



Poprawa właściwości mechanicznych elementów wykonanych z proszku AlSi10Mg metodami SLS/SLM przez zagęszczenie warstwy wierzchniej spieków

To enhance mechanical properties of parts produced from AlSi10Mg powder with use of SLS/SLM methods by densification of the product surface layer

ANDRZEJ STWORA
GRZEGORZ SKRABALAK
JOANNA MASZYBROCKA *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.5-6.58>

W artykule zaprezentowano wyniki badań mających na celu poprawę właściwości mechanicznych elementów wykonanych ze stopu AlSi10Mg metodami selektywnego spiekania/topienia laserowego (SLS/SLM). W ramach prac sprawdzono wpływ zarówno obróbki wykończeniowej (toczenia na twardo oraz nagniatania tocznego), jak i orientacji próbek względem powierzchni płyty bazowej urządzenia SLS/SLM (0°, 45°, 90°) na wytrzymałość elementów. Przedstawiono też wyniki badań mikrostruktury i gęstości wykonanych elementów oraz określono wpływ obróbki wykończeniowej na stan warstwy wierzchniej.

SŁOWA KLUCZOWE: selektywne spiekanie/topienie laserowe, SLS/SLM, wytwarzanie przyrostowe, warstwa wierzchnia, AlSi10Mg, nagniatanie toczne, toczenie na twardo

The paper presents results of experiments including application of finish machining (turning and burnishing) of samples produced with SLS/SLM, as well as influence of the sample orientation against the surface of base plate during building process (0°, 45°, 90°) on tensile strength of the produced samples. There are also presented results of microstructure examination and results of density measurements. The paper also discusses the state of samples surface layer depending on the applied finishing method.

KEYWORDS: selective laser sintering/melting, SLS/SLM, additive manufacturing, surface layer, AlSi10Mg, burnishing, turning

Stopy na bazie aluminium i krzemu (Al-Si) znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle wytwórczym. Elementy ze stopów Al-Si często są wytwarzane w procesach od-

lewania oraz obróbki plastycznej. W związku z małą gęstością (ok. 2,7 g/cm³), dobrą przewodnością cieplną oraz relatywnie dobrą obrabialnością (a zwłaszcza spawalnością) stopy Al-Si z powodzeniem wykorzystuje się m.in. w przemyśle: narzędziowym (wkładki formujące z konformalnymi kanałami chłodzącymi) [1, 2], elektronicznym i maszynowym (radiatory oraz wymienniki ciepła), lotniczym (lekkie i wytrzymałe konstrukcje ażurowe) [3, 4]. Ze względu na rosnącą popularność materiałów na bazie Al-Si stopy te coraz częściej wykorzystuje się podczas wytwarzania elementów metodami przyrostowymi (takimi jak selektywne spiekanie/topienie laserowe – SLS/SLM). Do tego celu zazwyczaj stosuje się proszki AlSi10Mg oraz AlSi12Mg.

Wraz ze wzrostem możliwości zastosowania elementów wytwarzanych przyrostowo rosną też wymagania co do ich właściwości – oczekuje się zwłaszcza poprawy dokładności i jakości topografii powierzchni oraz większej wytrzymałości mechanicznej. W przypadku metody wytwarzania warstwa po warstwie oraz scalania tych warstw za pomocą wiązki lasera problemem jest uzyskanie dużej wytrzymałości mechanicznej elementów [5–8] oraz dobrej jakości powierzchni zewnętrznej (obecnie chropowatość R_a wynosi 20÷50 μm). Prowadzone na świecie badania nad technologią SLS/SLM [9–13] wskazują, że poprzez zagęszczenie próbek, a także przez modyfikację parametrów procesu spiekania/topienia, można znacznie zwiększyć wytrzymałość elementów, lecz nie można niestety poprawić jakości powierzchni – w konsekwencji wyższe są wymagania wobec obróbki wykończeniowej. Ponieważ powierzchnie uzyskane w procesie spiekania laserowego charakteryzują się dużą chropowatością, w pierwszej fazie jako obróbkę wykończeniową stosuje się obróbkę skrawaniem. W celu polepszenia jakości powierzchni oraz właściwości mechanicznych w uzasadnionych przypadkach można zastosować obróbkę wykończeniową przez nagniatanie ślizgowe lub toczne.

* Mgr inż. Andrzej Stwora (andrzej.stwora@ios.krakow.pl), dr inż. Grzegorz Skrabalak (grzegorz.skrabalak@ios.krakow.pl) – Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania; dr Joanna Maszybrocka (joanna.maszybrocka@us.edu.pl) – Instytut Nauki o Materiałach, Uniwersytet Śląski

Z uwagi na możliwość wykorzystania metod przyrostowych do wytwarzania lekkich, ażurowych konstrukcji, części wykonywane w technologii SLS/SLM ustawia się pod różnymi kątami (0° – 90°) względem powierzchni płyty bazowej urządzenia.

