

# ANALIZA STATYSTYCZNA W PROCESIE BADAWCZYM NA PRZYKŁADZIE OZONOWANIA POLIAMIDU PA6 DLA POTRZEB KLEJENIA

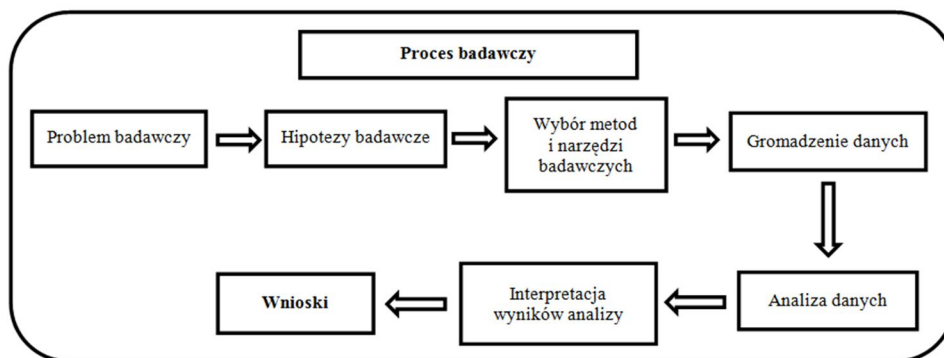
Mariusz KŁONICA, Józef KUCZMASZEWSKI

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wybrane wyniki badań dotyczących oszacowania liczebności próby, chropowatości powierzchni, swobodnej energii powierzchniowej, skuteczności klejenia poliamidu PA6 oraz testowania hipotez o równości wariancji i równości średnich. Stan energetyczny warstwy wierzchniej materiałów polimerowych stosowanych w przemyśle jest szczególnie ważny w technologiach, w których adhezja odgrywa znaczącą rolę. Poliamid PA6 znalazł szerokie zastosowanie w budowie maszyn, z tego względu ważne jest opracowanie technologii klejenia, w tym ekologicznych metod przygotowywania powierzchni do klejenia. Pracę zakończono wnioskami.

**Słowa kluczowe:** poliamid PA6, statystyka, chropowatość powierzchni, swobodna energia powierzchniowa, połączenia adhezyjne.

## 1. Wprowadzenie

Analiza danych w zastosowaniach naukowych oraz przemysłowych stanowi element procesu badawczego. Na rysunku 1 przedstawiono ogólny schemat procesu badawczego.



Rys. 1. Ogólny schemat procesu badawczego

Inżynieria jakości dysponuje szerokim zestawem metod i narzędzi pomocnych w uzyskaniu odpowiedniej jakości wyrobów. Metody wspomagające zarządzanie jakością przeznaczone są do zbierania i przetwarzania danych o procesach zachodzących podczas produkcji. Pozwalają przedstawić zależności między różnymi czynnikami procesu produkcyjnego i jego wynikami [10].

Technika klejenia, dzięki niezwykle szybkiemu postępowi w dziedzinie chemii materiałów adhezyjnych, ciągle się rozwija, a jej znaczenie w wielu gałęziach przemysłu nieustannie wzrasta [1, 11].

Skuteczność klejenia zależy w największym stopniu od doboru odpowiedniego kleju oraz zastosowania odpowiedniej technologii przygotowania powierzchni [5-7, 9].

Poliamid PA6 jest ważnym tworzywem konstrukcyjnym i często występuje konieczność klejenia i uszczelniania konstrukcji wykonanych z tego tworzywa. Istotnym problemem z naukowego i praktycznego punktu widzenia jest poszukiwanie możliwie prostej i skutecznej technologii łączenia adhezyjnego poliamidu.

Ważnym elementem w procesie klejenia jest przygotowanie warstwy wierzchniej łączonych materiałów. Celem tej operacji jest przede wszystkim usunięcie z powierzchni zanieczyszczeń nieorganicznych, odfuszczenie powierzchni oraz ewentualna aktywacja, czyli obróbka specjalna, mająca na celu zwiększenie wartości swobodnej energii powierzchniowej [2, 3].

