rys. 3. Wytrzymałość na ścinanie w funkcji temperatury [15]

Przygotowanie kleju odbywało się z użyciem statycznego mieszadła przepływowego. Nanoszono klej na powierzchnie łączone, zgodnie z zaleceniami producenta kleju.

2. 2. Analiza statystyka w badaniach

Podstawowym etapem przeprowadzenia eksperymentu są badania wstępne. Na podstawie analizy rozrzutu i przyjętego poziomu istotności określono niezbędną liczbę pomiarów w badaniach zasadniczych [10, 12].

Średnią arytmetyczną obliczono ze wzoru:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (1)$$

gdzie: y_i – wartość czynnika wynikowego w i -tym pomiarze
 n - całkowita liczba pomiarów.

Odchylenie standardowe obliczono z następującej zależności:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}, \quad (2)$$

natomiast wariancję wyznaczono z zależności:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}. \quad (3)$$

Liczbę pomiarów oszacowano na podstawie wzoru:

$$n = \frac{t_{\alpha}^2 \cdot s^2}{d^2} \leq n_0 \quad (4)$$

gdzie: n_0 - liczebność próby wstępnej,

t_{α} - wartość zmiennej t-Studenta,

s^2 - wariancja z próby wstępnej,

d – maksymalny błąd szacunku, równy maksymalnemu błędowi pomiarowemu.

W analizie danych uzyskanych z badań ważne jest wnioskowanie na podstawie testów statystycznych. Pierwszym etapem weryfikacji hipotez jest sprawdzenie hipotezy

o równości wariancji.

Hipoteza zerowa ma postać:

$$H_0: \sigma_I^2 = \sigma_{II}^2 \quad (5)$$

Hipoteza alternatywna na postać:

$$H_1: \sigma_{II}^2 < \sigma_I^2 \quad (6)$$

Do weryfikacji hipotezy wykorzystano statystykę opartą na rozkładzie Fischera-Snedecora:

$$F = \frac{S_I^2}{S_{II}^2} \quad (7)$$

gdzie: S_I^2 - wariancja o większej wartości,
 S_{II}^2 - wariancja o mniejszej wartości.

Kolejnym etapem jest weryfikacja hipotezy o równości średnich.

Hipoteza zerowa ma postać:

$$H_0: m_1 = m_2 \quad (8)$$

Hipoteza alternatywna na postać:

$$H_1: m_1 > m_2 \quad \text{lub} \quad m_1 < m_2 \quad (9)$$

Jeżeli wariancje są równe do weryfikacji wykorzystujemy test oparty na rozkładzie t-Studenta.

$$t = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}} \quad (10)$$

Gdy test hipotezy o równości wariancji wykazał, że wariancje są różne do weryfikacji stosujemy test oparty na rozkładzie Cochran-Coxa.

$$c = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (12)$$

Na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej można formułować jednoznaczne wnioski przy założonym poziomie istotności.

Po „postawieniu” hipotez należy przyjąć poziom istotności. W badaniach „technicznych” zazwyczaj przyjmuje się poziom istotności na poziomie $\alpha = 0,05$. Błędy popełnione przy ocenie hipotez statystycznych obrazuje tabela 4.

Tabela. 4. Błędy popełnione przy analizie hipotez statystycznych [8]

Hipoteza	Prawdziwa	Fałszywa
Przyjęta	Decyzja prawidłowa	Błąd drugiego rodzaju = $1 - \alpha$
Odrzucona	Błąd pierwszego rodzaju = α	Decyzja poprawna

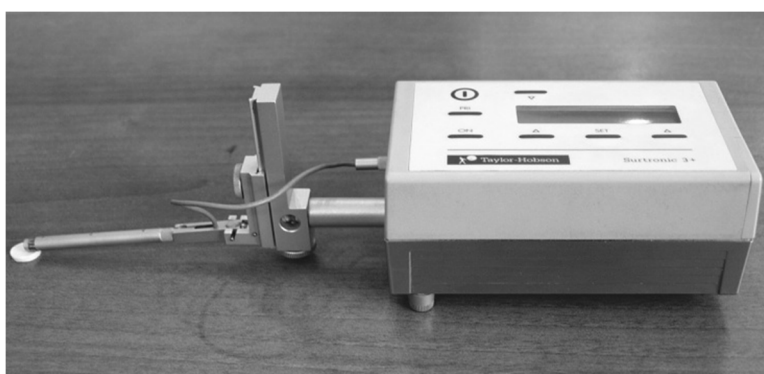
Zazwyczaj konsekwencje przyjęcia hipotezy fałszywej są znacznie poważniejsze

w skutkach niż odrzucenie hipotezy prawdziwej.

