

Dr inż. Dariusz GRZESIAK,
dr inż. Daniel GROCHAŁA (Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny):

IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW PROCESU SELEKTYWNEGO STAPIANIA LASEROWEGO STOPU CoCr NA PODSTAWIE WYBRANYCH PARAMETRÓW TOPOGRAFII POWIERZCHNI PO FREZOWANIU

Streszczenie

Artykuł prezentuje przebieg i wyniki badań nad określeniem zależności pomiędzy parametrami procesu selektywnego stapiania laserowego SLM (selective laser melting) stopu CoCr a wybranymi parametrami topografii powierzchni po frezowaniu. Stop CoCr jest materiałem szeroko wykorzystywanym w medycynie, a zwłaszcza w dentystyce i protetyce. Jest powszechnie stosowany w technologiach przyrostowych, takich jak selektywne stapianie laserowe, i pozwala na wytwarzanie elementów o niemal dowolnie złożonej geometrii. Powstałe w ten sposób np. implanty można w bardzo wysokim stopniu spersonalizować. Ważnym aspektem jest również brak konieczności stosowania dodatkowego oprzyrządowania technologicznego, które znacznie podwyższa koszt produkcji jednostkowej, jaką jest wytwarzanie spersonalizowanych implantów medycznych. Jedną z największych wad technologii SLM jest wysoka chropowatość surowej powierzchni oraz niedostateczna dokładność wymiarowo-kształtowa. Pomimo że nad poprawą tych parametrów prowadzone są obecnie intensywne badania, a ich efekty są coraz lepsze, to zazwyczaj w celu uzyskania w pełni funkcjonalnych implantów zachodzi konieczność wykorzystania obróbki skrawaniem. Wcześniejsze badania pokazały, że w zależności od parametrów procesu SLM przedmioty wytworzone ze stopu CoCr mogą mieć zróżnicowane właściwości mechaniczne. Różnice te są widoczne zwłaszcza podczas obróbki skrawaniem. Prezentowane w artykule wyniki badań mają dać odpowiedź na pytanie, w jaki sposób dobór parametrów procesu SLM może wpływać na topografię powierzchni otrzymaną po procesie frezowania.

Słowa kluczowe: *selektywne spiekanie laserowe, frezowanie*

IDENTIFICATION OF PARAMETERS OF SELECTIVE LASER MELTING PROCESS OF THE CoCr ALLOY ON THE BASIS OF ASSORTED PARAMETERS OF TOPOGRAPHY OF A SURFACE AFTER MILLING

Abstract

The article presents the course and results of a study intended to determine the correlation between the parameters of the process of selective laser melting (SLM) of the CoCr alloy and assorted parameters of topography of a surface after milling. The CoCr alloy is a material widely used in medicine, particularly in dentistry and prosthetics. It is universally used in incremental technologies, such as selective laser melting, and allows manufacturing of elements with almost any complex geometries. Products made in such a manner, e.g. implants, enable a very large degree of customization. Another important aspect is the lack of necessity to use additional technological accessories significantly increasing the cost of unit production which is manufacturing of customized medical implants. One of the greatest disadvantages of the SLM technology is high roughness of the raw surface and insufficient dimensional and form accuracy. Although intense research is currently conducted in order to improve these parameters, and the effects thereof are increasingly better, there is usually a necessity to apply machining in order to obtain fully functional implants. The previous research has demonstrated that depending on the parameters of the SLM process, objects made of the CoCr alloy may have diverse mechanical properties. These differences are particularly visible during machining. The research results, as presented in the article, are to answer the question how the selection of parameters of the SLM process may impact the surface topography obtained after the process of milling.

Keywords: *selective laser melting, milling*

IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW PROCESU SELEKTYWNEGO STAPIANIA LASEROWEGO STOPU Co-Cr NA PODSTAWIE PARAMETRÓW TOPOGRAFII POWIERZCHNI PO FREZOWANIU

Dariusz GRZESIAK¹, Daniel GROCHAŁA¹,
Emilia BACHTIAK-RADKA¹

1. WSTĘP

Selektywne stapienie laserowe (z ang. Selective Laser Melting – SLM) jest wywodzącym się z grupy metod szybkiego prototypowania (RapidPrototyping) sposobem wytwarzania trójwymiarowych elementów na drodze selektywnego topienia warstwa po warstwie metalowego proszku precyzyjnie kierowaną wiązką lasera [2, 6, 7]. Metoda ta, w porównaniu do spiekania laserowego (z ang. Selective Laser Sintering - SLS), wymaga wyższego poziomu energii, który zwykle uzyskuje się przez zastosowanie lasera dużej mocy i przy użyciu cienkiej warstwy proszku [2]. W wytwarzaniu technologią SLM wykorzystuje się bezpośrednio modele geometryczne uzyskiwane za pomocą oprogramowania CAD [1, 6, 8, 9]. Istotną jej cechą jest brak konieczności stosowania oprzyrządowania technologicznego, dzięki czemu redukuje się koszty i czas wyprodukowania końcowego wyrobu. Ponadto specyfika wytwarzania przyrostowego znosi ograniczenia technologiczne typowe dla konwencjonalnych technologii wytwarzania, takich jak obróbka skrawaniem, czy obróbka plastyczna. Dzięki temu metoda ta ma prawie nieograniczone możliwości, jeżeli chodzi o kształt końcowego wyrobu. Wysoka wydajność procesu, wysoka gęstość, dobre właściwości antykorozyjne, dobry wygląd estetyczny, możliwość stosowania wielu rodzajów materiałów (m. in. Nanokompozytów w osnowach metalowych [10-13]), oraz możliwość zindywidualizowania procesu zaważyły o tym, że technika ta została zastosowana do produkcji uzupełnień protetycznych i przyciągnęła uwagę lekarzy dentyków [6, 14-17]. W protetyce dentyckiej, większość badań dotycząca metody SLM koncentrowała