Istotnym wskaźnikiem poprawności przygotowania powierzchni do klejenia jest jej stopień „rozwinęcia” geometrycznego.

## 2. Metodyka badań

### 2. 1. Materiału użyte w badaniach

Badania prowadzono z użyciem następujących materiałów:

1. Poliamid PA6,
2. Klej epoksydowy E57/Z-1,
3. Klej epoksydowy Hysol H 9484,
4. Klej epoksydowy Hysol H 9466,
5. Klej akrylowy Hysol 3038,
6. Środki pomocnicze: narzędzia nasypowe o ziarnistości P320, środek odfuszczający Loctite 7063, woda destylowana, dijdometan.

### 2. 2. Statystyka w badaniach wstępnych

W pierwszym etapie, w badaniach wstępnych, na podstawie analizy rozrzutu oraz przyjętego poziomu istotności określono niezbędną liczbę pomiarów.

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 następującego wzoru:

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

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 zależności:

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

gdzie:  $n_0$  - liczebność próby wstępnej,  
 $t_{\alpha}$  - wartość zmiennej t-Studenta,  
 $s^2$  - wariancja z próby wstępnej,  
 $d$  – maksymalny błąd szacunku, równy maksymalnemu błędowi pomiarowemu.

Liczbę pomiarów oszacowano przy założeniu, że wytrzymałość połączenia klejowego jest zgodna z rozkładem normalnym.

W celu wybrania najodpowiedniejszego kleju do przeprowadzenia badań niszczących połączenie zakładkowe przeprowadzono badania wstępne z wieloma klejami. Następnie posłużono się współczynnikiem zmienności Pearsona i wytypowano najlepszy klej. Współczynnik zmienności obliczono ze wzoru:

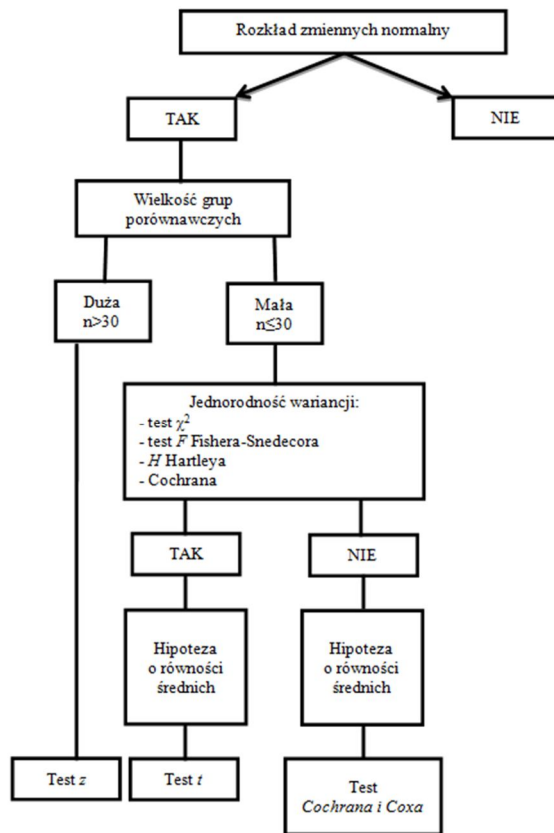
$$V_{(y)} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}}}{\bar{y}} \cdot 100\% \quad (5)$$

Współczynnik ten informuje, ile procent średniej arytmetycznej stanowi odchylenie standardowe.

### 2. 3. Testowanie hipotez statystycznych

Wybór testu istotności różnic w wartościach średnich wytrzymałości jest determinowany przez wiele czynników, między innymi tym, czy próby są zależne czy niezależne. Kolejnymi czynnikami decydującym o wyborze testu są: ilość grup porównawczych (dwie czy więcej niż dwie grupy) oraz jaka jest skala pomiarowa (ilościowa, porządkowa, nominalna). Przy założeniu, że rozkład zmiennych jest normalny wybór testu przedstawia rysunek 2.

