

ANALIZA STANU POWIERZCHNI PO CIĘCIU HYDROABRAZYWNYM METALOWYCH KOSTRUKCJI PRZEKŁADKOWYCH

Analysis of the surface after hydro-abrasive cutting of metal sandwich structure

Mariusz KŁONICA, Józef KUCZMASZEWSKI, Paweł PIEŚKO

Streszczenie: W pracy przedstawiono wybrane wyniki badań jakości powierzchni po cięciu próbek klejonych różnymi klejami epoksydowymi. Z punktu widzenia efektywności procesów montażowych ważne jest, aby powierzchnie te nie wymagały dodatkowych operacji, takich jak usuwanie zadziorów czy operacji o charakterze wykończeniowym. Materiałami klejonymi była stal 316L oraz stop tytanu Ti6Al4V. Badane materiały klejono w układzie klasycznej zakładki oraz w układzie „sandwich” w różnych wariantach. Proces cięcia realizowano z użyciem technologii „waterjet” ze zmiennym parametrem pracy v_f . W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczące wartości swobodnej energii powierzchniowej oraz wybranych parametrów chropowatości powierzchni klejonych materiałów. Przedstawiono także topografię powierzchni powstałej w wyniku przecięcia łączonych materiałów oraz kąt ukosowania powierzchni po cięciu strugą wodno-ścierną. Pracę zakończono wnioskami.

Słowa kluczowe: technologia „waterjet”, połączenia klejowe, warstwa wierzchnia

Abstract: The paper presents selected results of the surface quality measurements after cutting the samples bonded using different epoxy adhesives. From the point of view of efficiency of assembly processes, it is important that these surfaces do not require additional operations such as deburring or finishing operations. Materials were adhesive disc: 316L steel and Ti6Al4V titanium alloy. The test materials were bonded in conventional lap joint and in a “sandwich” in the different variants. The cutting process was realized with the use of “waterjet” technology under variable speed v_f . The article presents the results of research on the value of surface free energy and selected parameters of surface roughness of bonded materials, shows the topography of the surface created by the intersection of the materials to be joined, and the angle of the bevel surface after cutting by jet of water and abrasive. Conclusions from the tests are presented at the final stage of the paper.

Key words: “waterjet” technology, adhesive joints, surface layer

Wstęp

W nowoczesnych konstrukcjach często projektuje się struktury ściśle ukierunkowane na oczekiwane właściwości. W konsekwencji prowadzi to do łączenia ze sobą (łącznikowo bądź bezłącznikowo), materiałów istotnie różniących się cechami fizycznymi i technologicznymi. Konstrukcje warstwowe często są kłopotliwe w obróbce – różne materiały składające się na takie elementy wymagają doboru technologicznych parametrów obróbki oraz narzędzi i ich cech geometrycznych, które zapewnią w największym stopniu realizację oczekiwań jakościowych i ekonomicznych.

Nowoczesne metody rozdzielania materiałów, zarówno na etapie przygotowania półfabrykatów, jak i w niektórych przypadkach jako operacje kształtujące, w wielu przypadkach zapewniają jakość i dokładność powierzchni, spełniając ostateczne wymagania [5, 8, 9]. Dlatego też istotna jest znajomość takich warunków obróbki, które zapewniają uzyskanie standardów na etapie obróbki lub montażu, akceptowalnych jako standardy ostateczne.

W technologii montażu maszyn i urządzeń, połączenia klejowe zyskują coraz większe znaczenie spośród różnych rodzajów wykonywanych w przemyśle połączeń materiałów konstrukcyjnych [2, 3, 4, 6, 7, 12, 13]. Jest to spowodowane przede wszystkim szybkim rozwojem materiałów adhezyjnych, stosowanych w przemyśle.

Obecnie stosunkowo dużo elementów konstrukcji poddawanych jest cięciu wiązką laserową bądź strumieniem wodno-ściernym [11]. Operacje te mogą być operacjami końcowymi w procesie technologicznym, co ma decydujące znaczenie podczas eksploatacji danego elementu.

