



## Wpływ parametrów technologicznych procesu selektywnego topienia laserowego na wybrane właściwości elementów wykonanych z proszków stopu AlSi10Mg

Effect of the selective laser melting process parameters on some properties of the components manufactured from AlSi10Mg alloy powder

ANDRZEJ STWORA  
GRZEGORZ SKRABALAK\*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.3.21

Zaprezentowano optymalizację procesu selektywnego topienia laserowego z uwzględnieniem gęstości elementu oraz czasu jego wytwarzania. Przedstawiono wyniki badań mikrostruktury i gęstości elementów wykonanych ze stopu AlSi10Mg – potwierdziły one, że zwiększenie odległości pomiędzy kolejnymi przejściami wiązki lasera pozwala na znaczące skrócenie czasu wytwarzania elementów, a jednocześnie na nieznaczne zwiększenie porowatości materiału, przy czym powstałe pory mają charakter stochastyczny.

**SŁOWA KLUCZOWE:** selektywne spiekanie laserowe, SLS, selektywne topienie laserowe, SLM, wytwarzanie przyrostowe, efektywność procesu

*Described is the work on optimization of the parameters of Selective Laser Melting process with reference to manufacturing cycle and density of the produced components. Consequently, there are presented results of the examination of microstructures and density of the samples produced from the AlSi10Mg alloy powder. Achieved results confirmed that wider spacing of the laser scanning lines if applied for considerably shorter manufacturing cycles, will only insignificantly increase porosity of the machined components with the pores stochastically distributed.*

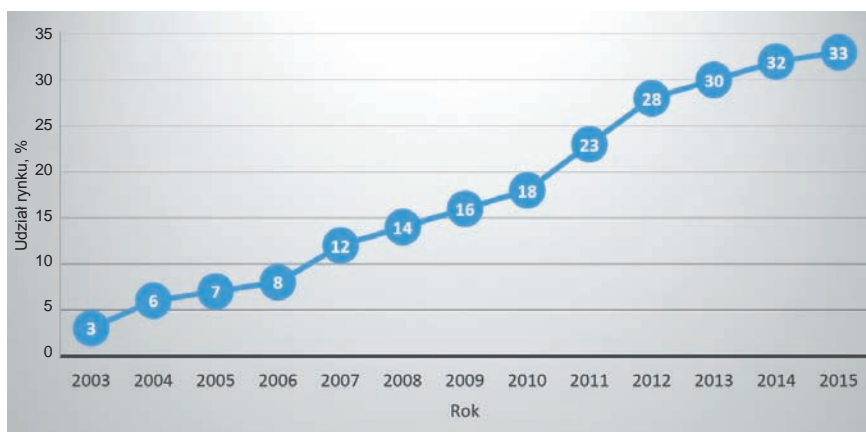
**KEYWORDS:** selective laser sintering, SLS, selective laser melting, SLM, additive manufacturing, process efficiency

Branża związana z wytwarzaniem przyrostowym (potocznie nazywanym drukiem 3D) jest obecnie jednym z najszybciej rozwijających się obszarów. Wraz z postępem technologicznym nastąpił znaczący wzrost udziału tego segmentu w całej produkcji rynkowej (rys. 1). Każdego roku stowarzyszenie Wohlers prezentuje wyniki finansowe branży wytwórczej wykorzystującej metody przyrostowe [1].

Wzrost znaczenia technik wytwarzania przyrostowego obserwuje się

również w branży narzędziowej, gdzie wykorzystywane są proszki metali i ich stopów oraz m.in. technologie selektywnego spiekania laserowego (SLS) i selektywnego topienia laserowego (SLM). Technologie SLS i SLM znajdują zastosowanie przede wszystkim w wytwarzaniu form wtryskowych oraz wkładek formujących z konformalnymi kanałami chłodzącymi. W przypadku form wtryskowych czy wkładek formujących istotne są wymagania dotyczące ich żywotności i jakości. Wytwarzanie elementów metalicznych (np. form wtryskowych) w procesach SLS/SLM opiera się na scalaniu ze sobą pojedynczych ziaren proszkowych przez oddziaływanie na nie skoncentrowaną wiązką energii laserowej. Uzyskanie wysokiej jakości elementów jest uzależnione od wielu czynników, takich jak: grubość spiekanej warstwy, prędkość i moc lasera, odległość pomiędzy poszczególnymi naświetleniami wiązki czy prędkość skanowania (ruchu wiązki lasera). Parametry te bezpośrednio wpływają na wartość gęstości energii, która jest dostarczana do spiekanej warstwy proszku i która decyduje zarówno o właściwościach mechanicznych, jak i jakości uzyskanej powierzchni.

