

Izabela Barwińska¹, Tomasz Durejko², Mateusz Kopec^{1,3}, Zbigniew L. Kowalewski¹

¹ Institute of Fundamental Technological Research Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland,

² Military University of Technology, Warsaw, Poland,

³ Imperial College London, London, UK

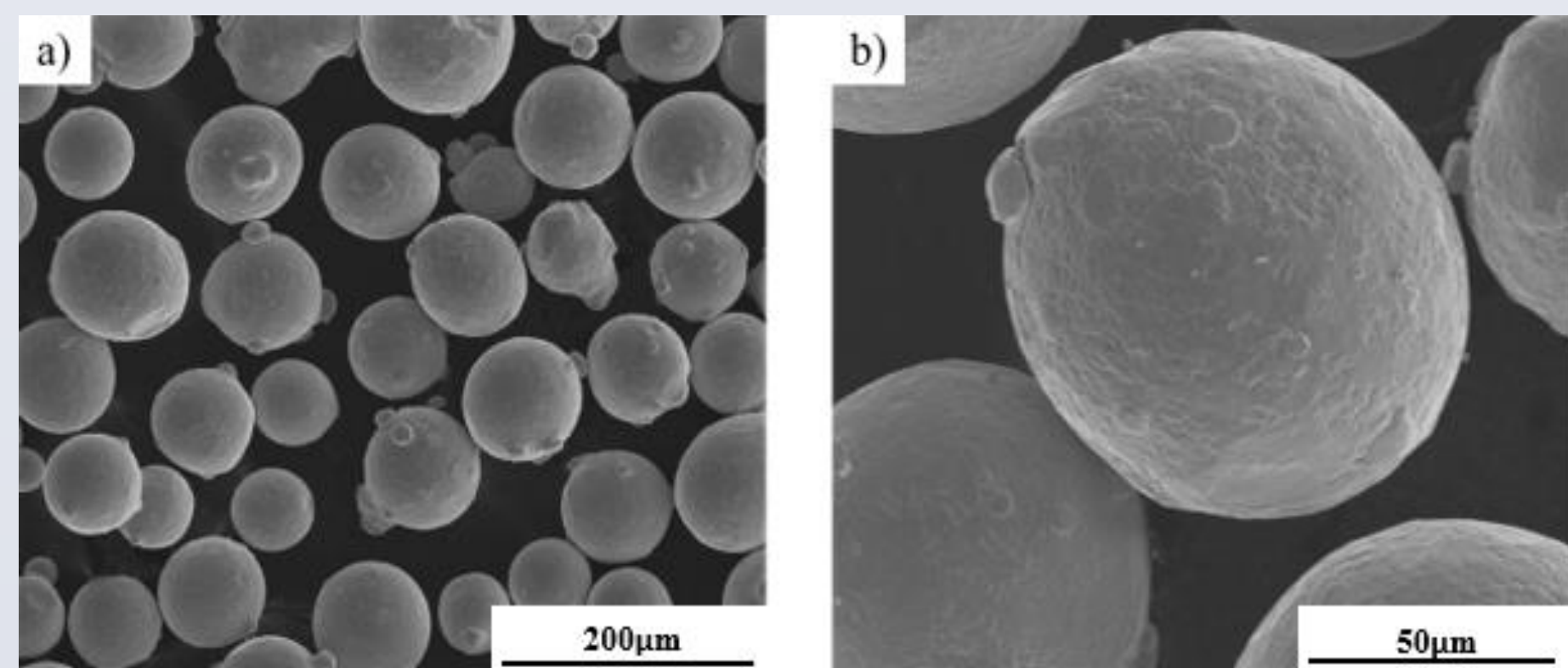
Abstrakt

W pracy zaproponowano wykorzystanie laserowej metody przyrostowej Laser Engineered Net Shaping (LENS) do oceny regeneracji modelowych elementów wykonanych ze stopu Inconel 625. W badaniach wstępnych wykorzystano sferyczny proszek stopu Inconel 625 o średniej wielkości cząstek równej 70 μm oraz podłoże wykonane z tego samego materiału. Optymalizację parametrów technologicznych przeprowadzono przy stałej mocy lasera równej 550 W, zmieniając posuw głowicy laserowej, szybkość podawania proszku, czas zwłoki włączenia/wyłączenia lasera (Laser On/Off Wait) względem startu napawania oraz włączenie/wyłączenie lasera ściśle skorelowane z ruchem głowicy (Laser Off/On Shutter Delay). Podczas regeneracji z wykorzystaniem modułu Teach and Learn w opcji bez i z budowaniem konturu (odpowiednio Hatch Only i Hatch Fill) wykonano napoinę nie wykazującą defektów strukturalnych w objętości. Stwierdzono, że odpowiednio dobrane parametry technologiczne procesu LENS (moc lasera 550 W i szybkość podawania proszku 12 RPM) oraz podniesienie temperatury podłoża do 300°C umożliwi precyzyjną regenerację wybranych elementów części maszyn i urządzeń. Ponadto, ubytki powinny być wypełnianie w co najmniej trzech przejściach, co z kolei zagwarantuje otrzymanie napoiny o wysokiej jakości metalurgicznej oraz bez występowania nieciągłości w strefie przejścia napoina/materiał podłoża.