Wyniki z przeprowadzonych badań traktowano jako próby niezależne o małej liczebności. Do weryfikacji uzyskanych wyników wykorzystano statystyki testu t-Studenta oraz testu  $F$  Fishera-Snedecora.



Rys. 2. Sposób postępowania podczas wyboru testu

Pierwszym etapem jest sprawdzenie hipotezy o równości wariancji. Do tego celu wykorzystuje się statystykę:

$$F = \frac{S_I^2}{S_{II}^2} \quad (6)$$

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

Hipoteza zerowa ma postać:

$$H_0: S_I^2 = S_{II}^2 \quad (7)$$

Hipoteza alternatywna ma postać:

$$H_1: S_{II}^2 < S_I^2 \quad (8)$$

Tak postawione hipotezy definiują nam test z jednostronnym obszarem krytycznym.

Liczbę stopni swobody określono z zależności:

$$f_1 = n_I - 1 \quad (9)$$

$$f_2 = n_{II} - 1 \quad (10)$$

Korzystając z tablic krytycznych wartości współczynnika  $F$ , określamy jednostronny obszar krytyczny:

$$F_{kr} = F_{(\alpha; f_1; f_2)} \quad (11)$$

$$O_{kr} = \langle F_{(\alpha; f_1; f_2)}, +\infty \rangle \quad (12)$$

Jeżeli stwierdzono, że  $F < F_{kr}$  to brak jest podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej, czyli wariancje nie różnią się w sposób istotny.

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

$$t = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2}{n - 1}}} \quad (13)$$

przy założeniu, że próby są małe o tej samej liczebności.

Hipoteza zerowa ma postać:

$$H_0: \bar{y}_1 = \bar{y}_2 \quad (14)$$

Hipoteza alternatywna na postać:

$$H_1: \bar{y}_1 > \bar{y}_2 \quad \text{lub} \quad \bar{y}_1 < \bar{y}_2 \quad (15)$$

Liczbę stopni swobody określono z zależności:

$$f = n - 1 \quad (16)$$

Korzystając z tablic krytycznych wartości współczynnika  $t_{(\alpha; f)}$  rozkładu t-Studenta, określamy dwustronny obszar krytyczny:

$$t_{kr} = t_{(\alpha; f)} \quad (17)$$

$$O_{kr} = (-\infty, -t_{(\alpha; f)}) \cup (t_{(\alpha; f)}, +\infty) \quad (18)$$

Jeżeli stwierdzono, że wartość statystyki  $t_{(\alpha; f)}$  znajduje się w obszarze krytycznym, to hipoteza  $H_0$  zostaje odrzucona na rzecz hipotezy alternatywnej  $H_1$ .

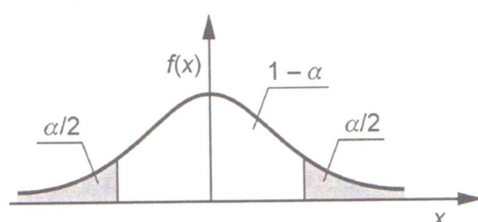
Po postawieniu hipotez należy przyjąć poziom istotności. W badaniach „technicznych” zazwyczaj przyjmuje się poziom istotności na poziomie  $\alpha = 0,05$ . Błędy popełnione przy ocenie hipotez statystycznych obrazuje tabela 1.

