

WYKORZYSTANIE ELEMENTÓW STATYSTYKI W PROCESIE BADAWCZYM NA PRZYKŁADZIE POMIARÓW WYBRANYCH PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI

Mariusz KLONICA

Streszczenie: W pracy przedstawiono wybrane wyniki badań jakości powierzchni. Powierzchnie próbek przygotowano według czterech wariantów. W pracy analizowano wpływ różnych sposobów przygotowania warstwy wierzchniej na wartości wybranych parametrów chropowatość powierzchni 2D oraz 3D. W badaniach wykorzystano elementy statystyki w celu wyznaczenia, między innymi liczebności wykonywanych pomiarów. Intensywny rozwój różnych technik pomiaru topografii powierzchni pozwala na przewidywanie właściwości funkcjonalnych powierzchni oraz ocenę jej jakości. Pracę zakończono wnioskami.

Słowa kluczowe: warstwa wierzchnia, parametry chropowatości powierzchni, stal 316L.

1. Wprowadzenie

Na strukturę geometryczną powierzchni składają się trzy główne elementy: kształt, falistość oraz chropowatość. Chropowatość powierzchni należy do cech jakości powierzchni najczęściej ocenianej poprzez wskaźniki ilościowe zwane parametrami chropowatości powierzchni 2D (metoda profilowa) i 3D (metoda stereometryczna). Współcześnie wyznaczane parametry są techniką stykową przy pomocy profilometrów lub optyczną, a pomiary te należą do skomplikowanych [1, 5-7, 9, 10, 11]. Wiele publikacji wskazuje na istotną rolę strategii pomiaru w ocenie wartości tych parametrów [12, 14-17].

Parametry chropowatości powierzchni dzielą się na 4 główne grupy. Należą do nich: parametry wyznaczone w kierunku pionowym (amplitudowe) uwzględniające zmiany wysokości, parametry poziome (odległościowe) wyznaczone wzdłuż linii profilu, parametry mieszane oraz parametry związane z krzywą udziału materiałowego profilu w funkcji przekroju [2, 3]. Algorytmy ich obliczania są prezentowane w wielu normach, a ich oznaczenia często się różnią [18-20]. W praktyce pomiarowej jest więc problem z wyborem parametrów chropowatości do oceny powierzchni.

Inżynieria jakości znalazła praktyczne zastosowanie w inżynierii produkcji. Jest nauką opartą na podejściu procesowym i systemowym, która, oprócz zorientowania na docelowego odbiorcę, zawiera podstawowe zasady zarządzania jakością. W ramach inżynierii jakości zastosowano metody oraz narzędzia wspomagające analizę jakości produktów i procesów wytwórczych [5, 8, 13]. W celu poprawnej analizy procesów i wyrobów za pomocą statystycznych metod sterowania procesami należy dokonać pomiaru ich cech i wyznaczyć niepewność pomiarową, a wyniki archiwizować. Istotą statystycznego sterowania procesami produkcji jest dążenie do utrzymania wartości średniej jako docelowej nawet wtedy, gdy rozrzut uzyskanych wyników zajmuje niewielką część dopuszczalnego przedziału tolerancji. Statystyczne sterowanie procesami produkcji jest przeznaczone przede wszystkim do analizy procesów w produkcji seryjnej i masowej [8, 13].

2. Metodyka badań

2.1. Materiały użyte w badaniach

Skład chemiczny stali 316L, z której wykonano próbki do badań przedstawiono w tabeli 1. Tabelę opracowano na podstawie certyfikatu materiału.

Tab. 1. Skład chemiczny stali 316L (wg certyfikatu materiału)

| 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 |

Podstawowe właściwości stali 316L, opracowane na podstawie certyfikatu materiału przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Wybrane właściwości stali 316L (wg certyfikatu materiału)

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

W tabeli 3 przedstawiono warianty przygotowania warstwy wierzchniej próbek wykonanych ze stali 316L. Próbki o wymiarach 100x25 mm i o grubości 1,5 mm przygotowano w czterech wariantach (W), a następnie wszystkie próbki odtłuszczone środkiem odtłuszczającym firmy Loctite 7061. Oczyszczanie przebiegało dwuetapowo: w pierwszym etapie próbki przemywano środkiem odtłuszczającym i przecierano papierowym ręcznikiem (czynności powtórzono dwukrotnie), w drugim etapie próbki przemyto środkiem Loctite 7061 i pozostawiono do odparowania. Obróbkę, zarówno włókniną jak i narzędziem nasypowym (P100 i P320) przeprowadzono ręcznie.