Próbki do badań wykonano metodą SLS/SLM, uwzględniając ich orientację w stosunku do płyty bazowej: równoległe do płyty bazowej (0°), prostopadle do płyty bazowej (90°) oraz pod kątem 45° względem płyty bazowej [7, 8]. Dodatkowo część próbek poddano procesowi toczenia oraz nagniatania w celu poprawy jakości powierzchni zewnętrznej oraz eliminacji występujących w niej porów. Tak przygotowane próbki zbadano pod względem wytrzymałościowym. W celu dokładniejszej analizy oraz uzyskania pełnej charakterystyki materiału zbadano mikrostrukturę, gęstość oraz strukturę topografii powierzchni (R_a , R_z).

Uzyskane wyniki będą podstawą do optymalizacji parametrów procesu SLS/SLM, aby w przyszłości elementy wytwarzane tą metodą były wytrzymałe i lekkie oraz dobrej jakości.

Opis prowadzonych badań

Do badań wykorzystano proszek AISi10Mg o średniej ziarnistości $50 \mu\text{m}$. Materiał ten charakteryzuje się wysoką przewodnością cieplną (ok. $200 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) i niewielkim ciężarem właściwym ($2,67 \text{ g/cm}^3$). Jest to typowy stop odlewniczy o dobrej wytrzymałości i twardości, dzięki czemu może być stosowany do wykonywania podzespołów mechanicznych przenoszących duże obciążenia. Ponieważ elementy wykonane z tego stopu mają stosunkowo niewielką wagę, zasadne wydaje się wykonywanie z niego elementów o dużych gabarytach, złożonej geometrii i cienkich ściankach – np. elementów lotniczych, radiatorów. Skład chemiczny wykorzystanego proszku zaprezentowano w tabl. I.

Na mikrofotografii (rys. 1) widać cząsteczki kompozycji proszków wchodzących w skład AISi10Mg. Można zauważyć, że proszek charakteryzuje się dużą ilością cząstek o średnicy $30\div 50 \mu\text{m}$ oraz nieregularnym kształcie (mimo że proszek jest przeznaczony do procesu SLS/SLM), co może niekorzystnie wpływać na strukturę próbek, w tym przyczyniać się do powstawania zwiększonej liczby porów (w porównaniu z próbkami wytwarzanymi z proszków sferycznych).

Próbki do badań wykonano techniką SLS/SLM z wykorzystaniem urządzenia AM250 firmy Renishaw, które wyposażono w półprzewodnikowy laser włóknowy o mocy 400 W i długości fali $1060\div 1070 \text{ nm}$. Na podstawie wcześniejszych doświadczeń [2, 11] dobrano parametry wykonania elementów testowych. Parametry pracy urządzenia zawarto w tabl. II.

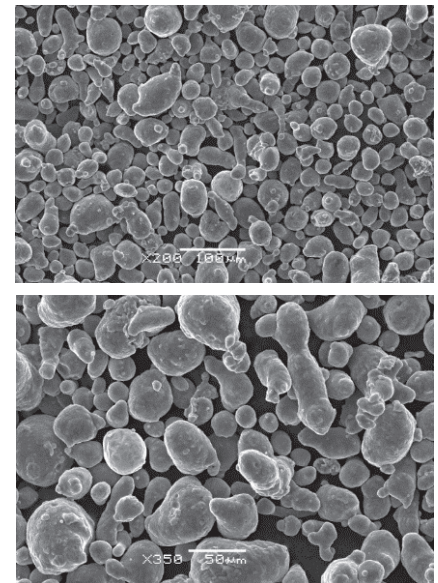
Spieki wytworzono z różną orientacją spiekania (0° , 45° , 90°) w stosunku do płyty roboczej (rys. 2), aby móc określić wytrzymałość próbek na rozciąganie.