Metodyka badań

Badania przeprowadzono na próbkach klejonych ze stali 316L (grubość 2 mm) oraz stopu tytanu Ti6Al4V (grubość 1,6 mm). Wymiary próbek to 20 × 100 mm. Przed wykonaniem połączenia klejowego próbki ze stali 316L oraz ze stopu tytanu poddano obróbce mechanicznej (szlifierka oscylacyjna) narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 w czasie 30 s. Wszystkie próbki oczyszczono i odtłuszczono trzykrotnie środkiem odtłuszczającym Loctite 7063, a następnie sklejono w następujących wariantach: 316L – 316L, 316L – 316L – 316L, 316L – Ti6Al4V – 316L, 316L – Ti6Al4V, Ti6Al4V – 316L – Ti6Al4V, Ti6Al4V – Ti6Al4V oraz Ti6Al4V – Ti6Al4V – Ti6Al4V. Utworzono więc struktury przekładkowe w których elementami były dwa materiały trudnoobrabialne i różniące się cechami fizycznymi. W badaniach wykorzystano żywicę epoksydową Epidian 5 z utwardzaczem PAC (w ilości 80% masowo w stosunku do żywicy) oraz klej Hysol 9484 firmy Loctite. Proces sieciowania kleju przebiegał

w temperaturze otoczenia wynoszącej 21–24°C, przy wilgotności względnej (40–55%). Wartość ciśnienia jednostkowego, wywieranego na powierzchnię próbek w procesie klejenia wynosiła 0,2 MPa. Czas utwardzania ustalono na stałym poziomie 168 godz.

Przed wykonaniem połączeń klejowych przeprowadzono analizę stanu energetycznego warstwy wierzchniej materiałów klejonych. Wartość swobodnej energii powierzchniowej określono w sposób pośredni, wykorzystując pomiary kątów zwilżania. Do tego celu wykorzystano goniometr PGX. Użyte ciecze do pomiarów kąta zwilżania наносzono na badaną powierzchnię w sposób automatyczny, w postaci kropli o stałej objętości 4 µl. Pomiar kąta zwilżania wodą destylowaną i diiodometanem był wykonany minimum dziesięć razy na każdej z badanych próbek.

Pomiary wybranych parametrów chropowatości powierzchni przeprowadzono na urządzeniu do pomiaru konturu, chropowatości i topografii 3D T8000 RC-120-400 firmy Hommel-Étamic. Urządzenie to było wyposażone w końcówkę pomiarową o promieniu 2 µm, natomiast długość odcinka elementarnego dobrano na podstawie literatury [1]. Analizie poddano następujące parametry chropowatości powierzchni: R_a – średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości, R_p – maksymalna wysokość piku profilu chropowatości, R_q – odchylenie średnie kwadratowe profilu chropowatości, R_t – całkowita wysokość profilu chropowatości, R_z – maksymalna wysokość profilu chropowatości. Przedstawione w artykule parametry z badań są zgodnie z normą PN-EN ISO 4287:1999/A1:2010P [10].

Cięcie próbek klejonych zrealizowano z wykorzystaniem technologii „waterjet” na urządzeniu firmy Eckert o nazwie Opal Waterjet Combo, wyposażonej w sterownik CNC ECS 872. Prędkość posuwu podczas badań wynosiła 200 oraz 350 mm/min.

W badaniach wykorzystano również mikroskop Keyence VHX-5000 w celu obrazowania i pomiarów kąta ukosowania powierzchni powstałej wskutek cięcia strugą wodno-ścierną.