Tab. 3. Warianty przygotowania próbek

| Wariant | Sposób przygotowania próbek |
|---------|---|
| W1 | Przed obróbką |
| W2 | Po obróbce włókniną P80 |
| W3 | Po obróbce narzędziem nasypowym o ziarnistości P100 |
| W4 | Po obróbce narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 |

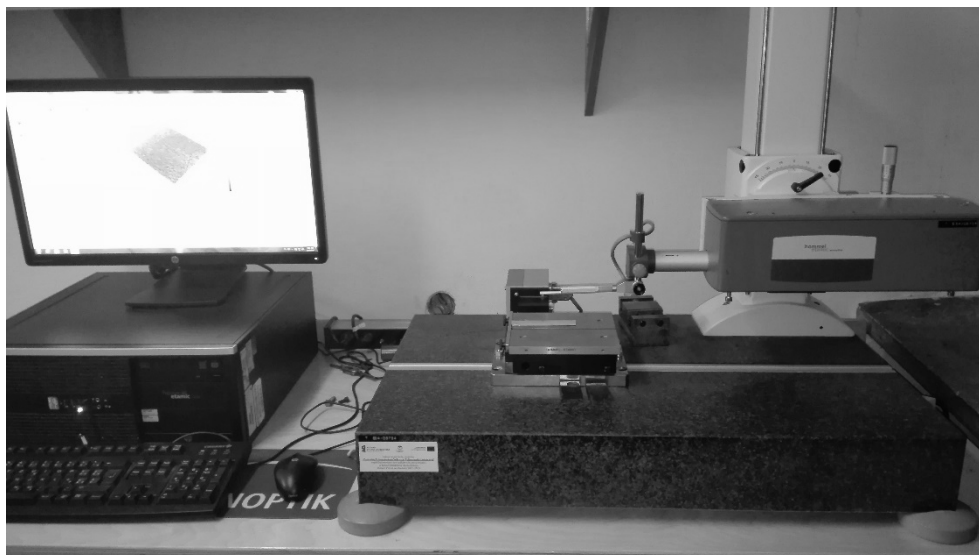
Na tak przygotowanych próbkach przeprowadzono pomiary wybranych parametrów chropowatości powierzchni, a uzyskane wyniki poddano analizie.

2.2. Stanowisko badawcze

W przeprowadzonych badaniach pomiaru chropowatości powierzchni wykorzystano urządzenie do pomiaru konturu, chropowatości i topografii 3D T8000 RC-120-400 firmy Hommel-Etamic. W pomiarach zastosowano końcówkę pomiarową o promieniu 2 μm . Długość odcinka elementarnego dobrano na podstawie literatury [4].

Na rysunku 1 przedstawiono urządzenie do pomiaru konturu, chropowatości i topografii powierzchni 3D. Wiele firm oferuje przyrządy stykowe, które pozwalają badać

topografię powierzchni 3D lub charakterystykę profilu 2D, wyznaczając różne parametry ilościowych ujęte w licznych normach.



Rys. 1. Urządzenie do pomiaru konturu, chropowatości i topografii powierzchni 3D

Zasada pomiarów stykowych oparta jest na odwzorowaniu wzniesień i wgłębień na powierzchni przez ostrze (końcówka pomiarowa) o określonym promieniu, przesuwające się ze stałą prędkością po powierzchni. Pomiarów dokonuje się w określonym kierunku w przypadku metody profilowej 2D oraz przeprowadzając tzw. wierszowanie na określonej powierzchni w metodzie stereometrycznej 3D. Obszar skanowania próbki wynosił 4,8 mm x 4,8 mm. Pomiarów parametrów chropowatości powierzchni 2D (dla wszystkich wariantów) powtórzono dziewięć razy, a wartości średnie wraz z odchyleniem standardowym przedstawiono na wykresach.