TABLICA I. Skład chemiczny proszku AISi10Mg

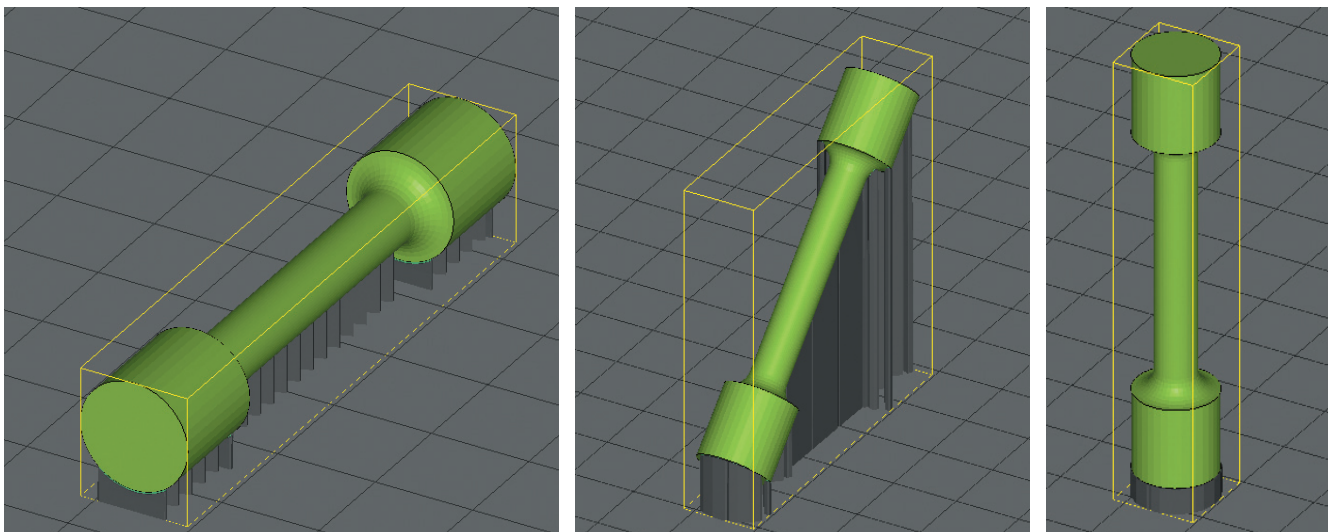
Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
87,1±89,35	9±11	0,55	0,05	0,45	0,2±0,45	0,05	0,10	0,05	0,05	0,15

TABLICA II. Parametry spiekania próbek testowych wytworzonych w technologii SLS/SLM

Moc lasera, W	Odległość między punktami, μm	Czas naświetlenia, μs	Odległość między liniami przejazdu wiązki, μm	Grubość warstwy, μm	Strategia spiekania
400	75	75	165	50	meander



Rys. 1. Mikrofotografia SEM proszku AISi10Mg w różnych powiększeniach



Rys. 2. Ułożenie próbek pod kątem 0° , 45° oraz 90° względem płyty bazowej

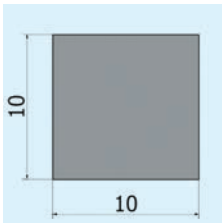
W celu sprawdzenia gęstości spieków oraz zbadania ich mikrostruktury wykonano próbki sześcienne o wymiarach $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ (rys. 3). Zgłady przygotowano z użyciem odczynnika Kellera. Przed włożeniem do mikroskopu próbki oczyszczono w myjce ultradźwiękowej.

Gęstość pozorną mierzono metodą nasycenia w próżni, zgodnie z normą PN-EN 632-2.

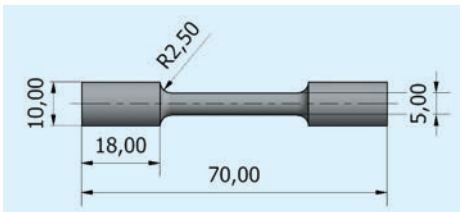
Analizę mikrostruktury metodą SEM (*scanning electron microscopy*) przeprowadzono z użyciem mikroskopu JSM 6460LV firmy JEOL, wyposażonego w spektrometr rentgenowski EDS firmy Oxford Instruments.

Na potrzeby statycznej próby rozciągania wykonano próbki o wymiarach podanych na rys. 4. Próbki badano zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1 na uniwersalnej maszynie testującej Instron 5982 (rys. 5) [14], której szybkość przesuwu trawersy wynosiła 1 mm/min .

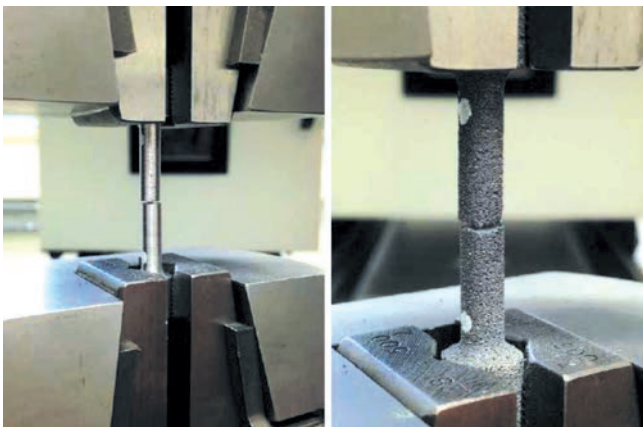
Badano właściwości mechaniczne oraz mikrostrukturę zarówno spieków surowych, jak i próbek po dodatkowych zabiegach obróbki wykończeniowej.