Wyboru między testem jednostronnym a dwustronnym oraz formułowanie hipotezy zerowej powinno być dokonane przed rozpoczęciem badań.

2. 3. Stanowisko badawcze

Do pomiaru parametrów chropowatości powierzchni wykorzystano profilografometr firmy Taylor Hobson Surtronic3+, przedstawiony na rysunku 4. Profile natomiast opracowano w programie TalyProfile Lite. Długość odcinka elementarnego dobrano na podstawie literatury [5].



Rys. 4. Profilografometr firmy Taylor Hobson Surtronic3+

Do wyznaczenia wartości swobodnej energii powierzchniowej wykorzystano pomiary kątów zwilżania. Za pomocą goniometru PGX wykonano pomiary kąta zwilżania cieczami pomiarowymi (woda destylowana oraz diiodometan). Ciecze pomiarowe o stałej objętości 4 μl nanoszono na badane powierzchnie w sposób automatyczny przez mechanizm goniometru PGX. Przyjęto następujące wartości swobodnej energii powierzchniowej cieczy pomiarowych oraz ich składowych polarnej i dyspersyjnej: swobodna energia powierzchniowa wody $\gamma_w=72,8$ [mJ/m^2], składowa polarna swobodnej energii powierzchniowej wody $\gamma_w^p=51,0$ [mJ/m^2], składowa dyspersyjna swobodnej energii powierzchniowej wody $\gamma_w^d=21,8$ [mJ/m^2], swobodna energia powierzchniowa diiodometanu $\gamma_d=50,8$ [mJ/m^2], składowa polarna swobodnej energii powierzchniowej diiodometanu $\gamma_d^p=2,3$ [mJ/m^2], składowa dyspersyjna swobodnej energii powierzchniowej diiodometanu $\gamma_d^d=48,5$ [mJ/m^2]. Pomiar kąta zwilżania zarówno wodą destylowaną jak i diiodometanem był wykonany minimum dziesięć razy na każdej z badanych próbek.

Badania wytrzymałości na ścinanie jednozakładkowych połączeń klejowych zostały przeprowadzone na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z 150, zgodnie z normą DIN EN 1465 [14]. Prędkość trawersy podczas próby niszczącej wynosiła 2 mm/min, a odległość uchwytów przy pozycji startowej wynosiła 85 mm.

3. Wyniki badań

3.1. Pomiary parametrów chropowatości powierzchni

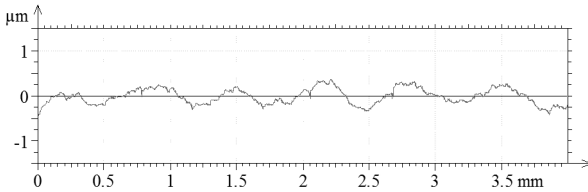
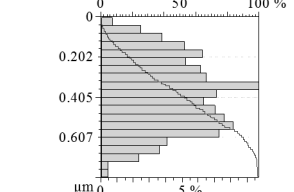
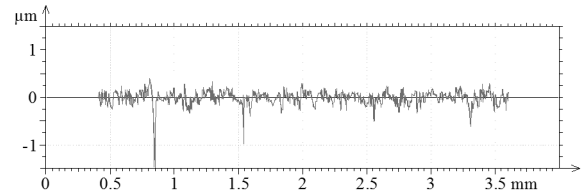
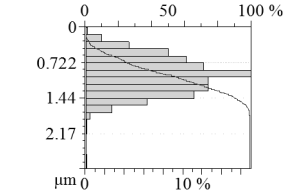
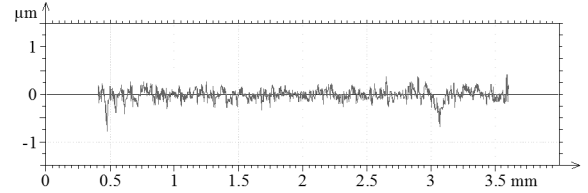
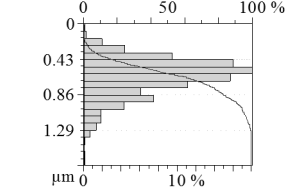
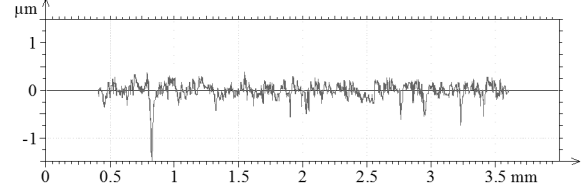
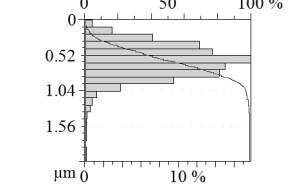
Dla pomiaru parametrów chropowatości powierzchni w badaniach wstępnych przyjęto n_0