Materiał i metodyka badań

W ramach badań wstępnych dokonano analizy składu chemicznego oraz morfologii cząstek proszku wsadowego w stanie dostawy z użyciem mikroskopu skaningowego typu FEI Quanta 3D FEG z przystawką EDS (Rys.1, Tab.1). W przeprowadzonej pracy wykorzystano proszek Inconel 625 (Rys. 1) o składzie chemicznym przedstawionym w Tabeli 1. Przy pomocy analizatora wielkości cząstek IPSU (Kamika) stwierdzono, że średnia wielkość cząstek proszku Inconel 625 wynosi około 70 μm. Dobór właściwych parametrów oraz finalny proces przeprowadzono z użyciem urządzenia LENS 850-R. Badania zasadnicze zostały przeprowadzone na próbkach modelowych w postaci kieszeni otrzymanych za pomocą frezarki Haas VF-1B. Każda z powstałych kieszeni charakteryzowała się różnym kształtem (kwadrat, sześciokąt i „koniczyna”), aby w efekcie końcowym możliwe było kompleksowe zweryfikowanie możliwości regeneracyjnych systemu LENS wraz z ewentualnymi ograniczeniami w tym obszarze. Niezależnie od przyjętych kształtów poszczególnych kieszeni, wszystkie miały tą samą głębokość równą 1 mm.

Po przeprowadzonej regeneracji próbki zostały zbadane pod kątem jakości połączenia napawanego proszku (napoiny) z materiałem rodzimym. W tym celu przeprowadzono obserwacje makroskopowe strefy przejścia napoina/rdzeń z użyciem mikroskopu optycznego Nikon MA220 oraz pomiary tomograficzne z wykorzystaniem mikrotomografu NIKON X-TEK XT H225 MICRO-CT. Jakość metalurgiczną sprawdzono również pod kątem szerokości strefy wpływu ciepła. W tym celu wykonano zdjęcia mikroskopowe oraz sprawdzono zmianę wartości mikrotwardości w zależności od odległości od czoła napoiny przy pomocy twardościomierza ZWICK.