Tabela. 1. Błędy popełnione przy analizie hipotez statystycznych [8]

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

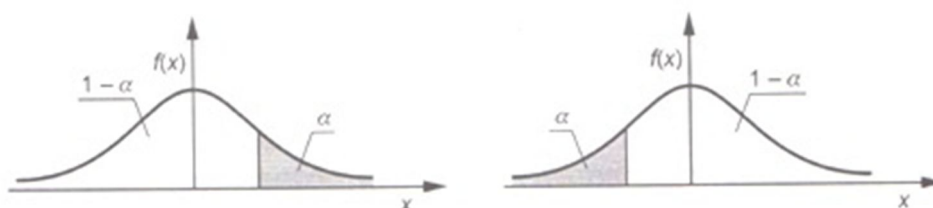
Zazwyczaj konsekwencje przyjęcia hipotezy fałszywej są znacznie poważniejsze w skutkach niż odrzucenie hipotezy prawdziwej.

Od sposobu postawienia hipotezy zerowej i alternatywnej zależy, czy test będzie testem jednostronnym, czy dwustronnym. Na rysunku 3 przedstawiono obszar krytyczny dwustronny.



Rys. 3. Obszar krytyczny dwustronny [8]

Na rysunku 4 przedstawiono obszar krytyczny jednostronny.



Rys. 4. Obszar krytyczny jednostronny (prawostronny lub lewostronny) [8]

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

## 2. 4. Stanowisko badawcze

Pomiary chropowości powierzchni prowadzono z wykorzystaniem profilografometru firmy Taylor Hobson Surtronic3+, profile natomiast opracowano w programie TalyProfile Lite. Długość odcinka elementarnego dobrano na podstawie literatury [4].

Do pomiarów kąta zwilżania cieczami pomiarowymi (woda destylowana oraz diiodometan) użyto goniometru PGX. Ciecze pomiarowe o stałej objętości 4  $\mu\text{l}$  były наносzone 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/min, a odległość uchwytów przy pozycji startowej wynosiła 85 mm.

Utwardzenie klejów przebiegało w temperaturze otoczenia wynoszącej (21 - 23)°C, przy wilgotności względnej (30 – 35)%. Czas utwardzania ustalono na poziomie 96 godzin.

### 3. Wyniki badań

#### 3.1. Badania wstępne

##### 3.1.1. Chropowość powierzchni

Dla pomiaru parametrów chropowości powierzchni w badaniach wstępnych przyjęto  $n_0 = 10$ ,  $t_\alpha = 2,262$ ,  $d = 0,1 \mu\text{m}$ . Liczbę pomiarów oszacowano na podstawie pomiarów parametrów Ra oraz Rz.

W tabeli 2 przedstawiono dane z pomiarów parametru chropowości dla poliamidu PA6.

Tabela 2. Parametry chropowości

Lp.	Poliamid PA6	
	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]
1.	0,69	6,3
2.	0,83	6,32
3.	0,88	6,16
4.	0,59	6,31
5.	0,86	6,21
6.	0,86	6,43
7.	0,82	6,38
8.	0,78	6,44
9.	0,84	6,48
10.	0,79	6,18
$\bar{y}$	0,79	6,32
s	0,0900	0,1123
$s^2$	0,00809	0,01261
n	<b>4,14</b>	<b>6,45</b>

Na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej ustalono minimalną liczbę powtórzeń pomiarów parametrów chropowości. Dla poliamidu PA6 minimalna liczba powtórzeń pomiarów wynosi siedem. W celu zwiększenia dokładności wykonywanych pomiarów zdecydowano się na wykonanie dziewięciu powtórzeń pomiarów. Wartości skrajne odrzucano.

##### 3.1.2. Pomiary kąta zwilżania oraz 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 dijdometanem.

W tabeli 3 przedstawiono dane z pomiarów wstępnych kąta zwilżania cieczami pomiarowymi oraz SEP.