Wyniki

W tab. 1 przedstawiono uśrednione wyniki wartości swobodnej energii powierzchniowej SEP wykorzystanych materiałów konstrukcyjnych po procesie obróbki mechanicznej narzędziem nasypowym o ziarnistości P320. W tab. zestawiono również składowe SEP – polarną oraz dyspersyjną. Uzyskane wyniki opracowano statystycznie, podając odchylenie standardowe jako miarę rozrzutu uzyskanych wyników. Przed wykonaniem pomiarów kąta zwilżania cieczami pomiarowymi (wodą destylowaną i diiodometanem), na podstawie których wyznaczono wartość SEP, powierzchnie próbek oczyszczono oraz odtłuszczono trzykrotnie środkiem odtłuszczającym Loctite 7063. Wyznaczenie SEP wykonano w celu określenia poprawności przygotowania warstwy wierzchniej do operacji klejenia.

W tab. 2 przedstawiono uśrednione wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni stali 316L oraz stopu tytanu po obróbce mechanicznej narzędziem nasypowym o ziarnistości P320. Przeprowadzona obróbka mechaniczna narzędziami nasypowymi o ziarnistości P320, za pomocą szlifierki oscylacyjnej, skutecznie rozwija analizowaną powierzchnię materiałów konstrukcyjnych w znaczeniu geometrycznym oraz usuwa warstwę fizy-sorbcyjną.

Na rys. 1 przedstawiono powierzchnię po cięciu próbki strugą wodno-ścierną z widoczną spoiną klejową.

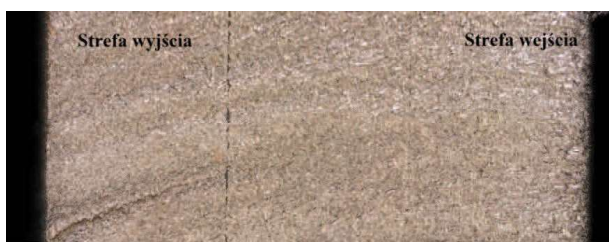
Na prezentowanym rysunku można dostrzec wyraźne różnice w topografii w strefie wejścia oraz wyjścia strugi wodno-ścierniej. Rys. 1 stanowi przykład powstałej

Tabela 1. Swobodna energia powierzchniowa oraz jej składowe materiałów klejonych
Table 1. Surface free energy and its components for adherends

Materiał		SEP [mJ/m ²]	Składowa polarna SEP [mJ/m ²]	Składowa dyspersyjna SEP [mJ/m ²]
316L	Wartość średnia	61,2	15,1	46,1
	Odchylenie standardowe	1,1	1,9	2,2
Ti6Al4V	Wartość średnia	68,6	20,7	47,9
	Odchylenie standardowe	1,2	1,3	1,5

Tabela 2. Parametry chropowatości powierzchni materiałów klejonych
Table 2. Parameters of surface roughness of adherends

Materiał		R_p [µm]	R_z [µm]	R_t [µm]	R_a [µm]	R_q [µm]
316L	Wartość średnia	0,33	1,24	1,95	0,10	0,14
	Odchylenie standardowe	0,014	0,112	0,159	0,015	0,023
Ti6Al4V	Wartość średnia	0,49	0,94	1,25	0,11	0,15
	Odchylenie standardowe	0,039	0,102	0,124	0,015	0,022

