IMiB
Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych
2020(1)
Gliwice 2020
WYDZIAŁ MECHANICZNY TECHNOLOGICZNY
POLITECHNIKA ŚLĄSKA
ZESZYTY STUDENCKICH KÓŁ NAUKOWYCH

Wpływ parametrów druku SLM na strukturę i porowatość stali 1.2709

A. Tarkiewicz[a], M. Król[b]

[a] Studentka Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

[b] Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych
email: mariusz.krol@polsl.pl

Streszczenie: Jedną z najbardziej popularnych technik wytwarzania przyrostowego wykorzystujących proszki metalu jest Selektywne Topienie Laserowe. W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu parametrów technologicznych na porowatość.

Niewłaściwy dobór wartości zmiennych takich jak: szybkość skanowania, odległość między punktami skanowania, czas naświetlania, średnica wiązki lasera oraz objętościowa gęstość energii absorpcji wpływa na jednorodność struktury oraz własności mechaniczne gotowego elementu. Celem pracy było określenie wpływu zmiennych parametrów druku SLM na strukturę oraz porowatość stali 1.2709.

Abstract: One of the most popular additive manufacturing techniques using metal powders is Selective Laser Melting. The paper presents the results of research on the impact of technological parameters on porosity.

The inappropriate selection of variables value such as: scanning speed, distance between scan points, exposure time, diameter of the laser beam, absorption energy density by volume have influence on homogeneity of the structure and strength properties. The aim of the study was to define the influence of SLM printing parameters on the structure and porosity of 1.2709 steel.

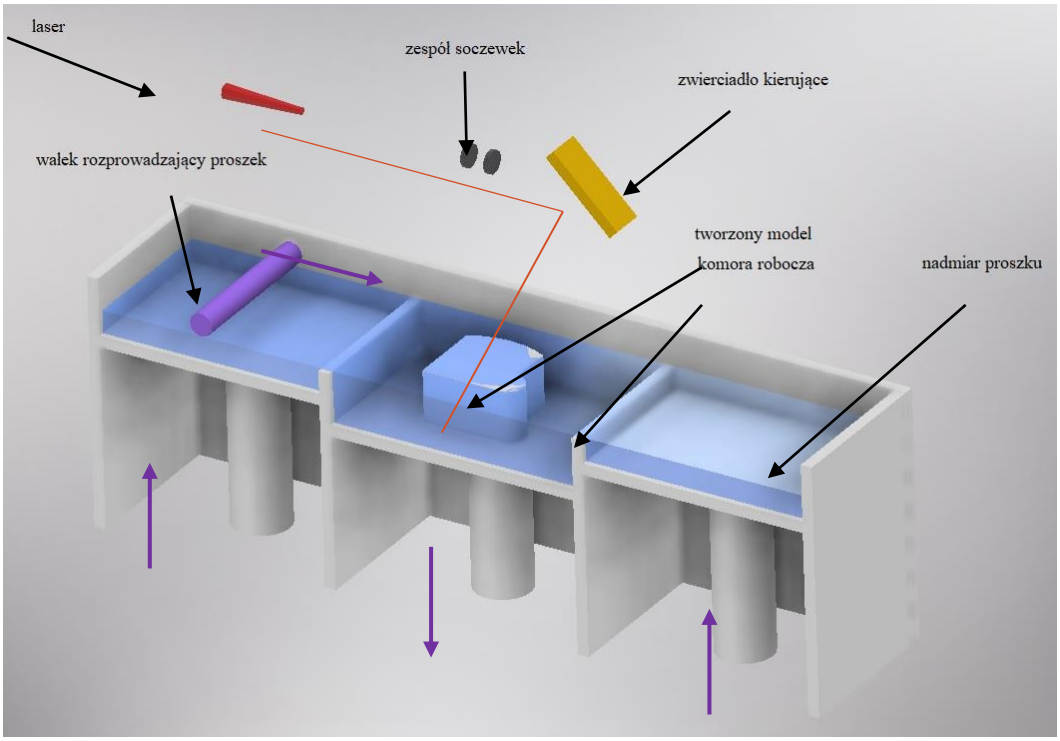
Słowa kluczowe: druk 3D, technologia selektywnego topienia laserowego, SLM, struktura, porowatość, stal

1. WSTĘP

Zainteresowanie technikami szybkiego prototypowania z roku na rok wzrasta a obszar zastosowań ciągle się powiększa. Opracowanie cyfrowego modelu daje projektantowi ogromną swobodę tworzenia elementów silnie spersonalizowanych i dostosowanych do potrzeb branży. Zmniejszenie czasu oraz kosztów produkcji zmusiło przemysł do poszukiwań rozwiązań alternatywnych, dających lepsze wyniki.

Selektywne stapianie laserowe (ang. selective laser melting- SLM) już w 1992r. opatentowano na Uniwersytecie w Teksasie. Metoda ta polega na przetopieniu proszku laserem CO2, neodymowym Nd:Yag, itrebowym, bądź nowoczesnym laserem światłowodowym. SLM zaliczane jest to przyrostowego wytwarzania modeli, prototypów oraz narzędzi. Omawiana technologia wykazuje wyjątkowe podobieństwo do selektywnego spiekania laserem (ang. Selective Laser Sintering- SLS), natomiast największą różnicą jest gęstość lasera, która w SLM pozwala na całkowite przetopienie proszków metali. Przekłada się to na uzyskanie gęstości zbliżonej do teoretycznej, czyli bardzo wysokiej szczelności modelu. Używane materiały proszkowe powinny odznaczać się wysoką czystością oraz możliwością przetopienia. Własności mechaniczne gotowego wyrobu charakteryzują się wysokimi własnościami, jak również jednorodną budową i składem chemicznym, wolnym od niepożądanych domieszek [1-8].

W komorze roboczej maszyny SLM za sprawą przepływu gazu poziom tlenu zostaje obniżony praktycznie do zera. Gazami przeważnie stosowanymi w tej technologii jest argon lub azot. W zależności od klasy reaktywności używanego proszku używa się innej atmosfery ochronnej. Dla materiałów takich jak tytan czy aluminium wykorzystuje się osłonę argonu, natomiast w przypadku stali narzędziowych, stopów kobaltu i chromu istnieje możliwość stosowania atmosfery azotu ze względu na mniejszą reaktywność. Przepływ gazów ma również za zadnie ciągłe oczyszczanie komory z powstających podczas przetapiania zanieczyszczeń oraz zapobieganie oksydacji sproszkowanego materiału. Proszek jest naniesiony na platformę roboczą, gdzie jego poziom zostaje wyrównany za sprawą działania belki, bądź wałka rozprowadzającego. Kierunek padania wiązki lasera charakteryzującej się dużą mocą skupienia jest uwarunkowany danymi CAD, które są zgodne z bitmapą. Układ optyczny składający się z soczewek koncentruje wiązkę lasera. Wirtualny zapis elementu skanuje według ustalonej wcześniej geometrii dwu etapowo: granice kształtu oraz wewnętrzny obszar. Po ekspozycji laserowej platforma robocza zostaje obniżona o zadaną wysokość, następnie nałożona jest kolejna warstwa proszku i proces powtarza się aż do momentu uzyskania pożądanego produktu [2, 5-6, 8-14]. Schemat przedstawiający zasadzę działania SLM przedstawiono na rysunku 1.1.



Rysunek 1.1 Schematyczne przedstawienie zasady działania technologii SLM [9]
Figure 1.1. Scheme of SLM principle of operation [9]

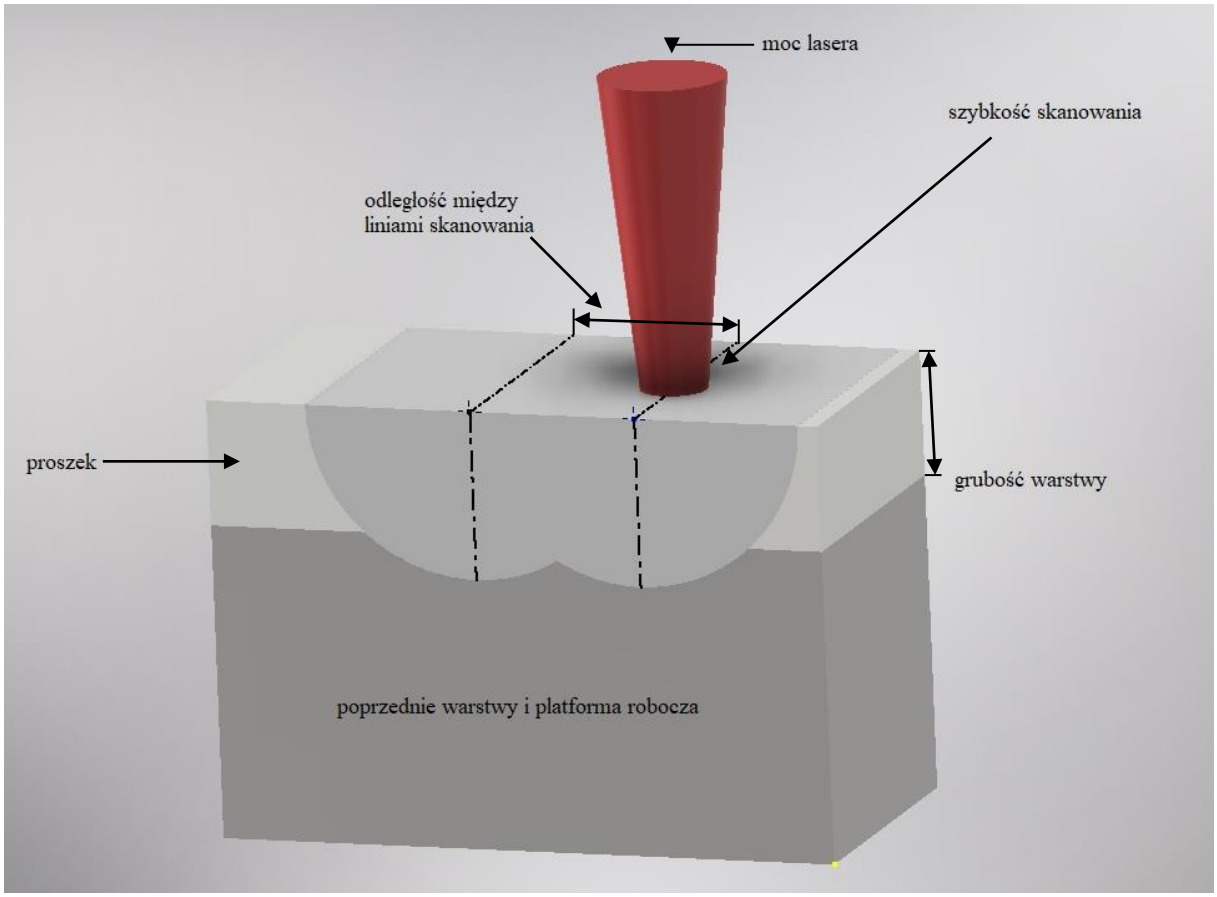
Jakość otrzymanego elementu jest ściśle związana z zastosowanymi parametrami. W wytworzonym elemencie nie ma standardowych defektów takich jak skurcz czy utlenienie z uwagi na precyzyjne ustawienie i utrzymanie zadanych czynników. Mikrostruktura powstała po procesie SLM wpływa na własności mechaniczne elementu, dlatego odpowiedni dobór parametrów ma tak istotne znaczenie [2, 10]. Parametry, którymi można manipulować w procesie selektywnego stapiana laserowego można podzielić na [2, 5, 10, 12, 15-17]:

- Parametry skupione na materiale:
  - kształt proszku,
  - rozmiar ziaren,
  - skład chemiczny proszku,
  - jednorodność proszku,
  - lejność proszku.
- Parametry skupione na opcjach drukowania (rys. 1.2) :
  - Parametry skupione na opcjach lasera:
    - tryb pracy,
    - wielkość plamki,
    - długość fali,
    - częstotliwość pracy,
    - moc
    - szybkość impulsu.

