

mgr inż. Arkadiusz PALCZAK

Uniwersytet Rzeszowski, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, Katedra Mechaniki i Budowy Maszyn,
Centrum Innowacyjnych Technologii

University of Rzeszów, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Department of Mechanics
and Mechanical Engineering, Centre for Innovative Technologies

ANALIZA MOŻLIWOŚCI POPRAWY STRUKTURY STEREOMETRYCZNEJ POWIERZCHNI ELEMENTÓW WYKONANYCH W TECHNOLOGII DMLS

Streszczenie

Wstęp i cel: W artykule dokonano analizy struktury stereometrycznej powierzchni i opisano podjęte próby poprawy jej właściwości dla elementów wykonanych metodą wytwarzania przyrostowego.

Materiał i metody: Przebadano strukturę stereometryczną powierzchni elementów wytworzonych poprzez selektywne spiekanie wiązką lasera sproszkowanej stali 316L. Podjęto również próbę poprawy parametrów powierzchni wytworzonych elementów poprzez obróbkę skrawaniem, szlifowanie, nagniatanie ślizgowe i toczne.

Wyniki: W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano znaczą poprawę parametrów względem powierzchni surowych, uzyskanych bezpośrednio w procesie wytwarzania przyrostowego. Jednocześnie parametry powierzchni uzyskanych konwencjonalnymi metodami nie różniły się w znaczący sposób.

Wniosek: Warstwa wierzchnia elementów wykonanych metodą laserowego spiekania proszków metali cechuje się znaczną chropowatością. Dodatkowa obróbka tak wytworzonych detali poprzez zastosowanie konwencjonalnych metod takich jak skrawanie lub nagniatanie pozwala w istotny sposób zmniejszyć chropowatość.

Słowa kluczowe: DLMS, obróbka mechaniczna, struktura stereometryczna powierzchni, stal nierdzewna 316L.

(Otrzymano: 25.07.2016; Zrecenzowano: 27.07.2016; Zaakceptowano: 31.07.2016)

ANALYSIS OF IMPROVEMENT POSSIBILITIES FOR THE SURFACE TEXTURE OF THE ELEMENTS MADE WITH DMLS TECHNOLOGY

Abstract

Introduction and aim: The article shows the analyze of the surface texture and describes attempts to improve surface parameters for the components made with the use of additive manufacturing technology.

Material and methods: The surface texture of the elements made of powdered 316L stainless steel with the use of direct metal laser sintering technology were studied. Also an attempt was made to improve the parameters of the surface of those elements by machining or grinding and after that by roller or slide burnishing.

Results: During the studies a significant improvement was achieved, relative to the surface parameters obtained directly in the DMLS process. Surface parameters obtained by conventional methods did not differ significantly.

Conclusion: The outer layer of elements made out of metal powders with the laser sintering technology is characterized by a high roughness. Additional mechanical treatment of these parts with the use of conventional methods like turning or grinding and than roller or slide burnishing can significantly reduce the roughness.

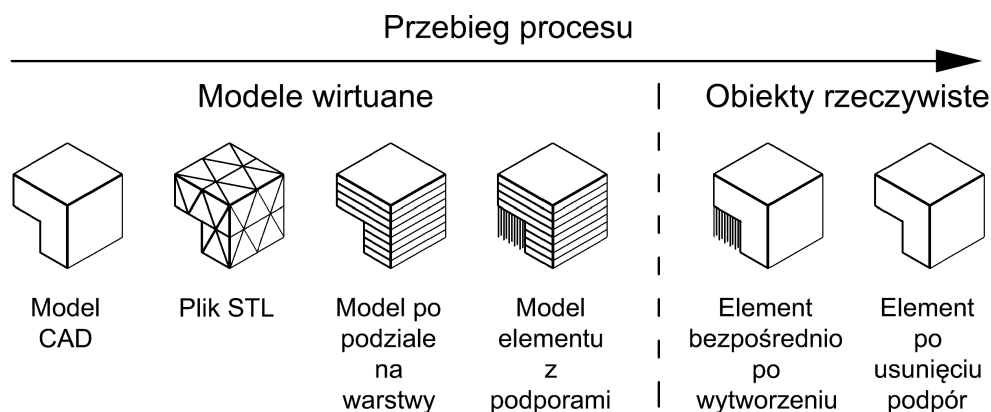
Keywords: DMLS, mechanical treatment, surface texture structure, 316L stainless steel.