= 10, $t_a = 2,262$, $d = 0,1 \mu\text{m}$. Liczbę pomiarów oszacowano na podstawie pomiarów parametrów Ra oraz Rz.

Na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej ustalono minimalną liczbę powtórzeń pomiarów parametrów chropowatości, która wynosi pięć. W celu zwiększenia dokładności wykonywanych pomiarów zdecydowano się na wykonanie siedmiu powtórzeń pomiarów. Wartości skrajne odrzucano.

W tabeli 5 przedstawiono profile chropowatości stali 316L po różnych sposobach przygotowania powierzchni oraz krzywe udziału materiałowego.

Tabela. 5. Chropowatość powierzchni stali 316L

	Profil chropowatości	Krzywa Abbotta-Firestone'a
T1		
T2		
T3		
T4		

Przed wykonaniem pomiarów powierzchnie próbek oczyszczono oraz odtłuszczono środkiem odtłuszczającym Loctite 7061. Warto zwrócić uwagę, obserwując profile nierówności, że obróbka mechaniczna narzędziami nasypowymi skutecznie rozwija analizowaną powierzchnię. Na przedstawionych profilach po obróbce mechanicznej narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 zauważono charakterystyczne zagłębienia przedstawiające kinematyczno-geometryczne odwzorowanie narzędzia.

Wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni dla przyjętych czterech wariantów kształtowania stanu energetycznego warstwy wierzchniej próbek wykonanych ze

stali 316L przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Wartości wybranych parametrów chropowatości stali 316L

Parametry amplitudy								Parametry stosunku materiałowego	
	Statystyka	Rp [μm]	Rz [μm]	Rc [μm]	Rt [μm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rmr [%]	Rdc [μm]
T1	Średnia	0,19	0,41	0,21	0,53	0,08	0,10	99,9	0,21
	Odchylenie standardowe	0,012	0,118	0,028	0,16	0,014	0,023	0,25	0,024
T2	Średnia	0,33	1,24	0,32	1,95	0,10	0,14	99,4	0,19
	Odchylenie standardowe	0,014	0,112	0,037	0,159	0,015	0,023	0,351	0,021
T3	Średnia	0,34	0,84	0,27	1,19	0,09	0,12	99,7	0,17
	Odchylenie standardowe	0,019	0,125	0,021	0,201	0,023	0,018	0,281	0,02
T4	Średnia	0,36	1,30	0,37	1,85	0,12	0,17	98,8	0,22
	Odchylenie standardowe	0,015	0,131	0,041	0,161	0,009	0,021	0,324	0,019

Wyniki wartości parametrów chropowatości uzyskane z badań eksperymentalnych odpowiadają parametrom chropowatości uzyskiwanym po procesie szlifowania. Na tym etapie badań nie stwierdzono wpływu parametrów ozonowania na wartości parametrów chropowatości powierzchni stali 316L po obróbce mechanicznej szlifierką oscylacyjną narzędziem nasypowym o ziarnistości P320.

3.2. Wyznaczenie wartości swobodnej energii powierzchniowej

Przed przystąpieniem do badań zasadniczych wykonano serie badań wstępnych mających na celu ustalenie liczebności pomiarów kąta zwilżania cieczami pomiarowymi oraz swobodnej energii powierzchniowej. Dla pomiaru kąta zwilżania oraz SEP w badaniach wstępnych przyjęto $n_0 = 10$, $t_\alpha = 2,262$, $d = 1^\circ$ - dla kąta zwilżania oraz $d = 1 \text{ mJ/m}^2$ - dla SEP. Liczbę pomiarów oszacowano na podstawie pomiarów kąta zwilżania wodą destylowaną oraz kąta zwilżania diiodometanem.

