



Wpływ warunków wytwarzania metodą SLS na jakość powierzchni

M. Król^a, S. Drużdż^b,

^a Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Technologii Procesów Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie email: mariusz.krol@polsl.pl

^b Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny email: sylwia.druzdz@gmail.com

Streszczenie: wykonanych badań było określenie wpływu parametrów Celem technologicznych, takich jak moc lasera oraz odległość między poszczególnymi punktami spiekania jak również orientacji modelu względem wiązki lasera na jakość powierzchni oraz odporność na ścieranie elementów wykonanych metodą selektywnego spiekania proszków.

Abstract: The main objective of this study was performed to determine the effect of selective laser sintering parameters such as power output, laser distance between the point's sintered metal powder during additive manufacturing as well as the orientation of the model relative to the laser beam on the surface quality and wear resistance of models.

Słowa kluczowe: selektywne spiekanie proszków, SLS, topografia powierzchni, chropowatość

1. WSTEP

Początki XXI w. przyniosły rozwój technologii rodem z science-fiction. Dotykowe ekrany, głośniki grubości kartki papieru, samo naprawiające się powierzchnie i wiele innych udogodnień do niedawna wydawały się być jedynie marzeniami oderwanych od rzeczywistości naukowców. Najwięcej emocji wśród nowych odkryć wzbudza tzw. "zabawa w Boga", czyli układanie atom po atomie. W ten kanon wpisuje sie również metoda szybkiego prototypowania (z ang. Rapid Prototyping), technologii której podwalina było odkrycie przez Charlesa Hull`a zjawiska utwardzania powłok polimerowych światłem UV [1-3].

Szybkie prototypowanie to błędnie przyjęta uogólniająca nazwa dla metod kształtowania przyrostowego (z ang. Additive Manufacturing - AM). Może to wynikać z faktu, że początkowo zastosowanie metod RP nie wykraczało poza tworzenie prototypów i modeli testowych. Dzięki prężnemu rozwojowi AM przez ok. 30 lat od odkrycia, możliwe jest "drukowanie" niemalże każdego typu elementu, zaczynając od makiet i prototypów, kończąc na protezach i obiektach o bardzo skomplikowanej geometrii.

Istotą procesów kształtowania przyrostowego jest tworzenie modeli warstwa po warstwie poprzez polimeryzację, klejenie, spiekanie czy też stapianie materiału wsadowego. Charakterystyczną cechą większości metod AM są tzw. wsporniki (supports), które po zakończeniu tworzenia modelu należy usunąć w procesie obróbki wykańczającej.

Wśród wielu dostępnych metod wytwarzania przyrostowego jedynie kilka z nich podbiło światowe rynki. Związane jest to głównie z możliwościami przystosowania technologii do produkcji na skalę przemysłową, jednak czynnikami decydującymi są szybkość wytwarzania, dokładność oraz względy ekonomiczne.

Ze względu na złożoność procesu nie istnieje jeden sposób sklasyfikowania metod szybkiego prototypowania - w związku z tym metody przyrostowe możemy podzielić ze względu na: sposób wytwarzania, typ materiału, stan oraz postać materiału, z czego ostatnie kryterium jest wiodące.



Klasyfikację metod przyrostowych przedstawiono na rysunku 1 [1]:

Rysunek 1. Podział metod AM ze względu na stan i postać materiału wejściowego [1] *Figure 1. Diagram of AM methods due to the form of the material*

Metody przyrostowego wytwarzania charakteryzują się różnorodnością technik wykonywania modeli. Każda z nich mieści się jednak w pewnym ogólnym schemacie (rys. 2) postępowania przygotowawczego, którego etapy muszą zostać bezsprzecznie zrealizowane przed wytworzeniem gotowego obiektu.