3. Badania wstępne

Przed przystąpieniem do badań zasadniczych, w pierwszym etapie wykonano badania wstępne. Na podstawie przeprowadzonej analizy rozrzutu oraz przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0,05$ określono niezbędną liczbę pomiarów: wybranych parametrów chropowatości powierzchni w badaniach zasadniczych.

Średnią arytmetyczną obliczono ze wzoru:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (3.1)$$

gdzie:

y_i – wartość czynnika wynikowego w i -tym pomiarze,

n – całkowita liczba pomiarów.

Odchylenie standardowe obliczono z następującego wzoru:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}}. \quad (3.2)$$

Liczbę pomiarów oszacowano na podstawie zależności:

$$n = \frac{t_{\alpha}^2 \cdot s^2}{d^2} \leq n_0, \quad (3.3)$$

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.

Do wyznaczenia liczby pomiarów parametrów chropowatości powierzchni, analizie poddano z badań wstępnych następujące parametry: R_v oraz R_z . W badaniach wstępnych przyjęto liczbę powtórzeń równą $n_0 = 10$. Na tej podstawie oraz dla przyjętego poziomu istotności odczytano wartość współczynnika $t_{\alpha} = 2,262$, przyjęto również maksymalny błąd szacunku równy $d = 0,1 \mu\text{m}$.

W tabeli 4 przedstawiono liczbowe dane z pomiarów wstępnych parametrów chropowatości powierzchni stali 316L.

Tab. 4. Parametry R_v oraz R_z chropowatości powierzchni z badań wstępnych

| Lp. | Stal 316L | |
|-----------|--------------------|--------------------|
| | $R_v[\mu\text{m}]$ | $R_z[\mu\text{m}]$ |
| 1 | 0,321 | 0,421 |
| 2 | 0,282 | 0,392 |
| 3 | 0,588 | 0,830 |
| 4 | 0,397 | 0,509 |
| 5 | 0,480 | 0,593 |
| 6 | 0,401 | 0,517 |
| 7 | 0,368 | 0,535 |
| 8 | 0,438 | 0,72 |
| 9 | 0,312 | 0,411 |
| 10 | 0,447 | 0,568 |
| \bar{y} | 0,403 | 0,535 |
| s | 0,0908 | 0,1259 |
| s^2 | 0,008247 | 0,015852 |
| n | 4,219 | 8,109 |

Pomiar chropowatości odbywał się na próbkach przed obróbką (wariant W1). Pomiary wykonano po oczyszczeniu próbek.

Na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej ustalono minimalną liczbę powtórzeń pomiarów wybranych parametrów chropowatości powierzchni. Dla stali 316L liczba ta wynosi dziewięć.

4. Wyniki badań

Przeprowadzono badania mikrogeometrii powierzchni metodą profilometrii stykowej. Profilometr umożliwia rejestrację trójwymiarowych pomiarów metrologicznych powierzchni. Pomiar parametrów chropowatości powierzchni pozwala na wszechstronną ocenę jej mikrogeometrii. Topografię powierzchni, zwłaszcza chropowatość i falistość, można scharakteryzować za pomocą wielu parametrów. W przeprowadzonych badaniach wykorzystano następujące parametry 3D:

- Sq - średnia kwadratowa rzędnych profilu 3D,
- Sp - wysokość najwyższego wzniesienia profilu 3D,
- Sv - wartość najniższego wgłębienia profilu 3D,
- Sz - maksymalna wysokość profilu 3D,
- Sa - średnia arytmetyczna rzędnych profilu 3D.

Analizie poddano również wybrane parametry chropowatości powierzchni 2D. Do tych parametrów należały:

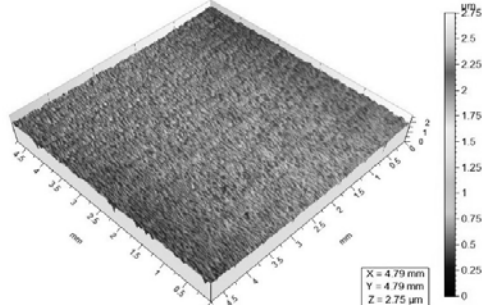
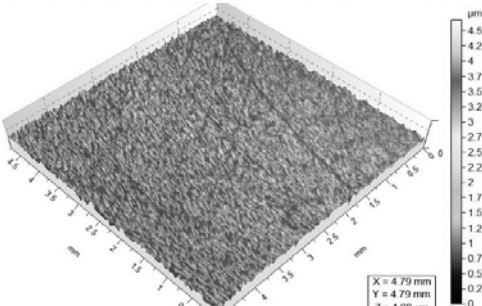
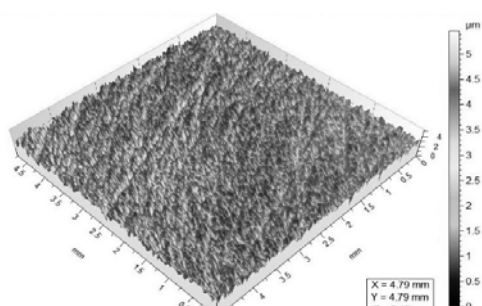
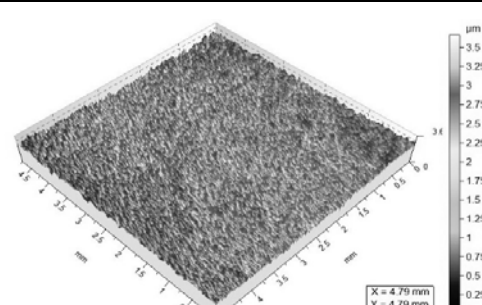
- Rv - maksymalna głębokość wgłębienia profilu chropowatości,
- Rz - maksymalna wysokość profilu chropowatości,
- Ra - średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości,
- Rt - całkowita wysokość profilu chropowatości,
- Rc - średnia wysokość elementów profilu chropowatości.

4.1. Chropowatość powierzchni 3D

W tabeli 5 przedstawiono topografię powierzchni powstałej po różnych sposobach przygotowania próbek wykonanych ze stali 316L. W tabeli zestawiono również wybrane wartości liczbowe analizowanych parametrów chropowatości powierzchni.

Na przedstawionych mapach topografii powierzchni można zauważyć typowe dla prowadzonej obróbki (od W2 do W4) ślady powstałe na powierzchniach próbek. Warto zwrócić uwagę, że dla uzyskanych map oznaczonych od W2 do W4 uzyskano znacznie wyższe parametry chropowatości powierzchni 3D co wskazuje na rozwinięcie powierzchni w sensie geometrycznym. Próbki oznaczone W2 i W4 charakteryzują się zbliżonymi parametrami chropowatości powierzchni.

Tab. 5. Widoki izometryczne powierzchni próbek oraz wybrane wartości parametrów chropowatości powierzchni

| Wariant | Obraz 3D | Parametry [μm] | |
|---------|---|-----------------------------|--------|
| W1 |  | Sq | 0,126 |
| | | Sp | 0,869 |
| | | Sv | 1,89 |
| | | Sz | 2,75 |
| | | Sa | 0,0916 |
| W2 |  | Sq | 0,268 |
| | | Sp | 2,63 |
| | | Sv | 3,23 |
| | | Sz | 5,86 |
| | | Sa | 0,21 |
| W3 |  | Sq | 0,441 |
| | | Sp | 2,18 |
| | | Sv | 3,28 |
| | | Sz | 5,45 |
| | | Sa | 0,344 |
| W4 |  | Sq | 0,232 |
| | | Sp | 1,42 |
| | | Sv | 2,25 |
| | | Sz | 3,67 |
| | | Sa | 0,182 |