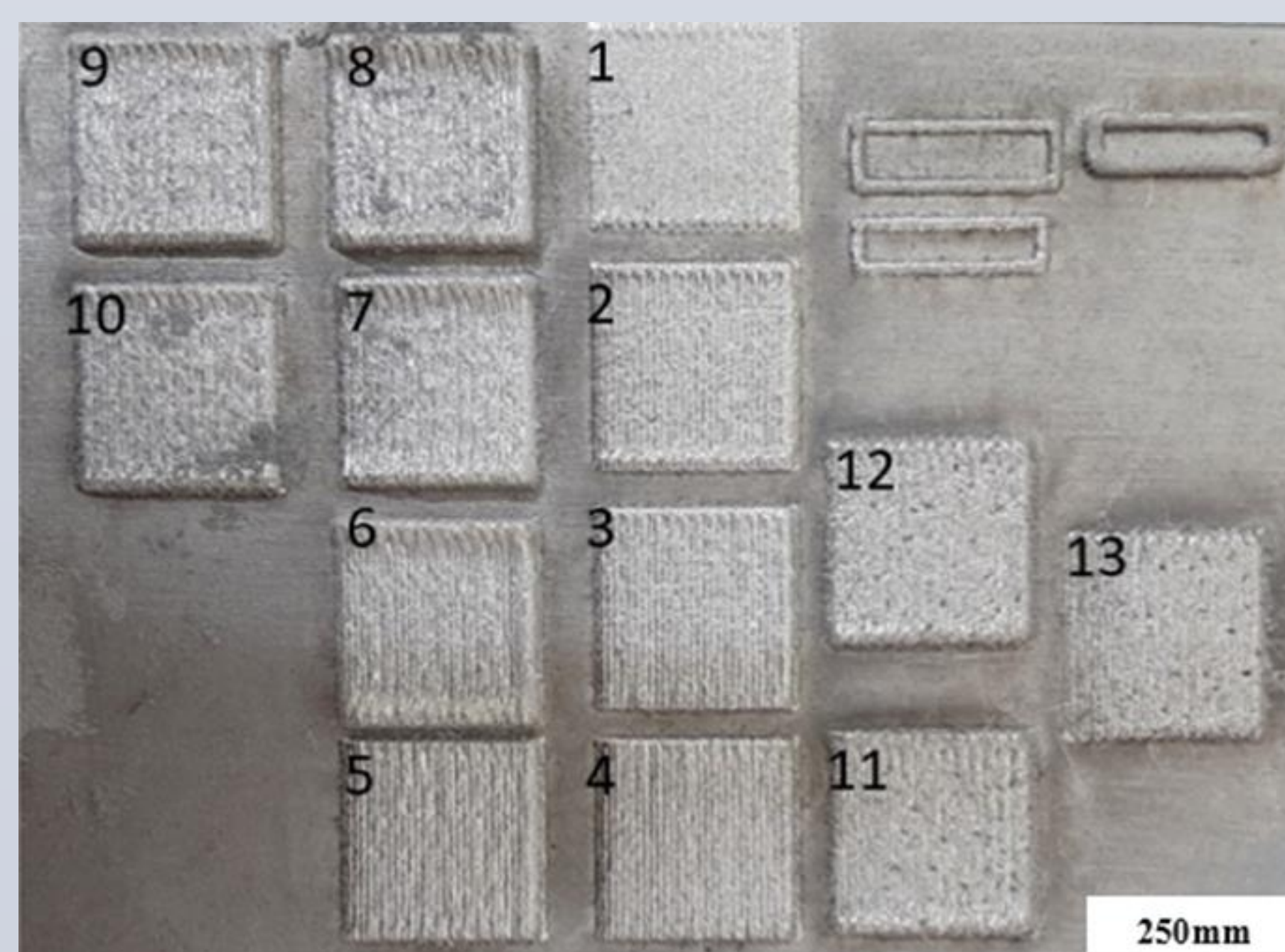
Rys. 1 Widok ogólny proszku wsadowego Inconel 625 (a); widok pojedynczej cząstki proszku (b)

Tab. 1 Skład chemiczny proszku Inconel 625

Pierwiastek	O	Fe	Ni	Al	Si	Zr	Nb	Mo	Cr	Mn
% wag.	2,18	5,10	55,87	0,38	0,34	0,48	3,83	9,03	22,53	0,27

Wyniki i dyskusja

Wstępne próby technologiczne nanoszenia proszku na podłoże Inconel 625 zostały przeprowadzone przy użyciu modułu Line Build Deposition, który umożliwił szybsze wyznaczenie parametrów pozwalających na osiągnięcie założonej grubości napoiny (Rys. 3 (napoiny 1-5)). Podczas napawania modułem Line Build Deposition próbki testowe wytwarzano utrzymując stałe parametry procesu, tj.: moc lasera równą 500W i szybkość posuwu głowicy laserowej na poziomie 10,5 mm/s. Za zmienny parametr przyjęto szybkość podawania proszku. Dla każdego z otrzymanych wariantów testowych zmierzono ich grubość w celu wyznaczenia szybkości podawania proszku pozwalającej uzyskiwać grubości napoiny wynoszącej około 1mm w jednym przejściu. Następnie powtórzono proces napawania przy zastosowaniu modułu Teach and Learn, w którym w pierwszej kolejności „obrysowywany” był kontur, a następnie wypełniano jego wnętrze (Rys. 2 (6-13)). Po przeprowadzeniu obserwacji makroskopowych stwierdzono, że powstałe napoiny nie spełniają założonych wymagań geometrycznych i jakościowych. Podczas napawania na kontur nanosiło się zbyt dużo proszku, co w konsekwencji prowadziło do niekontrolowanego zwiększenia jego grubości. Celem kolejnych prób technologicznych było dobranie takich warunków procesu, aby grubość napoiny była jednorodna na całej powierzchni testowanej. W pierwszej kolejności postanowiono zmienić czas zwłoki włączenia/wyłączenia lasera (Laser On/Off Wait), względem startu napawania, co jednak nie przyniosło oczekiwanych efektów geometrycznych. W następnych próbach sterowanym parametrem był posuw oraz włączenie/wyłączenie lasera, ale ściśle skorelowane z ruchem głowicy (Laser Off/On Shutter Delay). Parametry wykorzystane do optymalizacji napawania systemem LENS przedstawiono w Tab. 2.