¹ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Instytut Technologii Mechanicznej, ul. Piastów 19, 70-310 Szczecin

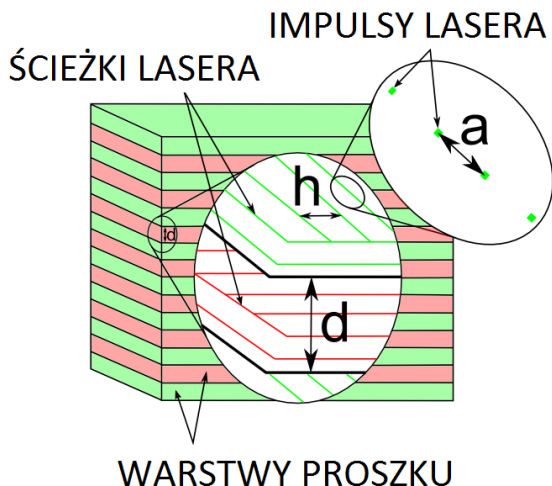
się na stopach Co-Cr [9], z których elementy do tej pory otrzymywane były drogą odlewania [6]. Warto dodać, że stopy Co-Cr charakteryzują się dobrą odpornością na korozję i zużycie oraz bardzo dobrą biokompatybilnością, [2, 8]. Wykorzystanie procesu SLM do wytwarzania implantów niesie ze sobą wiele wyzwań, do których zaliczyć można uzyskanie wysokiej gęstości, pełną kontrolę procesu wytwarzania, odpowiednią twardość oraz odporność na ścieranie, a przede wszystkim zamierzoną chropowatość powierzchni. Właśnie chropowatość surowej powierzchni przedmiotów wykonanych za pomocą SLM powoduje, że w wielu przypadkach konieczne jest zastosowanie dodatkowej obróbki wykończeniowej, którą w wielu przypadkach jest obróbka skrawaniem.

Stop Co-Cr należy do grupy materiałów trudnoobrabialnych i producenci narzędzi skrawających umieszczają go w jednej grupie z takimi materiałami jak stopy na bazie tytanu, wolframu niklu czy molibdenu [18]. Wcześniejsze badania [19] wykazały, że zastosowanie odpowiednich parametrów procesu SLM pozwala uzyskiwać zróżnicowane właściwości mechaniczne stopu. Postawiona została zatem teza, że modyfikacja parametrów selektywnego stapiania laserowego może mieć wpływ na przebieg oraz efekt końcowy procesu obróbki skrawaniem. W celu weryfikacji tej tezy przeprowadzono eksperyment, w którym próbki wykonane przy zróżnicowanych parametrach procesu SLM zostały obrobione frezowaniem, a następnie poddane ocenie topografii powierzchni obrobionej przy pomocy mikroskopii konfokalnej.

2. METODYKA BADAŃ

2.1. SPIEKANIE I SKRAWANIE STOPÓW WYKONYWANYCH Z PROSZKÓW METALI Co-Cr

Do wytwarzania próbek wykorzystany został system REALIZER II 250 (MTT-Group) wyposażony w laser Nd-YAG o mocy 100W. Podczas procesu selektywnego stapiania, proszek nakładany był warstwami o grubości 30 μm . Po nałożeniu każdej z warstw następowało stapianie proszku w miejscach odpowiadających przekrojowi próbki na danym poziomie. W tym etapie procesu nowo powstała warstwa wiąże się na stałe z wytworzonym do tej pory fragmentem budowanego elementu. Podczas stapiania każdej warstwy wiązka lasera kierowana za pomocą systemu zwierciadeł przemieszcza się po zaprogramowanych za pomocą komputera sterującego ścieżkach, złożonych z punktów odpowiadających pojedynczym impulsom lasera. Odległość pomiędzy poszczególnymi punktami oraz złożonymi z nich ścieżkami, czas ekspozycji wiązki lasera w każdym punkcie oraz grubość warstwy proszku, są parametrami technologicznymi, których wartości mają bezpośredni wpływ na końcowy efekt procesu SLM. Schemat procesu SLM oraz znaczenie charakteryzujących go parametrów przedstawia rys. 1.



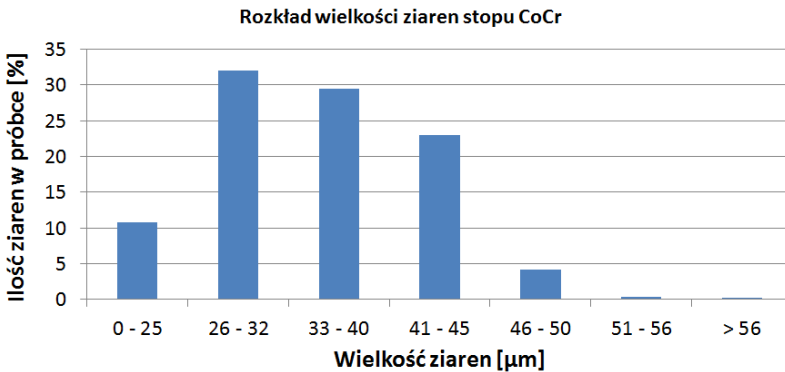
Rysunek 1. Parametry charakteryzujące metodę przyrostowego wytwarzania części SLM, a - odległość działania impulsów lasera, d – grubość stapianej warstwy, h – odległość kolejnych przejść wiązki lasera

Próbki wytworzone zostały z proszku stopu Co-Cr ASTM F75 dostarczonego przez producenta urządzenia REALIZER. Skład chemiczny stopu przedstawiono w tabeli 1. Ze względu na duże zróżnicowanie rozmiaru ziaren proszku (rys. 2) oraz fakt, że duża ich część miała średnicę przekraczającą grubość stapianej warstwy, materiał został przesiany za pomocą wstrząsarki laboratoryjnej LPzE-2e, a do procesu wykorzystano wyłącznie frakcję o rozmiarze mniejszym od 32 mikrometrów.