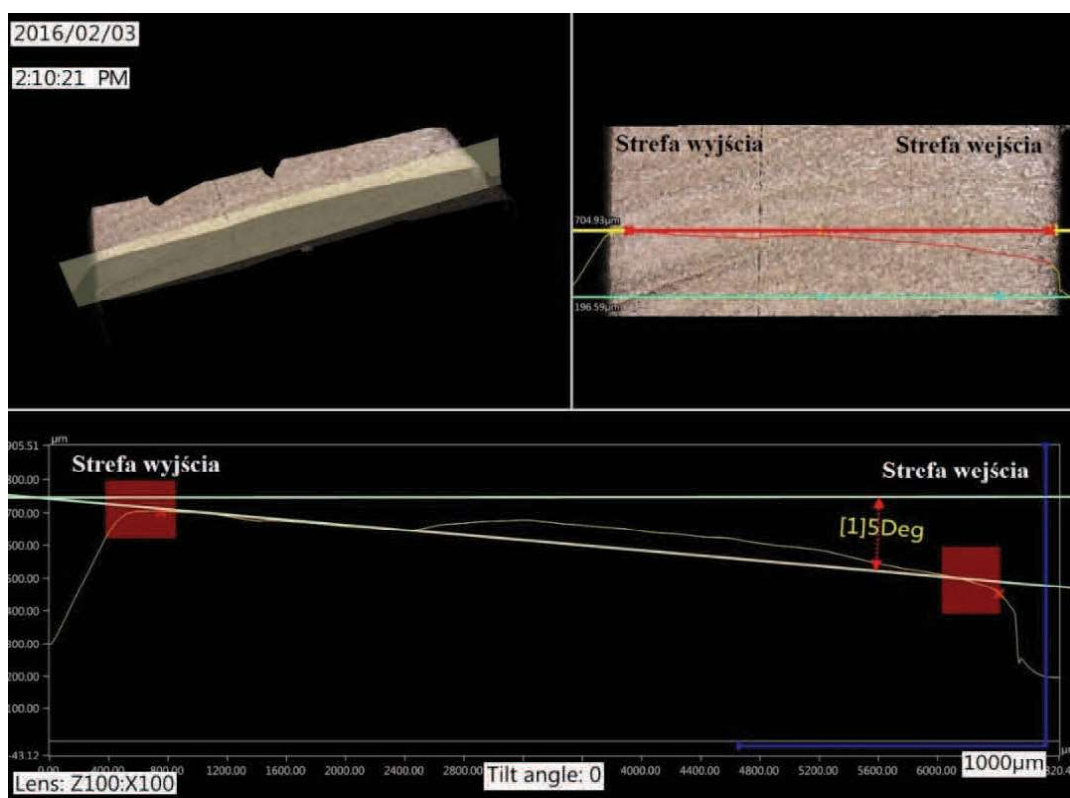


Rys. 1. Powierzchnia próbki 316L – 316L – 316L sklejonej klejem Hysol 9484 po cięciu strugą wodno-ścierną z $v_f = 350$ mm/min
 Fig. 1. The surface of samples 316L – 316L – 316L bonded using adhesive Hysol 9484 after cutting jet of water and abrasive at $v_f = 350$ mm / min

powierzchni po cięciu. Próbkę została wykonana ze stali 316L, sklejonej klejem Hysol 9484. Nie widać istotnych zmian cech geometrycznych w obszarze sklejania, a jedynie różnice cech geometrycznych w obszarze wejścia i wyjścia strugi.

Rys. 2 przedstawia przykład pomiaru kąta ukosowania powierzchni po cięciu strugą wodno-ścierną. Jako przykład przedstawiono próbkę wykonaną ze stali 316L, sklejoną klejem Hysol 9484.

Rozszerzenie strugi w strefie wyjścia jest typowym błędem kształtu elementów po cięciu strugą wodno-ścierną. Może to być istotnym elementem oceny jakości jednostek montażowych.



Rys. 2. Kąt ukosowania powierzchni próbki wykonanej ze stali 316L klejonej klejem Hysol 9484 po cięciu strugą wodno-ścierną – posuw 350 mm/min