- Parametry skupione na opcjach skanowania:
  - szybkość skanowania,
  - odległość między pulsami skanera,

- sektor skanowania,
- współczynnik skalowania,
- grubość warstwy,
- kierunek skanowania.

- Parametry skupione na środowisku drukowania:
  - temperatura podgrzania,
  - rodzaj gazu ochronnego,
  - poziom ciśnienia,
  - ilość tlenu.



Rysunek 1.2. Podstawowe parametry druku SLM: moc lasera, prędkość skanowania, grubość warstwy oraz odległość pomiędzy liniami skanowania [18]
Figure 1.2. The basic parameters of SLM printing: laser power, scanning speed, layer thickness, hatch spacing [18]

Jak już wcześniej wspomniano najważniejszą własnością materiałów stosowanych w technologii SLM jest zdolność do sproszkowania oraz przetopienia [9]. Główną grupą materiałów stosowanych procesie SLM jest stal, najczęściej stale nierdzewne [1]. Ponadto istnieje możliwość tworzenia modeli z: czystego tytanu a także jego stopów, stopów cynku, stopów kobaltu, stopów miedzi, stopów niskotopliwych, stali narzędziowej, węglików krzemu, tlenków aluminium a nawet materiałów kompozytowych [2, 5, 9]. Metale o stosunkowo niskiej dyfuzyjności cieplnej, lepkości i napięciu powierzchniowym są lepszym materiałem, aby wykorzystać go w technologii SLM w porównaniu do metali o wysokich wyżej wymienionych

własnościach jak wolfram czy molibden. Wynika to z faktu, że stale, które ulegają szybszemu odparowaniu, czyli o niższej temperaturze topnienia skracają czas procesu [13].

Niewłaściwy dobór parametrów procesu może skutkować powstaniem porowatej struktury oraz występowaniem wad materiałowych. Przyczyny powstawania defektów przedstawiono w tablicy 1.1. Porowatość odnosi się do substancji stałych, jest terminem określającym wielkość, kształt, położenie, częstotliwość występowania i ilość pustych przestrzeni wewnątrz materiału. Pory można również scharakteryzować w odniesieniu do ich lokalizacji. Mogą występować w zamkniętym obszarze, łączyć się ze sobą, bądź rozprzestrzeniać się w całej objętości materiału, tworząc nieregularną sieć. Kolejnym kryterium jest budowa porów. Można je podzielić na pory zamknięte oraz otwarte, zależności czy mają kontakt z powierzchnią materiału, czy są zamknięte wewnątrz [19-20].

Tablica 1.1. Główne przyczyn porowatości oraz wady materiałowe elementów wytwarzanych techniką SLM [21-22]
Table 1.1. Main reasons of generation porosity and material defects manufactured by SLM technique [21-22]

Przyczyny porowatości	**niewystarczające przetopienie**	**obecność tlenków**	**ponowne osadzanie się odparowanych cząstek**	**efekt dziurki od klucza**
	niedopasowanie między grubością warstwy a głębokością ścieżki lasera	podatność materiału na utlenianie	gęstość lasera powoduje zarówno topienie jak i odparowanie materiału	niedopasowanie między gęstością lasera a przesunięciem wiązki lasera
	niewystarczająca gęstości energii lasera do wytworzenia przetopienia	wysokie temperatury topnienia warstwy tlenków	wtopienie zanieczyszczenia w warstwę	
	niedopasowanie między odległością pomiędzy liniami skanowania a szerokością ścieżek laserowych		wtrącenia o innej gęstości niż materiał stopowy	

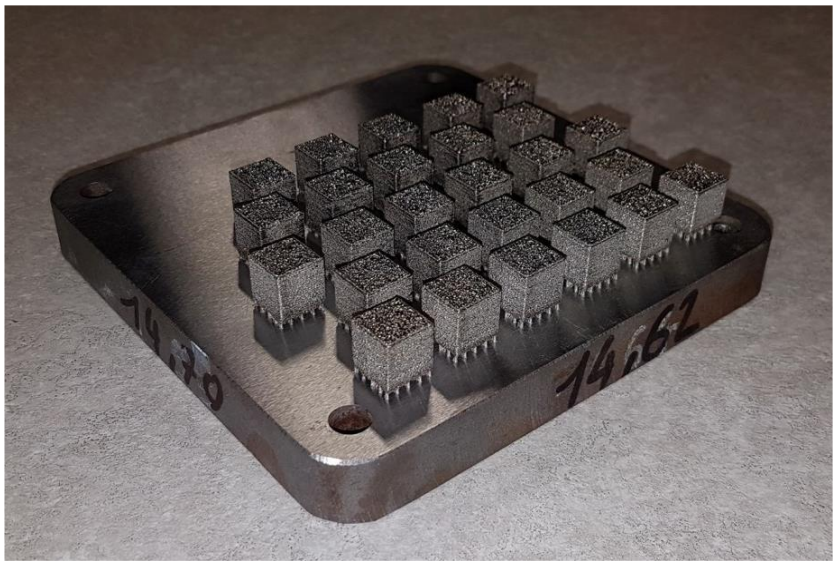
W większości przypadków tworzenia skomplikowanych, trójwymiarowych elementów, istnieje konieczność stosowania podpór. Z uwagi na duże różnice temperatur występujące pomiędzy ciekłym metalem a atmosferą komory roboczej generowane konstrukcje podporowe mają za zadanie [23-24]:

- przymocowanie elementu do platformy roboczej, w celu uniknięcia jego odkształcenia,
- stanowić konstrukcję podtrzymującą, na której zostanie wytworzony obiekt,
- odprowadzać ciepło i odpowiednio kontrolować ochładzanie.

Niezbędne wytworzenie trwałych struktur podporowych rzutuje na większe zużycie drogiego materiału. Ich kształt oraz ilość dobierana jest w zależności od wielkości i złożoności drukowanego elementu [24].

2. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Wytworzono 23 próbki ze stali 1.2709 w formie sześcianów o wymiarach: 10x10x10mm (rys. 2.1) technologią SLM. Skład chemiczny proszku stali W722 dostarczonej przez firmę Böhler Edelstahl przedstawiono w tablicy 2.1. Wielkość cząstek proszku zawiera się w przedziale od 15 do 45 µm o pozornej gęstości 3,9 g/cm3 [25].



Rysunek 2.1. Próbki w kształcie sześcianów wydrukowane technologią SLM
Figure 2.1. Samples in shape of cubics printed by SLM technology

Tablica 2.1. Skład chemiczny stali 1.2709 [25-26]
Figure 2.1. Chemical composition of steel 1.2709 [25-26]

Stal	Inne	DIN	Skład chemiczny [%]								
	oznaczenia		C	Mo	Ti	Si	Mn	Cr	Ni	S_{max}	P_{max}
1.2709	- Marge 300	X3NiCoMoTi 18-9-5	< 0,03	4,6-5,2	0,8-1,2	< 1,0	< 0,15	< 0,25	17-19	< 0,01	< 0,01

Proces selektywnego topienia laserowego przeprowadzono z wykorzystaniem urządzenia AM 125 firmy RENISHAW (rys. 2.2). Urządzenie wyposażone jest w laser światłowodowy fiber Nd:YFL o maksymalnej mocy 200W. W trakcie trwania procesu proszek za pomocą podajnika jest systematycznie porcjowany I dostarczany do platformy roboczej, nadmiar materiału za pomocą zgarniacza rozprowadzającego jest usuwany do pojemnika nadmiarowego. Ponadto, maszyna stosuje technologie próżniową oraz wyposażona jest

w szczelną, spawaną komorę, co przekłada się na niższe zużycie gazu ochronnego. Dzięki niskiej zawartości tlenu podczas procesu, urządzenie w pełni nadaje się do bezpiecznego topienia stali reaktywnej w tym tytanu I aluminium oraz materiałów reaktywnych [27-29].

Rysunek 2.2. Urządzenie do selektywnego topienia laserowego Renishaw AM125
Figure 2.2. Selective laser melting device Renishaw AM125

Warto zauważyć, że ponad 98% proszku może zostać wykorzystane po raz kolejny po dopracowaniu systemy kondycjonowania materiału. Ten aspekt rzutuje na minimalizację odpadów drogiego, metalowego proszku. Czas potrzebny na wytworzenie elementu jest silnie uzależniony od parametrów procesu, jego wielkości oraz złożoności geometrycznej [27, 29].

Dobór odpowiednich parametrów procesu ma odzwierciedlenie w strukturze a te z kolei we własnościach mechanicznych oraz uzyskanej końcowej jakości powierzchni. W celu uzyskania najefektywniejszych wyników wykorzystania technologii SLM należy dopasować parametry do wymagań stawianych gotowemu produktowi. Każda próbka została wytworzona w innych warunkach pracy maszyny.

W tablicy 2.2 zaprezentowano parametry, które zmieniały swoją wartość:

- V- szybkość skanowania [mm/s],
- PD- odległość między punktami skanowania [µm],
- EP- czas naświetlania [µs],
- HD- odległość między liniami skanowania [µm],
- LFD- średnica wiązki lasera [µm],
- E- objętościowa gęstość energii absorpcji [J/mm3],

oraz te, które pozostały na stałym poziomie:

- P- moc lasera [W],
- H- grubość warstwy [µm].

Tablica 2.2 Parametry wykorzystane do wytworzenia próbek technologią SLM
Table 2.2 Parameters used to manufactured samples by SLM technology

	Parametry zmienne						Parametry stałe	
Nazwa próbki	V [mm/s]	PD [µm]	EP [µs]	HD [µm]	LFD [µm]	E [J/mm^3]	P [W]	h [µm]
C3	450	30	50	60	70	246,91	200	30
C5	340	60	100	120	70	163,40	200	30
C6	340	30	50	60	70	326,80	200	30
C8	340	60	100	100	70	196,08	200	30
C9	340	60	100	110	70	178,25	200	30
C10	340	60	100	130	70	150,83	200	30
C12	300	60	100	110	70	202,02	200	30
C13	300	60	100	120	70	185,19	200	30
C14	300	60	100	130	70	170,94	200	30
C17	260	60	100	120	70	213,68	200	30
C21	220	60	100	120	70	252,53	200	30
C22	220	60	100	130	70	233,10	200	30
C23	340	60	100	120	90	163,40	200	30
C24	340	60	100	120	120	163,40	200	30
C25	340	60	100	120	150	163,40	200	30
C26	340	60	125	120	70	163,40	200	30
C27	340	60	125	120	90	163,40	200	30
C28	340	60	125	120	120	163,40	200	30
C29	340	60	125	120	150	163,40	200	30
C30	340	60	150	120	70	163,40	200	30
C31	340	60	150	120	90	163,40	200	30
C32	340	60	150	120	120	163,40	200	30
C33	340	60	150	120	150	163,40	200	30
Liczba zmiennych	6	2	4	5	4	13	-	-

Zmieniając tak różnorodnymi parametrami, niezbędne było wykonanie regresji, która umożliwia określenie współzmienności licznych zmiennych. Na jej podstawie wyznaczono ważność poszczególnych parametrów, wybierając najistotniejsze zmienne.