4.2. Chropowość powierzchni 2D

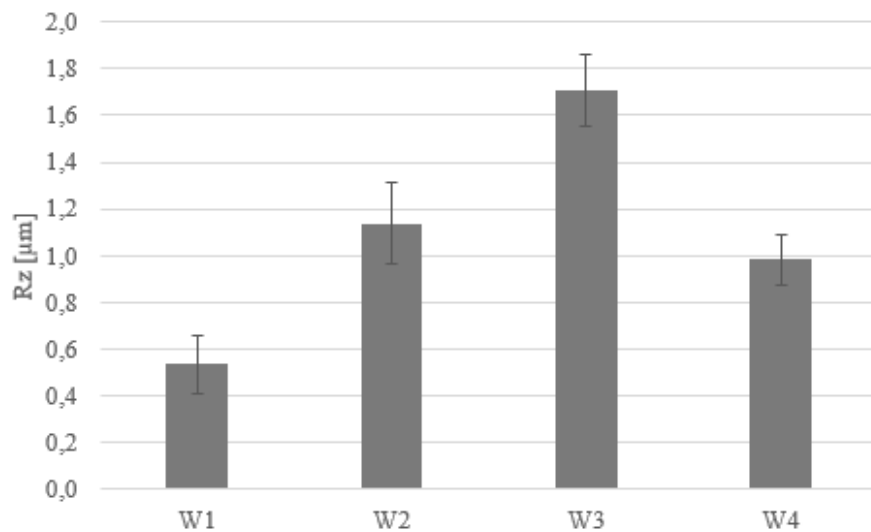
W tabeli 6 zestawiono wybrane profile chropowości powierzchni próbek wykonanych ze stali 316L wraz z krzywą Abbotta-Firestone`a (krzywa udziału nośnego) dla wszystkich wariantów prowadzonej obróbki. Przed wykonaniem pomiarów powierzchnie próbek oczyszczono. Warto zwrócić uwagę, obserwując profile nierówności, że obróbka narzędziami nasypowymi oraz włókniną skutecznie rozwijają analizowaną powierzchnię próbek.

Tab. 6. Krzywa Abbotta-Firestone`a oraz profile chropowości powierzchni 2D

| Wariant | | |
|---------|--|--|
| W1 | | |
| W2 | | |
| W3 | | |
| W4 | | |

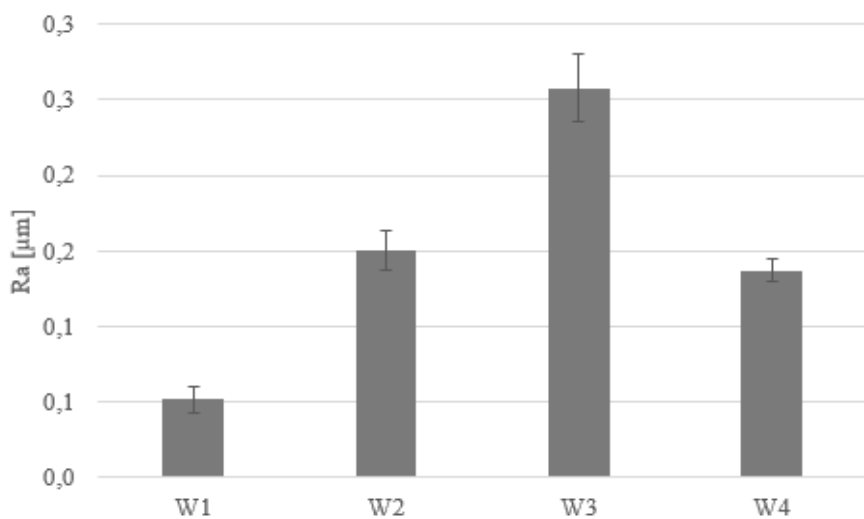
Dla próbek wykonanych ze stali 316L po obróbce narzędziami nasypowymi o ziarnistości (P100 i P320) oraz włókniną P80 zauważono charakterystyczne zagłębienia przedstawiające kinematyczno-geometryczne odwzorowanie narzędzi.

Na rysunku 2 przedstawiono wpływ przygotowania powierzchni próbek na wartość parametru R_z chropowości powierzchni.



Rys. 2. Wpływ przygotowania powierzchni próbek na wartość parametru Rz chropowatości powierzchni