Rozwój branży przyrostowej wymaga optymalizowania procesów SLS/SLM [2-6] pod kątem stosowanych materiałów w celu ciągłego doskonalenia otrzymywanych spieków, a zwłaszcza w celu poprawienia ich właściwości fizycznych i mechanicznych.



Rys. 1. Udział technologii przyrostowych w odniesieniu do całości produkcji [1]

\* Mgr inż. Andrzej Stwora (andrzej.stwora@ios.krakow.pl), dr inż. Grzegorz Skrabalak – Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania

Wykorzystanie technologii SLS/SLM w produkcji form wtryskowych musi być zgodne z przyjętymi kryteriami dotyczącymi: materiału, z którego będą wytwarzane (metodą wtrysku) elementy przemysłowe, oraz wielkości miesięcznej produkcji tych elementów. Na podstawie analizy dostępnych informacji można stwierdzić, że forma wtryskowa przeznaczona do produkcji dużych serii elementów z tworzyw sztucznych, którym stawia się wysokie wymagania, musi zapewniać osiągnięcie wysokich parametrów technicznych.

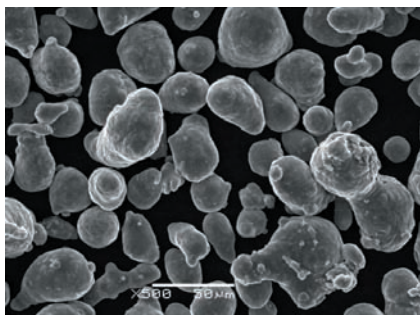
Oprócz materiałów przeznaczonych na formy wtryskowe, np. MaragingSteel MS1, w wytwarzaniu tych form metodami SLS/SLM coraz częściej wykorzystuje się materiały stanowiące alternatywę dla polimerowych i charakteryzujące się: niższą ceną, dobrą przewodnością cieplną oraz łatwą obróbką wykończeniową. Takie właściwości ma m.in. stop AISi10Mg, który znajduje zastosowanie w produkcji form wtryskowych, wkładek i wkładek formujących. Niestety, ze względu na niesferyczne ziarna proszku, niejednorodne pod względem kształtu i rozmiaru, konieczna jest optymalizacja parametrów spiekania tego materiału, aby zapewnić wymaganą wytrzymałość i jakość powierzchni elementów finalnych (narzędzi), a jednocześnie – krótki czas wytwarzania.

Do pełnej charakterystyki materiału po procesie SLS/SLM niezbędne jest przeprowadzenie badań mających na celu określenie gęstości pozornej  $\rho_p$  i struktury topografii powierzchni ( $R_a$ ,  $R_z$ ) oraz sprawdzenie mikrostruktury – by ustalić wpływ poszczególnych parametrów technologicznych na właściwości wykonanych elementów.

### Materiał i metodyka badań

Badaniom poddano materiał AISi10Mg (tabl. I) – drobnoziarnisty proszek na bazie aluminium, który charakteryzuje się wysoką przewodnością cieplną (ok. 200 W/m·K) i niewielką gęstością (2,67 g/cm<sup>3</sup>).

Na mikrofotografii (rys. 2) widać cząsteczki kompozycji proszków wchodzących w skład materiału AISi10Mg. Można zauważyć, że proszek zawiera dużą liczbę cząstek o średnicy 30÷50  $\mu\text{m}$  i nieregularnym kształcie. Taka geometria nie jest korzystna w przypadku spiekania elementów litych i bez porów.



Rys. 2. Mikrofotografia SEM proszku AISi10Mg (powiększenie 500 $\times$ )

Proces selektywnego topienia laserowego SLM prowadzono z wykorzystaniem urządzenia AM250 firmy Renishaw (rys. 3), wyposażonego w półprzewodnikowy laser włóknowy o maksymalnej mocy 400 W i długości fali ok. 1060 nm.