Fundamentem całego procesu jest stworzenie obiektu za pomocą oprogramowania typu CAD. Programy umożliwiające stworzenie takiego modelu opisują go za pomocą brył i powierzchni. Pozwala to na bardzo dokładne wygenerowanie danych potrzebnych do realizacji procesu przyrostowego wytwarzania. Podczas etapu projektowania można wykorzystać techniki 2D oraz pomiary 3D, poprzez proces skanowania trójwymiarowego za pomocą tomografu lub rezonansu magnetycznego. W obu przypadkach konieczna jest obróbka otrzymanych danych w programach CAD, dzięki którym uzyskujemy poprawną bryłę i wymagany zakres danych. Podczas tworzenia projektu należy pamiętać o kontroli poprawności bryły. Błędy w postaci niedomkniętych powierzchni mają znaczący wpływ na budowę modelu fizycznego i mogą go wręcz uniemożliwić [3].

Oprogramowanie CAD zapisuje zbyt dużo informacji dla procesu kształtowania przyrostowego. Koniecznym staje się przekonwertowanie projektu za pomocą metod numerycznych do neutralnego formatu zawierającego odwzorowanie geometryczne w trzech

wymiarach bez tekstury, koloru i innych atrybutów modeli CAD jak materiał czy opisy geometrii.



Rysunek 2. Etapy realizacji projektu przed wytworzeniem gotowego obiektu [3] *Figure 2. The steps of the project before the formation of finished structure [3]*

Kolejnym krokiem po stworzeniu trójwymiarowego projektu modelu i zapisie w wybranym formacie, jest zaimportowanie geometrii do systemu AM w celu zorientowania go w przestrzeni roboczej. Jest to bardzo ważny etap, od którego zależeć będzie chropowatość powierzchni, dokładność gotowego wyrobu oraz czas jego wytwarzania. Wynika to z istoty przyrostowego wytwarzania, w którym obiekty powstają warstwowo. Grubość warstwy jest ograniczona przez wybraną metodę, więc dokładność w osi z jest dużo mniejsza niż w płaszczyźnie *xy*. Duże kąty nachylenia są powodem powstawania tzw. efektu schodkowego (rys. 3), więc ważne jest, by w osi z umieszczać w miarę możliwości najmniejszy wymiar. Ma to również istotny wpływ na czas budowy obiektu (ze względu na wpływ ilości oraz grubości warstw) oraz ilości materiału niezbędnego do wykonania modelu. Od orientacji modelu zależą również geometrie pomocnicze, co ma wpływ na jakość oraz koszt wyrobu. Orientacja modelu wpływa również na czas obróbki wyrobu, z którego trzeba usunąć wytworzone wcześniej wsporniki.





Figure 3. "Stair effect" in projection of hole in model oriented to: a) parallel and b) perpendicular to the layers and substrate

Po określeniu orientacji modelu na platformie, należy utworzyć tzw. wsporniki (ang. support), które są niezbędne do utrzymania modelu we właściwej pozycji. Pomagają one

również w podtrzymaniu powierzchni pozbawionych innego podparcia. Budowa geometrii pomocniczych nie jest konieczna w każdej technologii kształtowania przyrostowego, ponieważ w niektórych z nich materiał wykorzystywany do budowy elementu samoczynnie podpiera model, jak jest np. w przypadku technologii opartej na spiekaniu proszków. Podstawowe wymagania stawiane przy projektowaniu to przede wszystkim zużycie jak najmniejszej ilości materiału dodatkowego przy zachowaniu odpowiedniej sztywności wsporników. Istotna jest również łatwość oddzielenia wsporników od wykonanego modelu [4, 7-9].

Ostatnim etapem przed uruchomieniem procesu wytwarzania modelu jest podział zamodelowanego obiektu (wraz ze wspornikami) na warstwy, które są istotą procesów wytwarzania przyrostowego. Są one również główną przyczyną powstawania nieciągłości modelu. Najczęściej spotykanym problemem opisany wcześniej jest tzw. "efekt schodkowy" spowodowany brakiem możliwości dokładnego odtworzenia krzywych zorientowanych pionowo [5].

