

# BADANIA SKUTECZNOŚCI KLEJENIA STOPU TYTANU Ti6Al4V I STALI NIERDZEWNEJ 0H18N9

Mariusz KLONICA, Józef KUCZMASZEWSKI

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wybrane wyniki badań dotyczących skuteczności klejenia stopu tytanu Ti6Al4V oraz stali 0H18N9. Stopy tytanu należą do materiałów trudnoobrabialnych, pokrytych w warunkach rzeczywistych warstwą tlenków. Stale nierdzewne są trudne do aktywowania energetycznego poprzez tworzenie wysokoenergetycznych tlenków, ponadto istotny jest charakter „związania” tlenków z materiałem. Skuteczne klejenie, zarówno stopów tytanu jak i stali nierdzewnych jest trudne, wymaga odpowiedniej technologii przygotowania powierzchni jak też odpowiedniego kleju. W pracy skoncentrowano się na badaniach porównawczych wytrzymałości na ścinanie połączeń klejowych z udziałem tych stopów z użyciem różnych klejów konstrukcyjnych i po zróżnicowanej, ale uproszczonej, proekologicznej technologii obróbki. Istotą pracy jest poszukiwanie efektywnych technologii klejenia tych ważnych materiałów.

**Słowa kluczowe:** stop tytanu Ti6Al4V, stal nierdzewna 0H18N9, połączenia adhezyjne, swobodna energia powierzchniowa, chropowatość powierzchni.

## 1. Wprowadzenie

Stopy tytanu i stale nierdzewne to materiały konstrukcyjne o interesujących właściwościach. Znalazły one zastosowania w bardzo wielu gałęziach przemysłu, zwłaszcza w przemyśle lotniczym i kosmicznym, maszynowym, chemicznym, spożywczym, transporcie lądowym i morskim. Tak szerokie spektrum wykorzystania tych materiałów sprawia, że w procesach montażu elementów, wykonanych z tych materiałów, często wykorzystuje się klejenie [1-3]. Ponadto, technologie związane ze zjawiskiem adhezji, takie jak malowanie, lakierowanie, nakładanie powłok o specjalnych właściwościach, często stosowane w nowoczesnych konstrukcjach, wymagają kształtowania odpowiedniego stanu energetycznego warstwy wierzchniej elementów wykonanych ze stopów tytanu i stali nierdzewnych. Materiały te należą do grupy materiałów trudnosklejalnych. Skuteczność klejenia zależy w największym stopniu od doboru odpowiedniego kleju oraz zastosowania odpowiedniej technologii przygotowania powierzchni [5-8]. Zarówno stopy tytanu jak i stale nierdzewne należą do grupy materiałów trudnoobrabialnych metodami obróbki mechanicznej i ścierniej.

Właściwości powierzchni ciał stałych zależą w dużym stopniu od sposobów ich formowania, a więc „przeszłości technologicznej” oraz wpływu środowiska w którym były przechowywane. Atomy powierzchniowe metali charakteryzuje ponadto duża aktywność chemiczna, która wpływa na oddziaływanie tej powierzchni na gazy, ciecze czy też ciała stałe znajdujące się z nią w kontakcie fazowym. Doprowadza to w rezultacie do adsorpcji fizycznej obcych substancji, tworzy się więc warstwa fizysorpcyjna, co powoduje obniżenie energii swobodnej układu [9, 10]. Tak więc w warunkach rzeczywistych powierzchnie są na ogół pokryte warstwą tlenków, zaadsorbowanych związków

organicznych i gazów, a w warstwie wierzchniej występują efekty wynikające ze sposobów jej tworzenia, w tym efekty związane z deformacją plastyczną, zmianami struktury, naprężeniami własnymi. Stan warstwy wierzchniej jest też silnie skorelowany z cechami środowiska w którym znajduje się analizowany przedmiot oraz czasem tego kontaktu. Warstwa wierzchnia metali jest heterogeniczna pod względem geometrycznym i fizykochemicznym.

Sposób przygotowania powierzchni do klejenia dla różnych materiałów jest inny. Dla stali węglowych z reguły występuje oczyszczanie, „rozwiniecie” mechaniczne powierzchni (przykładowo piaskowanie czy obróbka narzędziami nasypowymi, np. papierem ściernym) i odtłuszczenie. Dla stali stopowych, stopów aluminium czy stopów tytanu dla otrzymania dobrej jakości połączenia zwykle niezbędna jest odpowiednia obróbka chemiczna, płukanie i suszenie. Są to jednak z reguły technologie o dużym stopniu szkodliwości dla środowiska.

Celem operacji przygotowania warstwy wierzchniej łączonych elementów jest przede wszystkim:

- usunięcie z powierzchni zanieczyszczeń nieorganicznych,
- staranne odtłuszczenie powierzchni,
- ewentualna aktywacja, czyli obróbka specjalna, mająca na celu zwiększenie wartości swobodnej energii powierzchniowej.