(Received: 25.07.2016; Revised: 27.07.2016; Accepted: 31.07.2016)

1. Wprowadzenie

W latach osiemdziesiątych XX wieku nastąpił dynamiczny rozwój technologii komputerowych. Przyczyniło się to w znacznym stopniu do zwiększenia możliwości sterowania numerycznego maszynami pracującymi w oparciu o konwencjonalne – ubytkowe – metody wytwarzania. W metodach tych kształt produkowanego detalu jest uzyskiwany poprzez skrawanie nadmiaru materiału. Jednak komputeryzacja pozwoliła też na opracowanie niemożliwych wcześniej do implementacji technologii przyrostowych. Metody przyrostowe (zwane również addytywnymi) sprowadzają się do budowania wytwarzanego elementu warstwa po warstwie.

Kształt wytwarzanych przedmiotów jest zdeterminowany przez ich wirtualne modele opracowywane w oprogramowaniu CAD. Po zakończeniu procesu projektowania 3D, modele są eksportowane do uniwersalnego formatu STL bazującego na siatce trójkątów. Na kolejnym etapie model numeryczny zapisany w takim pliku jest dzielony na warstwy, odpowiadające kolejnym warstwom materiału nakładanego w procesie wytwarzania (Rys. 1). Grubość pojedynczej warstwy jest zależna od szeregu czynników – technologii wytwarzania, materiału, z którego wykonywany jest detal, a w końcu od zakładanej dokładności i czasu jego wykonania [2].



Rys. 1. Proces modelowania i wytwarzania elementów metodami addytywnymi

Źródło: Opracowanie własne

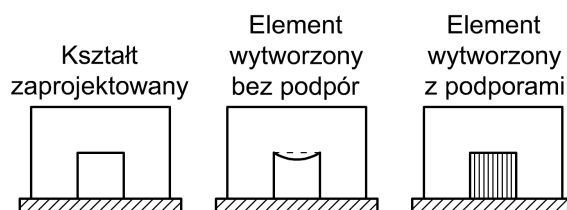
Fig. 1. Modeling and manufacturing process by additive manufacturing methods

Source: Elaboration of the Authors

2. Technologia spiekania proszków metali wiązką laserową

Technologia selektywnego spiekania proszków metali przy użyciu wiązki lasera (*Direct Metal Laser Sintering* – w skrócie DMLS) jest coraz częściej spotykaną metodą wytwarzania elementów metalowych o skomplikowanych geometriach. Cały proces sprowadza się do nanoszenia na platformę roboczą kolejnych warstw proszku. W momencie, gdy pojedyncza warstwa jest rozgarnięta w przestrzeni roboczej, urządzenie dokonuje ekspozycji wybranych obszarów na działanie wiązki laserowej. Na skutek tego dochodzi do przetopu oświetlonych ziaren proszku i łączenia się ich z sąsiadującymi ziarnami. Po naświetleniu wszystkich obszarów stanowiących przekroje wytwarzanych elementów w danej warstwie, następuje obniżenia platformy roboczej i naniesienie kolejnej warstwy proszku. Cykl ten jest powtarzany, aż do momentu uzyskania pełnej wysokości wszystkich elementów w przestrzeni roboczej. Zauważyć należy przy tym, że maszyna wykonuje wszystkie elementy w tym samym czasie, a jedynym ograniczeniem ich ilości jest obszar platformy roboczej.

Pomimo iż wydawać by się mogło, że nieprzetopiony proszek warstw poprzednich będzie pełnił rolę podpory dla warstw kolejnych, konieczne jest jednak stosowanie dodatkowych struktur podporowych w przypadku budowania elementów mostkowych. Dzieje się tak dlatego, iż ostrze nakładające kolejne warstwy proszku, oprócz rozgarniania powoduje również docisk nakładanych ziaren do warstw poprzednich. Pozwala to lepiej rozprowadzić proszek i zwiększyć jego zagęszczenie przed rozpoczęciem przetopu przy użyciu wiązki lasera. Brak podpór przy rozgarnianiu proszku na dużych obszarach może powodować deformację w kierunku pionowym tworzonych elementów mostkowych. Z drugiej strony stosowanie podpór wymaga ich późniejszego usunięcia poprzez obróbkę mechaniczną (Rys. 2).