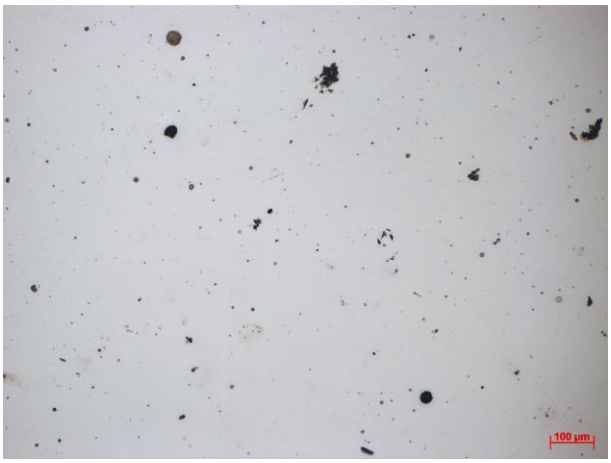
Przeprowadzono preparatykę zgładów w celu umożliwienia obserwacji struktury przy pomocy mikroskopu świetlnego Axio Observer, techniką obserwacji w polu jasnym, wykorzystując oprogramowanie do analizy obrazu Axio Vision firmy ZEISS. Wykonano po 4 zdjęcia każdej próbki przy powiększeniu 100x. Zdjęcia struktury zostały zrobione w różnych miejscach, żeby uchwycić zmienną porowatość, ze względu na nierównomierne występowanie tej wady.

Badanie powierzchniowej porowatości wykonano za pomocą programu Image-Pro Plus, który pozwala na analizę obrazu przekonwertowanego w skalę szarości. Następnie za pomocą segmentacji obiektów na zdjęciu według jasności, ręcznie ustalono zakres ich podziału. Funkcja zliczania przedstawiła w tabelce procentowy udział pustych (ciemnych) przestrzeni na powierzchni próbki w stosunku do reszty obszaru. Czynność powtórzono dla wszystkich zdjęć, wyliczając średnią i odchylenie standardowe.

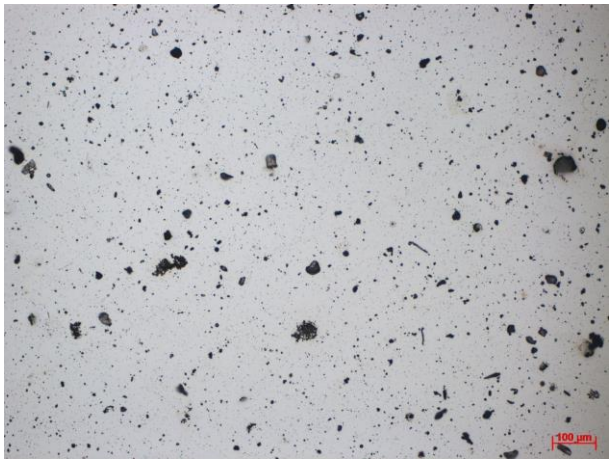
3. WYNIKI BADAŃ

Zdjęcia z mikroskopu świetlnego próbek ze stali 1.2709 wytworzonych za pomocą selektywnego topienia laserowego ujawniają zróżnicowaną porowatość (rys. 3.1- 3.4). Można zaobserwować pory otwarte widoczne na powierzchni. Na podstawie wszystkich czterech zdjęć podzielono porowatość ze względu na ilość i wielkość porów na:

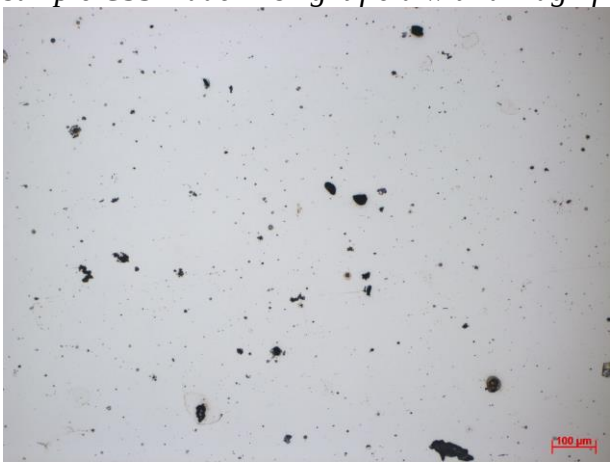
- pory o małych rozmiarach występujących w małej ilości: C5, C8, C9, C12, C13, C14, C25, C26, C28, C30, C32 (rys. 3.1);
- pory o małych rozmiarach występujących w dużej ilości: C10, C17, C21, C22, C23, C27, C29, C33 (rys.3.2);
- pory o dużych rozmiarach występujących w małej ilości: C6, C10, C12, C17, C24, C31 (rys. 3.3);
- pory o dużych rozmiarach występujących w dużej ilości: C3 (rys. 3.4).



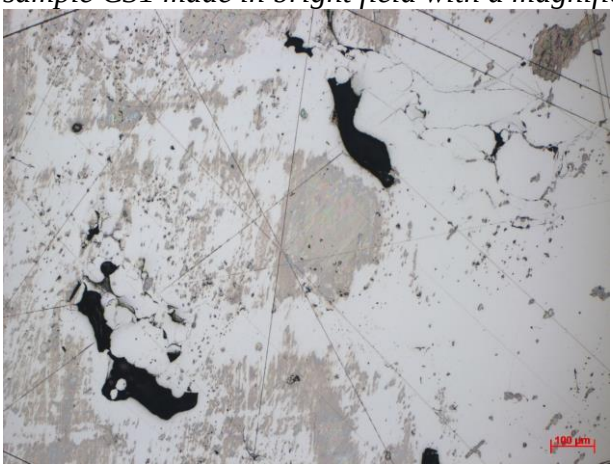
Rysunek 3.1. Zdjęcie próbki C32 wykonane w polu jasnym przy powiększeniu 100x
Figure 3.1. Structure of sample C32 made in bright field with a magnification 100x



Rysunek 3.2. Zdjęcie próbki C33 wykonane w polu jasnym przy powiększeniu 100x
Figure 3.2. Structure of sample C33 made in bright field with a magnification 100x



Rysunek 3.3. Zdjęcie próbki C31 wykonane w polu jasnym przy powiększeniu 100x
Figure 3.3. Structure of sample C31 made in bright field with a magnification 100x



Rysunek 3.4. Zdjęcie próbki C3 wykonane w polu jasnym przy powiększeniu 100x
Figure 3.4. Structure of sample C3 made in bright field with a magnification 100x

Komputerowa analiza każdego zdjęcia określiła obszar zajmowany przez pory w odniesieniu do reszty powierzchni próbki. Z uzyskanych wyników wyciągnięto średnią porowatość oraz

obliczono odchylenie standardowe (tab. 3.1). Zakres parametrów selektywnego topienia laserowego kształtuje się następująco:

- V- szybkość skanowania 220- 450 mm/s,
- PD- odległość między punktami skanowania 30- 60 µm,
- EP- czas naświetlania 50-150 µs,
- HD- odległość między liniami skanowania 60- 130 µm,
- LFD- średnica wiązki lasera 70- 150 µm,
- E- objętościowa gęstość energii absorpcji 150,83- 326, 8 J/mm3,
- P- moc lasera 200 W,
- H- grubość warstwy 30 µm.

Wynik regresji liniowej przedstawiono w tablicy 3.2. Obliczenia pozwoliły na ocenę istotności wszystkich parametrów oraz wyborze najważniejszych czynników wpływających na średnią porowatość próbek. Siła zależności pomiędzy zmiennymi wykazała, że czas naświetlania ma najmniejszy wpływ na średnią porowatość.

Tablica 3.2. Wynik regresji liniowej
Table 3.2. Linear regression result

Parametry	Współczynniki	Błąd standardowy	t Stat	Wartość-p
Przecięcie	45,7710845	23,9871451	1,908151	0,07245234
V [mm/s]	-0,03596188	0,020087868	-1,79023	0,09025274
PD [µm]	-0,268763343	0,134032391	-2,00521	0,0602147
EP [µs]	-0,001633372	0,016004962	-0,10205	0,91984205
HD [µm]	-0,078416049	0,063272785	-1,23933	0,2311388
LFD [µm]	0,016500208	0,010508215	1,57022	0,13377584
E [J/mm^3]	-0,04921403	0,03493047	-1,40891	0,17590163
	powyżej 0,5 wartość p nie ma istotnego znaczenia			

W celu oceny średniej porowatości przy stałej mocy lasera oraz grubości warstwy wykresy zostały pogrupowane według parametrów:

- V- szybkość skanowania [mm/s]

Na podstawie wykresu 3.5 można zauważyć, że przy stałej odległości między punktami skanowania- 60 µm, czasie naświetlania- 100 µs, odległości między liniami skanowania 120 µm, średnicy wiązki lasera 70 µm, lecz zmiennej objętościowej gęstości energii absorpcji w zakresie 213,68- 252,53 J/mm^3 wzrost porowatości od 0,68 do 3,61%.

Natomiast na wykresie 3.6 charakteryzującym się tymi samymi parametrami lecz większym zakresem zmienności objętościowej gęstości energii absorpcji 185,19- 252,53 J/mm^3, widać znaczny wzrost średniej porowatości do 3,61% dla szybkości skanowania równej 260 mm/s w porównaniu do 0,68- 0,86% dla odpowiednio 220 i 300 mm/s.

W odróżnieniu od poprzedniego wykresu odległość między liniami skanowania wynosi 130 µm przy zachowaniu wcześniejszych parametrów. Wykres 3.7 pokazał spadek średniej porowatości do 0,5% dla prędkości 300 mm/s przy energii 170,94 mm^{3,} w zestawieniu z porowatością 0,8 i 1,6 % dla parametrów wynoszących: szybkość skanowania 220 mm/s i objętość gęstości energii absorpcji 233,1 J/mm^3; szybkość skanowania 340 mm/s i objętość gęstości energii absorpcji 150,83 J/mm^3.

Wykres 3.8 został stworzony dla niskiej różnicy objętościowej gęstości energii absorpcji 163,4- 185,19 J/mm^3 oraz niższej odległości między liniami skanowania 120 µm, natomiast

na wykresie 3.9 zebrano większą ilość próbek mieszczących się w obrębie 163,4-252,53 J/mm^3. Linia trendu ciągle wskazuje tendencje wzrostu porowatości 07- 3,6 % uwarunkowanej wzrostem szybkości skanowania.

Próbki C5 oraz C6 charakteryzują się małą różnicą objętościowej gęstości energii absorpcji tak jak próbki C9 i C12 od 178,25 do 202,02 J/mm^3 analizowane na wykresie 3.10. Jako jedyne przedstawiają spadek średniej porowatości 0,5 i 1,1 % przy odległości między liniami skanowania liczącej 110 µm, odległości między liniami skanowania 60 µm, czasie naświetlania 100 µs oraz średnicy wiązki lasera 70 µm. Może to wynikać z wysokiej wartości odchylenia standardowego dla szybkości skanowania wynoszącej 300 mm/s dla próbki C12. Należy również wziąć pod uwagę, że wyniki komputerowej analizy obrazu w niektórych przypadkach wymagają większej ilości zdjęć, ponieważ porowatość w tym przypadku nie jest wadą występującą symetrycznie czy w określonych, powtarzających się odległościach.