Zastosowanie w technologii selektywnego spiekania proszków (ang. Selective Laser Sintering - SLS) różnego rodzaju proszków metali umożliwiło wykorzystanie tej metody w wielu gałęziach przemysłu do tworzenia pełnowartościowych prototypów lub pojedynczych egzemplarzy o wyjątkowo skomplikowanych kształtach często wymagających wysokich własności mechanicznych. Połączenie poszczególnych etapów skanowania, projektowania i wytwarzania w jeden proces, stwarza dla przemysłu wiele nowych możliwości rozwoju dzięki, którym wykorzystana technologia staję się bardziej konkurencyjna i atrakcyjna dla szerokiej gamy klientów.

Dostępność technologii SLS sprawia, że staje się ona obiektem zainteresowań dla coraz to nowszych dziedzin przemysłu. W swojej pracy wykorzystują ją już między innymi konstruktorzy, technolodzy, chirurdzy, stomatolodzy, projektanci, architekci, a nawet artyści. Rosnąca popularność metody SLS sprawia, iż firmy zalewają rynek coraz nowszymi urządzeniami różniącymi się od siebie rodzajem i mocą lasera, systemem dozowania proszku oraz wielkością komory roboczej, która definiuje nam maksymalną wielkość elementu

możliwego do wykonania za pomocą danego urządzenia. Istotne zmiany dotyczą również rodzaju stosowanego proszku, wielkości jego ziaren, a także grubości nanoszonej warstwy [6].

Szerokie zdolności wytwórcze technologii SLS umożliwiają zastosowanie jej w procesie wytwarzania części zawierających liczne szczegóły takie jak np. kanały powietrzne, skomplikowane zagłębienia, podcięcia czy też kanały wewnętrzne, części z dopasowanymi zatrzaskami i ruchomymi przegubami, a także wytwarzania małoseryjnych elementów metalowych o bardzo skomplikowanych kształtach [1-9].

W artykule podjęto próbę określenia wpływu parametrów technologicznych wytwarzania w trakcie wytwarzania przyrostowego metodą SLS na jakość wykonania powierzchni jak również odporności na ścieranie uzyskanych elementów.

2. MATERIAŁ ORAZ PRZEBIEG BADAŃ

W celu określenia wpływu parametrów technologicznych wytwarzania metodą selektywnego spiekania proszków opracowano zestaw 24 modeli, który każdy z nich został wykonany przy innych parametrach technologicznych tj. różnej mocy spiekania oraz odległości pomiędzy poszczególnymi punktami spiekania. Oprócz przedstawionych

parametrów, opracowane modele charakteryzowały się ściankami różnie zorientowanymi względem podłoża.

W tablicy 1 przedstawiono plan eksperymentu, a na rysunku 4 zestaw modeli opracowanych w jednym procesie wytwarzania metodą selektywnego spiekania proszków metali.

<u> </u>						
	Odległość między poszczególnymi punktami spiekania 10-50 µm					
Moc spiekania 200-100 W	200/10	200/20	200/30	200/40	200/50	
	175/10	175/20	175/30	175/40	175/50	
	150/10	150/20	150/30	150/40	150/50	
	125/10	125/20	125/30	125/40	125/50	
	100/10	100/20	100/30	100/40	100/50	

Tablica 1. Plan eksperymentuTable 1. Matrix of experimental data



Rysunek 4. Wizualizacja w programie Autofab modeli zaplanowanych do wykonania *Figure 4. Visualization of models in Autofab software of the working platform*

W celu wykonania modeli techniką selektywnego spiekania proszków (rys. 5 i 6) wykorzystano urządzenie AM125 firmy Renishaw (rys. 6), którego główne parametry to:

- maksymalna moc lasera 200 W,
- maksymalna szybkość skanowania lasera do 2000 mm/s,
- średnica wiązki lasera 35-200 μm,
- grubość spiekanej warstwy 20-100 μm.

Urządzenie SLS wykorzystuje do spiekania proszków metali włóknowy laser o materiale czynnym domieszkowanym Iterbem. Cały proces wytworzenia modeli został wykonany w atmosferze ochronnej argonu.