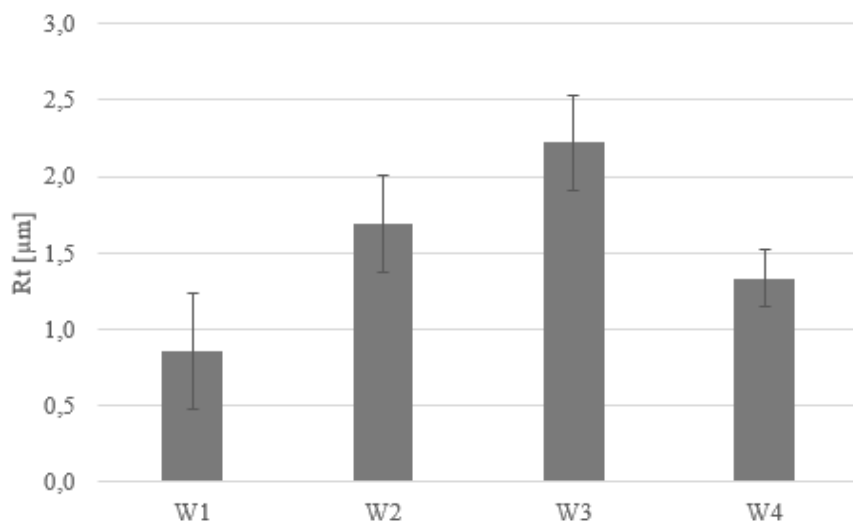
Na rysunku 3 przedstawiono wpływ przygotowania powierzchni próbek na wartość parametru Ra chropowatości powierzchni.



Rys. 3. Wpływ przygotowania powierzchni próbek na wartość parametru Ra chropowatości powierzchni

Największy wzrost wartości parametrów Rz oraz Ra zaobserwowano dla próbek oznaczonych W3 w stosunku do próbek oznaczonych W1. Zarówno dla parametru Rz jak i dla parametru Ra wzrost ten był ponad trzykrotny. Natomiast dla próbek oznaczonych W2 oraz W4 nie stwierdzono istotnych zmian w omawianych parametrach chropowatości powierzchni. Jako miarę rozrzutu podano odchylenie standardowe.

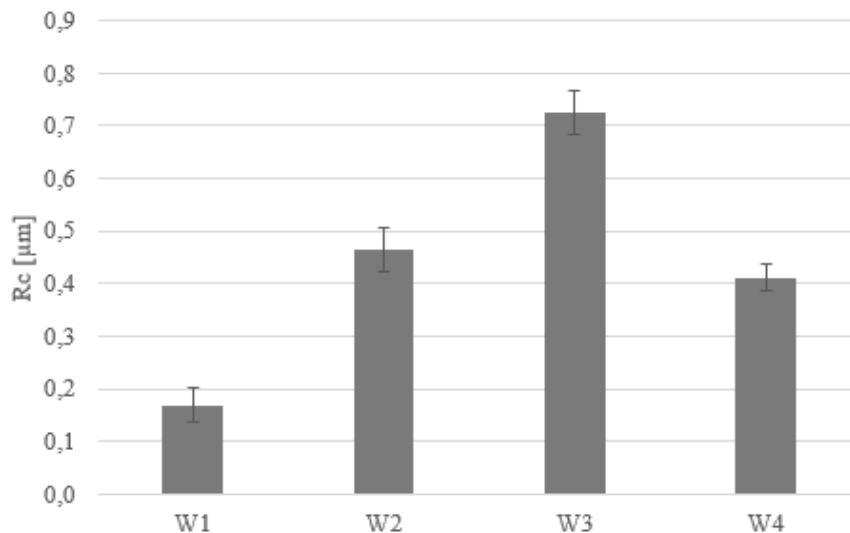
Wpływ przygotowania powierzchni próbek na wartość parametru chropowatości powierzchni R_t przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Wpływ przygotowania powierzchni próbek na wartość parametru R_t chropowatości powierzchni

Na rysunku 5 przedstawiono wpływ przygotowania powierzchni próbek na wartość parametru R_c chropowatości powierzchni.

Analizowane parametry chropowatości powierzchni charakteryzują się stosunkowo niewielkim rozrzutem uzyskanych wyników. Najmniejsze rozrzuty wyników zaobserwowano dla próbek oznaczonych W4.



Rys. 5. Wpływ przygotowania powierzchni próbek na wartość parametru R_c chropowatości powierzchni

Dla wszystkich czterech omawianych parametrów chropowatości powierzchni 2D można zaobserwować podobny trend.