Podczas badań wykorzystano eksperyment planowany. Przyjęto ortogonalny plan doświadczony z trzema wielkościami wejściowymi o 15 układach planu i ramieniu gwiazdowym  $\alpha = 1$ . Zmienne parametryczne ustalono na podstawie własnych badań i przeglądu literatury.

Próbki do badań stworzono w programie AutoFab 1.8 (rys. 4). Ich wielkość dobrano tak, aby możliwe było sprawdzenie topografii powierzchni czołowej ( $R_a$ ,  $R_z$ ). Na podstawie badań sprawdzono wpływ parametrów wejściowych (tabl. II) na określone właściwości fizyczne spiekanych próbek.

TABLICA I. Skład chemiczny (%) proszku AISi10Mg

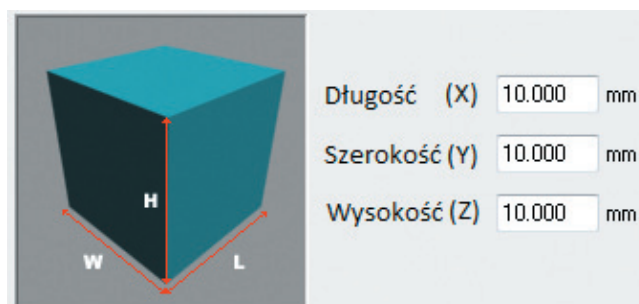
Al	Si	Fe	Cu	Mn	
87,1+89,35	9+11	0,55	0,05	0,45	
Mg	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
0,2+0,45	0,05	0,10	0,05	0,05	0,15

TABLICA II. Parametry procesu SLM

Parametry zmienne	Odległość między przejściami wiązki, mm	0,125±0,3
	Czas oddziaływania wiązki w punkcie, $\mu\text{s}$	60+170
	Moc, W	200+400
Parametry stałe	Prędkość, mm/s	2400
	Grubość warstwy proszku, $\mu\text{m}$	50
	Gaz osłonowy	argon



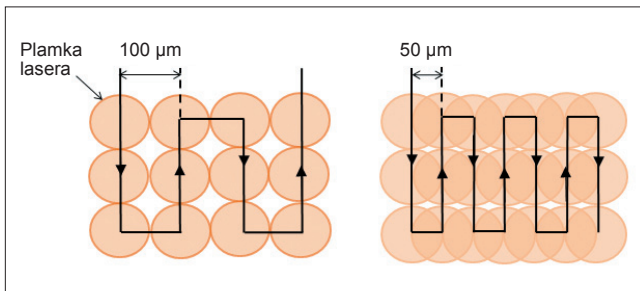
Rys. 3. Urządzenie AM250 firmy Renishaw do spiekania laserowego metodą SLS/SLM (źródło: www.renishaw.com)



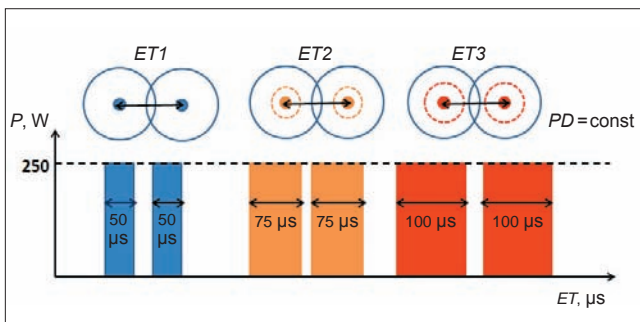
Rys. 4. Próбка do badań optymalizacyjnych

Te parametry to:

- **odległość między przejściami wiązki ( $HS$ )** mierzona między bezpośrednio sąsiadującymi ze sobą przejściami wiązki lasera (rys. 5). W zależności od wielkości plamki lasera możliwe jest zadanie tej odległości na powierzchni spiekanej warstwy;
- **czas oddziaływania wiązki w punkcie ( $ET$ )**, czyli czas naświetlenia, w jakim wiązka spieka dany punkt (rys. 6). Ten parametr jest ściśle związany z mocą lasera ( $P$ ) – im jest ona większa, tym krótszy czas oddziaływania wiązki w punkcie;
- **moc ( $P$ )**, z jaką wiązka lasera spieka dany materiał;
- **prędkość ( $SP$ )**, z jaką wiązka lasera pokonuje dany dystans.