Rys. 2. Wpływ stosowania podpór na kształt struktur mostkowych

Źródło: Opracowanie własne

Fig. 2. The effect of the support structures on the bridge-shape elements

Source: Elaboration of the Authors

Aby zminimalizować zużycie proszku i ułatwić usunięcie podpór po zakończonym procesie wytwarzania nadaje się im sztywną, ale łatwą do odcięcia strukturę siatkową. Niewykorzystany proszek może być użyty ponownie w czasie wytwarzania kolejnych elementów, jednak musi być on wcześniej przesiany przez sita o odpowiednim rozmiarze w celu usunięcia ewentualnych zanieczyszczeń.

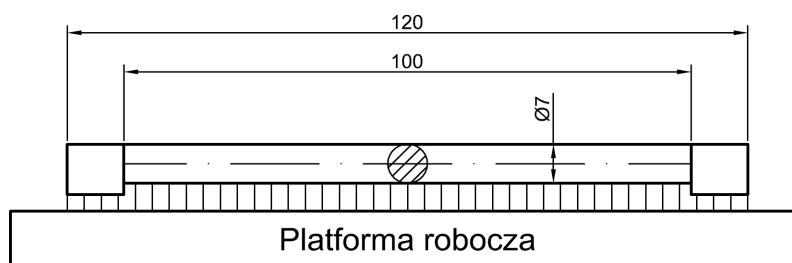
W technologii DMLS elementy mogą być wytwarzane z proszków na bazie tytanu, aluminium, inconelu, kobaltu oraz różnych gatunków stali. Proszki te podzielono na dwie grupy. Do grupy A zaliczono proszki na bazie materiałów o niższej reaktywności. W większości wypadków są to różne gatunki stali. Do grupy B zaliczono proszki o podwyższonej reaktywności, wymagające szczególnych środków ostrożności w czasie przygotowań procesu wytwarzania. Zalicza się do niej proszki na bazie tytanu bądź aluminium. Ponadto – niezależnie od grupy – aby zapobiec ewentualnemu utlenianiu proszków w czasie przetopu, cały proces wytwarzania odbywa się w środowisku gazów obojętnych. W zależności od stosowanego proszku gazem osłonowym jest azot lub argon.

Stal 316L jest stalą o wysokiej odporności na korozję. Z uwagi na śladowe ilości niklu, jakie uwalnia do organizmu ma właściwości hipoalergiczne, a więc praktycznie nie powoduje reakcji uczuleniowych. Dzięki temu jest szeroko stosowana zarówno w przemyśle spożywczym jak i w medycynie. Wykonuje się z niej śruby podtrzymujące złamane kości, płytki kostne, druty do protetyki stomatologicznej [1].

Elementy ze stali 316L wykonywane z wykorzystaniem technologii DMLS otwierają nowe możliwości w zakresie produkcji narzędzi chirurgicznych. Możliwość wykonywania elementów o złożonej geometrii może okazać się kluczowa w chirurgii małoinwazyjnej, pozwalającej na wykonywanie zabiegów wewnątrz ciała pacjenta, z minimalną szkodą dla tkanek znajdujących się w bezpośrednim otoczeniu operowanego miejsca. Istotnym jednak czynnikiem wydaje się być w tym przypadku struktura stereometryczna powierzchni (SSP) wytworzonych w ten sposób narzędzi. Chropowatość może mieć istotny wpływ zarówno na właściwości mechaniczne, jak również na możliwość przygotowania i sterylizacji takich elementów przed planowanym zabiegiem [1].