Tabela 1. Skład chemiczny metalicznego proszku ze stopu Co-Cr ASTM F75

Pierwiastek [symbol]	Procentowa zawartość w stopie
Chrom [Cr]	27–30%
Molibden [Mo]	5–7%
Nikiel [Ni]	<0,5%
Żelazo [Fe]	<0,75%
Węgiel [C]	<0,35%
Krzem [Si]	<1%
Magnez [Mg]	<1%

Wolfram [W]	<0,2%
Fosfor [P]	<0,02%
Siarka [S]	<0,01%
Azot [N]	<0,25%
Glin [Al]	<0,1%
Tytan [Ti]	<0,1%
Bor [B]	<0,01%
Kobalt [Co]	zbilansowane



Rysunek 2. Podział proszku metalicznego stopu Co-Cr ASTM F75 na frakcje o różnej wielkości ziarna

Podczas badań eksperymentalnych przygotowano dziesięć zestawów próbek. W celu ograniczenia wpływu zjawisk losowych i możliwych błędów grubych, każdą z próbek wykonano sześć razy. Łącznie otrzymano sześćdziesiąt próbek (tabela 2). Zestawy próbek różniły się między sobą objętościową gęstością energii dostarczonej przez laser ϵ [J/mm^3], która wyrażona jest równaniem 1 i zależna jest od następujących parametrów technologicznych procesu SLM:

- moc lasera – P [W],
- szybkość przemieszczania wiązki lasera po ścieżce – V [mm/s],
- odległość pomiędzy ścieżkami lasera – h [mm],
- grubość warstwy stapianej – d [mm].

$$\epsilon = \frac{P}{vhd} \quad [20] \quad (1)$$

Szybkość skanowania wyrażona jest równaniem 2 i zależna jest od odległości pomiędzy impulsami wiązki lasera – a [mm] oraz czasu ekspozycji wiązki lasera w pojedynczym punkcie – t [s].

$$V = \frac{a}{t} \quad (2)$$

Dodatkowym zróżnicowaniem próbek była ilość przejść lasera w celu stopienia materiału (X) – w pierwszym przypadku wiązka lasera przemieszczała się po zaprogramowanych ścieżkach jednokrotnie, w drugim zaś dwukrotnie. Pełen zestaw parametrów technologicznych, przy użyciu których przygotowano próbki zawiera tabela 2.

Tabela 2. Zestawy technologicznych parametrów podczas wytwarzania próbek metodą SLM poddanych następnie frezowaniu

Lp.	ϵ [J/mm ³]	V [mm/s]	P [W]	h [mm]	d [mm]	t [s]	a [mm]	X	a _p [mm]	V _c [m/min]	f _z [mm/ząb]
1	46,2	601,5	100	0,12	0,03	0,000133	0,08	1	0,5	25	0,05
2	46,2	601,5	100	0,12	0,03	0,000133	0,08	2	0,5	25	0,05
3	75	369,9	100	0,12	0,03	0,000173	0,064	1	0,5	25	0,05
4	75	369,9	100	0,12	0,03	0,000173	0,064	2	0,5	25	0,05
5	85	326,5	100	0,12	0,03	0,000245	0,08	1	0,5	25	0,05
6	85	326,5	100	0,12	0,03	0,000245	0,08	2	0,5	25	0,05
7	100	277,8	100	0,12	0,03	0,000288	0,08	1	0,5	25	0,05
8	100	277,8	100	0,12	0,03	0,000288	0,08	2	0,5	25	0,05
9	200	138,9	100	0,12	0,03	0,000576	0,08	1	0,5	25	0,05
10	200	138,9	100	0,12	0,03	0,000576	0,08	2	0,5	25	0,05

Próbki zostały następnie poddane obróbce skrawaniem. Każda próbka była dwukrotnie frezowana. Pierwsze przejście narzędzia miało na celu usunięcie wierzchniej, chropowatej warstwy, zaś przejście drugie było przejściem właściwym, którego efektem była powierzchnia poddana późniejszym pomiarom. Do frezowania wykorzystano czterostrzową głowicę frezarską A211.40.R.04-11 wyposażoną w płytki skrawające XDKT 11T308SR-R50 HCN2235. Wszystkie próbki obrobiono z jednakowymi parametrami (tabela 2) zachowując identyczne położenie osi narzędzia względem powierzchni obrabianej oraz krawędzi przedmiotu, co miało na celu uniknięcie wpływu śladów ostrzy na wynik eksperymentu.