Rysunek 5. Ideowy zarys technologii wytwarzania przyrostowego metodą SLS [3] *Figure 5. Outline diagram of additive manufacturing technology for the SLS method*



Rysunek 6. Urządzenie do selektywnego laserowego spiekania AM125 firmy Renishaw *Figure 6. AM 125 device for Slective Laser Sintering*

Materiał bazowy, z którego zostały wykonane modele do badań, stanowił proszek stali austenitycznej 316L firmy Renishaw, której wielkość ziarna przedstawiona przez producenta zawierała się w zakresie 15-45 µm. Skład chemiczny wykorzystanego proszku stali austenitycznej przedstawiono w tablicy 2. Znaczenie tego materiału w przemyśle jest bardzo duże, szczególnie w branży farmaceutycznej, chemicznej, petrochemicznej oraz energetycznej.

Badania obejmowały wykonanie analizy zarówno gotowych elementów jak i samego proszku użytego do ich wytworzenia. Chropowatość wewnętrznych i zewnętrznych powierzchni modelu, określono za pomocą tribometru.

Odporność na ścieranie wewnętrznych i zewnętrznych powierzchni modelu, określono za pomocą metody ball-on-plate. Jako przeciwpróbkę zastosowano kulkę stalową o średnicy 6 mm. Badanie wykonano przy obciążeniu 10 N i długości toru badania wynoszącej 35 m.

Pomiary ścieżki wytarcia wykonano na poligrafometrze Sutronic 25 firmy Tylor-Hubson oraz mikroskopie konfokalnym LSM Exciter 5 firmy Zeiss.

Oceny mikrostruktury powierzchni próbek wykonano w oparciu o badania z wykorzystaniem mikroskopu świetlnego Leica MEF4A oraz skaningowego mikroskopu elektronowego Supra 35 firmy Zeiss, gdzie obraz powierzchni badanych modeli otrzymano w oparciu o detekcję elektronów wtórnych (SE) przy napięciu przyspieszającym 25kV.

Tablica 2. Skład chemiczny proszku stali austenitycznej 316L (wag.) *Table 2. Chemical composition (wt. %) of 316L powder*

Tuble 2. Chemieur composition (Wi. 70) of 5101 powder								
С	Si	Mn	Р	S	Cr	Ni	Mo	Fe
0.024	0.51	1.25	0.024	0.009	16.3	10.1	2.11	bal



Rysunek 7. Zdjęcie SEM proszku stali 316L wykorzystanej do wykonania modeli *Figure 7. SEM image of powder SS 316L as-received*

3. WYNIKI BADAŃ

W celu określenia zależności pomiędzy zadanymi parametrami technologicznymi i orientacją modelu względem wiązki padającej, a jakością struktury powierzchni i składu chemicznego przeprowadzono badania z wykorzystaniem mikroskopu elektronowego skaningowego. Wyniki badań przedstawiono na rysunkach 8 i 10.

Powierzchnia wszystkich wytworzonych modeli charakteryzuje się dużą niejednorodnością związaną z obecnością w strukturze mikrocząsteczek w postaci kropel, a także frakcji o sferycznym kształcie, która nie została spieczona, a jedynie przytwierdzona do powierzchni. W strukturze zauważono również zestalone sferyczne cząsteczki oraz aglomeraty utworzone z kilku mikrocząsteczek. Jest to wynik zbyt krótkiego czasu spiekania pomiędzy implementacją warstwy a nałożeniem kolejnej partii proszku stali nierdzewnej 316L. Zaobserwowano również wgłębienia powstałe prawdopodobnie po zakończeniu procesu SLS w wyniku wyrwania spieczonych ze sobą cząsteczek (rys. 8).