Ważniejsze sposoby konstytuowania właściwości adhezyjnych warstwy wierzchniej są następujące:

- metody mechaniczne,
- metody chemiczne,
- aktywowanie wyładowaniami koronowymi,
- utlenianie ozonem,
- aktywowanie przy pomocy wyładowań niezupełnych,
- aktywowanie płomieniem,
- obróbka laserowa,
- aktywowanie wysokoenergetyczną plazmą, wysokoenergetyczną wiązką elektronów,
- aktywowanie promieniowaniem UV,
- inne, np. łączenie metody mechanicznej i chemicznej.

Obróbka mechaniczna stosowana jest zwłaszcza w procesie przygotowania do łączenia stali konstrukcyjnych węglowych. Jej celem jest usunięcie tlenków żelaza, ponieważ są one słabo związane z podłożem, a także częściowe „rozwiniecie” powierzchni.

Narzędzia nasypowe dzięki swojej ogólnodostępności, łatwości użycia bez konieczności stosowania dodatkowych urządzeń oraz niewielkim kosztem, są wygodnymi narzędziami do obróbki materiałów przeznaczonych do klejenia. W przypadku stosowania tych narzędzi uzyskuje się bezkierunkową strukturę śladów obróbki, co jest korzystne w warunkach klejenia konstrukcyjnego.

Alternatywą dla tego rodzaju obróbki jest tylko piaskowanie, ale jest to obróbka wymagająca odpowiednich urządzeń, kłopotliwa w stosowaniu, zwłaszcza w przypadku obróbki elementów wielkogabarytowych, związana z hałasem i zapyleniem, a więc wybitnie szkodliwymi czynnikami.

Dobierając do obróbki narzędzia nasypowe szczególnie interesuje nas wielkość ziarna oraz struktura narzędzia. Wybór nie jest oczywisty, jeśli uwzględni się różne cechy fizyczne materiałów konstrukcyjnych, zwłaszcza twardość czy właściwości sprężyste. Narzędzie o większym ziarnie skuteczniej usuwa warstwę materiału, w tym warstwę fizysoorpcyjną, jednak stopień rozwinięcia powierzchni jest mniejszy. Mniejsze ziarno

w większym stopniu rozwija powierzchnię, ale przy pewnej wartości obniża się skuteczność usuwania warstwy fizysoorpcyjnej. Korzystniejsza jest struktura otwarta, mniej produktów obróbki jest „rozprowadzana” po powierzchni.

Nie ulega wątpliwości, że jednym z istotnych wskaźników poprawności przygotowania powierzchni do klejenia jest jej stopień „rozwinięcia” geometrycznego. Powinien on być odpowiedni, to znaczy ani nie za duży ani nie za mały. Z jednej strony jesteśmy zainteresowani zwiększeniem tego stopnia, zwiększa się rzeczywista powierzchnia zwilżania na jednostkę powierzchni nominalnej, co jest korzystne z punktu widzenia wytrzymałości połączeń klejowych, z drugiej strony zbyt duży stopień „rozwinięcia” może doprowadzić do utworzenia osłabiającej warstwy granicznej w strefie kohezji materiału łączonego i w rezultacie osłabiać połączenie.

W pracy podjęto badania porównawcze wytrzymałości połączeń klejowych dla stali nierdzewnej i stopu tytanu stosując wyłącznie oczyszczanie chemiczne poprzez zmywanie odpowiednimi, dedykowanymi do tych celów środkami, oraz obróbkę narzędziami nasypowymi.

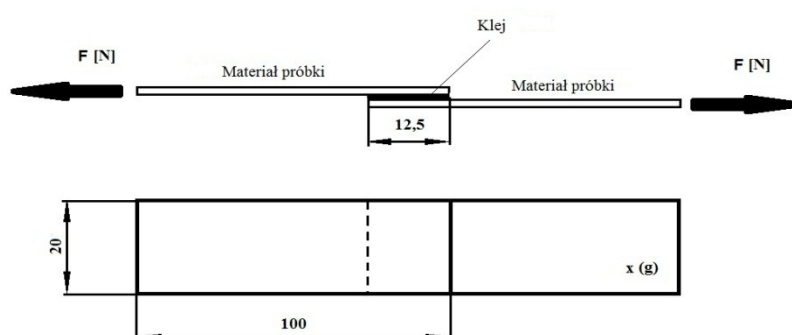
Dobór klejów jest szczególnie trudny i wymagający doświadczenia. Kleje, nawet z tej samej grupy chemicznej, na przykład kleje epoksydowe, mogą się istotnie różnić elastycznością, skurczem utwardzania i wytrzymałością w stanie utwardzonym. Te czynniki w istotnym stopniu decydują o efektywności procesu łączenia.