Rys. 3. Przekrój poprzeczny próbki do pomiarów gęstości oraz badań mikrostruktury spieków



Rys. 4. Próbki do przeprowadzenia statycznej próby rozciągania

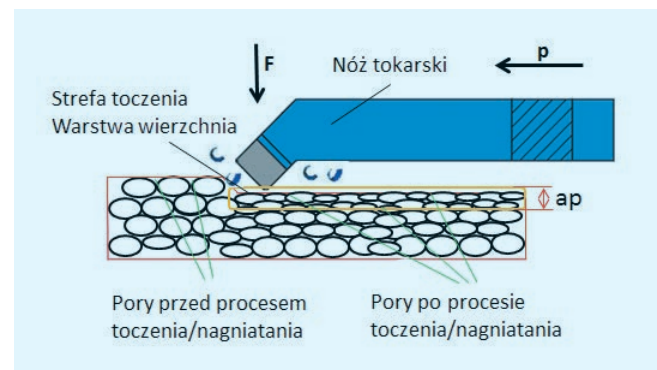


Rys. 5. Próbkę podczas prób wytrzymałościowych na maszynie Instron 5982

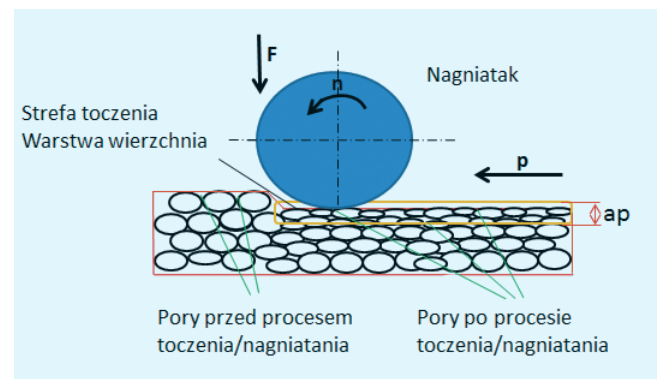
Część próbek poddano procesom toczenia (rys. 6) – z prędkością skrawania $p = 70\text{ m/min}$, posuwem narzędzia $F = 0,14\text{ mm/obr}$ i głębokością skrawania $a_p = 0,2\text{ mm}$ – oraz nagniatania (rys. 7), co nie tylko miało zmniejszyć chropowatość powierzchni próbek, lecz przede wszystkim wyeliminować pory występujące w strukturze warstwy wierzchniej. Jako obróbkę poprzedzającą nagniatanie zastosowano metodę toczenia na twardo. Niewielki posuw oraz mała głębokość skrawania zapewniły efekt usunięcia materiału z jednoczesnym zagnieceniem porów, co przelożyło się na wzrost wytrzymałości spiekanych próbek [15].

Nóż tokarski, podobnie jak element nagniatający, pod wpływem siły docisku wywołuje w strefie styku z przedmiotem obrabianym miejscowe odkształcenia sprężyste oraz plastyczne. Oczywiście w przypadku noża tokarskiego, gdzie nie występuje obrót jak w przypadku nagniataka, zmiany warstwy wierzchniej będą mniejsze (rys. 7). Wskutek odkształcenia występuje zmiana orientacji krystalograficznej ziaren oraz ich pierwotnego kształtu, co prowadzi do zmniejszenia chropowatości oraz zagęszczenia materiału w warstwie wierzchniej. Ponadto ziarna ulegają rozdrobnieniu, spłaszczeniu i wydłużeniu w kierunku największych odkształceń, tworząc teksturę zgniotu wykazującą anizotropię własności mechanicznych. Odkształcenie plastyczne zachodzi do pewnej głębokości od powierzchni, która zależy od własności plastycznych materiału i parametrów technologicznych nagniatania (prędkości nagniatania $p = 40\text{ m/min}$, posuwu nagniataka $F = 0,3\text{ mm}$, dosuwu narzędzia do powierzchni nagniatania $a_p = 0,3\text{ mm}$).

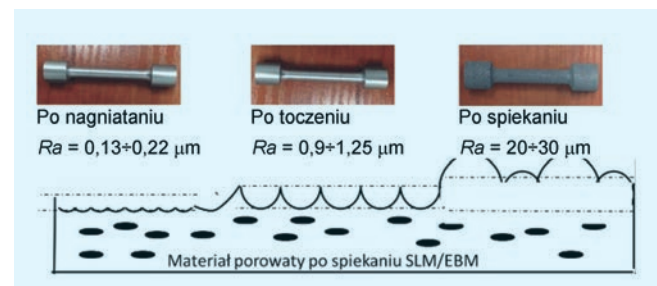
Na rys. 8 porównano próbki surowe i poddane obróbce wykończeniowej.



Rys. 6. Schemat odkształceń plastycznych (zmniejszenie chropowatości, eliminacja porów) w warstwie wierzchniej próbki podczas obróbki toczeniem



Rys. 7. Schemat odkształceń plastycznych (zmniejszenie chropowatości, eliminacja porów) w warstwie wierzchniej próbki podczas obróbki nagniataniem