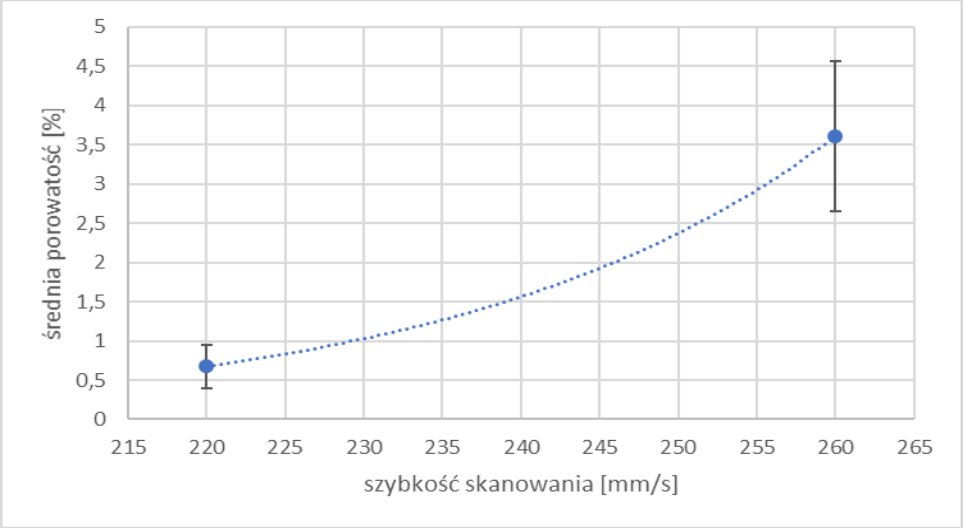
Tablica 3.1. Obliczona średnia porowatość na podstawie 4 zdjęć z mikroskopu świetlnego
Table 3.1. Calculated average porosity based on 4 pictures from light microscope

Nazwa próbki	Porowatość I [%]	Porowatość II [%]	Porowatość III [%]	Porowatość IV [%]	Średnia porowatość [%]	Odchylenie standardowe
C3	6,12	8,68	7,55	2,1	6,1	2,49
C5	1,19	1,45	0,99	0,99	1,2	0,19
C6	1,87	3,25	2,84	3,98	3,0	0,76
C8	0,91	0,78	1,78	1,27	1,2	0,39
C9	0,77	0,59	0,29	0,41	0,5	0,18
C10	1,28	2,55	1,74	1,01	1,7	0,58
C12	0,56	1,12	0,54	2,02	1,1	0,60
C13	0,64	0,62	1,51	0,66	0,9	0,38
C14	0,18	0,65	0,75	0,41	0,5	0,22
C17	2,91	4,94	2,52	4,07	3,6	0,96
C21	0,72	0,63	0,29	1,07	0,7	0,28
C22	0,46	0,76	0,94	0,91	0,8	0,19
C23	1,34	1,9	1,43	0,86	1,4	0,37
C24	1,34	1,43	5,77	2,52	2,8	1,80
C25	1,06	0,73	1,04	0,98	1,0	0,13
C26	0,91	0,55	1,13	0,96	0,9	0,21
C27	0,62	0,7	0,51	0,45	0,6	0,10
C28	0,5	0,53	0,59	0,71	0,6	0,08
C29	2,45	1,82	2,88	2,75	2,5	0,41
C30	0,62	0,27	0,79	0,45	0,5	0,19
C31	1,13	1,07	1,56	1,46	1,3	0,21
C32	0,79	0,78	0,47	1,27	0,8	0,29
C33	3,51	4,8	3,66	4,29	4,1	0,52
Maksymalna średnia porowatość [%]					6,1	
Minimalna średnia porowatość [%]					0,5	

Obie próbki, zarówno C3 jak i C6 pokazują bardzo wysoką średnią porowatość na wykresie 3.11. Idąc dalej, analizując szybkość skanowania od 340 do najwyższej uzyskanej wartości 450

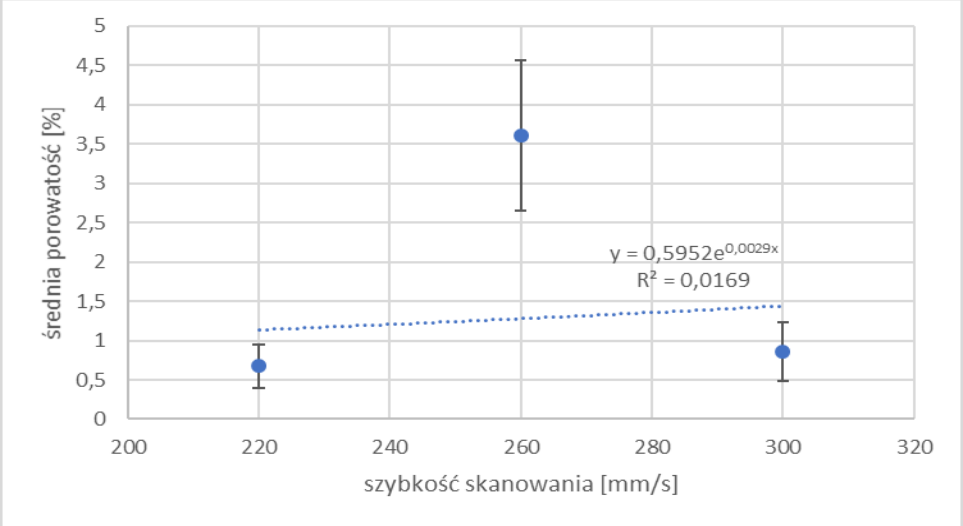
mm/s, zauważalny jest kierunek wzrostu średniej porowatości 3,0- 6,1 % przy najniższej odległości między liniami skanowania 60 µm i innej gęstości energii absorpcji 246,91- 326,8 J/mm^3. Próbki te charakteryzują się najniższymi uzyskanymi parametrami: odległość między punktami skanowania 30 µm, czas naświetlania 50 µs, odległość między liniami skanowania 60 µm, oraz średnicy wiązki lasera 70 µm.

Ostatni wykres 3.12 przedstawia zebrane wszystkie średnie porowatości 0,5- 6,11% dla różnych prędkości skanowania 220-450 mm/s, gęstości energii absorpcji 150,83- 326,8 J/mm^3, odległości między punktami skanowania 30- 60 µm, czasie naświetlania 50- 100 µs, odległości między liniami skanowania 60- 130 µm, oraz stałej średnicy wiązki lasera 70 µm.



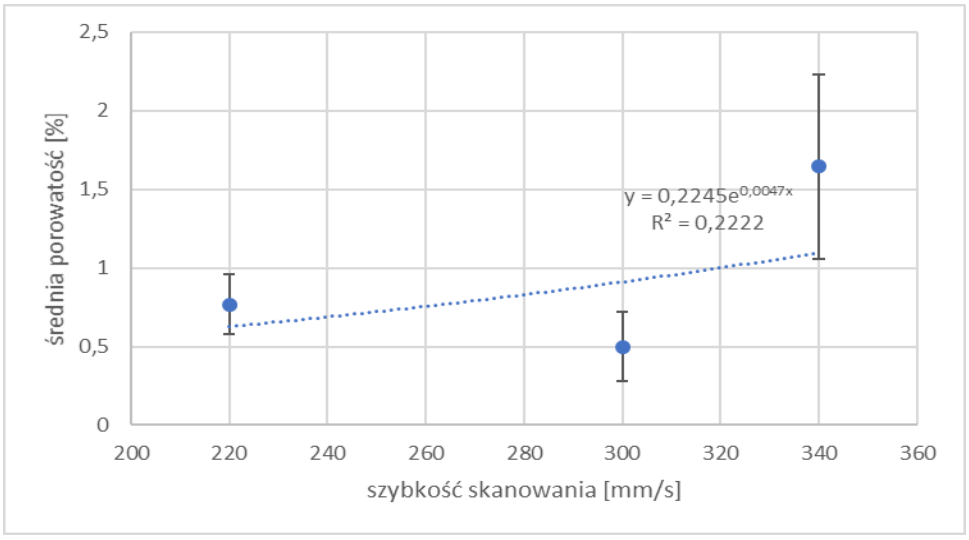
Rysunek 3.5. Wykres zależności średniej porowatości od szybkości skanowania dla próbek C17 i C21

Figure 3.5. Graph of average porosity versus scanning speed for samples C17 and C21



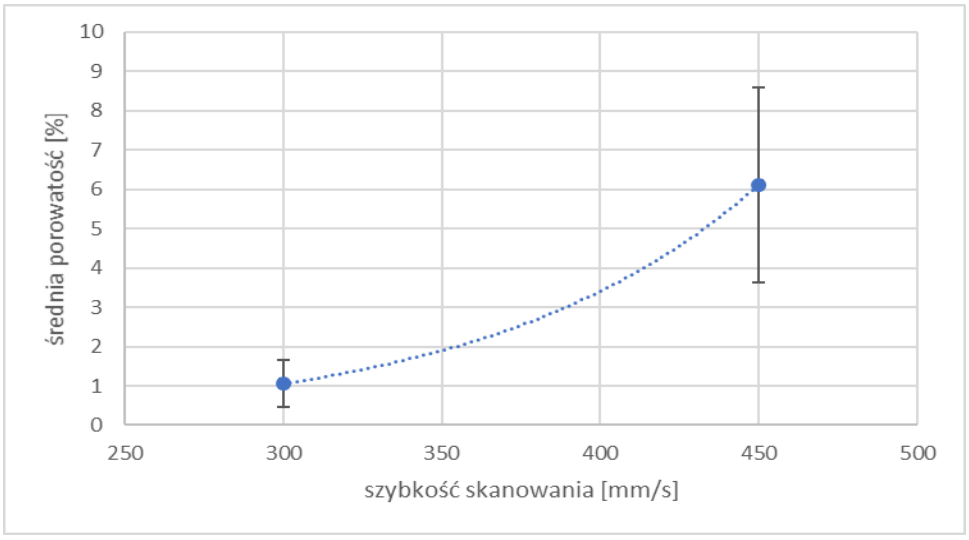
Rysunek 3.6. Wykres zależności średniej porowatości od szybkości skanowania dla próbek C13, C17 i C21

Figure 3.6. Graph of average porosity versus scanning speed for samples C13, C17 and C21