3. Badania struktury stereometrycznej powierzchni elementów wykonanych w technologii DLMS z proszków na bazie stali nierdzewnej 316L

Badaniom została poddana struktura stereometryczna powierzchni elementów wytworzonych z proszków stali nierdzewnej 316L w technologii DMLS. Próbki do badań zostały wykonane przy użyciu urządzenia M280 firmy EOS. Zaprojektowano je w formie wałków o średnicy 7 mm i długości 120 mm (Rys. 3). W celu zabezpieczenia przed oderwaniem wałków na etapie nakładania kolejnych warstw proszku, ich końce zostały wzmocnione poprzez umieszczenie dodatkowych prostokątów, zwiększających powierzchnię przylegania końców wałków do platformy roboczej. Dodatkowo na całej długości wytwarzanego elementu umieszczono podporę zapobiegającą uginaniu. Sam proces wytwarzania przyrostowego odbywał się zgodnie z parametrami zoptymalizowanymi dla stali 316L, dostarczonymi przez producenta urządzenia - firmę EOS. Wykonano w ten sposób cztery próbki. Zdjęcie jednej z próbek przedstawione jest na rysunku 4. Widać na nim podpory, które jeszcze nie zostały w pełni usunięte, ale uległy częściowemu uszkodzeniu w czasie odcinania elementu od platformy roboczej.



Rys. 3. Kształt i wymiary próbek wykonywanych ze stali nierdzewnej 316L w technologii DMLS

Źródło: Opracowanie własne

Fig. 3. The shape and dimensions of the samples made of 316L stainless steel in DMLS technology

Source: Elaboration of the Authors



Rys. 4. Próbką wykonaną w technologii DMLS ze stali nierdzewnej 316L

Źródło: Opracowanie własne

Fig. 4. The sample made of 316L stainless steel in DMLS technology

Source: Elaboration of the Authors

Przebadano elementy bezpośrednio po procesie wytwarzania przyrostowego mierząc strukturę stereometryczną powierzchni. Pomiarów dokonano na profilometrze optycznym Altisurf 520 zgodnie z normą ISO-25178. Następnie podjęto próbę poprawy struktury stereometrycznej powierzchni poprzez toczenie, szlifowanie oraz nagniatanie ślizgowe i toczne.

Szczegółowe informacje na temat parametrów obróbki zawarto w tabeli 1. Po wykonaniu tych operacji ponownie wykonano badania SSP a następnie obliczono współczynnik poprawy chropowatości powierzchni

$$K_{Sa} = \frac{Sa_p}{Sa_0}, \quad (1)$$

gdzie Sa_p – wartość parametru Sa po wytwarzaniu przyrostowym, Sa_0 – wartość parametru Sa po obróbce daną metodą.

Tab. 1. Parametry obróbki wykańczającej elementów ze stali 316L wykonanych w technologii DMLS
Tab. 1. Finishing parameters of the elements made of 316L stainless steel with the DMLS technology

Pomiar	Parametry obróbki:	Proces poprzedzający
1.	Element bezpośrednio po wytworzeniu przy użyciu metody DMLS	-
2.	Toczenie n = 460 obr/min; f = 0,05 mm/obr; $a_p = 0,1$ mm	1
3.	Nagniatanie rolką Ø5 mm n = 115 obr/min; f = 0,05 mm/obr; F = 180 N	2
4.	Toczenie n = 460 obr/min; f = 0,05 mm/obr; $a_p = 0,1$ mm	1
5.	Nagniatanie ślizgowe kulistą końcówką diamentową r = 4 mm n = 115 obr/min; f = 0,05 mm/obr; F = 84 N	4
6.	Szlifowanie	1
7.	Nagniatanie ślizgowe kulistą końcówką diamentową r = 4 mm n = 115 obr/min; f = 0,05 mm/obr; F = 70 N	6
8.	Szlifowanie	1
9.	Nagniatanie rolką Ø5 mm n = 115 obr/ min; f = 0,05 mm/obr; F = 180 N	8

Źródło: Opracowanie własne / Source: Elaboration of the Authors

4. Wyniki i dyskusja

Wyniki pomiarów parametrów wysokości struktury stereometrycznej powierzchni zgodnie z normą ISO-25178 zawarte zostały w tabeli 2. W przypadku wszystkich rodzajów obróbki zauważyć można znaczny spadek wartości parametrów Sq , Sp , Sv , Sz oraz Sa po obróbce względem wartości tych samych parametrów przed obróbką. Również zauważalne są różnice pomiędzy tymi wartościami w przypadku obróbki wstępnej przez toczenie lub szlifowanie, a wartościami po obróbce wykańczającej poprzez nagniatanie ślizgowe lub toczenie.