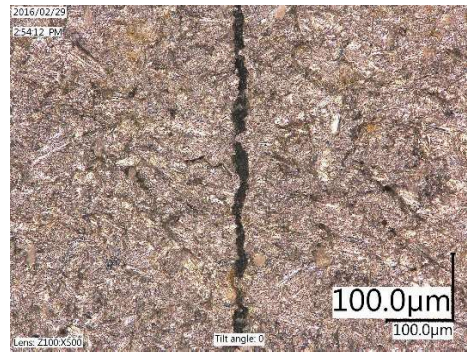
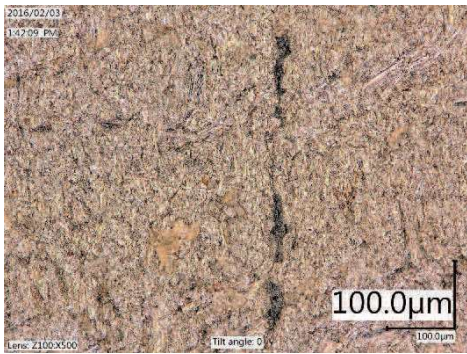
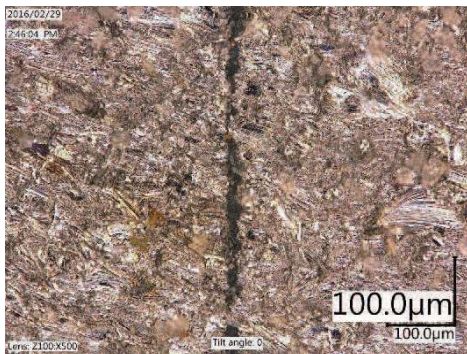
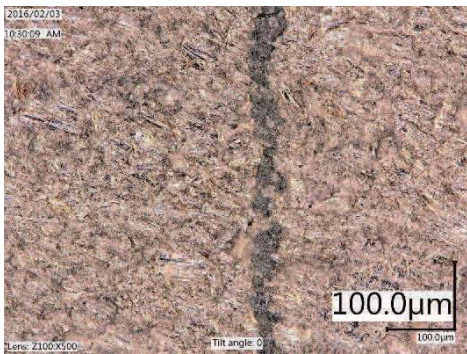
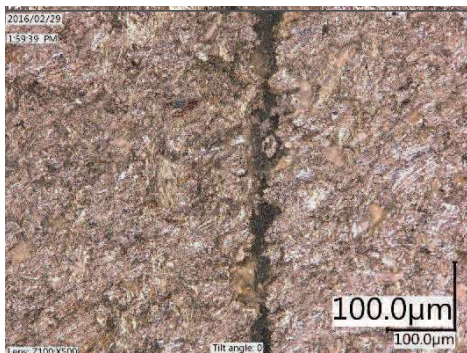
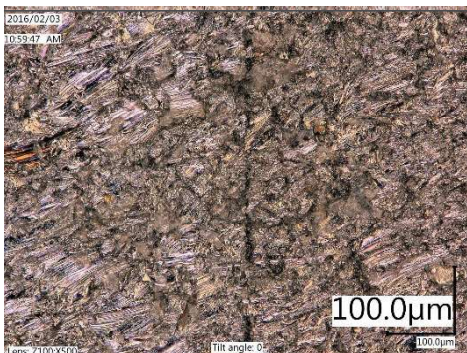
Fig. 2. The angle of the bevel of the sample surface made of steel 316L bonded using adhesive Hysol 9484 after cutting jet of water and abrasive – feed rate of 350 mm/min

Tabela 3. Kąt ukosowania próbek po cięciu strugą wodno-ścierną

Table 3. The angle of the bevel of samples after cutting jet of water and abrasive

Material	Klej	Posuw 200 mm/min		Posuw 350 mm/min	
		Hysol 9484	E5+PAC_80%	Hysol 9484	E5+PAC_80%
316L – 316L		6°	9°	9°	5°
316L – 316L – 316L		3°	2°	5°	5°
316L – Ti6Al4V – 316L		2°	0°	10°	9°
316L – Ti6Al4V		0°	7°	5°	8°
Ti6Al4V – 316L – Ti6Al4V		6°	3°	8°	11°
Ti6Al4V – Ti6Al4V		6°	5°	8°	6°
Ti6Al4V – Ti6Al4V – Ti6Al4V		3°	3°	3°	3°

Tabela 4. Fotografie powierzchni powstałej po cięciu strugą wodno-ścierną – klej Hysol 9484
 Table 4. Photographs of surface formed after cutting jet of water and abrasive – adhesive Hysol 9484