3. POMIARY TOPOGRAFII POWIERZCHNI

Pomiary topografii wykonano za pomocą multisensorycznej maszyny do badań struktury geometrycznej powierzchni AltiSurf A520, firmy Altimet. Akwizycję chmury punktów powierzchni prowadzono za pomocą konfokalnego sensora chromatycznego CL2 [20], którego zakres pracy wynosi 400 μm przy rozdzielczości pionowej równej 22 nm. Pomiary wykonano na polach o wymiarach 2x2 mm. Eksperymentalnie ustalono rozdzielczość skanowania w płaszczyźnie XY na 9128x1801 punktów. Pomiar ponad 16.4 mln punktów dla każdej z próbek trwał średnio 45 min. Analizę zebranych danych i opracowanie topografii powierzchni prowadzono z wykorzystaniem oprogramowania AltiMap PREMIUM 6.2 [21]. Dla każdej próbki stosowano standaryzowaną metodykę opracowania zarejestrowanej chmury punktów, która obejmowała:

- poziomowanie powierzchni (płaszczyznę średnią aproksymowaną metodą najmniejszych kwadratów LS),

- wyznaczenie wartości progowej w celu usunięcia błędnie zebranych punktów (pików) powierzchni, punkty usuwane każdorazowo ustawiono jako wartości niemierzone,
- wyznaczenie wartości stereometrycznych parametrów chropowatości wg ISO 25178 (wybrane parametry wysokości powierzchni, parametry funkcyjne, przestrzenne i cech powierzchni) oraz wartości parametrów funkcyjnych wg EUR 15178N.

3.1. OPRACOWANIE WYNIKÓW BADAŃ

W pomiarach topografii powierzchni, podobnie jak w badaniach chropowatości występuje problem z uzyskaniem wysokiej powtarzalności otrzymanych wartości parametrów charakteryzujących SGP. Przy badaniach powierzchni (na dużych obszarach), ze względu na brak składowej niepewności związanej z wyborem reprezentatywnego miejsca do badań (mierzona jest prawie cała powierzchnia próbki), trudność ta nie występuje. Zmienność wartości wyznaczonych parametrów SGP 3D w próbkach powodowana jest czynnikiem losowym związanym z technologią SLM i późniejszą obróbką skrawaniem, natomiast zmienność parametrów SGP pomiędzy różnymi próbkami powodowana jest otrzymaniem materiału (stopu Co-Cr) o różnych właściwościach skrawnych nadanych podczas wytwarzania metodą SLM.

W celu zidentyfikowania parametrów SGP charakteryzujących zależność objętościowej gęstości energii dostarczanej przez laser ϵ podczas stapiania proszku stali a jej właściwościami skrawnymi należy odrzucić parametry SGP 3D, których wewnątrzpróbkowa zmienność będzie większa od zmienności pomiędzy próbkami. Do tego celu można użyć statystycznych narzędzi bazujących na analizie ANOVA, jednak ze względu na wstępny charakter prowadzonych badań i ograniczonych możliwościach zrealizowania specjalnego planu eksperymentu (nastawy urządzenia REALIZER II 250), opracowano własną metodykę identyfikacji parametrów SGP 3D wykazujących systematyczny związek z wartością objętościowej gęstości energii ϵ .

W pierwszym etapie obliczono wartość współczynnika zmienności charakteryzującego wybrany parametr SGP 3D dla każdej z próbek:

$$v_{SGP} = \frac{s_p}{\bar{x}_p} \quad (3)$$

gdzie,

s_p – odchylenie standardowe wybranego parametru SGP wewnątrz próbki,

\bar{x}_p – wartość średnia wybranego parametru SGP wewnątrz próbki.

Na podstawie wartości współczynnika zmienności wartości wybranych parametrów SGP 3D wewnątrz próbek v_{SGP} wyznaczono średnią wartość współczynnika zmienności wybranego parametru pomiędzy próbkami:

$$\bar{v}_{SGP} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_{SGP}) \quad (4)$$

gdzie,
n – ilość próbek.

Za parametry SGP obrabianej skrawaniowo, związane z technologią SLM, uznano te, dla których wartość statystyki testowej t_{SGP} osiągnie wartość wyższą od 51%:

$$t_{SGP} = \frac{\bar{v}_{SGP}}{R_{SGP}} \quad (5)$$

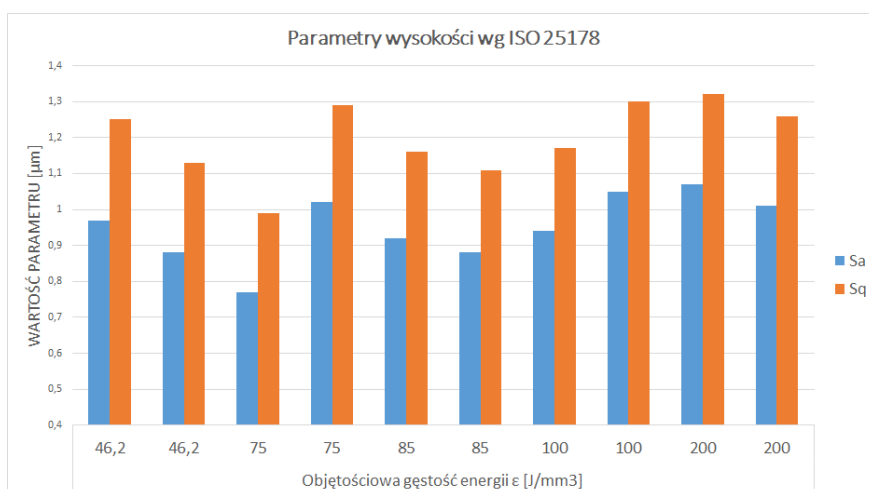
gdzie,
 R_{SGP} – rozstęp wybranej wartości parametru SGP między próbkami.

Ze zbioru wszystkich zarejestrowanych wartości parametrów wyznaczonych podczas badań w tabeli 3 zebrano wartości tylko tych, które wykazują związek chropowatości po frezowaniu z technologią śtapiania SLM.