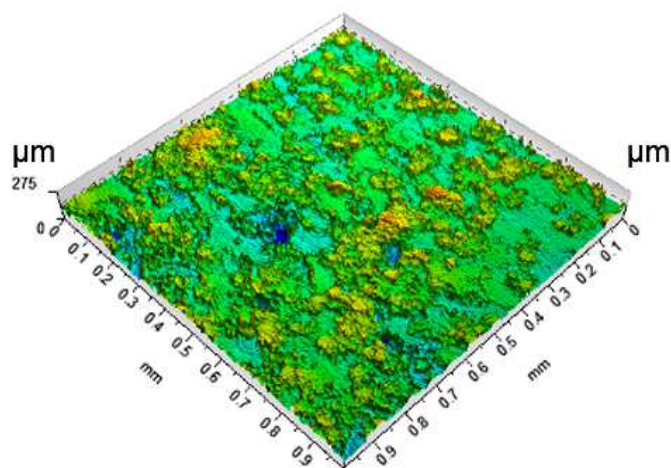
W przypadku obróbki wykańczającej poprzez nagniatanie toczne przy użyciu rolki zauważyć można zbliżone wartości dla parametrów Sq , Sp oraz Sa , niezależnie od tego, czy procesem poprzedzającym było toczenie (kolumna 3) czy też szlifowanie (kolumna 9). Zauważalne są natomiast znaczne - niemal dwukrotne - różnice pomiędzy parametrami Sv i Sz . Parametry te zgodnie z normą ISO-25178 odpowiadają odpowiednio za głębokość najniższego wgłębienia o ograniczonej skali oraz za największą wysokość powierzchni o ograniczonej skali.

Jednocześnie w przypadku obróbki wykańczającej poprzez nagniatanie ślizgowe przy użyciu kulki diamentowej zaobserwować można zbliżone wartości parametrów S_p , S_v oraz S_z . Różnice pojawiają się w przypadku parametrów S_q oraz S_a . Zgodnie z normą ISO-25178 oba powyższe parametry są parametrami określającymi wartości średnie, przy czym parametr S_q odpowiada za średnią kwadratową wysokości powierzchni o ograniczonej skali, a parametr S_a za średnią arytmetyczną wysokość powierzchni o ograniczonej skali.

Tab. 2. Wyniki pomiarów parametrów wysokości struktury stereometrycznej powierzchni elementów wykonanych w technologii DMLS ze stali 316L po poszczególnych procesach obróbkowych
Tab. 2. Measurement results of the surface texture of the elements made of 316L stainless steel with the DMLS technology after different kinds of finishing

Parametry powierzchni	Stan po procesie obróbki wykonanym według Tab.1								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S_q [μm]	21,38	0,954	0,331	1,05	0,508	0,702	0,293	0,826	0,378
S_{sk}	0,5418	-0,00667	0,0911	-1,01	0,209	0,158	0,360	0,00726	-0,376
S_{ku}	3,880	2,97	5,71	59,2	3,46	3,89	6,31	5,94	8,61
S_p [μm]	158,3	7,87	1,80	8,90	2,04	3,25	1,79	15,9	2,11
S_v [μm]	116,8	4,25	1,54	59,1	2,02	2,74	1,90	4,09	3,31
S_z [μm]	275,1	12,1	3,33	68,0	4,06	5,99	3,68	19,9	5,43
S_a [μm]	16,77	0,763	0,245	0,841	0,397	0,543	0,220	0,636	0,276
K_{Sa}	–	22	68	20	42	31	76	26	61