Material / Posuw	200 mm/min	350 mm/min
316L – 316L		
Ti6Al4V – Ti6Al4V		
316L – Ti6Al4V		

W tab. 3 przedstawiono wyniki pomiarów kąta ukosowania próbek po cięciu strugą wodno-ścierną. Największą wartość tego kąta zaobserwowano dla próbek przecinanych z prędkością posuwu 350 mm/min dla wariantu Ti6Al4V – 316L – Ti6Al4V, próbki klejono kompozycją klejową (Epidian 5 + PAC_80%). Wartość tego kąta wynosiła 11°. Dla próbek wykonanych ze stopu tytanu (wariant Ti6Al4V – Ti6Al4V – Ti6Al4V), klejonych klejem Hysol 9484 i kompozycją klejową na bazie żywicy epoksydowej (Epidian 5 + PAC_80%), bez względu na prędkość posuwu (200 mm/min oraz 350 mm/min) zaobserwowano stały kąt ukosowania powierzchni na poziomie 3°. Wynika stąd, że stal 316L hamuje i rozprasza strugę w stopniu większym od stopu tytanu.

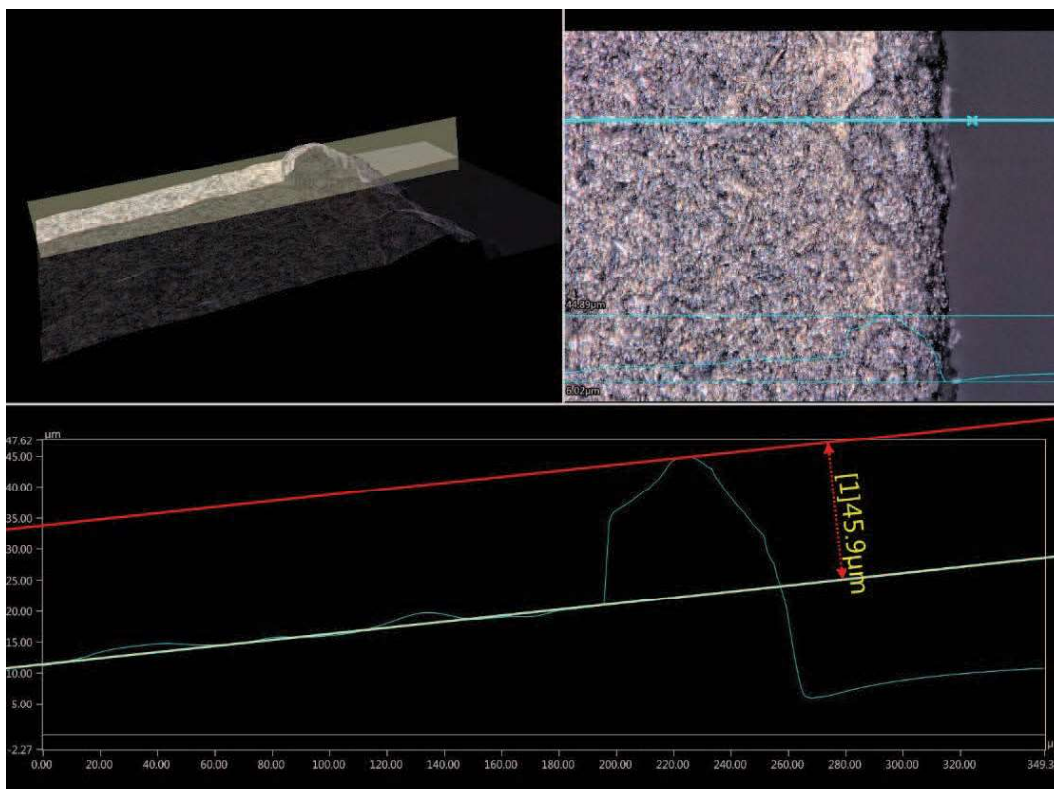
Po analizie uzyskanych wyników kąta ukosowania powierzchni powstałej po cięciu strugą wodno-ścierną można zaobserwować istotny wpływ prędkości posuwu

na wartość tego kąta. Dla wszystkich próbek przecinanych z prędkością posuwu 200 mm/min stwierdzono mniejsze wartości kąta ukosowania powstałej powierzchni w stosunku do próbek przecinanych z prędkością posuwu 350 mm/min.