Tabela 3. Parametry SGP 3D powierzchni ze stopu Co-Cr po frezowaniu zależne objętościowej gęstości energii dostarczanej przez laser ϵ podczas SLM

Symbol	Opis parametru	jednostka	kontekst	Objętościowa gęstość energii dostarczanej przez laser ϵ [J/mm ³]										\bar{v}_{SGP}	t_{SGP}
				46,2	46,2	75	75	85	85	100	100	200	200		
Parametry wysokości - ISO 25178															
Sa	Średnia arytmetyczna wysokość powierzchni	μm		0,97	0,88	0,77	1,02	0,92	0,88	0,94	1,05	1,07	1,01	24	80
Sq	Wysokość średniokwadratowa powierzchni	μm		1,25	1,13	0,99	1,29	1,16	1,11	1,17	1,3	1,32	1,26	23	69
Parametry funkcyjne (Objętość) - ISO 25178															
Vm	Objętość materiału powierzchni	mm ³ /mm ²	p = 10%	0,00005	0,00004	0,00003	0,00005	0,00004	0,00005	0,00006	0,00006	0,00006	0,00006	25	9,22E+05
Vv	Objętość pustej przestrzeni powierzchni	mm ³ /mm ²	p = 10%	0,00154	0,00139	0,00122	0,00163	0,00146	0,00144	0,00155	0,00174	0,00183	0,00172	24	3,94E+04
Vmp	Objętość pików materiału powierzchni	mm ³ /mm ²	p = 10%	0,00005	0,00004	0,00003	0,00005	0,00004	0,00005	0,00006	0,00006	0,00006	0,00006	25	9,22E+05
Vmc	Objętość rdzenia materiału powierzchni	mm ³ /mm ²	p = 10%, q = 80%	0,00108	0,00099	0,00087	0,00115	0,00104	0,00099	0,00106	0,00119	0,00122	0,00114	25	6,95E+04
Vvc	Objętość rdzenia pustej przestrzeni powierzchni	mm ³ /mm ²	p = 10%, q = 80%	0,00137	0,00123	0,00108	0,00145	0,0013	0,00131	0,00142	0,00161	0,0017	0,00158	25	4,00E+04
Vvv	Objętość pustej przestrzeni wgłębienia powierzchni	mm ³ /mm ²	p = 80%	0,00018	0,00016	0,00014	0,00018	0,00016	0,00013	0,00013	0,00013	0,00013	0,00014	18	3,47E+05
Parametry cech - ISO 25178															
Sda	Pole średniej doliny	mm ²	przycinanie = 5%	1,51E-04	1,43E-04	1,30E-04	1,19E-04	1,04E-04	1,30E-04	1,36E-04	1,35E-04	1,19E-04	1,48E-04	26	5,64E+05
Sha	Obszar średniego wzniesienia	mm ²	przycinanie = 5%	2,13E-04	2,12E-04	1,86E-04	1,50E-04	1,20E-04	1,13E-04	1,19E-04	1,15E-04	1,01E-04	1,19E-04	30	2,71E+05
Sdv	Objętość średniej doliny	mm ³	przycinanie = 5%	2,00E-08	1,90E-08	1,50E-08	1,60E-08	1,40E-08	1,20E-08	1,30E-08	1,40E-08	1,20E-08	1,30E-08	32	4,14E+09
Shv	Objętość średniego wzniesienia	mm ³	przycinanie = 5%	2,00E-08	1,90E-08	1,50E-08	1,50E-08	1,20E-08	1,10E-08	1,20E-08	1,30E-08	1,10E-08	1,20E-08	38	4,16E+09

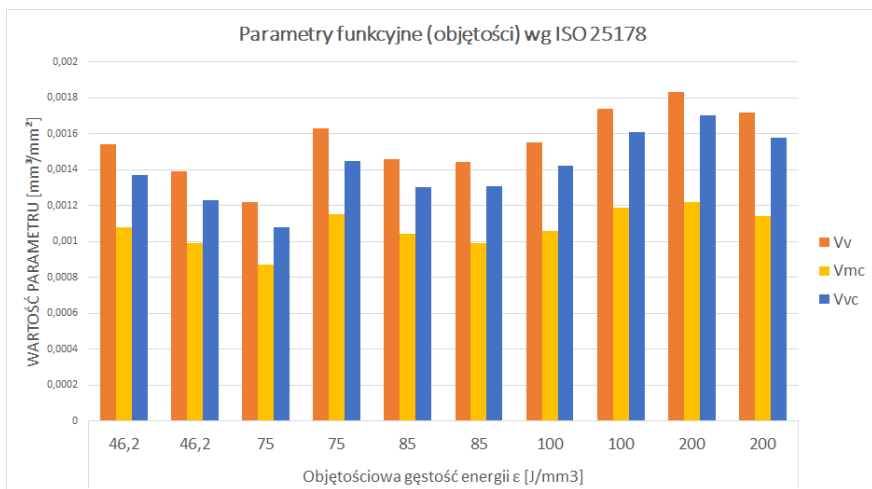
Większość z parametrów wysokościowych (amplitudy) i poziomych (częstotliwości) odznaczała się bardzo dużą zmiennością wewnątrz próbek. Na tym tle różnice pomiędzy próbkami są w zasadzie niezauważalne. Oznacza to tyle, że w wśród najczęściej stosowanych przez konstruktorów parametrach nie znajdzie się informacji mówiącej o zależnościach pomiędzy gęstością energii podczas stapiania proszków metalu Co-Cr a skrawalnością tak otrzymanych materiałów. Za końcowy stan otrzymanej SGP odpowiadają w głównej mierze warunki kinematyczno-geometryczne i parametry technologiczne frezowania. Podobnie nie stwierdzono żadnych związków pomiędzy wartościami parametrów hybrydowych i parametrów z rodziny funkcjonalnych (opisanych na podstawie krzywej Abbot'a). Na tym tle wyjątkiem są parametry Sa i Sq, dla których wartość przyjętej statystyki testowej t_{SGP} nieznacznie przekroczyła wartość 51% - rys.3.