Rys. 8. Próbki po procesie nagniatania, toczenia i spiekania

Analiza wyników badań mikrostruktury

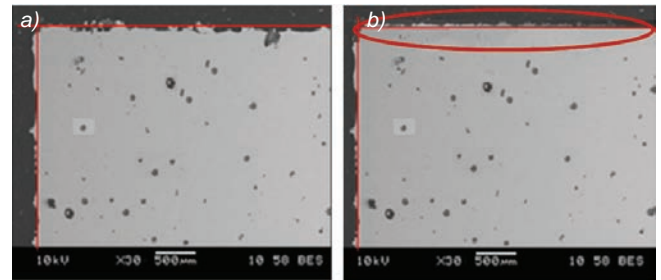
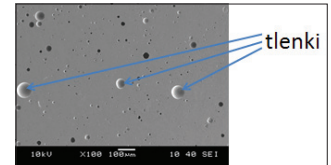
Badania jakościowe wybranych próbek ujawniły wewnętrzne wady/pory powstałe podczas wytwarzania próbek metodą SLS/SLM. Mimo że próby spiekania stopu AlSi10Mg są przeprowadzane w atmosferze argonu, przy zawartości tlenu nie większej niż 0,1%, to jednak sam proces napełniania komory materiałem proszkowym może doprowadzić do powstawania tlenków przez kontakt z powietrzem atmosferycznym. Takie prowadzenie procesu powoduje, że nawet zastosowanie lasera o mocy 400 W przy nie najlepszej optymalizacji parametrów spiekania może doprowadzić do zbyt niskiej energii w punkcie i w konsekwencji do nieprzetopienia tlenków. Na ten problem zwrócili uwagę w swoich artykułach m.in. L. Thijs i współautorzy [16] oraz E. Louvis i współautorzy [17]. Warto podkreślić, że pory występują stochastycznie, a połączenie między poszczególnymi warstwami jest niezauważalne, co świadczy o dobrym przetopieniu ziaren proszkowych [2] i potwierdza występowanie tlenków (rys. 9).

Analiza mikrostruktury próbek potwierdza, że toczenie na twardo powoduje wyraźne zmniejszenie chropowatości powierzchni oraz liczby porów w warstwie wierzchniej (rys. 10), w tym zamknięcie porów otwartych. Jeszcze mniejszą porowatością charakteryzuje się powierzchnia poddana nagniataniu tocznemu.

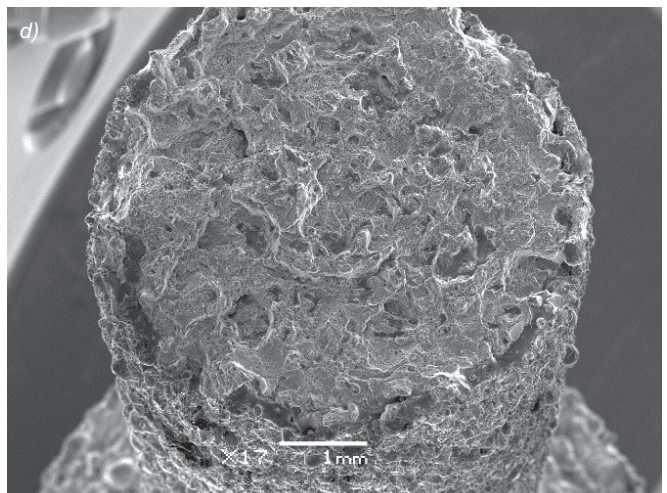
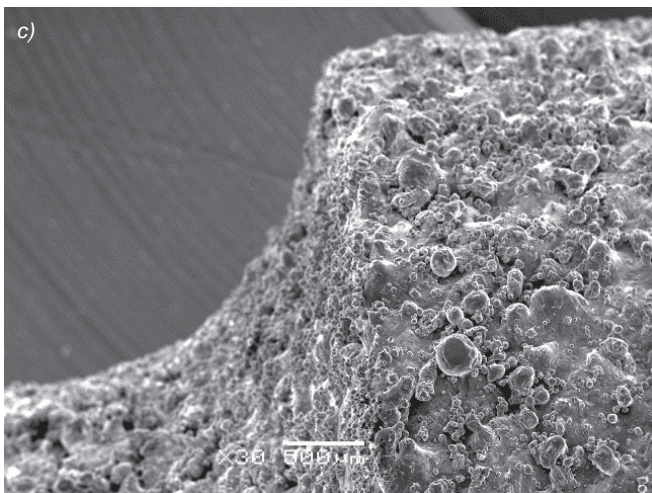
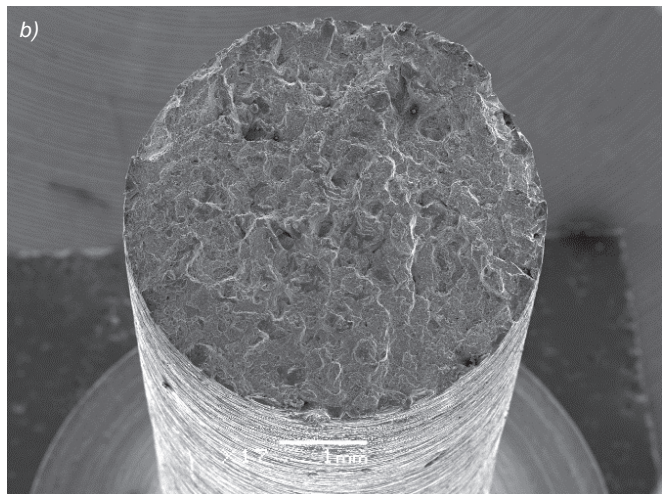
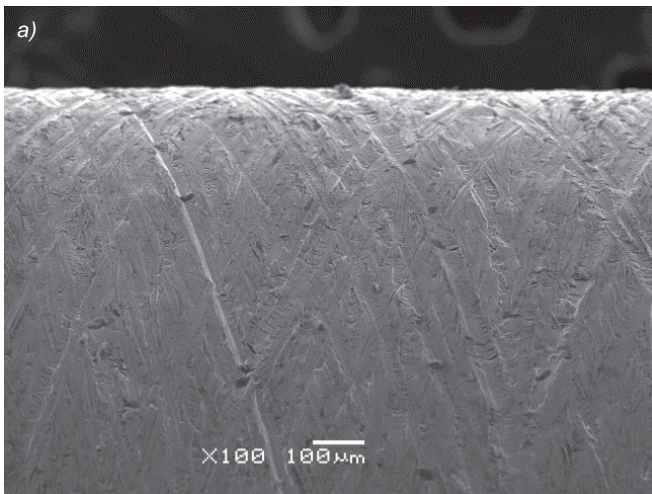
Na rys. 11 przedstawiono mikrostrukturę powierzchni próbek po obróbce wykończeniowej (po toczeniu – rys. 11a) oraz próbek surowych (rys. 11c). Na zdjęciach