## 2. Metodyka badań

Badania prowadzono z użyciem następujących materiałów:

1. Stop tytanu TiAl4V,
2. Stal nierdzewna 0H18N9,
3. Klej epoksydowy E53/Z-1,
4. Klej epoksydowy E57/Z-1,
5. Klej epoksydowy Hysol H 9484,
6. Klej epoksydowy Hysol H 9466,
7. Środki pomocnicze: narzędzia nasypowe o ziarnistości P320, środek odtłuszczający Loctite 7061, woda destylowana, dijdometan.

Widok próbki badawczej oraz wymiary przedstawiono na rys. 1. Wartość „g” (grubość) dla stopu tytanu Ti6Al4V wynosiła 1,6 mm, a dla stali 0H18N9 1,5 mm. Grubość warstwy kleju  $g_k=0,1$  mm.



Rys. 1. Próbkę stosowane w badaniach wytrzymałości

Utwardzenie klejów przebiegało w temperaturze otoczenia wynoszącej 20 - 23°C, przy wilgotności względnej (30 – 35)%. Czas utwardzania ustalono na poziomie 96 godzin. Technologię przygotowania powierzchni (stosowane warianty) przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Metody przygotowania warstwy wierzchniej pod połączenia klejowe

Lp.	TiAl4V	0H18N9
T1	Bez obróbki mechanicznej, po odtłuszczeniu Loctite 7061	Bez obróbki mechanicznej, po odtłuszczeniu Loctite 7061
T2	Obróbka narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 oraz po odtłuszczeniu Loctitem 7061	Obróbka narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 oraz po odtłuszczeniu Loctitem 7061

Pomiary chropowatości powierzchni prowadzono z wykorzystaniem profilografometru firmy Taylor Hobson Surtronic3+. Długość odcinka elementarnego dobrano na podstawie literatury [4].

Do pomiarów kąta zwilżania (wody destylowanej oraz dijdometanu) użyto goniometru PGX. Ciecze pomiarowe o stałej objętości 4 µl były nanoszone na badane powierzchnie w sposób automatyczny przez mechanizm goniometru PGX. Na podstawie pomiarów kątów zwilżania oszacowano wartości swobodnej energii powierzchniowej.

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

Wyniki opracowano statystycznie z wykorzystaniem pakietu STATISTICA v 10.

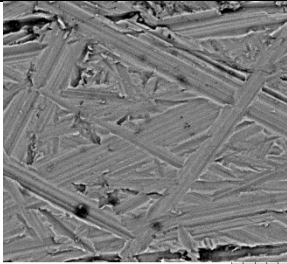
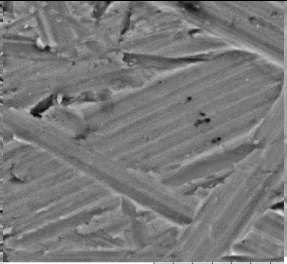
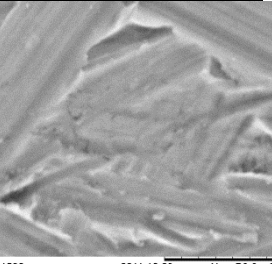
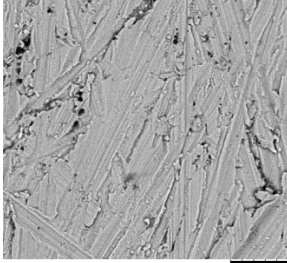
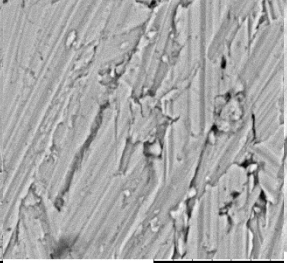
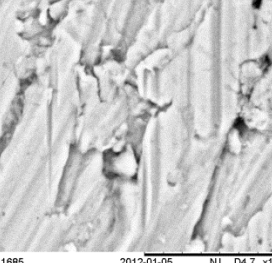
### 3. Wyniki badań

W tabeli 2 przedstawiono topografię próbek wykonanych ze stali 0H18N9 oraz stopu tytanu Ti6Al4V po obróbce narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 przy powiększeniach 2000, 5000 oraz 10000.

Stop tytanu posiada strukturę zwartą z widocznymi śladami po obróbce. Widoczne jest „bruzdowanie”, charakterystyczne dla materiałów o podwyższonej plastyczności. Nie obserwuje się jednak poszarpania brzegów, struktura jest zróżnicowana pod względem kierunku rys po obróbce pojedynczym ziarnem.

Struktura stali 0H18N9 po obróbce narzędziem nasypowym jest bardziej nieregularna, widoczne są wgłębienia i „przyklejenia” fragmentów materiału jako produktu obróbki. Warto zwrócić uwagę na niewielkie zmiany parametrów chropowatości po obróbce narzędziem nasypowym w stosunku do wartości tych parametrów przed obróbką. Może to być przesłanką do eliminowania tej operacji z procesu klejenia, jeżeli skuteczność oczyszczania chemicznego będzie wystarczająca do osiągnięcia określonej wytrzymałości mechanicznej.