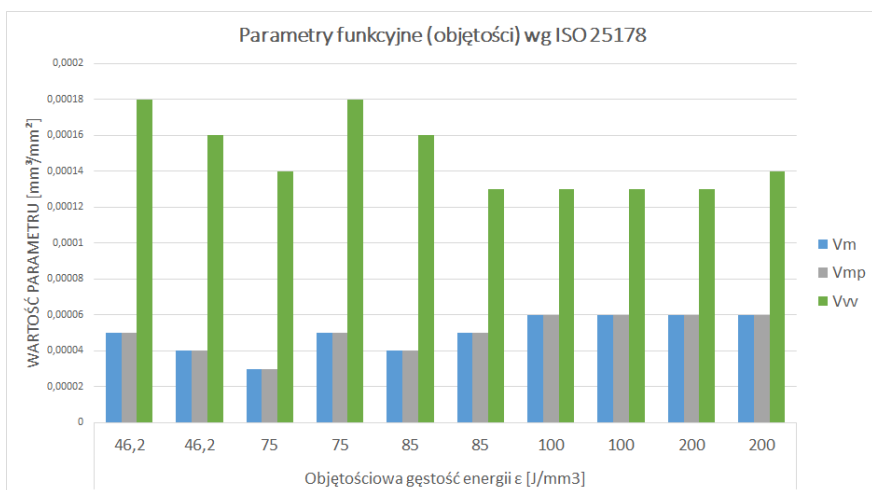
Rysunek 3. Wartości parametrów Sa oraz Sq powierzchni frezowanej w zależności od objętościowej gęstości energii podczas stapiania proszków stopu C-oCr

Rodzina parametrów, w której zauważalny jest systematyczny wpływ parametrów technologii SLM na skrawalność stopu Co-Cr, są to parametry funkcyjne (objętości) – rys.4, rys.5. Zmieniają się w istotny sposób wartości parametrów objętości materiału powierzchni V_m , jego pustych przestrzeni V_v i objętości piku materiału powierzchni V_{mp} przypadające na jednostkę powierzchni. Jest to spowodowane efektem rozdzielania za pomocą ostrza freza materiału o różnej ziarnistości powstałej w wyniku przetopienia proszku stali Co-Cr. Powstałe w ten sposób mikroobjętości materiału rozmieszczone na stosunkowo dużej powierzchni są „nieostrzegalne” w warunkach badania chropowatości w skali mezzo – rys.7. Podobne zachowanie zauważyć można wśród parametrów objętości rdzenia materiału V_{mc} , objętości pustych przestrzeni rdzenia V_{vc} i objętości pustej przestrzeni wgłębień V_{vv} przypadających na jednostkę

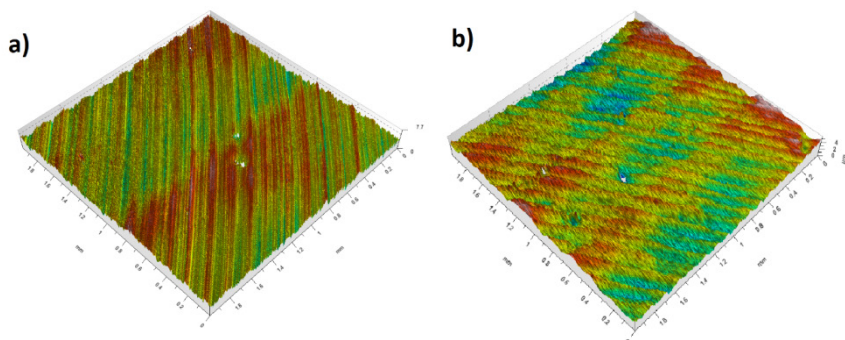
powierzchni. W tej rodzinie parametrów jednak nie stwierdzono systematycznej zmienności wartości parametrów w zależności od wzrastającej wartości objętościowej gęstości energii. Podobnie dodanie jeszcze jednego przejścia lasera podczas stapiania z tą samą wartością objętościowej gęstości energii nie powoduje systematycznej zmiany (zmniejszenia / zwiększenia) wartości rejestrowanych parametrów.



Rysunek 4. Wartości parametrów Vv, Vmc oraz Vvc powierzchni frezowanej w zależności od objętościowej gęstości energii podczas stapiania proszków stopu Co-Cr