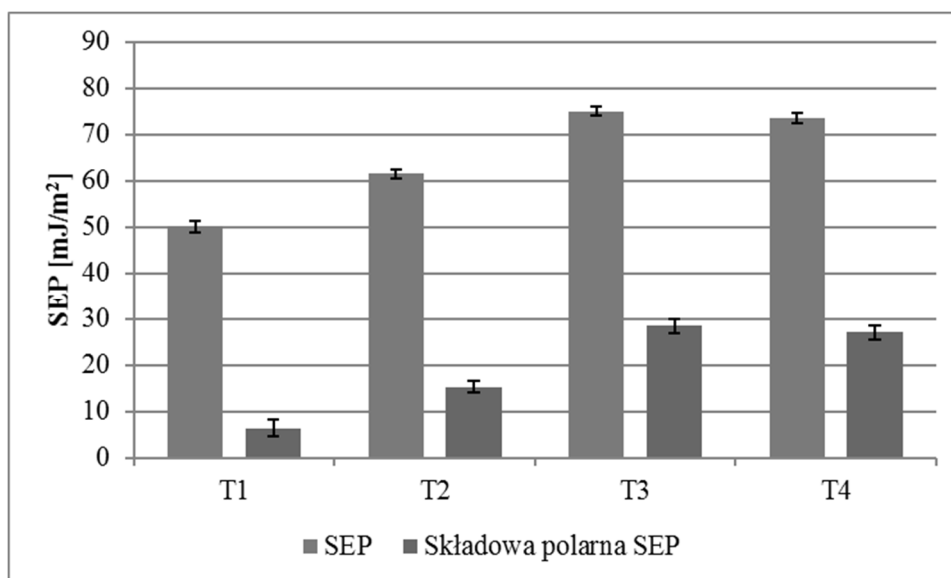
Na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej ze wstępnych badań ustalono minimalną liczbę pomiarów kąta zwilżania dla wody destylowanej oraz diiodometanu. Dla analizowanego materiału przyjęto minimalną liczbę pomiarów równą osiem. W celu zwiększenia dokładności wykonywanych pomiarów zdecydowano się na wykonanie dziesięciu powtórzeń pomiarów. Wartości skrajne odrzucano. Minimalna liczba powtórzeń pomiarów SEP wynosi dziesięć.

W tabeli 7 przedstawiono uśrednione wyniki wartości swobodnej energii powierzchniowej SEP stali 316L po różnych sposobach przygotowania warstwy wierzchniej wraz z obliczonym odchyleniem standardowym. W tabeli zestawiono również składowe SEP: składową polarną SEP oraz składową dyspersyjną SEP.

Tabela 7. Wartości swobodnej energii powierzchniowej SEP i jej składowe dla stali 316L

316L				
		SEP [mJ/m ²]	Składowa polarna SEP [mJ/m ²]	Składowa dyspersyjna SEP [mJ/m ²]
T1	Wartość średnia	50,1	6,3	43,8
	Odchylenie standardowe	1,2	1,8	1,4
T2	Wartość średnia	61,5	15,3	46,2
	Odchylenie standardowe	1,0	1,2	1,1
T3	Wartość średnia	75,1	28,4	46,7
	Odchylenie standardowe	1,1	1,6	1,3
T4	Wartość średnia	73,6	27,1	46,5
	Odchylenie standardowe	1,2	1,5	1,4

Na rysunku 5 przedstawiono wartości średnie swobodnej energii powierzchniowej oraz składowej polarnej SEP wraz z zaznaczonym odchyleniem standardowym.