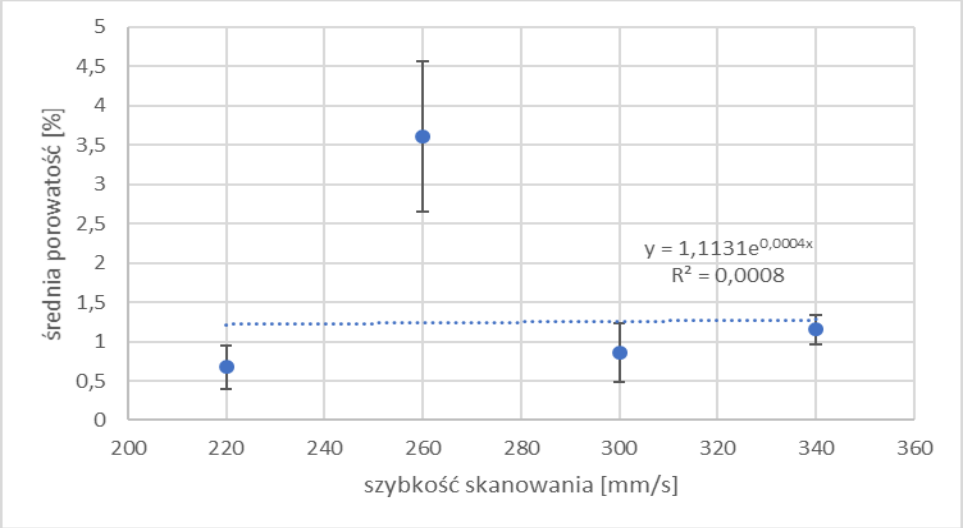
Rysunek 3.7. Wykres zależności średniej porowatości od szybkości skanowania dla próbek C10, C14 i C22

Figure 3.7. Graph of average porosity versus scanning speed for samples C10, C14 and C22



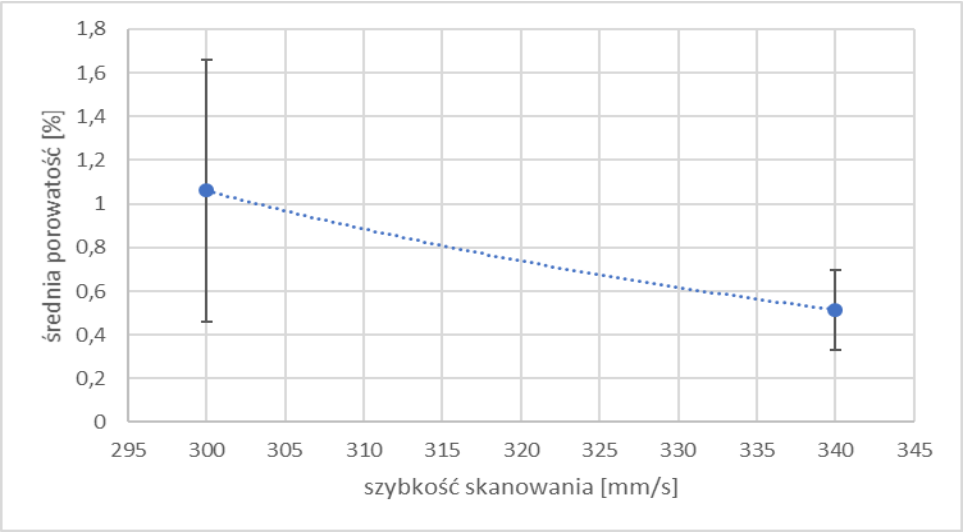
Rysunek 3.8. Wykres zależności średniej porowatości od szybkości skanowania dla próbek C5, C13

Figure 3.8. Graph of average porosity versus scanning speed for samples C5 and C13



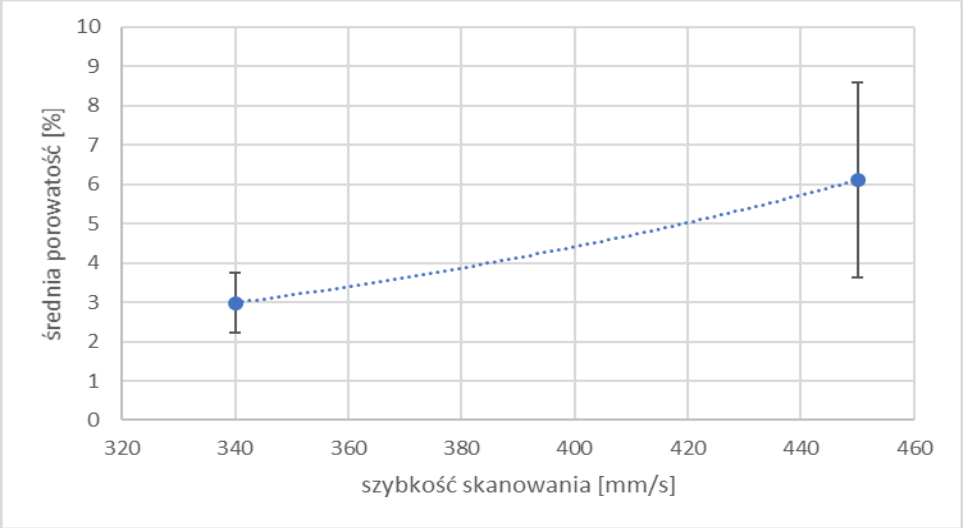
Rysunek 3.9. Wykres zależności średniej porowatości od szybkości skanowania dla próbek C5, C13, C17 i C21

Figure 3.9. Graph of average porosity versus scanning speed for samples C5, C13, C17 and C21



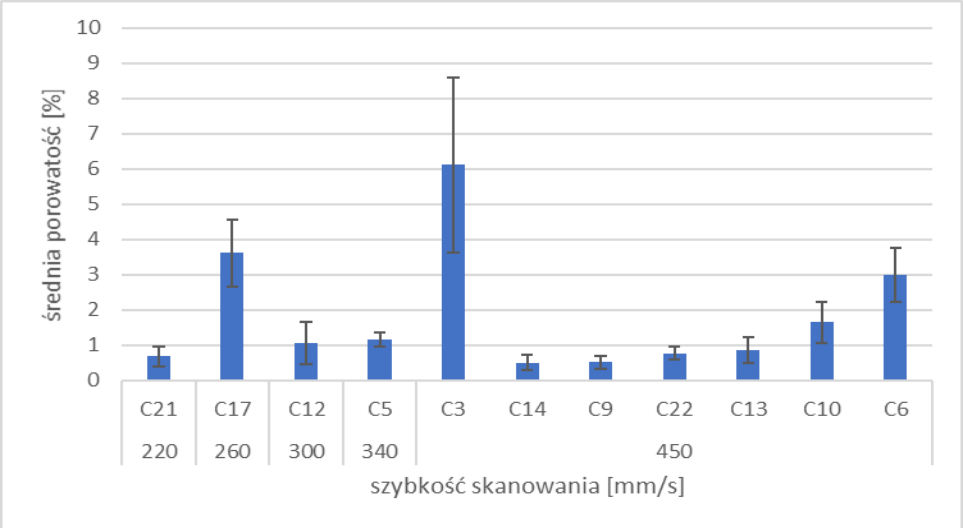
Rysunek 3.10. Wykres zależności średniej porowatości od szybkości skanowania dla próbek C9 i C12

Figure 3.10. Graph of average porosity versus scanning speed for samples C9 and C12



Rysunek 3.11. Wykres zależności średniej porowatości od szybkości skanowania dla próbek C3 i C6

Figure 3.11. Graph of average porosity versus scanning speed for samples C3 and C6



Rysunek 3.12. Wykres zależności średniej porowatości od szybkości skanowania dla wszystkich analizowanych próbek

Figure 3.12. Graph of average porosity versus scanning speed for all analysed samples

- PD- odległość między punktami skanowania [µm]

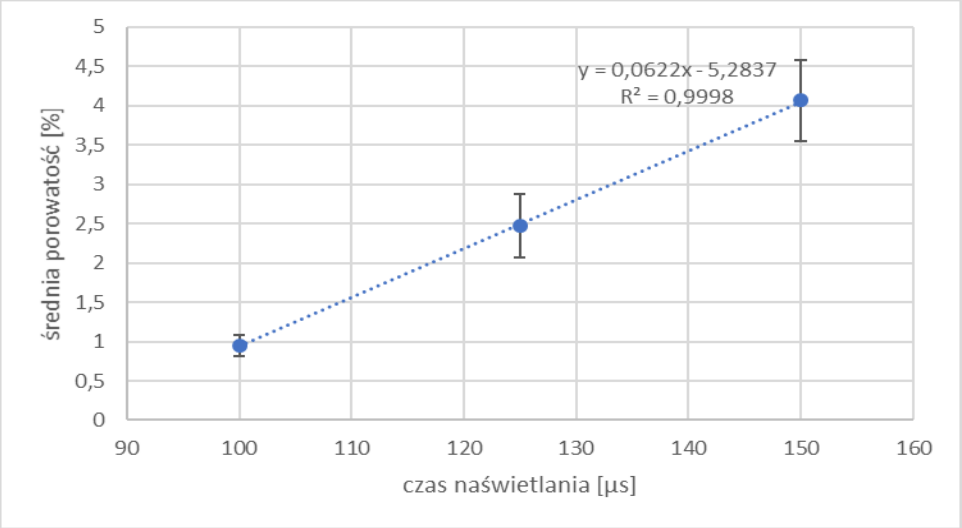
Dla odległości między punktami skanowania nie istnieje możliwość stworzenia wykresów o większości podobnych parametrów z uwagi na ilość różnych zmiennych.

- EP- czas naświetlania [µs]

W oparciu o wykres 3.13 zauważalna jest tendencja wzrostu porowatości z 1,0 aż do 4,1 % przy stałych parametrach jak szybkość skanowania 340 mm/s, odległości między punktami skanowania 60 µm, odległości między liniami skanowania 120 µm, średnicy wiązki lasera 150 µm a nawet objętościowej gęstości energii absorpcji 163,4 J/mm^3, lecz zmiennym czasie naświetlania ostałą wartość 25 µs w zakresie 100- 150 µs.

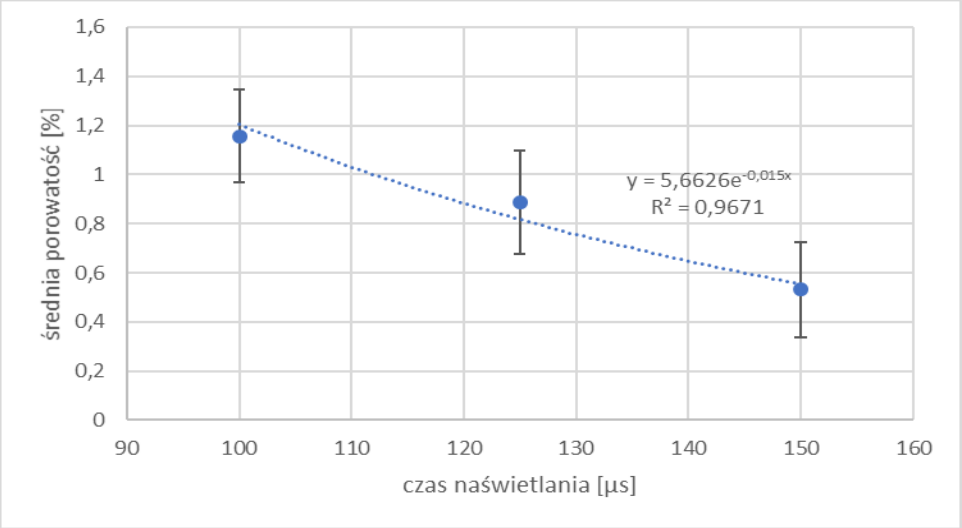
Kolejne wykresy 3.14- 3.16 wskazują na spadek porowatości dla zmieniającej się od 70 do 150 µs średnicy wiązki lasera, wzroście czasu naświetlania oraz dla reszty parametrów takich samych jak wyżej wymienione. Według wykresu 3.14 porowatość spadła z 1,2 do 0,5 %, co jest najniższym uzyskanym wynikiem przy średnicy wiązki lasera ustawionej na 70. Podobnie jak na następnym wykresie 3.15 zmieniając średnice lasera z 70 µm na wyższą wartość, czyli 90 µm porowatość zmalała o zbliżony poziom z 1,4 do 0,6 %. Wykres 3.16 stworzony został dla średnicy lasera liczącej 120 µm. W tym przypadku porowatość spadła z 2,8 do 0,8 %. Zarówno dla wykresu 3.15, jak i wykresu 3.16 wyraźnie widać obniżenie średniej porowatości przy czasie naświetlania wynoszącym 125 µs.