Tab. 2. Topografia powierzchni badanych próbek

Materiał	Powiększenie		
	X2000	X5000	X10000
Ti6Al4V			
0H18N9			

W tabeli 3 przedstawiono uśrednione wartości pomiarów parametrów chropowatości próbek wykonanych z badanych materiałów przed obróbką oraz po obróbce narzędziem nasypowym o ziarnistości P320. Przedstawiono również wartości odchylenia standardowego dla przedstawionych parametrów. Pomiarów chropowatości prowadzono po uprzednim odtłuszczeniu powierzchni środkiem Loctite 7061.

Tabela 3. Uśrednione wartości parametrów chropowatości dla badanych próbek przed obróbką oraz po obróbce narzędziem nasypowym

	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rq [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rt [ $\mu\text{m}$ ]	Ry [ $\mu\text{m}$ ]	Sm [ $\mu\text{m}$ ]
0H18N9 przed obróbką						
Średnia	0,15	0,24	0,99	2,15	2,04	96,9
Odchylenie standardowe	0,0823	0,1681	0,5384	1,7341	1,6879	40,3910
0H18N9 po obróbce						
Średnia	0,22	0,32	1,84	2,66	2,39	71,50
Odchylenie standardowe	0,0405	0,0631	0,2744	0,8449	0,4228	14,3391
Ti6Al4V przed obróbką						
Średnia	0,126	0,175	1,047	1,519	1,452	53,7
Odchylenie standardowe	0,0212	0,0303	0,1868	0,4492	0,4434	6,0009
Ti6Al4V po obróbce						
Średnia	0,142	0,2	0,75	1,29	1,19	222,9
Odchylenie standardowe	0,0856	0,1343	0,2635	0,6822	0,6437	59,1954

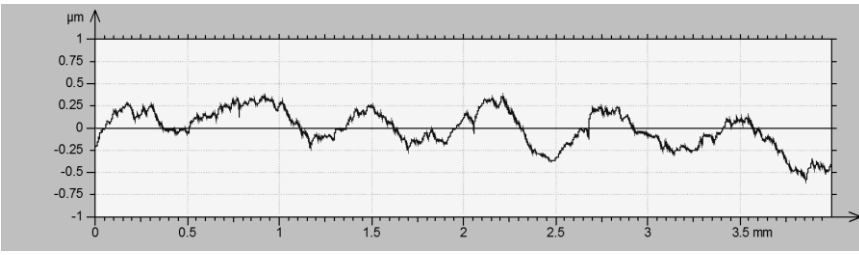
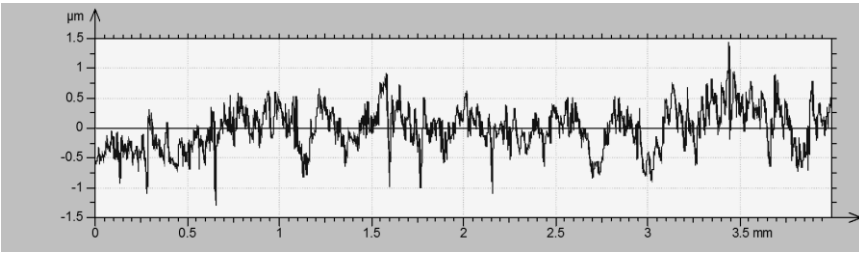
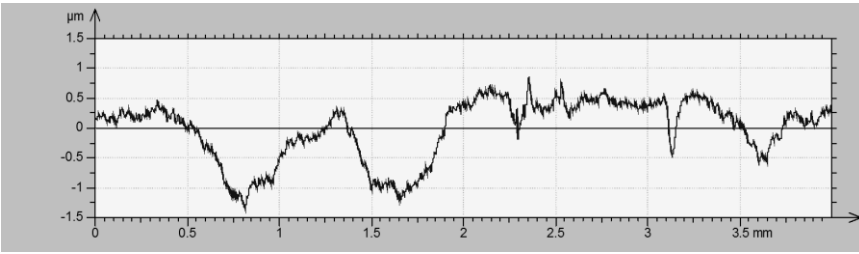
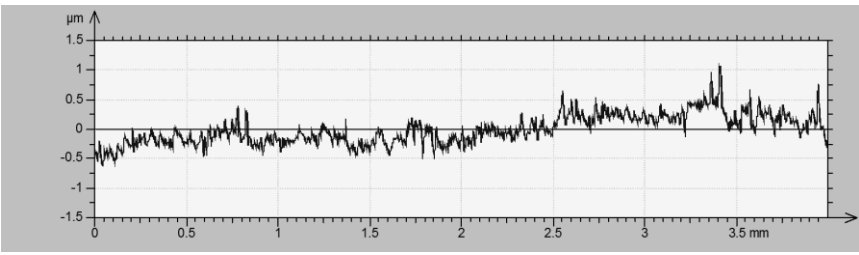
Porównując wyniki z przeprowadzonych badań chropowatości powierzchni wykorzystanych materiałów w różnych warunkach nie zauważono istotnych różnic

w wartościach parametrów chropowatości powierzchni, z wyjątkiem parametru  $S_m$ .