można zauważyć znaczące różnice w krawędziach przekroju próbki poddanej toczeniu (rys. 11b) i próbki nieobrobionej (rys. 11d). Oprócz usunięcia zewnętrznej warstwy proszku obróbka wykończeniowa powoduje również zgniecenie ziaren w nowo powstałej warstwie wierzchniej, co z kolei objawia się regularną krawędzią widoczną na przekroju. W przypadku próbki niepoddanej obróbce wykończeniowej występują duże nieregularności/wyrwy w warstwie zewnętrznej rozrywanego elementu.

Rys. 9. Zdjęcie mikrostruktury przekroju próbki wykonanej z materiału AlSi10Mg



Rys. 10. Zdjęcie mikrostruktury przekroju próbek: a) przed toczeniem, b) po toczeniu

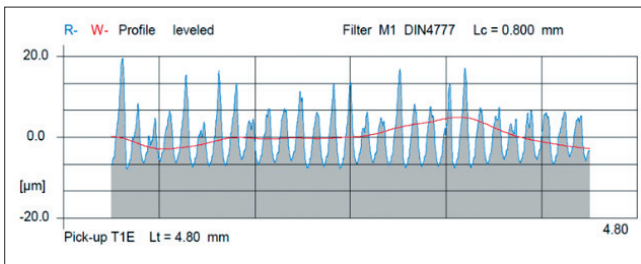


Rys. 11. Powierzchnia boczna oraz morfologia przekroju próbki XY (próbki budowanej w kierunku 90°): próbka po toczeniu (a, b) oraz próbka surowa (c, d)

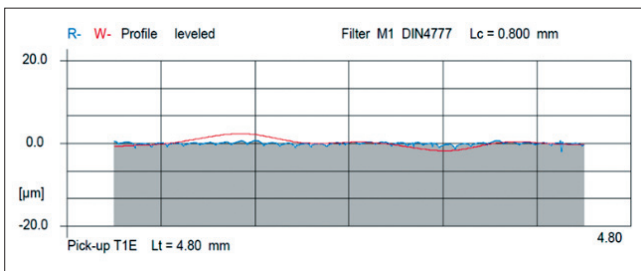
Na podstawie wyników badań gęstości stwierdzono, że próbki wykonane według dobranych parametrów charakteryzują się gęstością $2,47 \text{ g/cm}^3$, co stanowi 92,5% gęstości materiałów odlewanych ($2,67 \text{ g/cm}^3$).

Analiza mikrostruktury powierzchni wykazała znaczne zmniejszenie chropowatości powierzchni próbki spiekanej. Bezpośrednio po spiekaniu wartość R_a wynosiła $20 \div 30 \text{ } \mu\text{m}$ (rys. 12), po procesie toczenia – $0,9 \div 1,25 \text{ } \mu\text{m}$, a po procesie nagniatania – $0,13 \div 0,22 \text{ } \mu\text{m}$ (rys. 13).

Można jednoznacznie stwierdzić, że procesy toczenia na twardo oraz nagniatania tocznego mogą znacząco zmniejszyć chropowatość powierzchni materiału AlSi10Mg. Zastosowanie dodatkowej obróbki jest możliwe tylko w przypadku elementów cylindrycznych (rys. 14), co wydaje się poważnym ograniczeniem.



Rys. 12. Analiza topografii powierzchni bezpośrednio po spiekaniu



Rys. 13. Analiza topografii powierzchni po nagniataniu



Rys. 14. Próbką materiału AlSi10Mg z wyszczególnionymi obszarami po spiekaniu, toczeniu i nagniataniu

Analiza wyników badań wytrzymałości na rozciąganie

Próbki wykonane metodą SLS/SLM zostały po procesie spiekania odcięte od płyty bazowej.