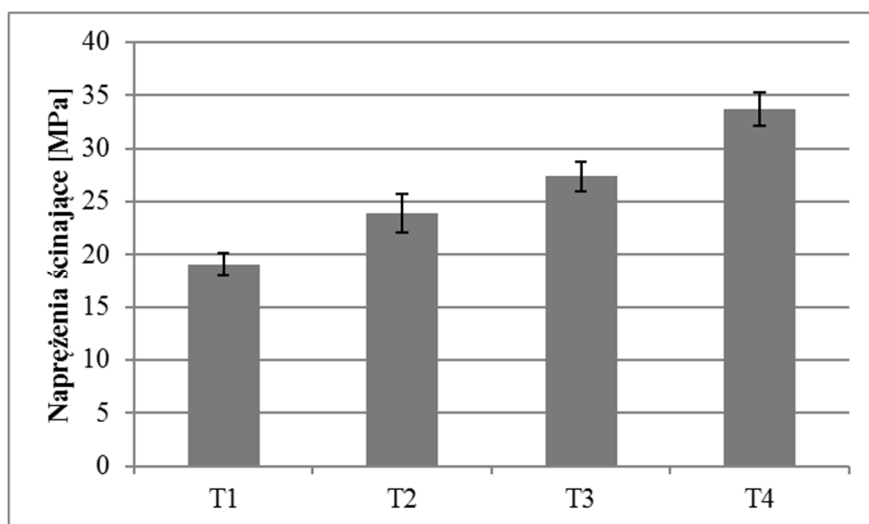
Rys. 5. Swobodna energia powierzchniowa oraz jej składowa polarna po różnych sposobach przygotowania warstwy wierzchniej

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy uzyskanych wyników stwierdzono wzrost wartości swobodnej energii powierzchniowej oraz składowej polarnej SEP po różnych sposobach przygotowania warstwy wierzchniej stali 316L w stosunku do metody T1, czyli próbki bez obróbki mechanicznej, po odtłuszczeniu Loctite 7061. Na uwagę zasługuje wzrost wartości swobodnej energii powierzchniowej dla stali 316L po obróbce mechanicznej narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 w stosunku do wartości SEP przed obróbką mechaniczną, wzrost ten wynosi około 20%. Wzrost ten może być spowodowany usunięciem warstwy fizysorpcyjnej utworzonej na materiale w warunkach ekspozycji, mogą to być warstewki tlenkowe i zaadsorbowane składniki otoczenia w postaci zanieczyszczenia.

Największy wzrost wartości SEP oraz jej składowej polarnej zanotowano dla sposobu obróbki warstwy wierzchniej oznaczonej symbolem T3 (próbki po obróbce narzędziem nasypowym o ziarnistości P320, odtłuszczenie Loctitem 7061 oraz ozonowanie: 20g O₃/m³ w czasie 30 minut) w stosunku do sposobu obróbki T1 (próbki bez obróbki mechanicznej, po odtłuszczeniu Loctite 7061). Wzrost ten wynosił około 50% dla wartości SEP, natomiast składowa polarna SEP wzrosła ponad czterokrotnie.

3.3. Wytrzymałość jednozakładkowych połączeń klejowych

Uśrednione wartości naprężeń krytycznych ścinających w jednozakładkowych połączeniach klejowych uzyskane w badaniach eksperymentalnych dla stali 316L po różnych sposobach przygotowania warstwy wierzchniej przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Naprężenie ścinające krytyczne (niszczące) uzyskane w badaniach eksperymentalnych dla próbek wykonanych ze stali 316L po różnych sposobach przygotowania warstwy wierzchniej

Po przeprowadzonych badaniach stwierdzono, że proces ozonowania próbek wykonanych ze stali 316L wpływa na zwiększenie wytrzymałości jednozakładkowego połączenia klejowego z udziałem kleju Hysol 9466. Największy wzrost wytrzymałości połączenia klejowego zanotowano dla próbek T4 (próbki po obróbce narzędziem nasypowym o ziarnistości P320, odtłuszczenie Loctitem 7061 oraz po ozonowaniu: 50g O₃/m³ w czasie 45 minut) w stosunku do próbek oznaczonych symbolem T1 (próbki bez obróbki mechanicznej, po odtłuszczeniu Loctite 7061), wzrost ten wynosi około 70%. Należy podkreślić, że uzyskane, bezwzględne wartości naprężenia niszczącego połączenie klejowe są wysokie i mogą być uznane za odpowiednie dla konstrukcyjnych połączeń klejowych. Podczas przeprowadzania badań nie zanotowano pogorszenia wytrzymałości połączeń klejowych próbek wykonanych ze stali 316L poddanych różnym procesom przygotowania warstwy wierzchniej. Potwierdza to przypuszczenia, że wzrost stopnia utlenienia stali o podwyższonej odporności na korozję powoduje wzrost wytrzymałości połączenia klejowego.