Rysunek 8. Reprezentatywna struktura powierzchni wykonanego modelu z wykorzystaniem urządzenia AM125: a) pow. 110x, b) pow. 1000x

Figure 8. Representative scanning electron microscope micrograph of the surface topography constructed models by AM125: a) mag. 110x, b) mag. 1000x

W wyniku przeprowadzonej ilościowej mikroanalizy rentgenowskiej potwierdzono występowanie głównych składników stopowych frakcje występujące w analizowanym proszku 316L oraz mikroobszarach analizowanych modeli (tablica 3). Pozwoliło to określić masę atomową oraz stężenie poszczególnych składników stopowych.

Autorzy pragną podkreślić, iż błędy pomiarowe, które wystąpiły podczas pomiarów chropowatości nie przekroczyły 5%. Pomiar chropowatości wykazał różnice w jakości powierzchni próbek jak przedstawiono na rysunku 10. Chropowatość powierzchni modeli zorientowanych pod kątem 60° do podstawy różni się od tych usytuowanych prostopadle. Badania pozwoliły również na potwierdzenie znacznego wpływu wgłębień oraz częściowo spieczonych cząsteczek przylegających do powierzchni na zwiększenie chropowatości powierzchni i zmniejszenie dokładności wymiarowej modelu.



Rysunek 9. a) Reprezentatywna topografia powierzchni modelu wykonana z wykorzystaniem urządzenia AM125 oraz b) wykres energii rozproszonego promieniowania rentgenowskiego z obszaru zaznaczonego na rys. a)

Figure 9. a) Surface topography of representative model carried out by AM125 machine and its X-ray energy dispersive plot of the area marked on Fig. a)

Table 3. Chemical composition	analysis of area presented on F	igure 9		
Pierwiastek	Stężenie pierwiastków w stopie [%]			
	wagowe %	atomowe %		
Si	1.7	3.33		
Мо	2.63	1.51		
Cr	20.05	21.19		
Mn	2.56	2.56		
Fe	62.43	61.45		
Ni	10.63	9.95		

Tablica 3. Skład chemiczny z obszaru zaznaczonego na rysunku 9



Rysunek 10. Wpływ mocy lasera oraz odległości między spiekaniem poszczególnych punktów na chropowatość modeli zorientowanych pod kątem 60° względem podłoża Figure 10. Influence of the laser power output and point distance of laser beam on the roughness of the models orientated to the substrate at an angle of 60°

W wyniku pomiaru chropowatości analizowanych modeli zorientowanych pod kątem 60° względem podłoża stwierdzono, że zarówno zmiana mocy lasera jak i odległość pomiędzy poszczególnymi punktami spiekania ma niewielki wpływ na chropowatość powierzchni modeli. Jedyne zauważalne różnice w chropowatości w wyniku zmiany parametrów technologicznych procesu dotyczą wewnętrznych i zewnętrznych ścian o tej samej orientacji. Różnice te w niektórych przypadkach wynoszą nawet 70% wartości. Dla przykładu model, wykonany przy użyciu mocy lasera równej 100 W oraz odległości punktów spiekania równej 10 µm charakteryzował się chropowatością wewnętrznej ściany na poziomie 2,57 µm. Te same parametry procesu pozwoliły na uzyskanie na zewnętrznej ścianie chropowatości równej 7.83 µm. Analogiczna sytuacja wynikła w przypadku próbek wykonanych przy użyciu 125 W mocy lasera i odległości punktu spiekania 50 µm, gdzie chropowatość

wewnętrznej ściany wynosiła 2.45 μ m a zewnętrznej 7.05 μ m. W przypadku modeli zorientowanych pod kątem 60° w stosunku do podstawy stwierdzono różnice w chropowatości pomiędzy wewnętrznymi i zewnętrznymi ściankami są na poziomie ok. 15-20%. Zmiana parametrów technologicznych procesu dla tak usytuowanych modeli pozwoliły na znalezienie optymalnej korelacji mocy lasera z zakresu 100-200 W i odległości punktów spiekania pomiędzy 10-50 μ m w celu uzyskania najmniejszej i największej chropowatości powierzchni, które wynosiły odpowiednio 2.45 μ m dla mocy 125 W i odległości na poziomie 50 μ m oraz 9.01 μ m dla mocy 175 W i odległości równej 20 μ m.