Tabela 3. Pomiarzy wstępne kąta zwilżania oraz SEP

Lp.	Poliamid PA6		
	$\Theta_w$ [°]	$\Theta_d$ [°]	SEP [mJ/m <sup>2</sup> ]
1.	66,1	25,1	54,1
2.	68,9	26,5	53,4
3.	68,5	24,2	51,2
4.	68,5	26,1	55,1
5.	68,6	25,5	54,4
6.	71	23,3	54,1
7.	68,5	24,1	53,4
8.	68,8	23	51,4
9.	69,2	24,6	55,1
10.	68,9	23,5	54,4
$\bar{y}$	68,70	24,59	53,66
s	1,1795	1,1921	1,3713
s <sup>2</sup>	1,39111	1,42100	1,88044
n	<b>7,12</b>	<b>7,27</b>	<b>9,62</b>

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.

### 3.1.3. Wybór kleju

Wyboru kleju dokonano po przeprowadzeniu badań wstępnych. Użyto następujących klejów:

1. Klej epoksydowy E57/Z-1,
2. Klej epoksydowy Hysol H 9484,
3. Klej epoksydowy Hysol H 9466,
4. Klej akrylowy Hysol 3038,

Badania przeprowadzono na próbkach poliamidu PA6 przed i po obróbce mechanicznej narzędziem nasypowym o ziarnistości P320. W obu przypadkach powierzchnie próbek były odfuszczone środkiem odfuszczaającym Loctite 7063. W tabeli 4 przedstawiono wyniki badań wartości naprężeń ścinających w jednozakładkowych połączeniach klejowych poliamidu przed obróbką mechaniczną.

Na podstawie przeprowadzonych analiz statystycznych z uzyskanych wyników badań wstępnych stwierdzono że, klej Hysol 9466 charakteryzuje się najmniejszymi rozrzutami naprężenia ścinającego połączenie zakładkowe w stosunku do innych użytych w badaniach klejów. Rozrzuty są ponad dwukrotnie mniejsze niż w przypadku użycia kleju Epidian 57 z utwardzaczem Z1.



Tabela 4. Wybór kleju - poliamid PA6 przed obróbką P320

Lp.	Napężenia ścinające [MPa]			
	Hysol 9466	Hysol 3038	Hysol 9484	Epidian 57 +Z1
1.	2,17	0,71	3,93	1,13
2.	1,65	0,828	3,71	0,654
3.	1,6	0,517	3,34	1,37
4.	1,62	0,436	3,21	1,11
5.	1,79	0,602	3,94	0,788
6.	1,87	0,529	4,12	0,864
7.	2,1	0,516	4,63	1,32
8.	2,09	0,424	4,67	1,36
9.	1,76	0,61	4,31	1,12
10.	2,11	0,531	3,83	0,85
$\bar{y}$	1,88	0,57	3,97	1,06
s	0,2238	0,1234	0,4862	0,2552
$V_{(y)}$	<b>11,93</b>	<b>21,63</b>	<b>12,25</b>	<b>24,15</b>

W tabeli 5 przedstawiono wyniki badań wartości napężeń ścinających w jednozakładkowych połączeniach klejowych poliamidu po obróbce mechanicznej.

Tabela 5. Wybór kleju - poliamid PA6 po obróbce P320

Lp.	Napężenia ścinające [MPa]			
	Hysol 9466	Hysol 3038	Hysol 9484	Epidian 57 +Z1
1.	2,34	1,66	5,85	1,66
2.	1,9	2,03	5,59	2,77
3.	1,97	1,8	5,08	1,8
4.	1,74	1,95	5,53	1,64
5.	2,21	1,86	4,32	2,47
6.	1,89	2,19	4,69	1,99
7.	2,11	1,66	4,46	2,55
8.	1,99	1,65	4,33	2,36
9.	2,04	1,72	4,94	1,73
10.	1,84	2,09	3,77	2,35
$\bar{y}$	2,00	1,86	4,86	2,13
s	0,1794	0,1961	0,6638	0,4153
$V_{(y)}$	<b>8,96</b>	<b>10,54</b>	<b>13,67</b>	<b>19,48</b>

Również użycie kleju Hysol 9466 na próbkach z poliamidu po obróbce mechanicznej daje najmniejsze rozrzuty w wartościach napężeń ścinającego połączenie zakładkowe. Rozrzut ten jest na poziomie 9%. Największym rozrzutem charakteryzuje się złącze wykonane klejem Epidian 57 z utwardzaczem Z1 i wynosi około 20%.