Rys. 5. Dystans pomiędzy przejściami wiązki lasera na płaszczyźnie

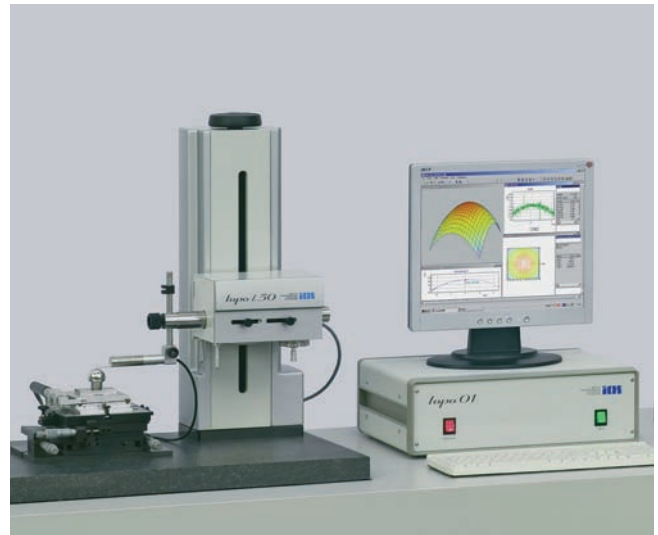


Rys. 6. Czas naświetlenia (oddziaływania) wiązki w punkcie [7]

Wytworzone próbki przebadano pod kątem właściwości fizycznych (gęstości pozornej  $\rho_p$ ) i struktury topografii powierzchni ( $Ra$ ,  $Rz$ ), a ponadto wykonano zdjęcia mikrostruktury, aby określić wielkość i ilość porów. Dodatkowo przeanalizowano możliwości skrócenia czasu wytworzenia spiekanych elementów, biorąc pod uwagę zależność wiążącą: odległość między przejściami wiązki, czas spiekania i gęstość pozorną spiekanych próbek. Gęstość pozorną  $\rho_p$  mierzono metodą nasycenia w próżni, zgodnie z normą PN-EN 632-2.

Badania struktury topografii powierzchni przeprowadzono z użyciem profilometru stykowego TOPO 01 produkcji IZTW Kraków (rys. 7). Wykorzystano głowicę pomiarową z diamentową końcówką w kształcie stożka o promieniu  $2 \mu\text{m}$  oraz kącie  $60^\circ$ . Ze względu na rozmiary próbek dobrano odcinek pomiarowy o długości  $4 \text{ mm}$ . Obliczono parametry profilu pierwotnego oraz (w niektórych przypadkach) profilu chropowatości – z zastosowaniem filtracji Gaussa,  $l_c = 2,5 \text{ mm}$ .

Do analizy mikrostruktury metodą SEM (*scanning electron microscopy*) użyto mikroskopu JSM 6460LV firmy JEOL, wyposażonego w spektrometr rentgenowski EDS produkcji firmy Oxford Instruments.