W tab. 4 zestawiono wybrane rysunki powierzchni uzyskanych po cięciu strugą wodno-ścierną dla użytych materiałów. Fotografie przedstawione w tab. 4 zostały wykonane przy powiększeniu 500x. Można dostrzec wyraźną granicę między materiałem próbki a spoiną klejową.

Po przeprowadzonej analizie fotografii nie stwierdzono rozwarstwienia próbek po cięciu strugą wodno-ścierną (z różnymi prędkościami posuwu), co jest korzystne ze względów montażowych i eksploatacyjnych.

Na rys. 3 przedstawiono przykładowy pomiar wysokości zadziora powstałego w strefie wyjścia strugi wodno-ściernej, po przecięciu próbki klejonej klejem Hysol 9484



Rys. 3. Pomiar wysokości zadziora: Próbką klejona klejem Hysol 9484 przecinana z prędkością posuwu 200 mm/min – materiał 316L-Ti6Al4V-316L

Fig. 3. Measurement of the height burr of sample bonded using adhesive Hysol 9484 cut at a feed rate of 200 mm / min – material 316L-Ti6Al4V-316L

w wariantcie 316L-Ti6Al4V-316L. Proces cięcia realizowano z prędkością posuwu 200 mm/min.

Występowanie zadziora na stali 316 L potwierdza wcześniejsze ustalenia, że jest to materiał trudny do przecinania strugą wodno-ścierną, dlatego należy szczególnie starannie dobierać wartości technologicznych parametrów obróbki.

W tab. 5 przedstawiono wyniki pomiaru wysokości powstałych zadziorów po cięciu strugą wodno-ścierną wybranych wariantów z różnymi prędkościami posuwu. Przedstawione wyniki dotyczą próbek klejonych tylko klejem Hysol 9484.

Tabela 5. Wymiary zadziorów próbek klejonych klejem Hysol 9484

Table 5. Dimensions of burr for samples bonded with adhesive Hysol 9484

	Posuw 200 mm/min	Posuw 350 mm/min
316L-Ti-316L	45,9 μm	78,9 μm
Ti6Al4V-Ti6Al4V-Ti6Al4V	38,8 μm	56,2 μm

Po analizie uzyskanych wyników stwierdzono, że dla próbek wykonanych ze stopu tytanu (wariant Ti6Al4V-Ti6Al4V-Ti6Al4V) klejonych klejem Hysol 9484, przecinanych z prędkością posuwu 200 mm/min i 350 mm/min, wysokość powstałych zadziorów jest mniejsza od

wysokości zadziorów na próbkach wykonanych z udziałem stali 316L (wariant 316L-Ti6Al4V-316L). Ponadto stwierdzono, że wraz ze wzrostem prędkości posuwu wzrasta wysokość powstałych zadziorów na krawędzi w strefie wyjścia strugi wodno-ścierniej. Powstawanie zadziorów na krawędziach po cięciu strugą wodno-ścierną ma kluczowe znaczenie w montażu elementów maszyn.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski o charakterze ogólnym:

1. Po przeprowadzonej analizie fotografii powstałych powierzchni po przecinaniu strugą wodno-ścierną nie stwierdzono rozwarstwień lub innych uszkodzeń w strefie złącza klejowego, co rekomenduje tę technologię do przecinania klejowych struktur przekładkowych.
2. Największą wartość kąta ukosowania zaobserwowano dla próbek przecinanych z prędkością posuwu 350 mm/min dla wariantu Ti6Al4V-316L-Ti6Al4V. Próbki klejono kompozycją klejową (E5/PAC_80%), a kąt ukosowania wynosił 11°. Fakt ten powinien być uwzględniany przy projektowaniu technologii.
3. Po przeprowadzonych badaniach jednoznacznie stwierdzono istotny wpływ prędkości posuwu strugi wodno-ścierniej na wartość wysokości powstałych zadziorów na krawędzi w strefie wyjścia.