Odpowiedni wybór 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.

### 3.2. Badania zasadnicze chropowatości powierzchni poliamidu PA6

W tabeli 6 przedstawiono profile chropowatości poliamidu PA6 po obróbce mechanicznej oraz krzywe udziału materiałowego.

Tabela. 6. Chropowatość powierzchni poliamidu PA6

Lp.	Profil chropowatości	Krzywa Abbotta-Firestone'a
1		
2		
3		
4		
5		

Sposoby modyfikacji warstwy wierzchniej próbek poliamidu PA6 po obróbce mechanicznej: 1- przed ozonowaniem, 2- po ozonowaniu:  $5\text{g O}_3/\text{m}^3$  w czasie 5 minut, 3- po

ozonowaniu - 10g O<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> w czasie 5 minut, 4- po ozonowaniu - 10g O<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> w czasie 10 minut, 5- po ozonowaniu 15g O<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> w czasie 20 minut.

Na przedstawionych w tabeli profilach chropowatości po obróbce mechanicznej narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 zauważono charakterystyczne zagłębienia przedstawiające kinematyczno-geometryczne odwzorowanie narzędzia. Warto zwrócić uwagę, że obróbka narzędziami nasypowymi skutecznie rozwija powierzchnię w sensie geometrycznym.

W tabeli 7 przedstawiono uśrednione wartości liczbowe oraz odchylenia standardowe parametrów chropowatości powierzchni poliamidu PA6 po obróbce mechanicznej.

Tabela. 7. Wartości chropowatości - Poliamid PA6

Parametry amplitudy									Parametry stosunku materiałowego	
	Statystyka	Rv [μm]	Rz [μm]	Rc [μm]	Ra [μm]	Rq [μm]	Rsk	Rku	Rmr [%]	Rdc [μm]
1	Średnia	1,87	6,32	2,57	0,63	1,1	0,18	3,76	3,48	1,59
	Odchylenie standardowe	0,124	0,131	0,312	0,05	0,14	0,01	0,17	0,072	0,028
2	Średnia	3,70	6,71	2,90	0,93	1,21	-0,2	3,39	0,625	1,79
	Odchylenie standardowe	0,267	0,142	0,352	0,03	0,05	0,03	0,09	0,061	0,064
3	Średnia	2,78	5,11	1,87	0,59	0,80	-0,3	4,51	1,19	1,09
	Odchylenie standardowe	0,272	0,146	0,224	0,03	0,08	0,02	0,06	0,064	0,075
4	Średnia	4,12	7,28	3,17	0,59	1,37	-0,4	3,61	1,63	2,19
	Odchylenie standardowe	0,144	0,151	0,122	0,03	0,94	0,03	0,94	0,081	0,146
5	Średnia	2,45	5,18	2,62	0,81	1,00	0,02	2,86	0,92	1,74
	Odchylenie standardowe	0,361	0,125	0,142	0,04	0,48	0,01	0,08	0,022	0,136

### 3.3. Weryfikacja hipotez o równości wariancji oraz średnich

W tabeli 8 przedstawiono wyniki z przeprowadzenia testów hipotez o równości wariancji oraz równości średnich.