W tabeli 4 zestawiono profile chropowatości przedstawiające parametr  $R_a$  przed i po obróbce mechanicznej. Profile opracowano w programie TalyProfile Lite.

Na profilach zarówno dla stali 0H18N9 jak i dla stopu tytanu Ti6Al4V po obróbce mechanicznej narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 zauważono charakterystyczne zagłębienia przedstawiające kinematyczno–geometryczne odwzorowanie narzędzia.

Tab. 4. Profile powierzchni badanych próbek

Materiał	Profil
0H18N9 przed obróbką	
0H18N9 po obróbce	
Ti6Al4V przed obróbką	
Ti6Al4V po obróbce	

Warto zwrócić uwagę, obserwując profile nierówności, że obróbka narzędziami nasypowymi skutecznie rozwija powierzchnię, zmniejsza wartość i rozrzut wartości nierówności, przy czym wydaje się, że pozytywne efekty tego rozwinięcia są silniejsze dla stopu Ti jak dla stali nierdzewnej.

W tabeli 5 przedstawiono uśrednione wartości swobodnej energii powierzchniowej SEP, składowej dyspersyjnej SEP oraz polarnej SEP dla omawianych materiałów przed i po obróbce mechanicznej. W tabeli również zamieszczono wartości odchylenia standardowego dla SEP oraz składowych: polarnej i dyspersyjnej.

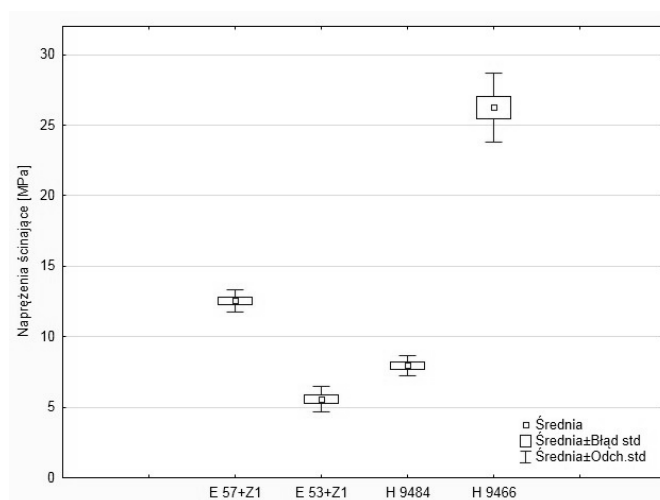
Na uwagę zasługuje wzrost wartości swobodnej energii powierzchniowej stali 0H18N9 po obróbce mechanicznej narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 w stosunku do wartości SEP przed obróbką mechaniczną. Wzrost ten jest na poziomie 25%. Wartość składowej dyspersyjnej SEP pozostaje na tym samym poziomie, natomiast wartość składowej polarnej SEP wzrasta około trzykrotnie. Ma to bezpośrednie przełożenie na wytrzymałość połączenia zakładkowego. Zaobserwowano wzrost wytrzymałości połączenia z wykorzystaniem klejów Epidian 57+Z1 oraz Hysol 9466. Dla kleju Epidian 57+Z1 wzrost ten wynosił około 30%, natomiast dla kleju Hysol 9466 wzrost kształtuje się na poziomie 10%.

Tab. 5. Uśrednione wartości swobodnej energii powierzchniowej dla badanych próbek przed obróbką oraz po obróbce narzędziem nasypowym

	SEP [mJ/m <sup>2</sup> ]	Dyspersyjna SEP [mJ/m <sup>2</sup> ]	Polarna SEP [mJ/m <sup>2</sup> ]
<b>0H18N9 przed obróbką</b>			
<b>Średnia</b>	49,87	43,66	6,22
<b>Odchylenie standardowe</b>	0,8193	0,5420	0,9531
<b>0H18N9 po obróbce</b>			
<b>Średnia</b>	62,66	46,57	16,09
<b>Odchylenie standardowe</b>	3,2432	0,7394	3,3792
<b>Ti6Al4V przed obróbką</b>			
<b>Średnia</b>	70,32	44,29	26,02
<b>Odchylenie standardowe</b>	1,7618	1,0290	1,7236
<b>Ti6Al4V po obróbce</b>			
<b>Średnia</b>	68,19	47,02	21,14
<b>Odchylenie standardowe</b>	1,2206	0,6015	1,3697

Obróbka mechaniczna narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 przeprowadzona na próbkach wykonanych ze stopu tytanu Ti6Al4V nie spowodowała istotnych różnic w wartości swobodnej energii powierzchniowej. Jest to interesujące, zważywszy na dobrze rozwinięty profil po obróbce mechanicznej.