Rys. 2 Efekty wstępnych prób technologicznych napawania systemem LENS proszku Inconel 625
1 – 5 napawanie modułem Line Build Deposition,
6 – 16 napawanie modułem Teach and Learn

Tab. 2 Parametry wykorzystane do optymalizacji napawania systemem LENS

Nr próbki	Moc lasera [W]	Posuw [mm/s]	Szybkość podawania proszku [RPM]	Laser On/Off Wait [ms]	Laser Off/On Shutter Delay [ms]	Temp podłoża [°C]
1	550	10,5	6	-	-	23
2	550	10,5	8	-	-	23
3	550	10,5	10	-	-	23
4	550	10,5	11	-	-	23
5	550	10,5	12	-	-	23
6	550	7,5	12	1	0	23
7	550	7,5	12	1	0	23
8	550	7,5	12	1	50	23
9	550	7,5	12	50	0	23
10	550	7,5	12	100	0	23
11	550	9	12	200	0	23
12	550	10,5	12	400	0	23
13	550	10,5	12	400	0	23

Obserwacje makroskopowe

Po naniesieniu materiału na wcześniej przygotowane ubytki modelowe, pobrane zostały próbki do obserwacji makroskopowych w celu oceny jakości metalurgicznej naniesionych napoin. Obserwacje makrostruktury napawanych elementów przedstawiono na (Rys. 3). Uzyskane wyniki wskazują na występowanie nieciągłości w strefie przejścia napoina/materiał rodzimy dla napoin otrzymanych w jednym przejściu i nanoszonych na podłoże będące w temperaturze pokojowej.



Rys. 3 Makroskopowe widoki napoiny bez optymalizacji warunków nanoszenia

W celu poprawy jakości metalurgicznej na granicy rozdziału napoina/podłoże, w kolejnych próbach technologicznych nagrzewano objętościowo podłoże do temperatury 300°C, oraz zwiększono liczbę przejść na grubości do trzech, przy zachowaniu finalnej grubości napoiny o wartości 1 mm. Temperatura materiału rodzimego wpływa na dyfuzyjność atomów na jego powierzchni. Podgrzanie podłoża zapewni szybkie i bezdefektowe nanoszenie napoiny oraz pozwala zminimalizować ryzyko powstawania struktur amorficznych na powierzchni nanoszenia. Finalnie do wykonania napoin wytypowano parametry przedstawione w Tab. 3. Natomiast efekt optymalizacji warunków nanoszenia widoczny jest na zdjęciu makroskopowym (Rys. 4a). Otrzymana napoina charakteryzuje się właściwą grubością oraz brakiem nieciągłości w strefie połączenia z materiałem rodzimym. Dla potwierdzenia poprawności zastosowanych parametrów przeprowadzono dodatkowe badania tomograficzne mające na celu ewentualną lokalizację nieciągłości zarówno w objętości napoiny, jak i na granicy rozdziału napoina/podłoże. Przeprowadzone badania nie wykazały żadnych defektów w analizowanych obszarach (Rys. 4b).