Tabela. 8. Weryfikacja hipotez o równości wariancji oraz średnich

Chropowatość powierzchni Ra[μm]									
			Hipoteza o równości wariancji			Hipoteza o równości średnich			
	$\bar{y}$	S <sup>2</sup>	Test	Wartość statystyki F	Wartość krytyczna F <sub>(α; f1; f2)</sub>	Wniosek	Wartość statystyki t	Wartość krytyczna t <sub>(α; f)</sub>	Wniosek
1	0,63	0,0031	—	—	—	—	—	—	—
2	0,93	0,0014	1-2	2,2149	4,2839	S <sub>I</sub> <sup>2</sup> = S <sub>II</sub> <sup>2</sup>	-10,858	2,447	$\bar{y}_1 \neq \bar{y}_2$
3	0,59	0,0010	1-3	3,1	4,2839	S <sub>I</sub> <sup>2</sup> = S <sub>II</sub> <sup>2</sup>	1,531	2,447	$\bar{y}_1 = \bar{y}_2$
4	0,59	0,0010	1-4	3,1	4,2839	S <sub>I</sub> <sup>2</sup> = S <sub>II</sub> <sup>2</sup>	1,519	2,447	$\bar{y}_1 = \bar{y}_2$
5	0,81	0,0017	1-5	1,8235	4,2839	S <sub>I</sub> <sup>2</sup> = S <sub>II</sub> <sup>2</sup>	-6,353	2,447	$\bar{y}_1 \neq \bar{y}_2$

Przy sprawdzaniu hipotezy o równości wariancji liczba stopni swobody wynosi:  $f_1=f_2=6$ . Również przy sprawdzaniu hipotezy o równości średnich liczba stopni swobody wynosi:  $f=6$ .

Z przeprowadzonych analiz hipotez wynika równość wariancji we wszystkich przypadkach. Test hipotezy o równości średnich wykazał istotne różnice w pierwszym i ostatnim przypadku na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ . Z punktu widzenia technologii wartości średnie parametru chropowatości Ra odpowiadają wartościom chropowatości po szlifowaniu.

#### 4. Wnioski

Przeprowadzona analiza statystyczna z uzyskanych wyników z badań wstępnych pozwoliła oszacować liczebność próby do badań zasadniczych. Analiza ta „zmniejszyła” liczbę wykonywanych pomiarów w badaniach chropowatości powierzchni z 10 do 7 powtórzeń. W pomiarach kąta zwilżania analiza statystyczna również wykazała, że można zmniejszyć liczbę powtórzeń wykonywanych badań, a co za tym idzie zmniejszyć nakłady finansowe na prowadzenie badań oraz skrócić czas prowadzonych badań. Analiza statystyczna wyników uzyskanych z badań wstępnych pozwoliła na skuteczny wybór kleju do prowadzenia dalszych badań. Przeprowadzone badania pozwalają na sformułowanie statystycznie zweryfikowanych wniosków dotyczących klejenia Poliamidu 6:

1. Ozonowanie nie zmienia topografii powierzchni w rozumieniu makroskopowym, w rozumieniu przygotowania technologicznego, w niektórych jednak przypadkach uzyskano statystycznie istotną różnicę w wartościach Ra.
2. Najskuteczniejszym klejem, w aspekcie maksymalnych naprężeń niszczących, okazał się klej Hysol 8494.
3. Najmniejszą wartość rozrzutu uzyskano dla kleju Hysol 9466.
4. Poliamid 6 jest materiałem trudnym do klejenia konstrukcyjnego, uzyskane wytrzymałości na ścinanie nie są zbyt wysokie.
5. Uzyskano bardzo dobrą powtarzalność (mały rozrzut) wartości SEP dla Poliamidu 6 po ozonowaniu.

#### 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 Wyrobów (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 Automatyzacja Montażu 4/2011, s. 45-48.
6. Kłonica M., Kuczmaszewski J., Ozonek 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. Korzyński M.: *Metodyka eksperymentu. Planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych.* Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa, 2006.
9. Kuczmaszewski J.: *Fundamentals of metal-metal adhesive joint design.* Politechnika Lubelska. Oddział PAN w Lublinie, 2006.
10. Sałaciński T.: *SPC – statystyczne sterowanie procesami produkcji.* Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa, 2009.
11. Żenkiewicz M.: *Adhezja i modyfikowanie warstw wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych.* WNT, Warszawa 2000.

*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.*

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