Ostatni wykres 3.17 rozpatrywany w kontekście czasu naświetlania obrazuje zebrane wszystkie średnie porowatości 0,5- 4,1 %w odniesieniu do zmiennego czasu naświetlania 100- 150 µs przy zmiennej średnicy wiązki lasera 70- 150 µm. Próbki C24, C29, C33 uzyskały najwyższą porowatość. Analizując stosunek czasu naświetlania do średnicy wiązki lasera widać, że jeśli średnica wiązki lasera jest wyższa o ok 20 µm od wartości czasu naświetlania porowatość osiąga wyższą porowatość w porównaniu do niższych, bądź znacznie wyższych średnic wiązki lasera od czasu naświetlania.



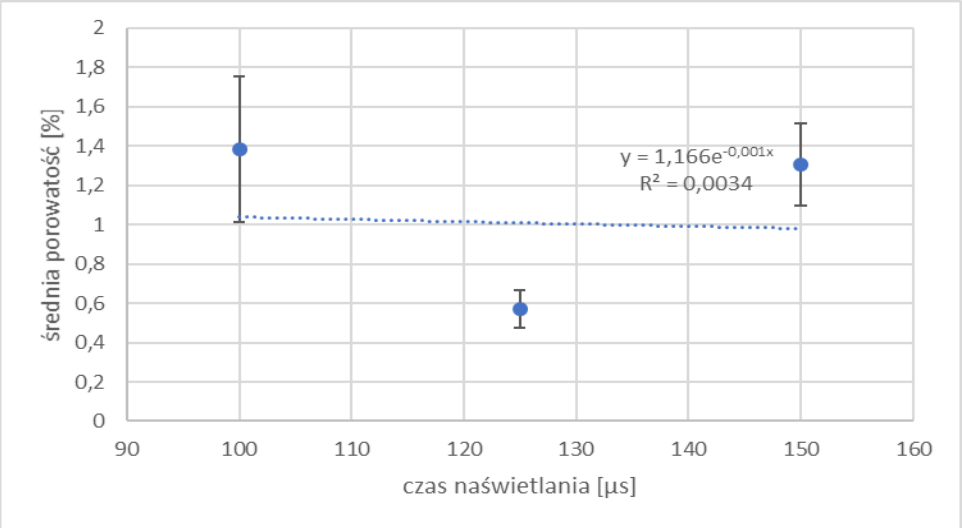
Rysunek 3.13. Wykres zależności średniej porowatości od czasu naświetlania dla próbek C25, C29 i C33

Figure 3.13. Graph of average porosity versus exposure time for samples C25, C29 and C33



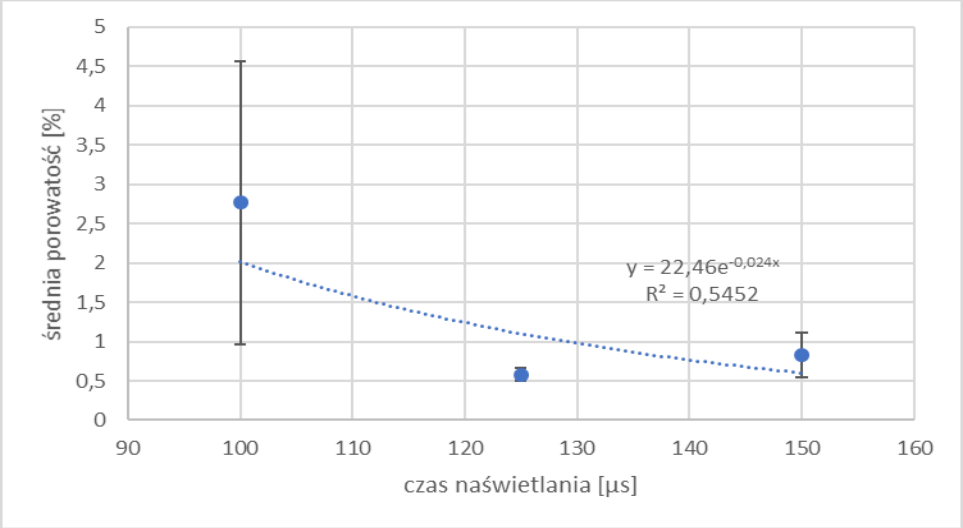
Rysunek 3.14. Wykres zależności średniej porowatości od czasu naświetlania dla próbek C5, C26 i C30

Figure 3.14. Graph of average porosity versus exposure time for samples C5, C26 and C30



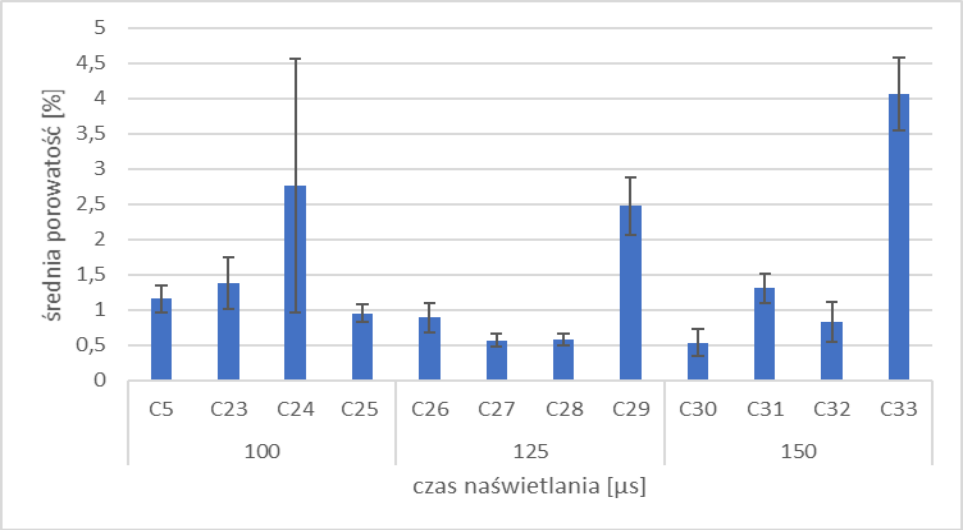
Rysunek 3.15. Wykres zależności średniej porowatości od czasu naświetlania dla próbek C23, C27 i C31

Figure 3.15. Graph of average porosity versus exposure time for samples C23, C27 and C31



Rysunek 3.16. Wykres zależności średniej porowatości od czasu naświetlania dla próbek C24, C28, C32

Figure 3.16. Graph of average porosity versus exposure time for samples C24, C28 and C32



Rysunek 3.17. Wykres zależności średniej porowatości od czasu naświetlania dla wszystkich analizowanych próbek

Figure 3.17. Graph of average porosity versus exposure time for all analysed samples

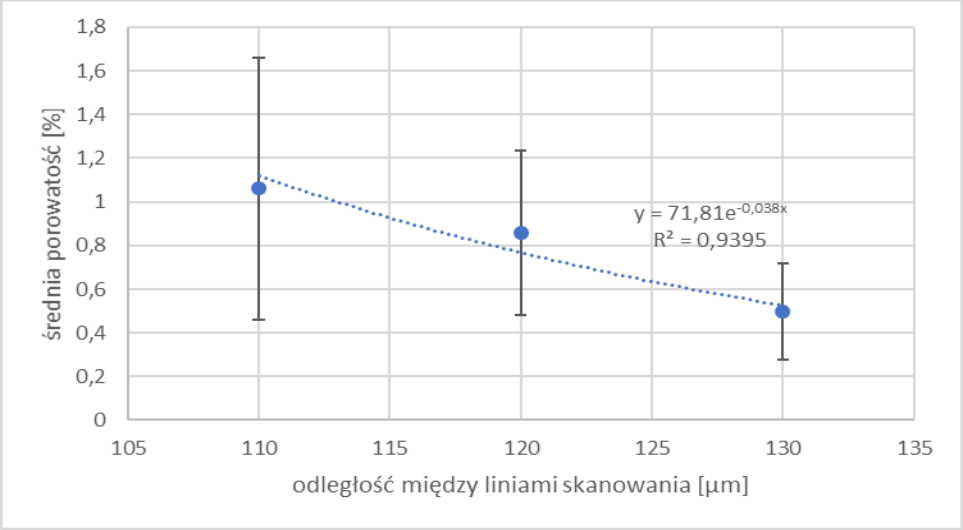
- HD- odległość między liniami skanowania [µm]

Wszystkie wykresy rozpatrywane w tej części mają stałe parametry takie jak: odległość między punktami skanowania 60 µm, czas naświetlania 100 µs oraz średnica wiązki lasera 70µm.

Zaczynając o sekcji o najniższej szybkości skanowania 220 mm/s tj. wykres 3.18, średnia porowatość nieznacznie spadła 0,7- 0,8 % wraz ze wzrostem odległości między liniami skanowania o 10 µm przy małej różnicy spadku objętościowej gęstości energii absorpcji 233,1- 252,5 J/mm^3. W odróżnieniu od pierwszego przypadku na wykresie 3.18 dla szybkości skanowania równej 300 mm/s, rosnącej objętościowej energii absorpcji 170,9- 202,0 J/mm^3, średnia porowatość maleje 1,1-0,5 % wraz ze wzrostem odległości między liniami skanowania.

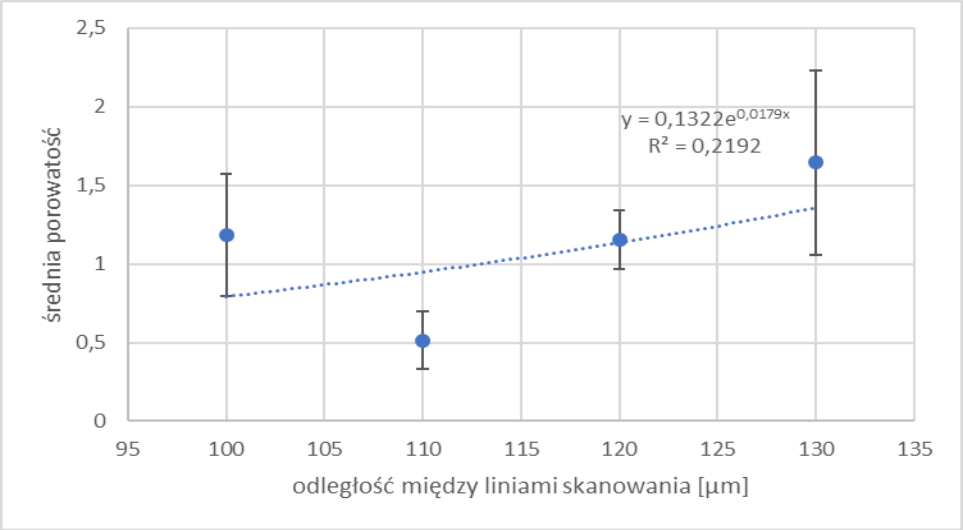
W oparciu o wykres 3.19 ponownie obserwujemy niski zakres wzrostu porowatości z 1,2 do 1,6 %, natomiast porowatość próbki C9 znacznie spadła do 0,5 % w porównaniu do reszty próbek wytworzonych przy tej samej szybkości skanowania 340 mm/s i różnej objętościowej energii absorpcji 150,8- 196,1 J/mm^3.