Tab. 3 Główne parametry wykorzystane do napawania systemem LENS

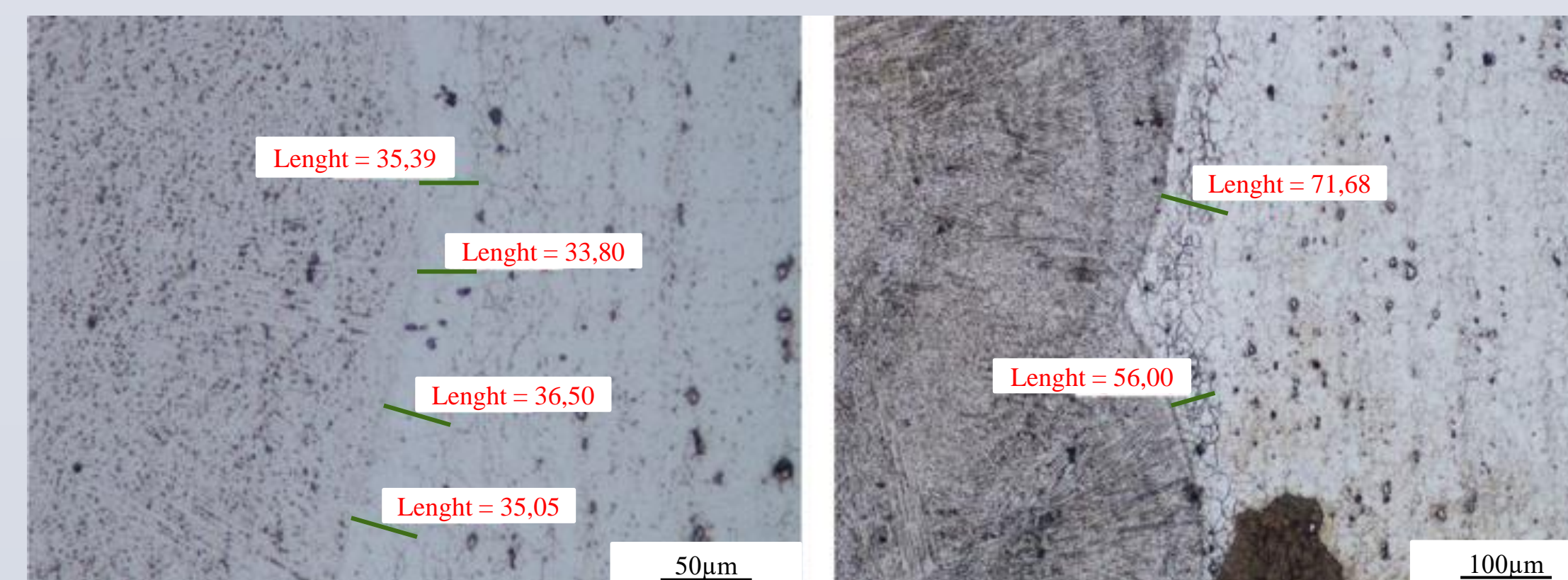
Parametr	Moc lasera [W]	Posuw [mm/s]	Szybkość podawania proszku [RPM]	Laser On/Off Wait [ms]	Laser Off/On Shutter Delay [ms]	Temp podłoża [°C]
Wartość	550	10,5	12	400	0	300



Rys. 4 Makroskopowe widoki napoiny z optymalizacją warunków nanoszenia (podgrzewane podłoże, trzy przejścia na grubości (a); przekrój wzdłużny finalnej napoiny wykonany techniką tomograficzną (b))