Źródło: Opracowanie własne / Source: Elaboration of the Authors



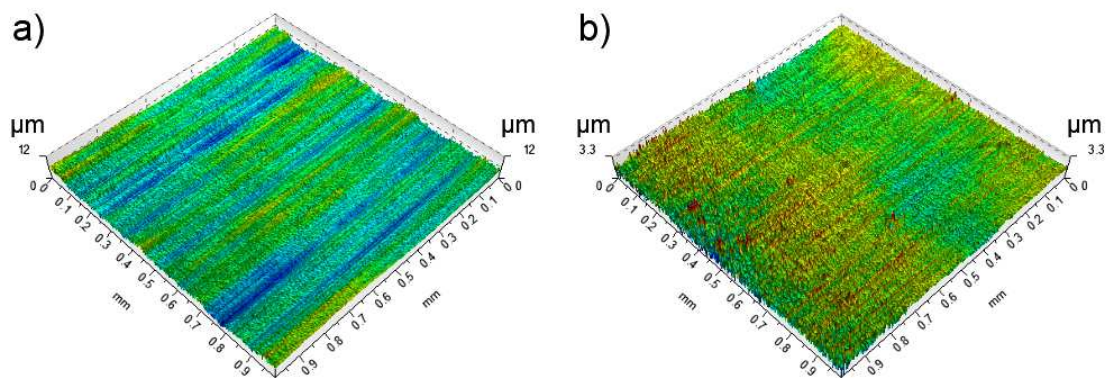
Rys. 5. Obraz powierzchni bezpośrednio po wytworzeniu w technologii DMLS

Źródło: Opracowanie własne

Fig. 5. Texture of the surface immediately after DMLS manufacturing process

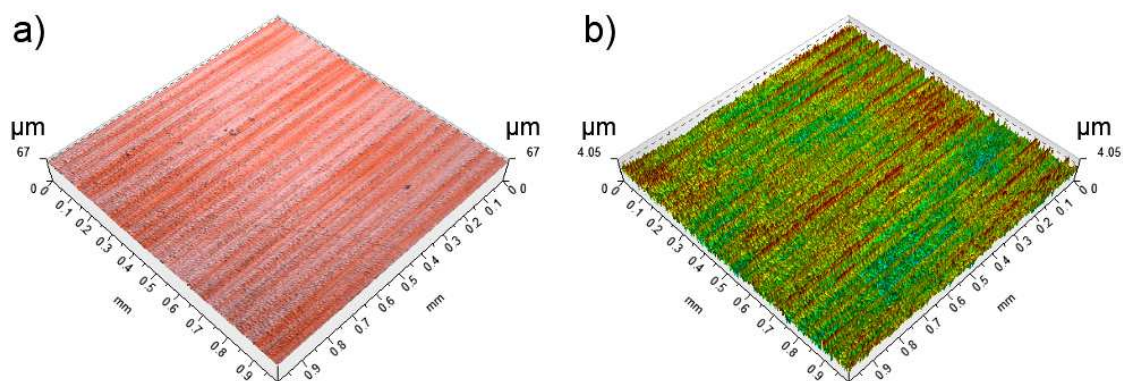
Source: Elaboration of the Authors

Na rysunku 5 przedstawiono obraz skanowanej powierzchni elementu wytworzonego ze stali nierdzewnej 316L w technologii DMLS. Można łatwo zauważyć anizotropię tej powierzchni. Poszczególne wzniesienia o przypadkowym rozmieszczeniu powstały prawdopodobnie na skutek przetopu pojedynczych ziaren proszku poprzez wiązkę lasera bezpośrednio na powierzchni warstwy poprzedniej.



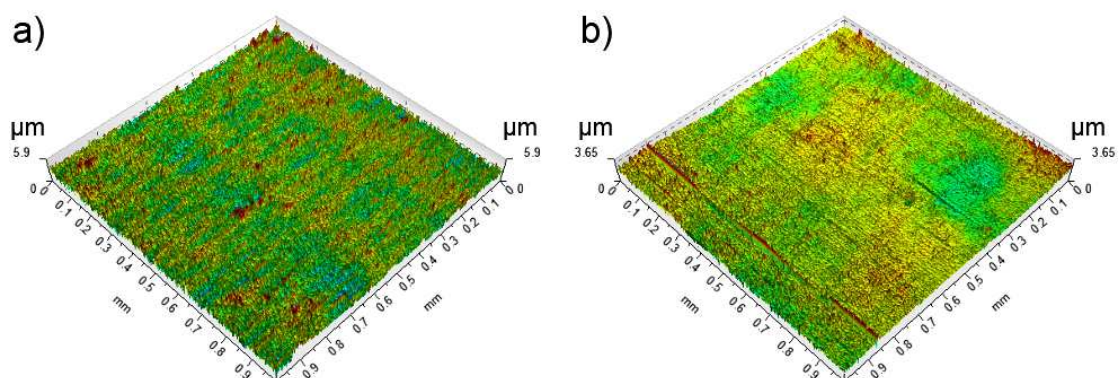
Rys. 6. Obraz powierzchni: a) toczonej, b) toczonej i nagniatanej tocznie
Źródło: Opracowanie własne