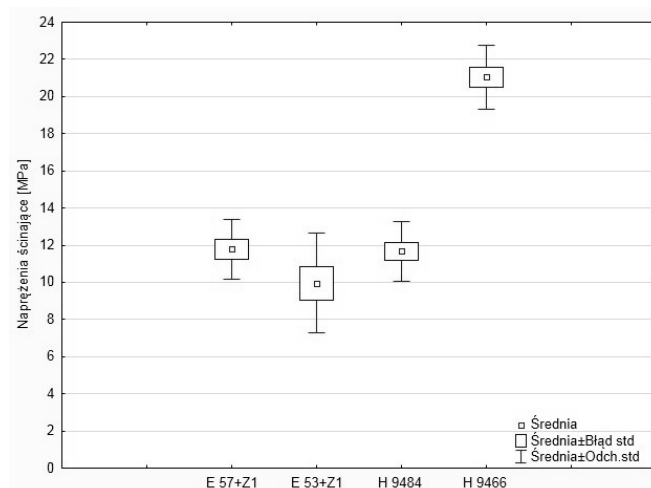
Na rys. 2 przedstawiono uśrednione wartości naprężeń ścinających w jednozakładkowych połączeniach klejowych uzyskane w badaniach eksperymentalnych dla stopu tytanu Ti6Al4V przed obróbką mechaniczną.



Rys. 2. Napężenie ścinające uzyskane w badaniach eksperymentalnych dla próbek wykonanych ze stopu tytanu Ti6Al4V bez obróbki narzędziem nasypowym (E 57+Z1 – Epidian 57 + utwardzacz Z1, E 53+Z1 – Epidian 53 + utwardzacz Z1, H 9484 – Hysol 9484, H 9466 – Hysol 9466)

Należy zauważyć wyjątkową skuteczność procesu klejenia klejem H9466. Uzyskane wartości napężenia niszczącego są ponad dwukrotnie wyższe niż w pozostałych przypadkach.

Na rys. 3 przedstawiono uśrednione wartości napężeń ścinających w jednozakładkowych połączeniach klejowych uzyskane w badaniach eksperymentalnych dla stopu tytanu Ti6Al4V po obróbce mechanicznej narzędziem nasypowym o ziarnistości P320.

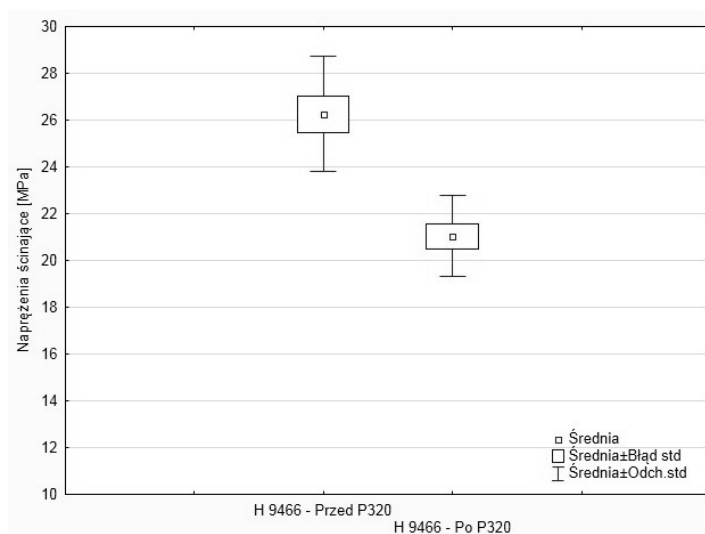


Rys. 3. Napężenie ścinające uzyskane w badaniach eksperymentalnych dla próbek wykonanych ze stopu tytanu Ti6Al4V po obróbce mechanicznej narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 (E 57+Z1 – Epidian 57 + utwardzacz Z1, E 53+Z1 – Epidian 53 + utwardzacz Z1, H 9484 – Hysol 9484, H 9466 – Hysol 9466)



Jak można zauważyć, obróbka mechaniczna narzędziem nasypowym stopu tytanu nie poprawia wytrzymałości w przypadku kleju H 9466 (dla którego uzyskano najwyższą wytrzymałość w wariancie bez obróbki mechanicznej), dla pozostałych klejów ta poprawa jest zauważalna, pogorszył się jednak nieco rozrzut wyników.

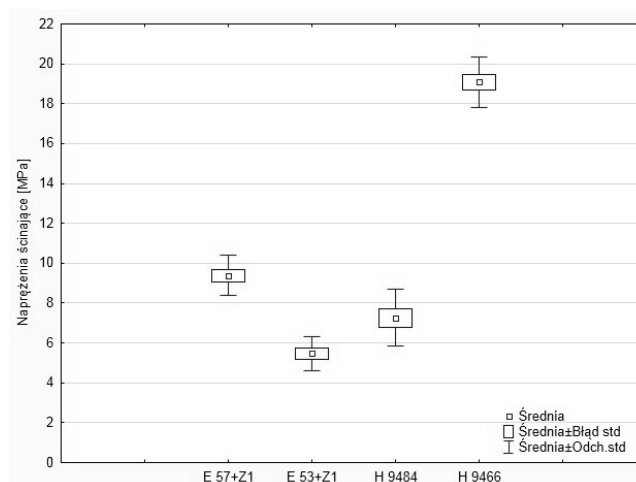
Na rys. 4 przedstawiono uśrednione wartości naprężeń ścinających w jednozakładkowych połączeniach klejowych uzyskane w badaniach eksperymentalnych dla stopu tytanu Ti6Al4V przed i po obróbce mechanicznej narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 dla kleju Hysol 9466.