Obserwacje mikroskopowe

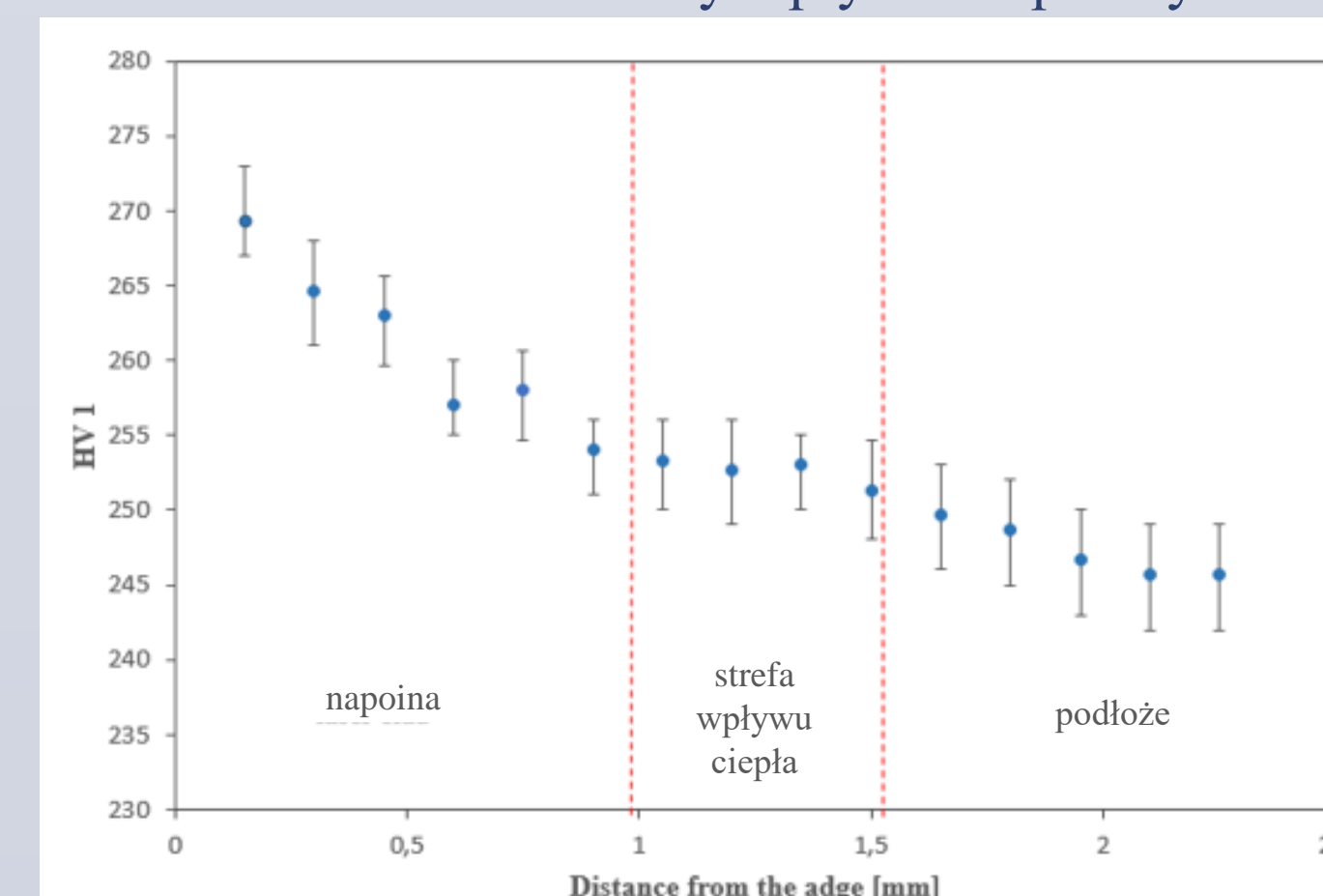
Mikrostrukturę napoiny z Inconel 625 osadzonej techniką LENS przedstawiono na (Rys. 5), który wykonano przy użyciu mikroskopu optycznego na granicy podłoża i osadzanego materiału. Na wykonanych zdjęciach widoczna jest niewielka strefa wpływu ciepła, której długość wynosi około 35,2 μm. Natomiast w obszarach, w których laser rozpoczął i zakończył proces nanoszenia proszku regeneracyjnego, strefa jest nieco większa (ok. 63 μm).



Rys. 5 Strefa wpływu przejścia przedstawiona przy pomocy zdjęć mikroskopowych

Mikrotwardość

Rozkład twardości zmierzono na przekroju poprzecznym zaczynając od krawędzi naniesionej napoiny (Rys. 6). Mikrotwardość naniesionego materiału wynosiła 275 ± 10 HV1 i zmniejszała się w kierunku warstwy wierzchniej nadstopu na bazie niklu do 245 ± 5 HV1. Twardość strefy wpływu ciepła wynosiła ok. 255 ± 5 HV1.



Rys. 6 Rozkład twardości w przekroju poprzecznym napoiny

Wnioski

Analizując uzyskane wyniki z badań napoin ze stopu Inconel 625 otrzymanych laserową techniką przyrostową LENS stwierdzono, że napawanie powinno być przeprowadzane w warunkach podwyższonej temperatury podłoża. Ponadto, ubytki powinny być wypełnianie w co najmniej trzech przejściach z wykorzystaniem sferycznego proszku Inconel 625, co w konsekwencji gwarantuje otrzymanie napoiny o właściwej geometrii i bez występowania nieciągłości w strefie przejścia napoina/materiał rodzimy.