Rysunek 11. Wpływ mocy lasera oraz odległości między spiekaniem poszczególnych punktów na chropowatość modeli zorientowanych prostopadle do podłoża Figure 11. Influence of the laser power output and point distance of laser beam on the roughness of the models orientated perpendicular to the substrate

Dla modeli zorientowanych prostopadle do podstawy (rys. 11) stwierdzono, że różnice pomiędzy chropowatością wewnętrznej i zewnętrznej ściany wynoszą jedynie 10%, a w niektórych przypadkach mieszczą się w granicy błędu pomiaru, co pozwala uznać taki proces za wydajny a przede wszystkim powtarzalny. Najmniejszą wartość chropowatości modelu zorientowanego prostopadle do podstawy stwierdzono dla modelu wykonanego z mocą lasera o wartości 100 W i odległości spiekania równej 10 µm gdzie wyniosła 5.49 µm. Natomiast najwyższą wartość chropowatości 8.59 µm uzyskano dla modelu wykonanego przy mocy lasera wynoszącej 150 W i 20 µm odległości pomiędzy poszczególnymi punktami spiekania.

Zmiana mocy lasera w przedziale 100-200 W nie ma wpływu na wielkość, głębokość oraz kształt przekroju wytarcia uzyskanych w wyniku testów odporności na zużycie. W przeciwieństwie do mocy lasera, odległość punktu plamki laserowej bardzo istotnie oddziałuje na zmianę geometrii profilu wytarcia po badaniach odporności na zużycie ścierne (rys. 12). Analiza wyników badań pozwala stwierdzić, że wraz ze wzrostem odległości punktu plamki lasera oraz odległości pomiędzy punktami spiekania pogarszają się własności

użytkowe zarówno modeli pochylonych względem podstawy jak i tych usytuowanych do niej prostopadle.

Orientacja modelu istotnie wpływa na zmianę odporności na zużycie ścierne. Modele zorientowane równoległe do wiązki lasera odznaczają się lepszymi własnościami użytkowymi w porównaniu z modelami zorientowanymi pod kątem 60° względem podłoża. Spowodowane może to być tzw. efektem schodkowym, który wpływa na powstawanie ostrych krawędzi wykruszających się podczas badań, powodując tym samym szybsze zużycie elementu. Profile wytarcia uzyskane po badaniu odporności na ścieranie modeli usytuowanych pod kątem do wiązki lasera są znacznie szersze i głębsze niż profile wytarcia powierzchni usytuowanych równolegle.



Rysunek 12. Reprezentatywne profile wytarcia po badaniach odporności na ścieranie wykonanych modeli: a) 100 W, 10 μ m (prostopadle); b) 100 W, 10 μ m (30°.) Figure 12. Representative wear pattern profiles after the wear test of analysed surfaces: a) 100 W, 10 μ m (parallel); b) 100 W, 10 μ m (30 deg.)

Rysunek 13 przedstawia wartość pola przekroju poprzecznego powierzchni wytarcia modeli poddanych badaniu odporności na zużycie dla założonych parametrów technologicznych. Największą powierzchnię wytarcia o wartości 40000 μ m² stwierdzono dla powierzchni modelu zorientowanego równolegle do wiązki lasera wykonanego z mocą lasera 200 W i odległości punktów spiekania 10 μ m, z kolei najmniejszą powierzchnię równą 18000 μ m² uzyskano dla modelu wykonanego z mocą lasera 100 W i 10 μ m odległości punktów spiekania. W wyniku pomiaru wielkości wytarcia po teście odporności na ścieranie stwierdzono, że zarówno dla powierzchni usytuowanych pod kątem 30° w stosunku do wiązki lasera jak i równolegle zwiększanie mocy w zakresie od 100 do 200 W a także zwiększenie odległości punktów spiekania wpływa na pogorszenie odporności na ścieranie.