Rys. 4. Napężenie ścinające uzyskane w badaniach eksperymentalnych dla próbek wykonanych ze stopu tytanu Ti6Al4V przed obróbką oraz po obróbce narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 z użyciem kleju Hysol 9466

Zauważalny spadek wytrzymałości połączenia, przedstawiony na rys. 4 jest prawdopodobnie związany ze skutkami usunięcia naturalnej warstwy fizysozycyjnej z próbek wykonanych ze stopu tytanu podczas obróbki mechanicznej. Spowodowało to spadek także wartości składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej o około 20% w stosunku do wartości składowej polarnej przed obróbką, co ma bezpośredni związek z wytrzymałością połączenia zakładkowego. Różnica wytrzymałości połączenia klejowego przed i po obróbce mechanicznej jest rzędu 20%. Może to być także skutkiem innego stopnia utlenienia powierzchni w rozpatrywanych przypadkach.

Na rys. 5 przedstawiono uśrednione wartości naprężeń ścinających w jednozakładkowych połączeniach klejowych uzyskane w badaniach eksperymentalnych dla stali 0H18N9 przed obróbką mechaniczną.

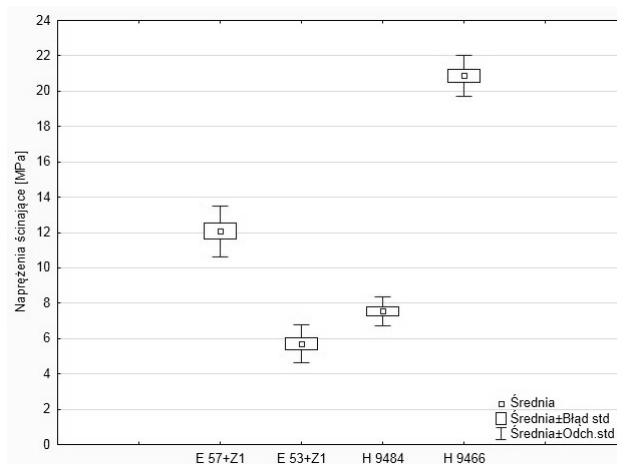


Rys. 5. Naprężenie ścinające uzyskane w badaniach eksperymentalnych dla próbek wykonanych ze stali 0H18N9 bez obróbki narzędziem nasypowym (E 57+Z1 – Epidian 57 + utwardzacz Z1, E 53+Z1 – Epidian 53 + utwardzacz Z1, H 9484 – Hysol 9484, H 9466 – Hysol 9466)

Podobnie jak w przypadku stopu tytanu tak i w przypadku stali nierdzewnej najwyższą wartość naprężenia niszczącego zaobserwowano dla kleju H9466, choć bezwzględna wartość jest nieco niższa niż w przypadku stopu Ti.

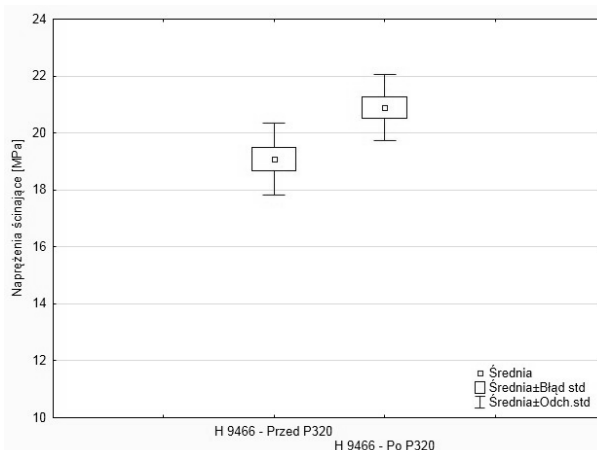
Na rys. 6 przedstawiono uśrednione wartości naprężeń ścinających w jednozakładkowych połączeniach klejowych uzyskane w badaniach eksperymentalnych dla stali 0H18N9 po obróbce mechanicznej narzędziem nasypowym o ziarnistości P320.

Z obserwacji wyników przeprowadzonych badań eksperymentalnych zauważono wzrost wytrzymałości połączenia klejowego dla dwóch klejów (Epidian 57+Z1 oraz Hysol 9466).