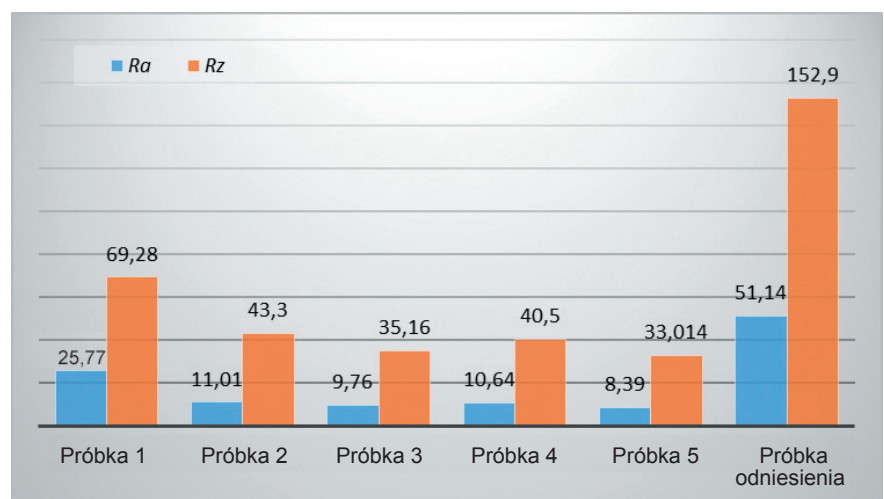


Rys. 7. Profilometr TOPO 01

## Wyniki badań

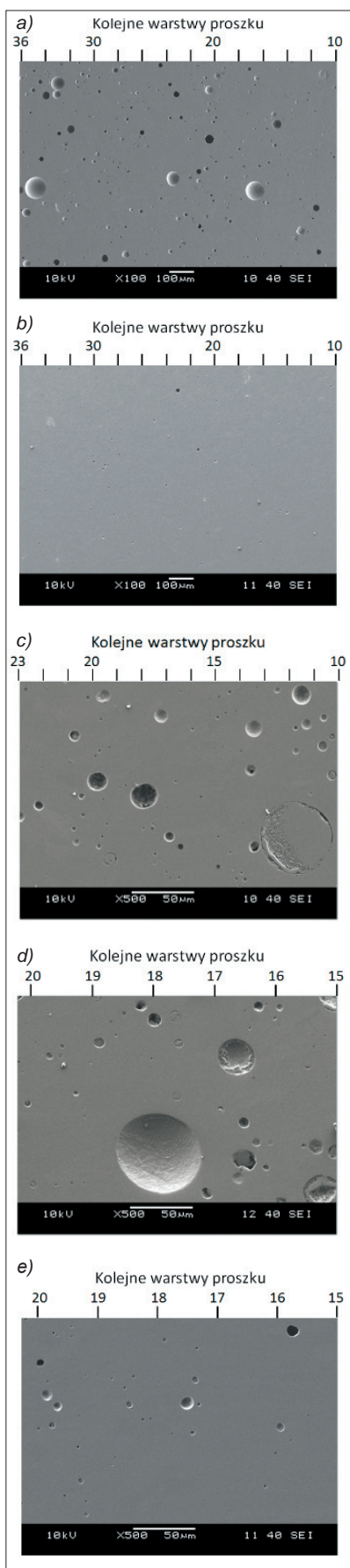
■ **Analiza topografii powierzchni (chropowatości  $Ra$ ,  $Rz$ ).** Ta analiza potwierdziła, że optymalizacja parametrów procesu spiekania (określonych przez producenta urządzenia) przyczynia się do wyraźnego zmniejszenia chropowatości powierzchni materiału AISi10Mg. Na powierzchni czołowej próbki uzyskano  $Ra$  na poziomie  $8,39 \mu\text{m}$ , podczas gdy dla próbki odniesienia ten parametr wyniósł  $51,14 \mu\text{m}$ . Wyraźnie udało się też poprawić parametr  $Rz$  – z blisko  $153 \mu\text{m}$  do  $33 \mu\text{m}$ . Można stwierdzić, że na skutek zmiany parametrów technologicznych procesu jakości powierzchni uległa znaczącej poprawie: parametr  $Ra$  zmniejszył się ok. 6-krotnie, a  $Rz$  – prawie 5-krotnie (rys. 8).

■ **Analiza mikrostruktury.** Badania jakościowe (rys. 9) ujawniły wewnętrzne wady – pory powstałe podczas wytwarzania próbek metodą SLS/SLM. Wyniki badań pokazały, że wraz ze wzrostem odległości pomiędzy kolejnymi naświetleniami wiązki zmniejsza się gęstość, co wynika ze wzrostu porowatości (rys. 9). Należy zwrócić uwagę, że pory występują stochastycznie. Połączenie między poszczególnymi warstwami jest niezauważalne, co świadczy o dobrym przetopieniu ziaren proszkowych. Występowanie porów ma związek z niesferycznymi, dużymi ziarnami (o wymiarach dochodzących do  $63 \mu\text{m}$ ). Na obrazach mikrostruktury zaznaczono schematycznie kolejne warstwy proszku w trakcie wytwarzania elementów. Z uwagi na nominalny rozmiar ziaren proszku



Rys. 8. Chropowatość powierzchni czołowej  $Ra$  i  $Rz$  (w  $\mu\text{m}$ ) dla pięciu wybranych próbek z planu badań materiału AISi10Mg