Fig. 6. Texture of the surface after: a) turning, b) roller burnishing
Source: Elaboration of the Authors



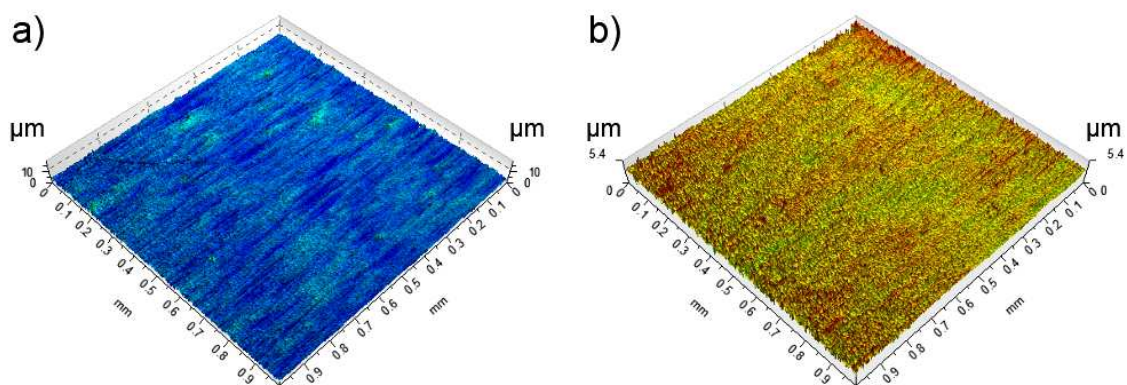
Rys. 7. Obraz powierzchni: a) toczonej, b) toczonej i nagniatanej ślizgowo
Źródło: Opracowanie własne

Fig. 7. Texture of the surface after: a) turning, b) slide burnishing
Source: Elaboration of the Authors



Rys. 8. Obraz powierzchni: a) szlifowanej, b) szlifowanej i nagniatanej ślizgowo
Źródło: Opracowanie własne

Fig. 8. Texture of the surface after: a) grinding, b) slide burnishing
Source: Elaboration of the Authors



Rys. 9. Obraz powierzchni: a) szlifowanej, b) szlifowanej i nagniatanej tocznie

Źródło: Opracowanie własne

Fig. 9. Texture of the surface after: a) grinding, b) roller burnishing

Source: Elaboration of the Authors

W przypadku pozostałych obrazów warstwy wierzchniej zauważyć już można konkretne ukierunkowanie struktury stereometrycznej powierzchni. Ponieważ zarówno toczenie jak i nagniatanie wykonane zostało przy użyciu tokarki, powstałe na powierzchni wgłębienia są wynikiem ruchu obrotowego elementu obrabianego i ruchu narzędzia wzdłuż osi obrotu wrzeciona.

5. Wnioski

- W wyniku zastosowania różnych metod obróbki wykańczającej, udało się w istotny sposób poprawić stan struktury stereometrycznej powierzchni elementów ze stali nierdzewnej 316L wytworzonych w technologii spiekania proszków metali przy użyciu wiązki lasera (metodą DMLS).
- Każda z badanych metod obróbki okazała się mieć duży wpływ na chropowatość obrabianej powierzchni jednak zdecydowanie najlepsze okazały się metody nagniatania. Za ich pomocą można - bez większych trudności - poprawić np. chropowatość powierzchni określaną parametrem Sa od 61 do 76 razy.

Literatura

- [1] Arifvianto B., Suyitno, Mahardika M., Dewo P., Iswanto P.T., Salim U.A.: *Effect of surface mechanical attrition treatment (SMAT) on microhardness, surface roughness and wettability of AISI 316L*. Materials Chemistry and Physics 125 (2011) pp. 418-426.
- [2] Budzik G., Burek J., Dziubek T., Markowska O., Turek P.: *Zastosowanie metod rapid prototyping w procesie kształtowania skomplikowanych struktur kostnych*. Problemy Nauk Stosowanych, Tom 2, Szczecin 2014, s. 47-58.