Średnia porowatość wszystkich próbek od 0,5 do 1,6 %została zebrana na wykresie 3.20 w stosunku do zmiennej odległości między liniami skanowania 100- 130 µm. Parametrami zmiennymi są w tym przypadku również: szybkość skanowania 220- 340 mm/s oraz objętościowa energia absorpcji 150,8- 252,5 J/mm^3. Średnia porowatość nie wykazuje dużych różnic wartości w porównaniu do poprzednich serii.



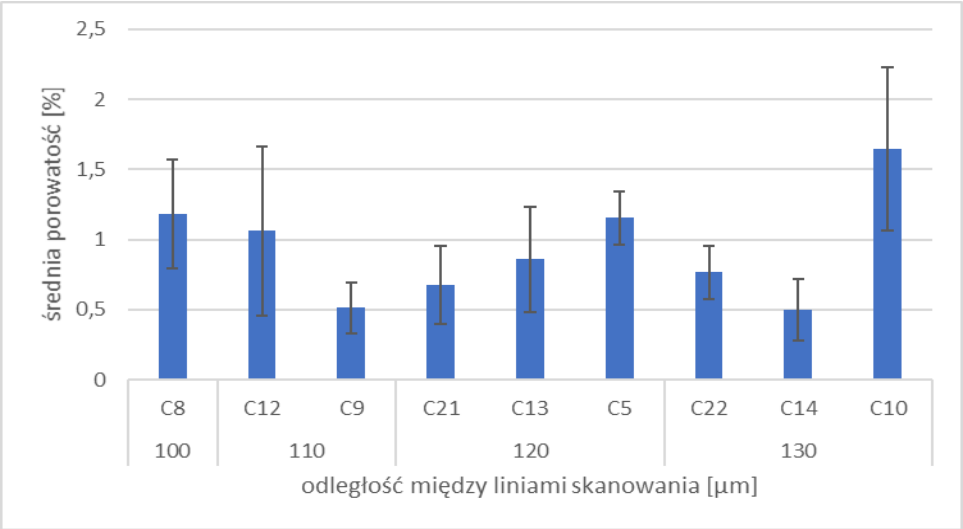
Rysunek 3.18. Wykres zależności średniej porowatości od odległości między liniami skanowania dla próbek C12- C14

Figure 3.18. Graph of average porosity versus distance between scan lines for samples C12-C14



Rysunek 3.19. Wykres zależności średniej porowatości od odległości między liniami skanowania dla próbek C5, C8- C10

Figure 3.19. Graph of average porosity versus distance between scan lines for samples C5, C8-C10



Rysunek 3.20. Wykres zależności średniej porowatości od odległości między liniami skanowania dla wszystkich analizowanych próbek

Figure 3.20. Graph of average porosity versus distance between scan lines for all analysed samples

- LFD- średnica wiązki lasera [µm]

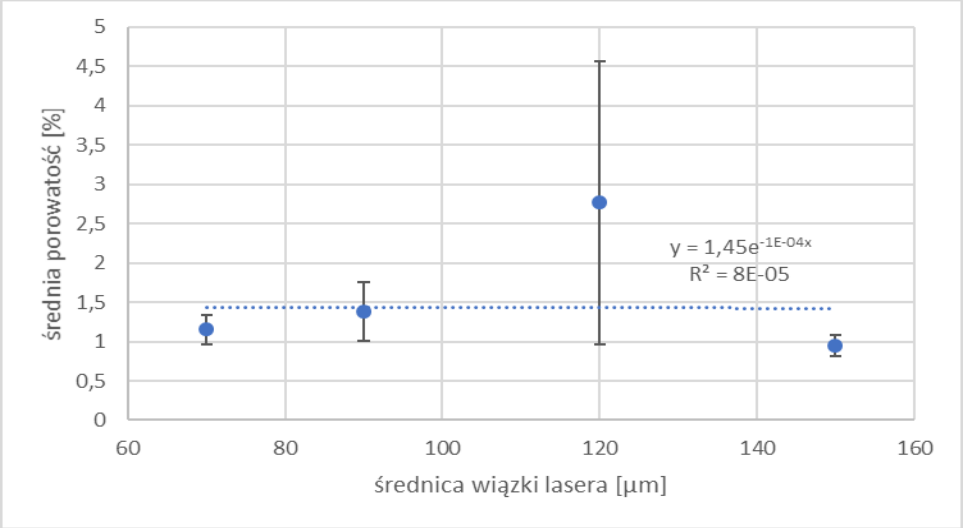
Określenie wpływu średnicy wiązki lasera na porowatość odbyło się przy stałych parametrach dla wszystkich wykresów: szybkość skanowania 340 mm/s, odległość między punktami skanowania 60 µm, odległość między liniami skanowania 120 µm oraz objętościowa gęstość energii absorpcji 163,4 J/mm^3.

Próbki C5, C23- C25 zostały przedstawione na wykresie 3.21 przy czasie naświetlania 100 µs. Porowatość rośnie wraz ze wzrostem wartości średnicy wiązki lasera do 120 µm w zakresie 1,2- 2,8%, lecz później spada do 1% przy średnicy wiązki lasera równej 150 µm.

Następny wykres 3.22 ma tendencje wzrostu porowatości 0,6- 2,5 % dla czasu naświetlania 120 µs wraz ze wzrostem średnicy wiązki lasera. Najwyższą porowatość tj. 2,5% uzyskano przy najwyższej średnicy wiązki lasera 150 µm.

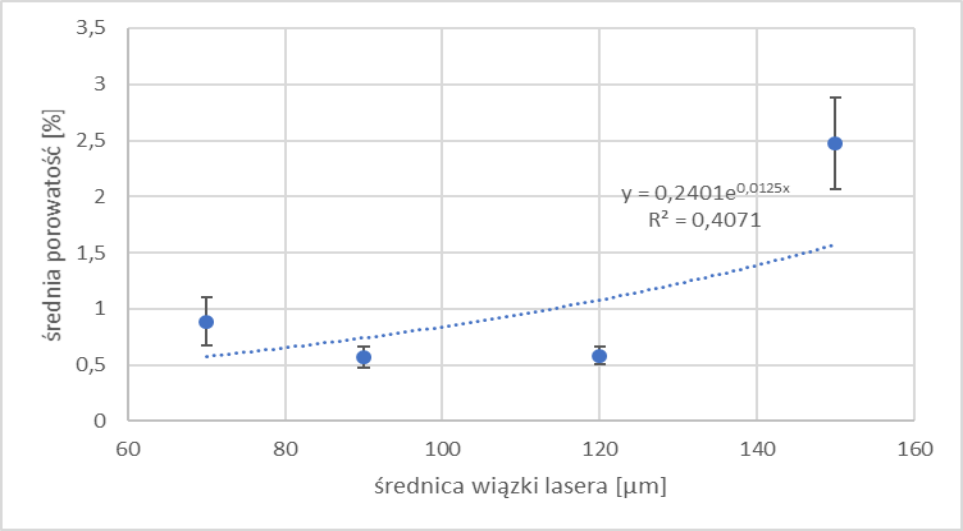
Wykres 3.23, podobnie jak poprzedni przypadek charakteryzuje się wzrostem średniej porowatości 0,5- 4,1 % dla czasu naświetlania 150 µs wraz ze wzrostem średnicy wiązki lasera. Próbka C33 również odznacza się najwyższą porowatością 4,5% przy najwyższej średnicy wiązki lasera 150 µm. Oba wykresy 3.22 i 3.23 pokazują, że średnia porowatość dla średnicy wiązki lasera 70-120 µm utrzymuje się na zbliżonym poziomie 0,6- 1,3%.

Średnia porowatość wszystkich próbek od 0,5 do 4,1 % została zebrana na wykresie 3.24 w stosunku do zmiennej średnicy wiązki lasera od 70 do 150 µm dla różnych czasów naświetlania 100-150 µs.



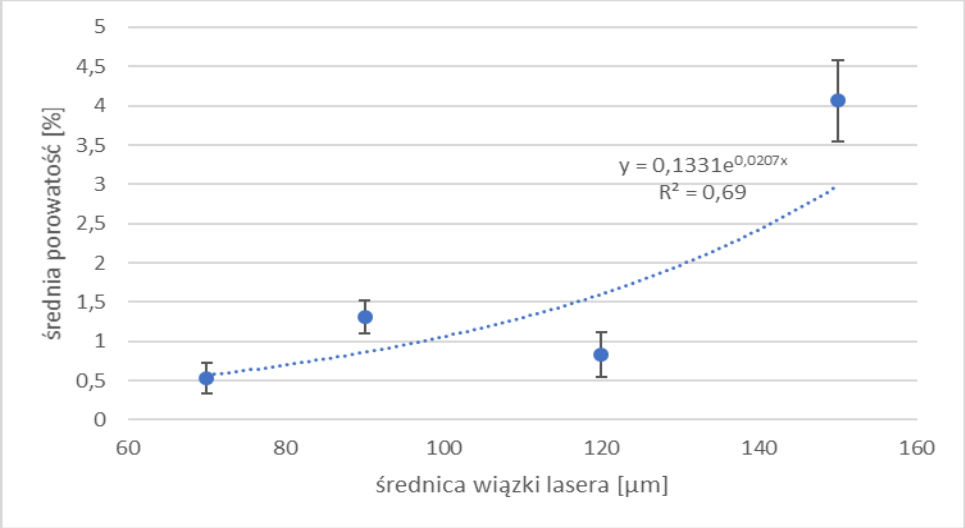
Rysunek 3.21. Wykres zależności średniej porowatości od średnicy wiązki lasera dla próbek C5, C23- C25

Figure 3.21. Graph of average porosity versus distance between scan lines for samples C5 and C23-25



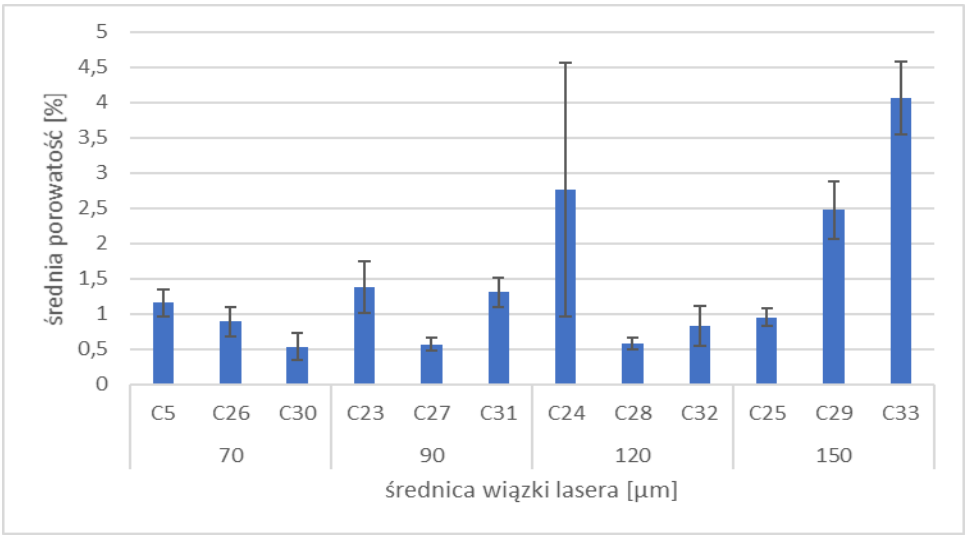
Rysunek 3.22. Wykres zależności średniej porowatości od średnicy wiązki lasera dla próbek C26- C29

Figure 3.22. Graph of average porosity versus distance between scan lines for samples C26-29



Rysunek 3.23. Wykres zależności średniej porowatości od średnicy wiązki lasera dla próbek C30- C33

Figure 3.23. Graph of average porosity versus distance between scan lines for samples C30-C33



Rysunek 3.24. Wykres zależności średniej porowatości od średnicy wiązki lasera dla wszystkich analizowanych próbek

Figure 3.24. Graph of average porosity versus distance between scan lines for all analysed samples

- E- objętościowa gęstość energii absorpcji [J/mm^3]

Dla objętościowej gęstości energii absorpcji nie można stworzyć wykresów o reszcie takich samych parametrów.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Technologia SLM zapewnia dużą dokładność, precyzje oraz spójność drukowanych elementów w krótkim czasie. Co więcej, możliwość ponownego wykorzystania proszku pozostałego po procesie i niskie zużycie energii w porównaniu do innych metod druku 3D wpływa na rosnącą popularność selektywnego topienia laserowego.