4. Wnioski

Przeprowadzona analiza statystyczna z uzyskanych wyników z badań wstępnych pozwoliła oszacować liczebność próby do badań zasadniczych. Przeprowadzone badania zasadnicze pozwalają na sformułowanie następujących, ważniejszych wniosków:

1. Stwierdzono, że obróbka mechaniczna narzędziami nasypowymi o ziarnistości P320 skutecznie rozwija analizowaną powierzchnię.
2. Stwierdzono wzrost wartości swobodnej energii powierzchniowej dla stali 316L po obróbce mechanicznej narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 w stosunku do wartości SEP przed obróbką mechaniczną, wzrost ten wynosił około 20%.
3. Największy wzrost wartości SEP oraz jej składowej polarnej zanotowano dla próbek po obróbce narzędziem nasypowym o ziarnistości P320, odtłuszczonych Loctitem 7061 oraz poddanych ozonowaniu z parametrami: 20g O₃/m³ w czasie 30 minut w stosunku do próbek bez obróbki mechanicznej, po odtłuszczeniu Loctite 7061, wzrost ten wynosił około 50%.
4. Największy wzrost wytrzymałości połączenia klejowego zanotowano dla próbek T4 w stosunku do próbek oznaczonych symbolem T1, wzrost ten wynosi około 70%.
5. Uzyskano bardzo dobrą powtarzalność (mały rozrzut) wartości SEP dla stali 316L po różnych sposobach przygotowania warstwy wierzchniej.

Uzyskane wyniki potwierdzają, że w wielu sytuacjach kosztowne w aplikacji i użyciu technologie kształtowania stanu energetycznego warstwy wierzchniej materiałów konstrukcyjnych mogą być zastąpione przez metody mniej kosztowne i bardziej przyjazne dla środowiska.

Badania realizowane w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.01.01.02-00-015/08 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (POIG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

Literatura

1. Blicharski M.: Inżynieria powierzchni. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 2009.
2. Burakowski T., Wierzchoń T.: Inżynieria powierzchni metali. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1995.
3. Godzimirski J.: Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
4. Godzimirski J., Komorek A.: Trwałość zmęczeniowa zakładkowych i czołowych połączeń klejowych. Przegląd Mechaniczny nr 12/2008, s. 40 – 44.
5. Humienny Z. (red.): Specyfikacje Geometrii Wyrobów (GPS) – wykład dla uczelni technicznych. Oficyna wydawnicza PW, 2001, s. 540.
6. Kłonica M., Kuczmaszewski J.: Badania porównawcze wytrzymałości na ścinanie zakładkowych połączeń klejowych po oczyszczaniu mechanicznym i ozonowaniu. Technologia i Automatyzacja Montażu 4/2011, s. 45-48.
7. Kłonica M., Kuczmaszewski J.: Analiza statystyczna w procesie badawczym na przykładzie ozonowania poliamidu PA6 dla potrzeb klejenia. Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji. T. 1, Red: Knosala Ryszard - Opole: Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, 2014, s. 736-748.

8. Kłonica M., Kuczmaszewski J., Ozonek J.: Ocena porównawcza właściwości energetycznych warstwy wierzchniej stopu tytanu. Inżynieria materiałowa. Nr 5 (171) 2009 s. 396-399.
9. Kłonica M., Kuczmaszewski J., Kwiatkowski M. P., Satoh S.: Analysis of energetic properties of AZ 91 HP magnesium alloy after ozonization. Proceedings of the 21-st Annual Conference on Ozone Science and Technology in Japan 2012, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, Hiroshima.
10. Korzyński M.: Metodyka eksperymentu. Planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa, 2006.
11. Kuczmaszewski J.: Fundamentals of metal-metal adhesive joint design. Politechnika Lubelska. Oddział PAN w Lublinie, 2006.
12. Sałaciński T.: SPC – statystyczne sterowanie procesami produkcji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa, 2009.
13. Żenkiewicz M.: Adhezja i modyfikowanie warstw wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych. WNT, Warszawa 2000.
14. DIN EN 1465: 2009: Adhesives – Determination of tensile lap-shear strength of bonded assemblies.
15. Karta technologiczna produktu firmy Loctite – Hysol 9466.

Mgr inż. Mariusz KŁONICA
Prof. dr hab. inż. Józef KUCZMASZEWSKI
Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji
Wydział Mechaniczny/Politechnika Lubelska
20-640 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36
tel./fax: (0-81) 538 42 31
e-mail: m.klonica@pollub.pl
j.kuczmaszewski@pollub.pl