**TABLICA III. Wpływ odległości pomiędzy przejściami wiązki na czas wytwarzania elementów oraz ich gęstość (gęstość próbki w odniesieniu do gęstości pręta walcowanego 2,67 g/cm<sup>3</sup>)**

Odległość między przejściami wiązki, mm	Czas wykonania próbki o wymiarach		Czas wykonania jednej warstwy o wymiarach 100 × 100 × 0,05 mm	Gęstość próbki, %
	10 × 10 × 10 mm	100 × 100 × 100 mm		
0,125	3 h 8 min	84 h 22 min	2 min 53 s	98,50
0,2125	3 h 7 min	52 h 31 min	1 min 58 s	97,38
0,3	3 h 6 min	39 h 14 min	1 min 17 s	96,25

### Wnioski

W przypadku dużych modeli (form wtryskowych, wkładek) wraz ze wzrostem odległości pomiędzy kolejnymi naświetleniami znacznie skraca się czas wykonywania detali, a jednocześnie następuje niewielkie procentowe zmniejszenie gęstości spieków. Znaczne przyspieszenie wykonania produktu – nawet o 50% – bezpośrednio przełoży się na ostateczną cenę wyrobu (tabl. III). Istotne skrócenie czasu wytwarzania elementów metodami SLS/SLM pozwoli na ograniczenie kosztów wytwarzania i wzrost konkurencyjności tych metod względem metod tradycyjnych (frezowania, toczenia itp.).

Rozkład ziaren podczas rozpraszania warstwy docelowo spiekanej oraz niesferyczny kształt ziaren materiału AlSi10Mg powodują, że wytwarzane elementy są porowate, co ma bezpośredni wpływ na jakość wykonania. Odpowiednio dobrane parametry technologiczne zapewniają całkowite przepiętowanie między warstwami spiekany. Podczas zwiększania odległości pomiędzy kolejnymi przejściami wiązki widać, że pomimo wzrostu porowatości pory występują stochastycznie, a strefy łączenia warstw spiekania są niezauważalne.

Zaprezentowane podejście związane z optymalizacją parametrów procesu SLS/SLM na potrzeby wytwarzania elementów z proszków metali i ich stopów pozwala na znaczące skrócenie czasu wytwarzania wyrobów (tabl. III) – niemal bez straty na jakości – oraz obniżenie ceny, co jest istotne zwłaszcza w przypadku produkcji wyrobów wielkogabarytowych (np. form wtryskowych).

### LITERATURA

1. Wohlers T. "Additive manufacturing state of the industry". *Wohlers Report 2015*. Wohlers Associates Inc., USA 2015.
2. Monzón M.D., Ortega Z., Martínez A., Ortega F. „Standardization in additive manufacturing: activities carried out by international organizations and projects”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 76, Iss. 5 (2015): pp. 1111÷1121.
3. Stwora A. „Optymalizacja procesu selektywnego spiekania laserowego w celu zmniejszenia chropowatości powierzchni wykonanych części”. *Mechanik*. R. 87, nr 12 (2014): s. 999÷1001.
4. Kempen K., Thijs L., Yasa E., Badrossamay M., Verheecke W., Kruth J.-P. "Process optimization and microstructural analysis for selective laser melting of AlSi10Mg". Referat wygłoszony podczas International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austi, Texas, USA, 6÷8 sierpnia 2011 r. (sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2011/2011-37-Kempen.pdf; dostęp: luty 2016 r.)
5. Louvis E., Fox P., Sutcliffe J. "Selective laser melting of aluminum components". *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 211, Iss. 2 (2011): pp. 275÷284.
6. Thijs L., Kempen K., Kruth J.-P., Humbeeck J.V. "Fine-structured aluminum products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder". *Acta Materialia*. Vol. 61, Iss. 5 (2013): pp. 1809÷1819.
7. Stwora A., Skrabalak G. "Influence of selected parameters of Selective Laser Sintering process on properties of sintered materials". *Journal of Achievements in Material Manufacturing Engineering*. Vol. 61, Iss. 2 (2013): pp. 375÷380.

grubość warstwy ustawiono na 50 µm. Widoczne na rys. 9 duże, kuliste kraterki w mikrostrukturze materiału powstały na skutek wyrwania (podczas przygotowywania zglądów) pojedynczych ziaren proszku, które nie zostały w pełni przepiętowane.