Dobór odpowiednich kombinacji parametrów stanowi najtrudniejszy etap wytwórczy. Własności mechaniczne oraz jednorodność struktury są silnie uwarunkowane poziomem wartości parametrów oraz zależności występujących między nimi. Optymalizacja czynników jest długotrwałą częścią badawczą poprzez istnienie bardzo dużej liczby zadanych parametrów.

Porowatość materiału w odniesieniu do zastosowań, może być w niektórych przypadkach pożądana. Jedną z takich branż jest medycyna. Należy natomiast liczyć się ze zmniejszeniem własności mechanicznych wynikających ze spadku gęstości struktury.

Najwyższą porowatość uzyskała próbka C3, której wartość wyniosła 6,1% dla większości najniższych zadanych parametrów: średnia szybkość skanowania- 340 mm/s, odległość między punktami skanowania- 30 µm, czas naświetlania- 50 µs, odległość między liniami skanowania- 60 µm, średnica wiązki lasera- 70 µm, objętościowa gęstość energii absorpcji- 246,9 J/mm^3, mocy lasera 200 W oraz grubości warstwy 30 µm. Próbka ta cechuje się występowaniem porów o bardzo dużych rozmiarach.

Najniższą porowatością tj. 0,5 % a dokładniej 0,49 % charakteryzuje się próbka C14 wytworzona według parametrów: średnia szybkość skanowania- 300 mm/s, odległość między punktami skanowania- 60 µm, czas naświetlania 100 µs, odległość między liniami skanowania- 130 µm, średnica wiązki lasera- 70 µm, objętościowa gęstość energii absorpcji- 326,8 J/mm^3, mocy lasera 200 W oraz grubości warstwy 30 µm. Próbka ta cechuje się występowaniem porów o małych rozmiarach.

Dla większości badanych próbek zaobserwowano tendencje wzrostu średniej porowatości 0,5- 6,1% wraz ze wzrostem szybkości skanowania w zakresie od 220 do 450 mm/s. Jeden wykres odnotował spadek porowatości z 1,1 do 0,5 % przy szybkościach skanowania liczących odpowiednio 300 i 340 mm/s.

Zarówno dla prędkości skanowania 220 i 300 mm/s wyniki badań wykazały tendencje spadku średniej porowatości z 1,2 do 0,5 % dla odległości między liniami wynoszących od 100 do 130 µm, natomiast w przypadku wyżej prędkości skanowania 340 mm/s porowatość rosła 0,5- 1,6 % dla tego samego zakresu odległości między liniami skanowania.

Wpływ średnicy wiązki lasera od 70 do 130 µm na średnią porowatość próbek wskazuje na jej wzrost 0,5-4,1 % dla różnych czasów naświetlania 120 i 150 µm. Próbki wytworzone przy niższym czasie naświetlania 100 µs charakteryzują się tendencją utrzymującą się na stałym poziomie przy porowatości wahającej się w przedziale 1,0- 2,8%.

Regresja liniowa zaprezentowała istotność wszystkich parametrów w odniesieniu do średniej porowatości. Okazało się, że czas naświetlania jest najmniej istotnym czynnikiem. Z powodu braku pokrywających się parametrów nie można stworzyć wykresów określających zależność średniej porowatości od odległości między liniami skanowania oraz objętościowej gęstości energii.

PODZIĘKOWANIE

Materiał do badań wykorzystany w ramach niniejszego projektu inżynierskiego został wykonany w ramach projektu "Opracowanie materiałów kompozytowych o podwyższonej przewodności cieplnej z przeznaczeniem na narzędzia do przetwórstwa tworzyw sztucznych" sfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach umowy nr LIDER/49/0196/L-9/17/NCBR/2018.

LITERATURA

1. J. Tatarczak, Z. Krzysiak, W. Samociuk, Z. Kaliniewicz, L. Krzywonos, Przegląd nowoczesnych *technologii druku 3D obiektów metalowych*, Mechanik nr 7, 2017, s. 612-614.
2. A. Skrzypczyk, K. Topolska, M. Król, *Wytrzymałość na zginanie kompozytów polimerowych wzmacnianych tytanowymi skafoldami wytworzonymi techniką SLM*, Politechnika Śląska, Prace Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zeszyt nr 2, Gliwice, 2017, s. 218-226.
3. L. Murr, S. Gaytan, D. Ramirez, E. Martinez, J. Harnandez, K. Amanto, P. Shindo, F. Medina, R. Wicker, *Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies*, Jurnal of Materials Science & Technology 2012, 2014, s. 1-14.
4. R. Rajesh, S. Sudheer, V. Mithun, *Selective laser sintering proces- a review*, International journal of current engineering and scientific research (ijcesr), Vol. 2, 2015, s. 91 – 100.
5. A. Woźniak, M. Adamiak, *Wpływ parametrów procesu SLM na własności tytanu technicznego Grade II*, Prace Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Śląska, Zeszyt nr 1, Gliwice, 2019, s. 281-286
6. M. Król, T. Tański, *Surface Quality Research For Selective Laser Melting Of Ti-6Al-4V Alloy*, Arch. Metall. Mater., Vol. 61, No 3, 2016, s. 1291–1296.
7. Ł. Szczepański, W. Pilarczyk, A. Ambroziak, *Characteristic of Titanium Alloys used in the SLM Additive Technology*, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa Nr. 3, Gliwice, 2019, s. 31-38.
8. B. Borsuk-Nastaj, M. Młynarski, *Zastosowanie technologii selektywnego topienia laserem (SLM) w wykonawstwie stałych uzupełnień protetycznych*, PROTET. STOMATOL., 3, 2012, s. 203-210.
9. A. Skrzypczyk, K. Topolska, S. Małek, M. Król, *Kompozyty polimerowe wzmacnianie tytanowymi rusztowaniami wytworzonymi techniką SLM*, Prace Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Śląska, Zeszyt nr 2, Gliwice, 2017, s. 228-240.
10. M. Król, L. A. Dobrzański, Ł. Reimann, I. Czaja, *Surface quality in selective laser melting of metal powders*, Archives of Materials Science and Engineering, Vol. 60, Issue 2, 2013, s.87-92
11. P. Siemiński, G. Budzik, *Techniki przyrostowe*, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa, 2013.

12. A. Woźniak, M. Adamiak, *Badanie wpływu parametrów druku w procesie SLM na własności stało 316L*, Innowacyjne badania młodych naukowców, InterTechDoc, Gliwice- Ustroń, 2019, s. 233-244.
13. P. Bajaj, *SLM Manufacturing of Molybdenum, Department of Materials Science & Engineering*, The University of Sheffield, 2016, s. 6
14. M. Karoluk, A. Pawlak, E. Chlebus, *Wykorzystanie technologii przyrostowej SLM w procesie przetwarzania stopu tytanu Ti-6Al-7Nb do zastosowań biomedycznych*, Aktualne Problemy Biomechaniki, nr 8, 2014, s.81-86.
15. E. Liverani, S. Toschi, L. Ceschini, A. Fortuanto, *Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel*, Journal of material Processing Technology 2017 vol. 249, 2017, s. 255-263.
16. J. A. Cherry, H. M. Davies, S. Mehmood, N. P. Lavery, S. G. R.Brown, J. Sienz, *Investigation into the effect of process parameters on microstructure and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting*, The international Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 76, 2017, s. 869-879.
17. W. Gao, Y. Zhang, D. Ramanujan, K. Ramani, Y. Chen, Ch. B. Williams, Ch. C. L. Wang., Y.C. Sinh, S. Zhang, P. D. Zavatteri, *The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering*, Computer-Aided Design, vol. 69, 2015, s. 65-89.
18. C. Y. Yap, C. K. Chua, Z. L. Dong, Z. H. Liu, D. Q. Zhang, L. E. Loh, S. L. Sing, *Review of selective laser melting: Materials and applications*, Applied Physics Reviews 2, 041101, 2015, s. 1- 16.
19. K. Gawdzińska, B. Głowacki, *Propozycja oceny porowatości w odlewach z metalowych kompozytów nasyconych*, Archiwum Odlewnictwa, Rocznik 4, nr 14, 2004, s. 147- 148.
20. G. Czachor, *Koncepcja metody wyznaczania współczynnika porowatości materiałów o budowie komórkowej*, Inżynieria Rolnicza 4(102), Wrocław, 2008, s. 181-182.
21. J. Kruth, P. Mercelis, L. Froyen, M. Rombouts, *Binding mechanisms in Selective Laser Sintering and Selective Laser Melting*, University of Leuven, Dept. of Metallurgy and Materials Engineering, 2004.
22. *https://www.insidemetaladditivemanufacturing.com* (dostęp 19.12.2019r.)
23. *https://drukarki3d.pl* (dostęp 15.12.2019r.)
24. P. Grobelny, *Ocena wybranych parametrów topografii powierzchni materiałów metalowych otrzymywanych technikami przyrostowymi*, Rozprawa Doktorska, Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Mechanicznej, Poznań, 2019, s. 24- 27.
25. *https://www.bohler-edelstahl.com* (dostęp 20.12.2019r.)
26. *http://www.oberonrd.pl* (dostęp 20.12.2019r.)
27. L. A. Dobrzański, A. Achtelik-Franczak, *Struktura i własności szkieletowych materiałów mikroporowatych wytworzonych metodą selektywnego spiekania laserowego do zastosowań w implantologii oraz medycynie regeneracyjnej*, Open Access Library, Annal VII, Issue 1, Gliwice, 2017, s. 194-195.
28. A. Haider, L. Ma, H. Ghadbeigi, K. Mumtaz, *In-situ residual stress reduction, martensitic decomposition and mechanical properties enhancement through high temperature powder bed pre-heating of Selective Laser Melted Ti6Al4V*, Material Science and Engineering, 2017, s. 1-27.
29. *https://www.renishaw.pl* (dostęp 23.12.2019r.)