Pierwszą serię próbek (dziewięć próbek – po trzy z każdego rodzaju: XY-R, 45-R, 90-R) poddano statycznej próbie rozciągania bez żadnej dodatkowej obróbki.

Druga seria próbek (dziewięć próbek – po trzy z każdego rodzaju: XY, 45, 90) została wykonana z nadładkiem wymiarowym $0,2 \text{ mm}$, a następnie poddana obróbce wykończeniowej – toczeniu na twardo do wymiarów zgodnych z normą dla próby wytrzymałościowej na rozrywanie.

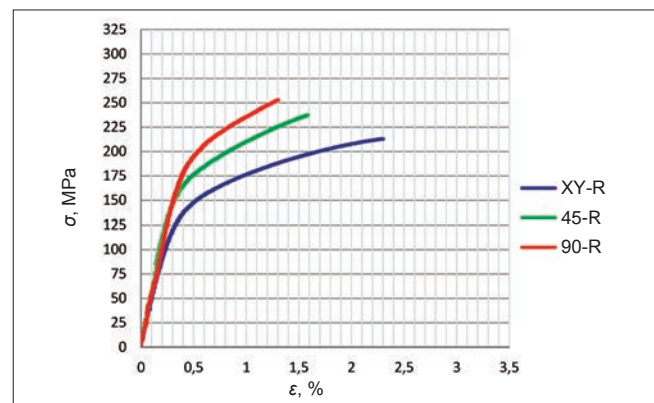
Dodatkowo przygotowano po trzy próbki oznaczone XY-N (zorientowane równolegle do płaszczyzny płyty bazowej) i wykonane z nadładkiem wymiarowym $0,3 \text{ mm}$, które poddano obróbce wykończeniowej – toczeniu na twardo oraz nagniataniu tocznemu do wymiarów zgodnych z normą dla próby wytrzymałościowej na rozrywanie.

Wyniki uzyskane dla próbek z pierwszej i drugiej serii (z uwzględnieniem kierunku spiekania w stosunku do płyty roboczej) zaprezentowano w tabl. III.

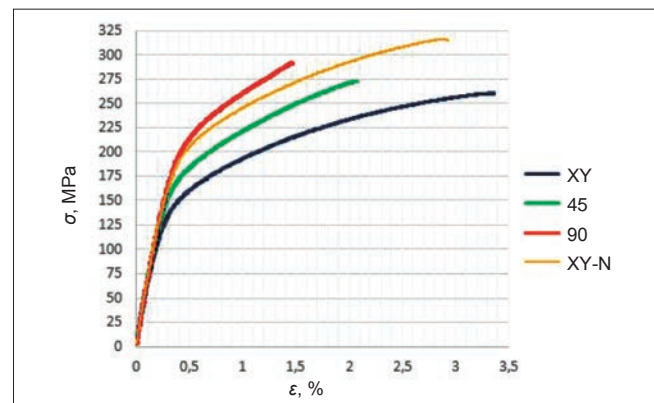
TABLICA III. Wytrzymałość na rozciąganie i odkształcenie próbek wykonanych metodą SLS/SLM, przed toczeniem i po toczeniu, w zależności od kierunku spiekania

Kierunek wytwarzania	Wytrzymałość na rozciąganie R_m , MPa	Średnie odchylenie bezwzględne, MPa	Odkształcenie przy rozciąganiu ϵ , %	Średnie odchylenie bezwzględne, %
XY	260,25	1,16	3,38	0,46
45	271,47	1,27	2,37	0,27
90	292,12	0,58	1,50	0,03
XY-R	227,61	14,46	3,04	0,16
45-R	253,02	15,27	2,20	0,10
90-R	264,36	6,51	1,43	0,02

Podczas analizowania wyników (rys. 15 i 16) zauważono, że próbki poddane procesowi toczenia cechuje lepsza wytrzymałość na rozciąganie. Ponadto takie próbki dłużej ulegają odkształceniu, zanim zostaną zerwane. Wynika to ze zwiększenia się wytrzymałości próbki po nagniataniu o ok. 40% w porównaniu z próbka po toczeniu na twardo.



Rys. 15. Wytrzymałość na rozciąganie oraz odkształcenie próbek wykonanych metodą SLS/SLM, niepoddanych obróbce wykończeniowej, w zależności od kierunku spiekania w stosunku do płyty roboczej (0° , 45° , 90°)



Rys. 16. Wytrzymałość na rozciąganie oraz odkształcenie próbek, wykonanych metodą SLS/SLM i poddanych toczeniu, w zależności od kierunku spiekania w stosunku do płyty roboczej (0° , 45° , 90°). Żółta krzywa reprezentuje próbki po nagniataniu

Wnioski

Przedstawione badania mikrostruktury i gęstości elementów wykonanych ze stopu AlSi10Mg potwierdziły, że wzrost gęstości oraz zmniejszenie porowatości w warstwie wierzchniej spieków wpływają na znaczne zwiększenie się ich wytrzymałości.