4. Z przeprowadzonych badań wynika, że stal 316L jest materiałem trudniej poddającym się procesowi cięcia hydroabrazynowego niż stop tytanu.
5. Badania wskazują, że warstwa kleju nie ulega istotnej degradacji w procesie cięcia analizowanych struktur warstwowych.
6. Wykonane analizy dokładności kształtu oraz chropowatości powierzchni wskazują, że w niektórych sytuacjach obróbka strugą wodno-ścierną może być obróbką ostateczną.

LITERATURA

- [1] „Specyfikacje Geometrii Wyrobów (GPS) – wykład dla uczelni technicznych” red. Humienny Z. 2001. Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej s. 540.
- [2] Blicharski M. 2009. „Inżynieria powierzchni”. Warszawa: WNT.
- [3] Ciecińska B., R. Perłowski. 2013. „Swobodna energia powierzchniowa wybranych materiałów lotniczych po obróbce laserowej”. *Technologia i Automatyzacja Montażu* (1): 56–62.
- [4] Jańczuk B., T. Białopiotrowicz. 1987. „Swobodna energia powierzchniowa niektórych polimerów”. *Polimery* (32): 269–271.
- [5] Kłonica M. et. al. 2016. „Polyamide 6 surface layer following ozone treatment”. *International Journal of Adhesion and Adhesives* (64): 179–187.
- [6] Kłonica M. 2015. “Impact of thermal fatigue on young’s modulus of epoxy adhesives”. *Advances in Science and Technology Research Journal* 9 (29): 103–106.
- [7] Kubit A., T. Mączka. 2012. „Zastosowanie techniki wizyjnej w pomiarze odkształcenia bezwzględnego warstwy kleju w spoinie”. *Pomiary Automatyka Robotyka* (5): 91–97.
- [8] Kuczmaszewski J. 2006. “Fundamentals of metal-metal adhesive joint design”. Politechnika Lubelska, Oddział PAN w Lublinie.
- [9] Kwiatkowski M. et. al. 2013. “Comparative analysis of energetic properties of Ti6Al4V titanium and EN-AW-2017A (PA6) aluminum alloy surface layers for an adhesive bonding application”. *Ozone-Science & Engineering* 35 (3): 220–228.
- [10] PN-EN ISO 4287:1999/A1:2010P: Specyfikacje geometrii wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa. Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
- [11] Skoczył A. 2011. „Analiza porównawcza procesu cięcia wiązką laserową i strumieniem wodno-ściernym”. *Advances in Science and Technology* (8): 121–128.
- [12] Zielecki W. et. al. 2013. “Surface topography effect on strength of lap adhesive joints after mechanical pretreatment”. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 13 (2): 175–185.
- [13] Żenkiewicz M. 2000. „Adhezja i modyfikowanie warstw wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych”. Warszawa: WNT.

Dr inż. Mariusz Kłonica – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej, ul. Nadbystrzycka 36, 20-640 Lublin, e-mail: m.klonica@pollub.pl

Prof. dr hab. inż. Józef Kuczmaszewski – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej, ul. Nadbystrzycka 36, 20-640 Lublin, e-mail: j.kuczmaszewski@pollub.pl

Dr inż. Paweł Pieško – Katedra Podstaw Inżynierii Produkcji Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej, ul. Nadbystrzycka 36, 20-640 Lublin, e-mail: p.piesko@pollub.pl