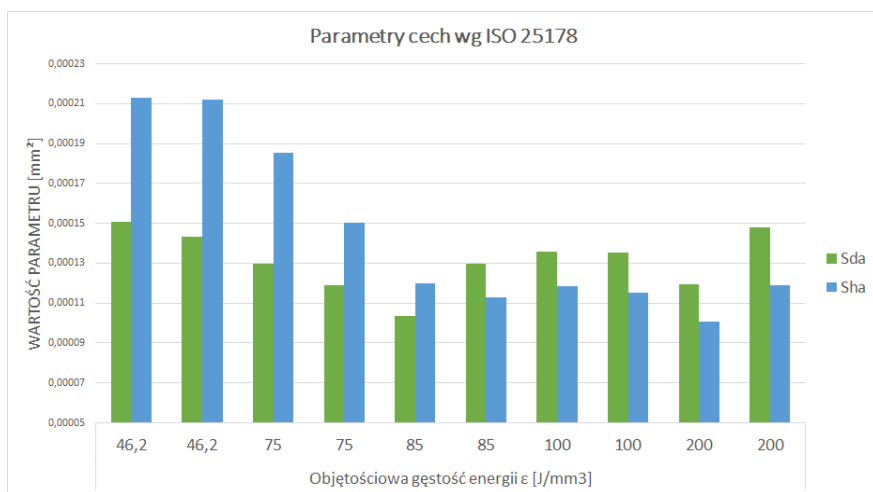


Rysunek 5. Wartości parametrów Vm, Vmp oraz Vvv powierzchni frezowanej w zależności od objętościowej gęstości energii podczas stapiania proszków stopu Co-Cr

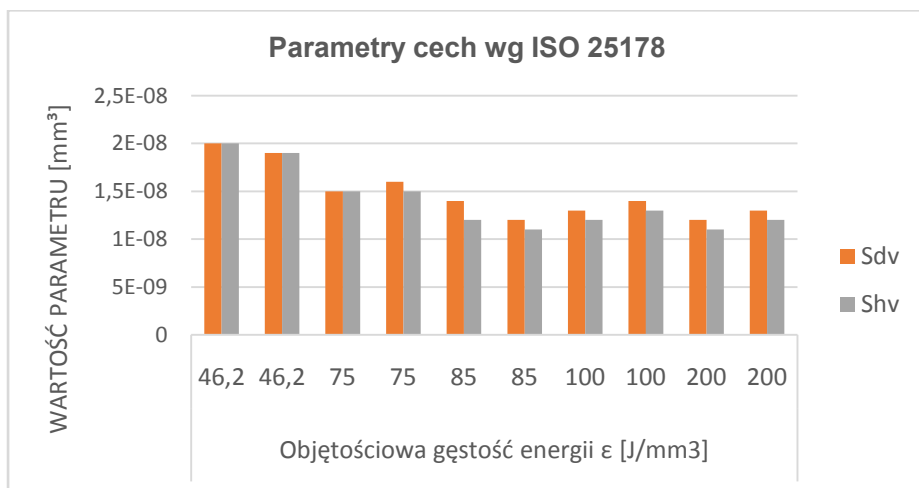


Rysunek 6. Widok powierzchni próbki, a) o najmniejszych wartościach parametrów funkcyjnych ($V_m=0,000048$; $V_v=0,0016$; $V_{mp}=0,000048$; $V_{mc}=0,00116$; $V_{vc}=0,0014$; $V_{vv}=0,000198$); b) o największych wartościach parametrów funkcyjnych ($V_m=0,0000457$; $V_v=0,0013$; $V_{mp}=0,000045$; $V_{mc}=0,00087$; $V_{vc}=0,0011$; $V_{vv}=0,000112$)

Wartości pola średniej doliny S_{da} , obszaru średniego wzniesienia S_{ha} , objętości średniej doliny S_{dv} i objętości średniego wzniesienia S_{hv} – odznaczają się podobnym przebiegiem jak wyżej wymienione parametry funkcyjne (objętości) – rys.7 i rys.8. Tym razem zauważalny jest wyraźny spadek średnich pól i objętości wzniesień i dolin wraz ze wzrostem objętościowej gęstości energii. Parametry te osiągają lokalne minimum przy wartości $\epsilon=85 \text{ J/mm}^3$. Dalszy wzrost dostarczanej za pomocą wiązki lasera energii nie powoduje zmniejszenia mikroobjętości powstałych wzniesień i dolin. Materiał staje się lity a SGP powstaje wyłącznie na skutek ortogonalnego skrawania ostrzem freza.



Rysunek 7. Wartości parametrów S_{da} i S_{ha} powierzchni frezowanej w zależności od objętościowej gęstości energii podczas stapiania proszków stopu Co-Cr



Rysunek 8. Wartości parametrów Sdv i Shv powierzchni frezowanej w zależności od objętościowej gęstości energii podczas stapiania proszków stopu Co-Cr

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W przeprowadzonych badaniach mających na celu wykazanie związku pomiędzy parametrami technologicznymi selektywnego laserowego spiekaniu proszków a skrawalnością otrzymanego stopu Co-Cr udało się dowieść postawionej tezy. Najważniejsze jest poszukiwanie w sygnale (chmurze punktów) powierzchni odpowiednich informacji. Najczęściej wykorzystywane parametry do określania stanu SGP po obróbce skrawaniem niestety odznaczają się zbyt „małą czułością” do tego aby dostrzec subtelne zmiany zachodzące w procesie skrawania części powstałych w technologii SLM. Przeprowadzone badania pozwalają na sformułowanie następujących wniosków.

1. Powierzchnie próbek otrzymane po selektywnym stapianiu wiązką lasera i skrawaniu stopu Co-Cr odznaczają się regularną strukturą, typową dla procesu ferowania. W całym zakresie badań (dla wszystkich próbek) nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy pionowymi i poziomymi wartościami parametrów SGP 3D, co świadczy o stabilności przeprowadzonego procesu skrawania.
2. Pomiary parametrów SGP 3D, należy prowadzić z bardzo dużą rozdzielczością poziomą i pionową, ze względu na obecność w chmurze punktów sygnałów powierzchni zawierających istotne informacje na temat warunków wytwarzania stopów Co-Cr metodami SLM.
3. Udało się wykazać wyraźny związek pomiędzy parametrami funkcyjnymi (objętości) i cech SGP a objętościową gęstością energii wiązki lasera podczas przygotowania próbek metodą SLM, które następnie były frezowane.