Rys. 6. Naprężenie ścinające uzyskane w badaniach eksperymentalnych dla próbek wykonanych ze stali 0H18N9 po obróbce narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 (E 57+Z1 – Epidian 57 + utwardzacz Z1, E 53+Z1 – Epidian 53 + utwardzacz Z1, H 9484 – Hysol 9484, H 9466 – Hysol 9466)

Na rys. 7 przedstawiono uśrednione wartości naprężeń ścinających w jednozakładkowych połączeniach klejowych uzyskane w badaniach eksperymentalnych dla stali 0H18N9 przed i po obróbce mechanicznej narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 dla kleju Hysol 9466.



Rys. 7. Naprężenie ścinające uzyskane w badaniach eksperymentalnych dla próbek wykonanych ze stali 0H18N9 przed obróbką oraz po obróbce narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 z użyciem kleju Hysol 9466

Zaobserwowano wzrost wytrzymałości połączenia z wykorzystaniem kleju Hysol 9466 na poziomie około 10%. Jest to więc sytuacja inna niż w przypadku połączeń stopów Ti

#### 4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Obserwowano zróżnicowany wpływ obróbki narzędziami nasypowymi na wartość swobodnej energii powierzchniowej stopu Ti6Al4V i stali nierdzewnej 0H18N9, w przypadku stali uzyskano znaczący wzrost tej energii, w przypadku stopu tytanu zaobserwowano spadek.
2. Topografia powierzchni po obróbce narzędziem nasypowym jest zróżnicowana, obserwuje się różną podatność na ten rodzaj obróbki dla analizowanych stopów, parametry chropowatości istotnie różniły się w przypadku parametru Sm.
3. Obróbka mechaniczna stopu tytanu Ti6Al4V oraz stali 0H18N9 narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 na wpływ na wytrzymałość złącza klejowego, ale ten wpływ jest różny dla obydwu stopów.
4. Obróbka mechaniczna stopu tytanu Ti6Al4V oraz stali 0H18N9 narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 na wartości swobodnej energii powierzchniowej oraz jej składowe dyspersyjną oraz polarną.
5. Stwierdzono, że obróbka mechaniczna narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 powoduje wzrost wartości swobodnej energii powierzchniowej dla stali 0H18N9 oraz składowej polarnej SEP. Wzrost SEP wyniósł 25% dla próbek po obróbce mechanicznej w stosunku do próbek przed obróbką.
6. Dla próbek wykonanych ze stali 0H18N9 po obróbce mechanicznej klejonych klejem Hysol 9466 uzyskano 10% przyrost wartości naprężeń niszczących

w stosunku do próbek przed obróbką. Maksymalny wzrost wartości naprężeń niszczących uzyskano dla kleju Epidian 57+Z1 rzędu 30%.

7. Zaobserwowano 20% spadek wartości naprężeń niszczących dla próbek wykonanych ze stopu tytanu Ti6Al4V po obróbce mechanicznej klejonych klejem Hysol 9466 w stosunku do próbek przed obróbką mechaniczną, w tym przypadku dokładna odpowiedź na pytanie o przyczyny takiej obserwacji może być możliwa po dokładnych badaniach stanu powierzchni stopi Ti przed obróbką narzędziem nasypowym i po takiej obróbce.

Badania realizowane w ramach Projektu " Wykorzystanie ozonowania jako ekologicznej metody modyfikacji właściwości warstwy wierzchniej materiałów konstrukcyjnych", Nr 2965/B/T02/2010/39.

### Literatura

1. Blicharski M.: Inżynieria powierzchni. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 2009.
2. Godzimirski J.: Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
3. Godzimirski J., Komorek A.: Trwałość zmęczeniowa zakładkowych i czołowych połączeń klejowych. Przegląd Mechaniczny nr 12/2008, s. 40 – 44.
4. Humienny Z. (red.): Specyfikacje Geometrii Wytrobów (GPS) – wykład dla uczelni technicznych. Oficyna wydawnicza PW, 2001, s. 540.
5. Kłonica M., Kuczmaszewski J.: Badania porównawcze wytrzymałości na ścinanie zakładkowych połączeń klejowych po oczyszczeniu mechanicznym i ozonowaniu. Technologia i Automatykacja Montażu 4/2011, s. 45-48.
6. Kłonica M., Kuczmaszewski J., Ozonok J.: Ocena porównawcza właściwości energetycznych warstwy wierzchniej stopu tytanu. Inżynieria materiałowa. Nr 5 (171) 2009 s. 396-399.
7. 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.
8. Kuczmaszewski J.: Fundamentals of metal-metal adhesive joint design. Politechnika Lubelska. Oddział PAN w Lublinie, 2006.
9. Majda Paweł: Metoda elementów skończonych w analizie zakładkowych połączeń klejowych. Przegląd Mechaniczny nr 1/2008, s. 14 – 19.
10. Żenkiewicz M.: Adhezja i modyfikowanie warstw wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych. WNT, Warszawa 2000.

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 30  
e-mail: m.klonica@pollub.pl  
j.kuczmaszewski@pollub.pl