5. Wnioski

Przeprowadzone badania pozwalają na sformułowanie następujących, ważniejszych wniosków dotyczących pomiarów chropowatości powierzchni:

1. Badania wstępne oraz przeprowadzona analiza statystyczna na ich podstawie pozwoliły na oszacowanie liczby powtórzeń pomiarów w prowadzonych badaniach eksperymentalnych. Przeprowadzona analiza statystyczna pozwoliła zmniejszyć liczbę powtórzeń wykonywanych badań, a co za tym idzie zmniejszyć nakłady finansowe oraz skrócić czas prowadzonych badań.
2. Stwierdzono, że obróbka narzędziami nasypowymi o ziarnistości P100 i P320 oraz włókniną P80 skutecznie rozwija analizowaną powierzchnię próbek wykonanych ze stali 316L.
3. Najwyższe wartości poddanych analizie parametrów chropowatości powierzchni (zarówno 2D jak i 3D) uzyskano dla próbek oznaczonych W3 (obróbka narzędziem nasypowym o ziarnistości P100).
4. Obserwując profile chropowatości powierzchni stwierdzono, że obróbka narzędziem nasypowym o ziarnistości P320 oraz włókniną skutecznie rozwijają analizowaną powierzchnię próbek, uzyskano podobne wartości liczbowe analizowanych parametrów chropowatości powierzchni.

Literatura

1. Adamczak S.: Pomiary geometryczne powierzchni. Zarysy kształtu, falistość i chropowatość. Warszawa, WNT, 2008.
2. Blicharski M.: Inżynieria powierzchni. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 2009.
3. Burakowski T., Wierchoń T.: Inżynieria powierzchni metali. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1995.
4. Humienny Z. (red.): Specyfikacje Geometrii Wyrobów (GPS) – wykład dla uczelni technicznych. Oficyna wydawnicza PW, 2001, s. 540.
5. Kamińska-Krzowska B., Kłonica M.: Rola strategii pomiarów topografii powierzchni w ocenie wybranych parametrów chropowatości. Mechanik, nr 8-9, 138-145, 2014.
6. 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.
7. Kłonica M., Kuczmaszewski J., Kwiatkowski M., Ozonok J.: Polyamide 6 surface layer following ozone treatment. International Journal of Adhesion And Adhesives 64, 2016, s. 179-187.
8. Korzyński M.: Metodyka eksperymentu. Planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa, 2006.

9. Kuczmaszewski J., Zagórski I.: Badania chropowatości po frezowaniu stopów magnezu AZ31 i AZ91HP. *Mechanik*, nr 12, 999-1004, 2012.
10. Matuszak J., Zaleski K.: Wpływ warunków obróbki szczotkowaniem na chropowatość powierzchni przedmiotów wykonanych ze stopu aluminium. *Mechanik*, nr 8-9, 509-516, 2014.
11. Packham D. E.: Surface energy, surface topography and adhesion. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2003, 23, s. 437–448.
12. Roźniatowski K., Kurzydłowski K.J., Wierzchnoń T.: Geometryczny opis cech mikrostrukturalnych warstwy powierzchniowej. *Inżynieria Materiałowa*, 1994, 5, s. 141-149.
13. Sałaciński T.: SPC – statystyczne sterowanie procesami produkcji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa, 2009.
14. Wieczorowski M.: Podstawy teoretyczne filtracji morfologicznej w pomiarach chropowatości powierzchni. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji*, Vol.29 nr 4, 41-49, 2009.
15. Wieczorowski M., Cellery A., Chajda J.: Przewodnik po pomiarach nierówności powierzchni czyli o chropowatości i nie tylko. Politechnika Poznańska, Poznań 2006.
16. Zaborski A.: Komputeryzacja pomiarów błędów kształtu i stereometrii przedmiotów walcowych. *Mechanik*, nr 11, 828-832, 2010.
17. Zielecki W., Pawlus P., Perłowski R, Dzierwa A.: Surface topography effect on strength of lap adhesive joints after mechanical pretreatment. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 13, nr 2, 175-185, 2013.
18. PN-EN ISO 4288:1997, Wymagania geometryczne wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni. Zasady i procedury oceny struktury geometrycznej powierzchni metodą profilową.
19. PN-87/M-04250: Warstwa wierzchnia. Terminologia. Surface layer. Terminology.
20. PN-EN ISO 4287:1999/A1:2010P: Specyfikacje geometrii wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa. Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.

Dr inż. Mariusz KŁONICA
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