Dzięki zastosowaniu metody toczenia na twardo oraz nagniatania tocznego istotnie zmniejszono porowatość przez zagniecenie porów, co bezpośrednio wpłynęło na wzrost wytrzymałości mechanicznej badanych próbek.

Tlenki powstałe w wyniku kontaktu proszków reaktywnych, tj. AlSi10Mg i Ti6Al4V, z tlenem wymagają zastosowania wyższej temperatury przetopienia niż materiał nieutleniony.

Duża zawartość tlenków w materiale Al-Si powoduje wystąpienie obszarów nieprzetopionych, o wysokiej porowatości, co znajduje odzwierciedlenie w wytrzymałości i jakości wykonanych elementów. Duża koncentracja porów na małym obszarze spieku jest powodem pogorszenia się wytrzymałości mechanicznej elementu. Z kolei koncentracja porów związanych z obecnością nieprzetopionych, utlenionych ziaren proszku powoduje osłabienie warstwy wierzchniej, o czym można się przekonać m.in. w trakcie obróbki wykończeniowej, gdy podczas piaskowania elementu oddziaływanie ścierniwa w miejscach o zwiększonej porowatości skutkuje powstawaniem wyrw w warstwie wierzchniej.

LITERATURA

- Bremen S., Meiners W., Diatlov A. "Selective laser melting – additive manufacturing for series production on the future".
- Stwora A., Skrabalak G. „Wpływ parametrów technologicznych procesu selektywnego topienia laserowego na wybrane właściwości elementów wykonanych z proszków stopu AlSi10Mg”. *Mechanik*. 3 (2016): s. 206–209.
- Qiu C., Yue S., Adkins N.J.E., Ward M., Hassanin H., Lee P.D., Withers P.J., Attallah M.M. "Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting". *Materials Science and Engineering: A*. 628 (2015): s. 188–197.
- Leary M., Mazur M., Elambasseril J., McMillan M., Chirent T., Sun Y., Qian M., Easton M., Brandt M. "Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures". *Materials and Design*. 98 (2016): s. 344–357.
- Maskery I., Aremu A.O., Simonelli M., Tuck C., Wildman R.D., Ashcroft I.A., Hague R. "Mechanical properties of Ti-6Al-4V selectively laser melted parts with body-centred-cubic lattices of varying cell size". *Experimental Mechanics*. 55, 7 (2015): s. 1261–1272.
- Aboulkhair N.T., Everitt N.M., Ashcroft I., Tuck C. "Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting". *Additive Manufacturing*. 1–4 (2014): s. 77–86.
- Kempena K., Thijs L., Van Humbeeck J., Kruth J.-P. "Mechanical properties of AlSi10Mg produced by selective laser melting". *Physics Procedia*. 39 (2012): s. 439–446.
- Brandl E., Heckenberger U., Holzinger V., Buchbinder D. "Additive manufactured AlSi10Mg samples using selective laser melting (SLM): microstructure, high cycle fatigue and fracture behavior". *Materials and Design*. 34 (2012): s. 159–169.
- Buchbinder D., Schleifenbaum H., Heidrich S., Meiners W., Bültmann J. "High power selective laser melting (HP SLM) of aluminum parts". *Physics Procedia. Part A*. 12 (2011): s. 271–278.
- Olakanmi E.O., Cochrane R.F., Dalgarno K.W. "Densification mechanism and microstructural evolution in selective laser sintering of Al-12Si powders". *Journal of Materials Processing Technology*. 211 (2011): s. 113–121.
- 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*. 61, 2 (2013): s. 375–380.
- Kempen K., Thijs L., Yasa E., Badrossamay M., Verheecke W., Kruth J. "Microstructural analysis and process optimization for selective laser melting of AlSi10Mg". *Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings*. Austin, Texas, USA, 8–10 August 2011.
- Aboulkhair N.T., Stephens A., Maskery I., Tuck C., Ashcroft I., Everitt N.M. "Mechanical properties of selective laser melted AlSi10Mg: nano, micro, and macro properties". *Proc. of Solid Freeform Fabrication Symposium. Vol. 1. Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2015, s. 1–30.
- PN-EN ISO 6892-1:2016:09 (wersja angielska). *Metale – Próba rozciągania – Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej*.
- Dobrzyński M., Przybylski W., Waszczur P. „Ocena parametrów chropowatości powierzchni toczonych otworów w kołach zębatych obrabianych nagniataniem”. *Tribologia*. 6 (2012): s. 61–68.
- Thijs L., Kempen K., Kruth J.P., Humbeeck J.V. "Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder". *Acta Materialia*. 61, 5 (2013): s. 1809–1819.
- Louis E., Fox P., Sutcliffe C.J. "Selective laser melting of aluminium components". *Journal of Materials Processing Technology*. 211 (2011): s. 275–284.