Rysunek 13. Wpływ parametrów wytwarzania na wielkość profilu wytarcia po badaniu odporności na ścieranie

Figure 13. Influence of the technological parameters on the value of the area of cross section wear track

Badania z wykorzystaniem mikroskopu świetlnego potwierdzają dla wszystkich wykonanych modeli zorientowanych pod kątem 60° względem podłoża efekt wypaczenia (rys. 14).



Rysunek 14. Efekt wypaczenia dla modeli zorientowanych pod kątem 60° względem podłoża, model wykonany przy parametrach - 100 W, 10 μ m

Figure 14. Representative warping effect of the wall oriented at 60 ° relative to the substrate, part made at 100 W and 10 μ m

4. WNIOSKI

Przedstawione wyniki badań potwierdzają, że istnieje możliwość wykonania litych modeli z wykorzystaniem metody SLS. Zmiana takich parametrów jak moc lasera, odległości między punktami spiekania jak również orientacji modelu względem wiązki lasera oraz powierzchni podłoża są przyczyną zmian geometrii profilu wytarcia a tym samym odporności na ścieranie.

Poprzez analizę parametryczną procesów spiekania proszku stali nierdzewnej 316L o wielkości ziarna do 45 µm stwierdzono, iż optymalnymi parametrami procesu SLS, dla założonych warunków tj. mocy lasera i odległości punktu spiekania są odpowiednio 100 W i 10 µm przy założeniu, że powierzchnia jest usytuowana równolegle względem wiązki lasera. Ustalono również, że zmiana mocy lasera w zakresie 100-200 W nie ma znaczącego wpływu na wielkość, głębokość oraz kształt powierzchni przekroju wytarcia uzyskanej po testach odporności na zużycie ścierne. Wyniki badań wykazały również, że wraz ze wzrostem odległości pomiędzy punktami spiekania pogarszają się własności funkcjonalne zarówno powierzchni zorientowanych pod kątem jak i tych równoległych.

PODZIĘKOWANIA

Mariusz Król jest stypendystą projektu nr POKL.04.01.01-00-003/09-00: "Otwarcie i rozwój studiów inżynierskich i doktoranckich w zakresie nanotechnologii i nauki o materiałach" (INFONANO) w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego. Kierownikiem projektu jest prof. dr hab. inż. L.A. Dobrzański.



LITERATURA

- 1. G. Budzik, D. Pająk, M. Magniszewski, W. Budzik, Metody szybkiego prototypowania, Stal Metale & Nowe Technologie, 1-2 (2011) 78-79.
- 2. M. Klimek, Zastosowanie technologii SLS w wykonawstwie stałych uzupełnień protetycznych, Protetyka 12 (2012) 47-55.
- 3. M. Miecielica, Techniki szybkiego prototypowania rapid prototyping, Przegląd Mechaniczny, 2 (2010) 39-45.
- 4. I. Campbell, D. Bourell, I. Gibson, Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age, Rapid Prototyping Journal 18/4 (2012) 255-258.
- 5. O. Ivanova, C. Williams, T. Campbell, Additive manufacturing (AM) and nanotechnology: promises and challenges, Rapid Prototyping Journal 19/5 (2013) 353-364.
- 6. A.I. Kovalev, V.P. Mishina, D.L. Wainstein, V.I. Titov, V.F. Moiseev, N.K. Tolochko, Selective laser sintering of single-phase powder Cr-V tool steel, Journal of Materials Engineering and Performance 11 (2002) 492-495.
- 7. C.M. Taylor, T.H.C. Childs, C. Hauser, Morphology of direct SLS-processed stainless steel layers, Solid Freeform Fabrication Symposium (2002) 530-537.

- 8. P. Vallabhajosyula, D.L. Bourell, Modeling and production of fully ferrous components by indirect selective laser sintering, Rapid Prototyping Journal 17/4 (2011) 262-268.
- 9. M. Chuchro, J. Czekaj, A. Ruszaj, Rapid Manufacturing of the functional prototypes and tools by selective laser sintering (SLS, DMLS), Mechanik, 81/12 (2008) 1064-1064 (in Polish).