4. Ze względu na wstępny charakter badań nie udało się przygotować optymalnego planu eksperymentu, wartość objętościowej gęstości energii przy SLM jest pochodną kilku różnych podstawowych parametrów technologicznych, których wpływ nie został bliżej poznany. W przyszłości należy uwzględnić wspomniane powyżej ograniczenia urządzenia REALIZER II 250 podczas prowadzenia badań doświadczalnych. Do opracowania wyników i dokładnego poznania ilościowego i jakościowego wpływu poszczególnych parametrów technologicznych SLM należy wykorzystać statystyczne narzędzia (DOE).

LITERATURA

- [1] Osakada K., Shiomi M., 2006, 'Flexible manufacturing of metallic products by selective laser melting of powder', *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 46, pp. 1188-1193
- [2] Monroy K., Delgado J., Ciurana J., 2013, 'Study of the pore formation on CoCrMo alloys by selective laser melting manufacturing process', *Procedia Engineering*, vol. 63, pp. 361-369
- [3] Wang D., Yang Y., Liu R., Xiao D., Sun J., 2013, 'Study on the designing rules and process stability of porous structure based on selective laser melting (SLM)', *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, pp. 1734-1742
- [4] Hagedorn Y.-C., Wilkes J., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R., 2010, 'Net Shaped High Performance Oxide Ceramic Parts by Selective Laser Melting', *Physics Procedia*, vol. 5, pp. 587-594
- [5] Su X., Yang Y., 2012, 'Research on track overlapping during Selective Laser Melting of powder', *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, pp. 2074-2079
- [6] Xin X.-Z., Chen J., Xiang N., Gong Y., Wei B., 2014, 'Surface characteristics and corrosion properties of selective laser melted Co-Cr dental alloy after porcelain firing', *Dental Materials*, vol. 30, pp. 263-270
- [7] Rombouts M., Kruth J.P., Froyen L., Mercelis P., 2006, 'Fundamentals of Selective Laser Melting of alloyed steel powders', *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, vol. 55 (1), pp. 187-192
- [8] Yamanaka K., Mori M., Kuramoto K., Chiba A., 2014, 'Development of new Co-Cr-W-based biomedical alloys: Effects of microalloying and thermomechanical processing on microstructures and mechanical properties', *Materials and Design*, vol. 55, pp. 987-998
- [9] Al. Jabbari Y.S., Koutsoukis T., Barmpagadaki X., Zinelis S., 2014, 'Metallurgical and interfacial characterization of PFM Co-Cr dental alloys fabricated via casting, milling or selective laser melting', *Dental Materials*, vol. 30, pp. e79-e88
- [10] Biedunkiewicz A., Figiel P., Biedunkiewicz W., Grzesiak D., Krawczyk M., Gabriel-Polrolniczak U., 2014, 'Mechanical Properties of Metal Matrix Nanocomposites Synthesized by Selective Laser Melting Measured by Depth Sensing Indentation Technique', *Key Engineering Materials*, vol. 586, pp. 83-86
- [11] Figiel P., Biedunkiewicz W., Grzesiak D., 2012, 'Oxidation process of the steel/nc-TiC nanocomposites' *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 108, pp. 979-983
- [12] Biedunkiewicz A., Biedunkiewicz W., Figiel P., Grzesiak D., Jaworska M., 2012, 'Nanokompozyty wytwarzane metodą selektywnego stapiania/spiekania umocnione nanokrystalicznymi proszkami w układzie Fe-Ti-BC', *Inżynieria Materiałowa*, vol. 33(6)
- [13] Biedunkiewicz A., Biedunkiewicz W., Figiel P., Grzesiak D., 2011, 'Preparation of stainless steel-TiC composite by selective laser melting', *Chemicke Listy*, vol. 105, pp. 773-774
- [14] Xiang N., Xin X.-Z., Chen J., Wei B., 2012, 'Metal-ceramic bond strength of Co-Cr alloy fabricated by selective laser melting' *Journal of Dentistry*, vol. 40, pp. 453-457

- [15] Joo B-D., Jang J-H., Lee J-H., Son Y-M., Moon Y-H, 2009, 'Selective laser melting of Fe-Ni-Cr layer on AISI H13 tool steel' *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 19, pp. 921-924
- [16] Xin X.Z., Xiang N., Chen J., Wei B., 2012, 'In vitro biocompatibility of Co-Cr alloy fabricated by selective laser melting or traditional casting techniques', *Materials Letters*, vol. 88, pp. 101-103
- [17] Xiang N., Xin X-Z., Chen J., Wei B., 2012, 'Metal-ceramic bond strength of Co-Cr alloy fabricated by selective laser melting' *Dental Materials*, vol. 40, pp. 453-457
- [18] http://www.sandvik.coromant.com/pl-pl/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_s_hrsa_titanium/pages/default.aspx
- [19] D. Grzesiak, M. Krawczyk: *Effects of the Selective Laser Melting Process Parameters on the Functional Properties of the Co-Cr Alloy*. International Journal of Recent Contributions from Engineering, Science & IT (iJES) – Volume 3, Issue 1: "ICAT 2014", 2015
- [20] Mathia T., Pawlus P., Wiczorowski M.: „Recent trends in surface metrology”. 2011 *Wear* 271, s.494–508.
- [21] ISO 25178-2, Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal — Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters