



## Napawanie stali X2CrNiMo17-12-2 laserem diodowym dużej mocy

K. Szpik<sup>a</sup>, A. Tomiczek<sup>b</sup>, W. Ozgowicz<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Absolwent Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

email: kamil.szpik@gmail.com

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Przetwórstwa Materiałów Metalowych i Polimerowych

email: anna.tomiczek@polsl.pl

<sup>c</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Inżynierii Materiałów Konstrukcyjnych i Specjalnych

email: wojciech.ozgowicz@polsl.pl

**Streszczenie:** Badania obejmują proces napawania laserowego stali austenitycznej kwasoodpornej X2CrNiMo17-12-2 na podłożu stali konstrukcyjnej S235JR. Proces przeprowadzono przy użyciu lasera diodowego dużej mocy (HPDL) oraz głowicy laserowej ze współosiowym do wiązki podawaniem proszku. Wykonując kolejne próby zastosowano zmienną moc wiązki laserowej oraz prędkość liniową głowicy. Stwierdzono, że zarówno moc wiązki laserowej, jak i prędkość liniowa znacznie wpływają na właściwości uzyskanej napoiiny: zbyt niska moc wiązki lasera skutkuje powstawaniem wąskich i porowatych ściegów o małej wysokości.

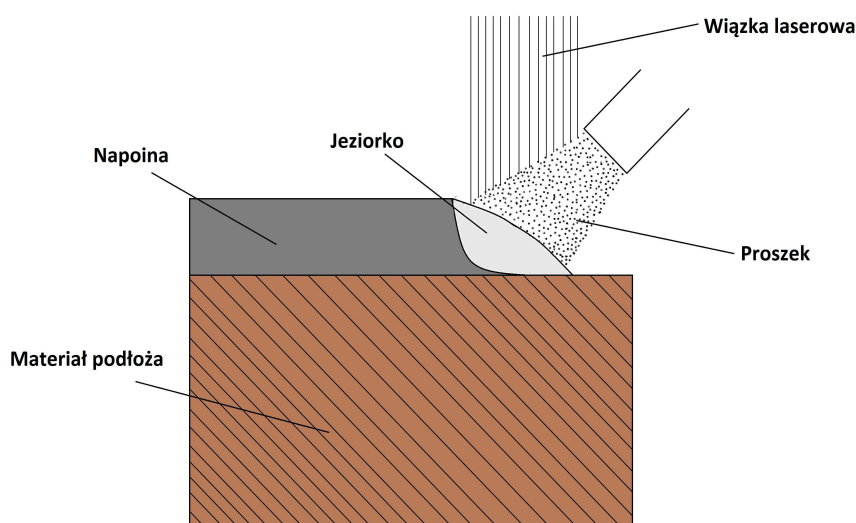
**Abstract:** The tests cover the process of overlay welding of acid-resistant austenitic steel X2CrNiMo17-12-2 on the substrate of structural steel S235JR. The process was performed using a high-power diode laser (HPDL) and a laser head with powder feeding coaxial to the laser beam. In successive tests, variable power of the laser beam, and variable linear velocity of the head were used. It was found that the power of the laser beam and the linear velocity have a great impact on the overlay weld produced. Excessively low power of the laser beam results in narrow and porous beams and its small height.

**Słowa kluczowe:** napawanie laserowe, obróbka powierzchniowa, laser HDPL

### 1. WSTĘP

Lasery diodowe dużej mocy HPDL (ang. *High Power Diode Laser*) to lasery półprzewodnikowe i jedne z najnowocześniejszych źródeł energii cieplnej, często wykorzystywane w technikach spawalniczych dla przemysłu. Proces napawania laserowego (rysunek 1) polega na stapianiu materiału dodatkowego za pomocą wiązki promieniowania

laserowego, przy jednoczesnym nadtopianiu cienkiej warstwy podłoża. Stopiony materiał dodatkowy może mieć postać proszku lub litego drutu, a proces ten prowadzony jest w odpowiedniej osłonie gazowej. Stopiony materiał tworzy warstwę wierzchnią napawanego podłoża, zwaną napoiną. Bardzo duże prędkości stapiania materiału dodatkowego wiązką laserową z jednoczesnym szybkim nadtopianiem materiału podłoża skutkują wymieszaniami obu materiałów w jeziorce ciekłego materiału napoiny. Skład chemiczny materiału napawanego zwykle znacznie różni się od składu chemicznego stopiwa, dlatego udział materiału podłoża w napoinie decyduje zasadniczo o końcowym składzie chemicznym, właściwościach użytkowych oraz strukturze napoiny [1-4].



Rysunek 1. Schemat procesu napawania powłoki z materiałem dodatkowym w postaci proszkowej [5]

*Figure 1. Scheme of coating's hardfacing with additional material in the form of powder [5]*

Metoda napawania laserowego znajduje wiele zastosowań w różnych gałęziach przemysłu, zwłaszcza tam gdzie elementy maszyn i urządzeń pracują w trudnych i agresywnych środowiskach, a tym samym są narażone na intensywne zużycie mechaniczne i/lub działanie wysokiej temperatury [1,6].

Celem niniejszej pracy jest określenie wpływu parametrów technologicznych wiązki laserowej i prędkości liniowej napawania stali austenitycznej X2CrNiMo17-12-2 na strukturę powstałego między powłoką napawaną a materiałem podłoża połączenia oraz twardość, a także jakość i poprawność wykonania napoiny.

## 2. MATERIAŁ DO BADAŃ

Materiał do badań stanowiły próbki napawane metodą laserową, w których materiał podłoża stanowiła stal S235JR (rysunek 2), której skład chemiczny przedstawiono w tabelicy 1. Materiałem napawanym była stal austenityczna kwasoodporna X2CrNiMo17-12-2 firmy Flame Spray Technologies, której skład chemiczny podano w tabelicy 2.

Tablica 1. Skład chemiczny stali S235JR [7]

Table 1. Technical specifications of S235JR [7]

Skład chemiczny, % wag						
C	Mn	Si	P <sub>max</sub>	S <sub>max</sub>	N	Fe
0,17	1,40	-	0,035	0,035	0,012	reszta

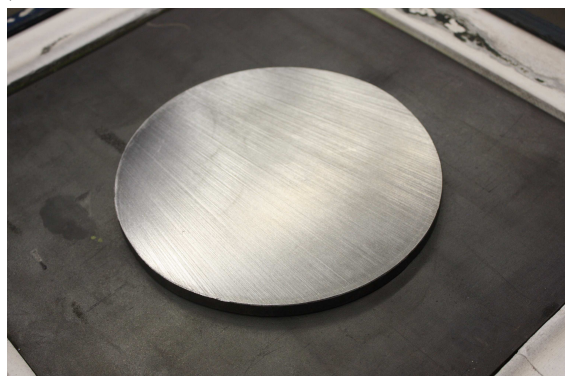
Tablica 2. Skład chemiczny stali X2CrNiMo17-12-2 [8]

Table 2. Technical specifications of X2CrNiMo17-12-2 [8]

Skład chemiczny, % wag									
C	Si	Mn	P <sub>max</sub>	S <sub>max</sub>	N	Cr	Mo	Ni	Fe
≤0,030	≤1,00	≤2,00	0,045	≤0,015	≤0,11	16,5÷18,5	2,00÷2,50	10,0÷13,0	reszta

Materiał do badań przygotowano na zrobotyzowanym stanowisku do napawania laserowego na Wydziale Technologii Laserowych w spółce Plasma SYSTEM S.A. w Siemianowicach Śląskich. Próbki napawano laserem HDPL o mocy 4,4 kW firmy Laserline. Przed napawaniem powierzchnię oczyszczano szczotką drucianą zamontowaną na szlifierce kątowej, a następnie odfuszczano czterochloroetylenem w celu usunięcia ewentualnych zanieczyszczeń. Proces prowadzono w atmosferze ochronnej argonu technicznego firmy Air Liquide; ten sam gaz służył do transportowania materiału dodatkowego w postaci proszku do jeziora spawalniczego. Do podawania materiału dodatkowego wykorzystano podajnik firmy Flame Spray Technologies, w którym również był on podgrzewany w celu odprowadzenia ewentualnej wilgoci. Widok procesu wraz z głowicą do napawania laserowego przedstawiono na rysunku 3.

a)



Rysunek 2. Krążek ze stali S235JR przygotowany do procesu napawania  
Figure 2. Disc of S235JR steel prepared to hardfacing process

b)



Rysunek 3. Proces napawania laserowego ze współosiowym podawaniem materiału dodatkowego  
Figure 3. The view of laser hardfacing process

Kolejne procesy napawania różniły się między sobą wartością mocy oraz prędkością liniową głowicy (tablica 3). Odległość dyszy od detalu była stała i wynosiła 15 mm, podawanie proszku następowało z prędkością 20 g/min, a przepływ gazu 15 l/min.

Tablica 3. Parametry procesu napawania próbek

Table 3. Specification of hardfacing process

Nr próbki	Moc, kW	Prędkość liniowa, mm/s	Skok, mm
1	2,0	40	1,6
2	2,5	40	
3	3,0	40	
4	3,0	30	
5	3,0	55	
6	3,0	45	

### 3. METODYKA BADAŃ

W ramach pracy zrealizowano badania penetracyjne, pomiary mikrotwardości i chropowatości, jak również dokonano obserwacji mikroskopowych.

Badania nieniszczące penetracyjne wykonano zgodnie z normą PN-EN 571-1. Ich celem było wykrycie ewentualnych otwartych nieciągłości powierzchniowych napoiny, mikro-pęknięć poprzecznych lub porów. Przed badaniem powierzchnię materiału oczyszczano i suszono, po czym rozpylano na nią penetrant, który wnikał w szczeliny lub nieciągłości powierzchni. Usunięcie penetrantu następowało po upływie określonego czasu, po czym наносzono wywoływacz, wchłaniający penetrant i ujawniający niejednorodność powierzchni. Do badań wykorzystano penetrant czerwony oraz wywoływacz firmy DIFFU-THERM.

Przekroje próbek obserwowano na mikroskopie świetlnym stereoskopowym Stereo Discovery V.12 (ZEISS) przy powiększeniu 20x. Mikrostrukturę próbek badano w elektronowym mikroskopie skaningowym (SEM) SUPRA 35 firmy ZEISS. W celu uzyskania obrazu badanych próbek wykorzystano detekcję elektronów wtórnych przy napięciu przyspieszającym 15 kV oraz maksymalnym powiększeniu 250 razy. Analizę składu chemicznego materiałów wykonano za pomocą spektrometru TRIDENT XM4 firmy EDAX, stanowiącego wyposażenie mikroskopu skaningowego.

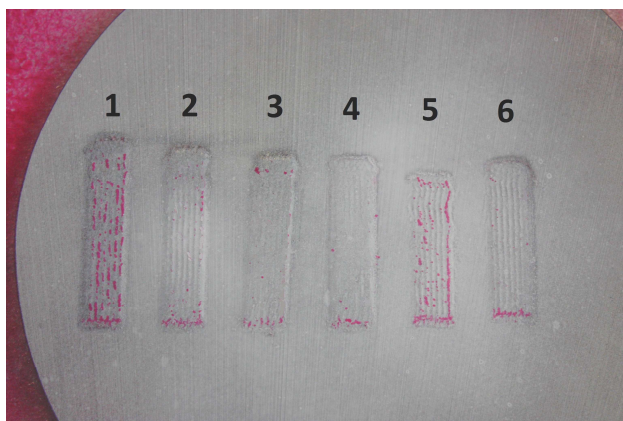
Pomiary twardości zrealizowano metodą Vickersa zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-1 za pomocą twardościomierza MICROHARDNESS TESTER FM-700 przy obciążeniu 100 g. Dla każdej z próbek wykonano pomiary twardości napoiny, strefy przejściowej oraz materiału podłoża.

Badania chropowatości oraz pomiar profilu metodą stykową wykonano przy użyciu profilometru SUTRONIC25 firmy TAYLOR HOBSON. Pomiary realizowano w kierunku poprzecznym do ściegów napawanych próbek na odcinku 6 mm.

### 4. WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Podczas napawania próbek prowadzono ciągłe monitorowanie parametrów procesu takich jak moc, prędkość liniowa, ilość podawanego materiału dodatkowego oraz przepływ gazu osłonowego i podającego proszek. Po zakończeniu napawania przeprowadzano wizualną ocenę poprawności wykonanych napoin oraz zgodności kształtu, nie stwierdzając żadnych nieprawidłowości. Nie zaobserwowano również wad zewnętrznych w postaci pękaczy, pęknięć, braku przetopu lub porowatości, w związku z czym badanie wizualne wykonanych prób napawania oceniono pozytywnie.

Na podstawie badania penetracyjnego (rysunek 4) przeprowadzonego na napawanych próbkach, stwierdzono, że w próbce nr 1 występuje duża liczba mikroporów wzdłuż lica pojedynczych ściegów (widoczne czerwone obszary). Stwierdzono ponadto, że ich przyczyną była niska moc zastosowana w procesie napawania (2000 W), co skutkowało tym, że materiał dodatkowy w postaci proszku nie został całkowicie przetopiony. Sporą liczbę nieciągłości zaobserwowano również w próbce nr 5, a ich obecność była zapewne spowodowana zwiększoną prędkością napawania do 55 mm/s.



Rysunek 4. Widok próbek po badaniu penetracyjnym

Figure 4. The view of samples after penetration test

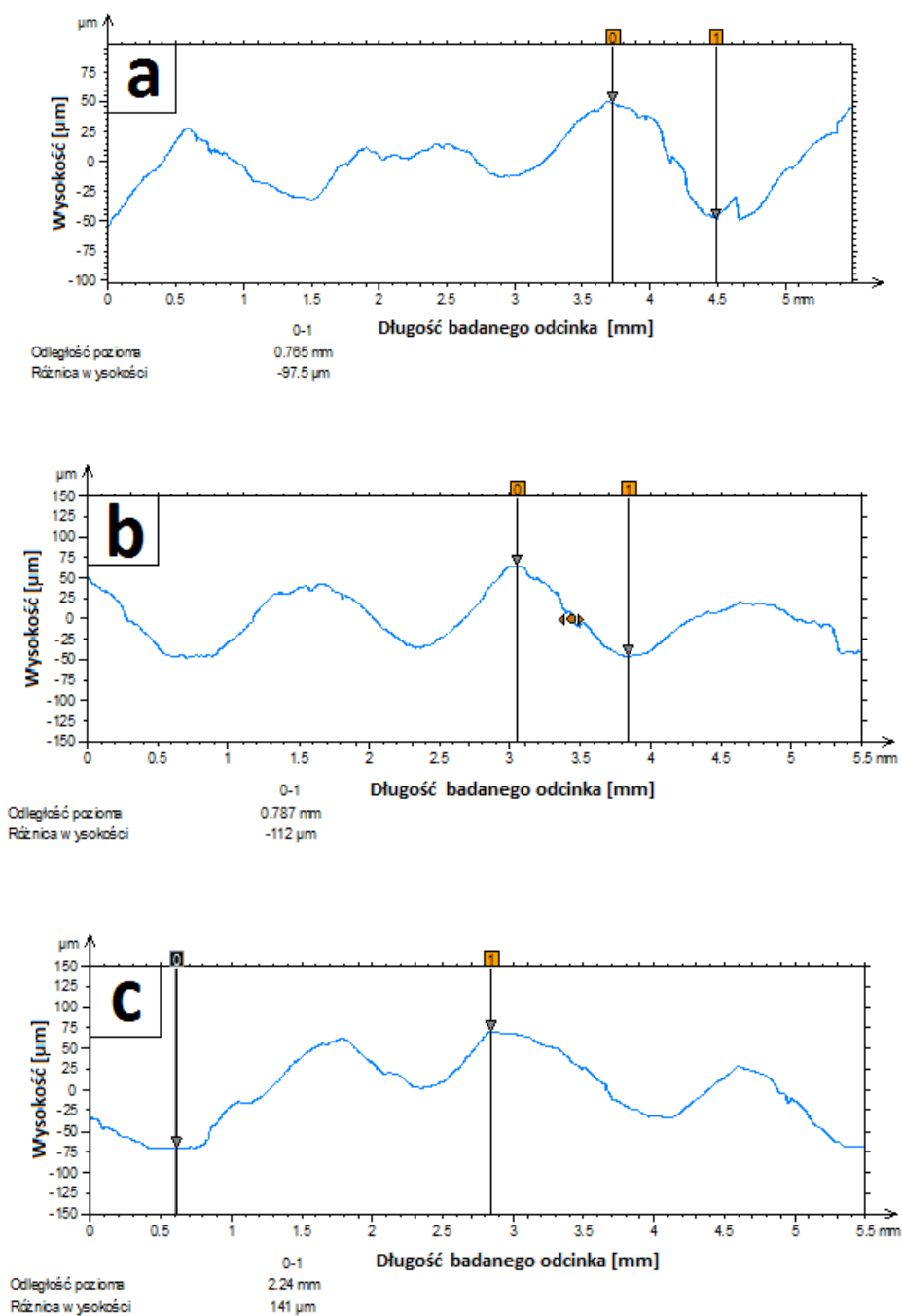
Pomiary mikrotwardości przeprowadzone metodą Vickersa pozwoliły na określenie przebiegu zmian twardości w poszczególnych strefach przekroju poprzecznego napawanych materiałów (tablica 4). Badania przeprowadzone na napoinie, strefie przejściowej między materiałami oraz podłożem wykazały, że twardość w poszczególnych strefach jest zróżnicowana, a warstwa wierzchnia po napawaniu ma większą twardość niż materiał rodzimy. Twardość napoiny mieści się w granicach 200÷235 HV 0.1, natomiast podłoża waha się w przedziale od 155 do 220 HV 0.1.

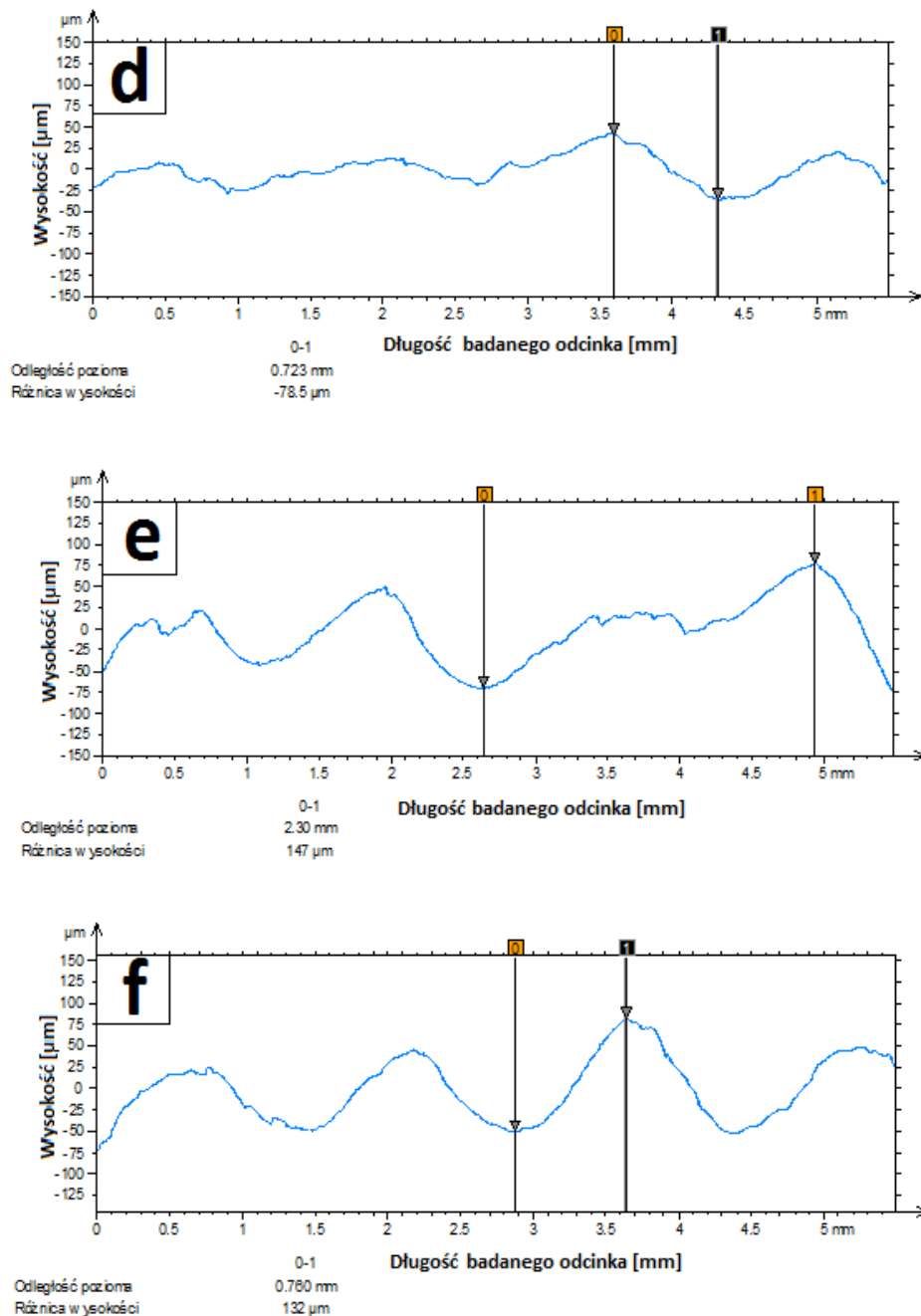
Tablica 4. Wyniki pomiarów mikrotwardości

Table 4. Results of microhardness test

Odległość od powierzchni napoiny, mm	Nr próbki					
	1	2	3	4	5	6
0,15	228,28	210,38	253,64	207,82	229,71	223,97
0,30	191,11	206,54	221,13	202,83	228,28	211,68
0,45	200,39	202,82	211,69	209,09	218,23	217,00
0,60	336,43	318,81	222,54	215,66	271,66	349,92
0,75	309,34	237,32	389,02	205,30	169,57	323,74
0,90	264,26	189,98	166,79	195,67	179,34	194,50
1,05	250,22	169,57	162,32	291,71	154,69	204,05
1,20	158,86	189,61	155,52	217,00	167,70	174,35
1,35	158,02	181,40	160,58	217,00	158,86	176,33
1,50	161,45	175,33	155,53	157,16	166,80	174,34

Chropowość powierzchni badanych materiałów oceniono na podstawie wykresów profilometrycznych (rysunek 5), stwierdzając, że próbka nr 4 posiada najbardziej gładką powierzchnię, tzn. różnica między skrajnymi punktami wysokości napoiny wynosi  $78,5 \mu\text{m}$ . Ponadto w próbkach 1, 2 oraz 3 zaobserwowano zwiększanie różnicy wysokości wraz ze wzrastającą mocą wiązki laserowej (przy tej samej prędkości podawania materiału dodatkowego). Zjawisko to jest wynikiem powstawania węższych ściegów przy niskich mocach lasera, co skutkuje powstawaniem większych rowków pomiędzy pojedynczymi napoinami. Największą różnicę wysokości odnotowano w próbce nr 5, w przypadku której o uzyskanym wyniku zdecydowała wartość prędkości liniowej (tj.  $55 \text{ mm/s}$ ).





Rysunek 5. Wykres profilu napoiny dla próbki nr: a) 1, b) 2, c) 3, d) 4, e) 5, f) 6  
Figure 5. The graph of overlay weld profile for sample No: a) 1, b) 2, c) 3, d) 4, e) 5, f) 6

Na podstawie obserwacji metalograficznych (rysunek 6) stwierdzono wyraźny wpływ mocy wiązki laserowej na wysokość warstwy napawanej. Porównując próbki nr 1÷3 (tablica 5) napawane z tą samą prędkością liniową i przy tym samym sposobie podawania materiału dodatkowego oraz przy różnej mocy lasera (zwiększanej kolejno o 500 W), zauważono różnicę (ok. 0,12 mm) średniej wysokości napoiny dla próbek nr 1 i 2 oraz 0,18 mm dla próbek nr 2 i 3. Stwierdzono ponadto, że im większa jest moc wiązki laserowej,

tym lepsza jest skuteczność przetapiania podawanego proszku i – co się z tym wiąże – większa wysokość powstałej napoiny. Zauważono również, że prędkość liniowa procesu ma znaczny wpływ na grubość napawanej warstwy, a w połączeniu z mocą wiązki laserowej stanowi ona o zmiennych szerokościach pojedynczych ściegów napoiny (a zatem szerokościach napawanych próbek).

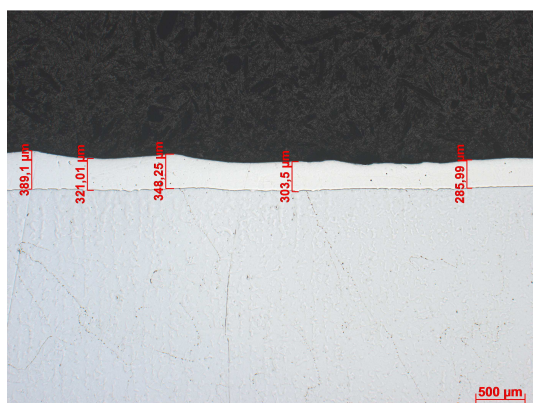
Podobnie jak przy pomiarach wysokości napoin, analizując wyniki pomiarów szerokości ściegów (rysunek 7) stwierdzono wzrost szerokości lica wraz ze zwiększaniem mocy wiązki lasera.

Rozpatrując prędkość liniową napawania próbek nr 4 i 5, stwierdzono wyraźną różnicę zarówno w wysokości napoiny (0,20 mm), jak i szerokości napawanych materiałów. Nieciągła struktura pojedynczych ściegów (rysunek 8) spowodowana jest niską mocą wiązki laserowej wynoszącą 2000 W. W wyniku słabego przetopu materiału dodatkowego powstały widoczne mikropory. Przy prędkości liniowej głowicy laserowej 40 mm/s znaczna ilość proszku zostawała słabo – lub wcale – nie przetopiona, co spowodowało mały przyrost napoiny i jej najniższą jakość. Stwierdzono, że najlepszą jakość powierzchni ma próbka nr 4, co wynika z najmniejszych wartości prędkości liniowej i mocy wiązki: mniejsza prędkość powoduje dokładniejszy i skuteczniejszy przetop materiału dodatkowego, a większa wartość mocy wiązki laserowej powoduje jego lepsze wtopienie się w podłoże.

Tablica 5. Zestawienie pomiarów poszczególnych próbek

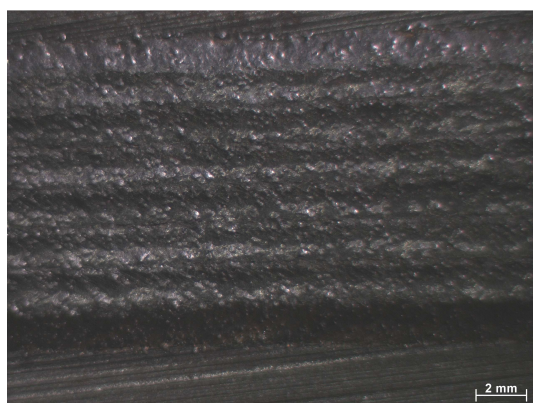
Table 5. Summary of the measurements for particular samples

Nr próbki	Średnia wysokość napoiny, mm	Średnia szerokość próbki, mm	Średnia szerokość pojedynczego ściegu, mm
1	0,33	12,37	1,52
2	0,45	12,95	1,55
3	0,63	13,42	1,54
4	0,73	13,57	1,54
5	0,53	12,86	1,59
6	0,67	13,10	1,55



Rysunek 6. Widok przekroju poprzecznego napoiny próbki nr 1

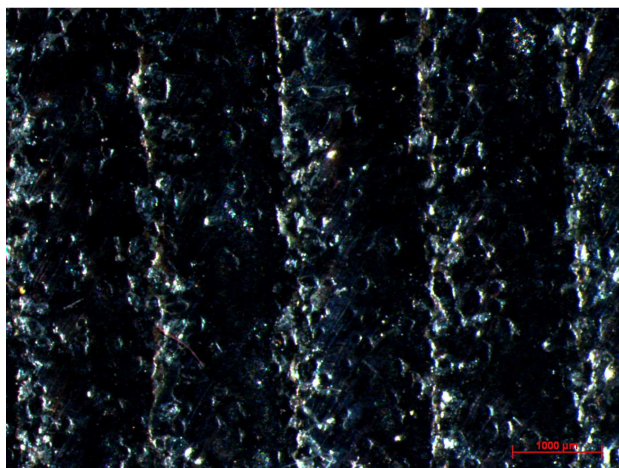
Figure 6. The view of overlay weld cross section for sample No 1



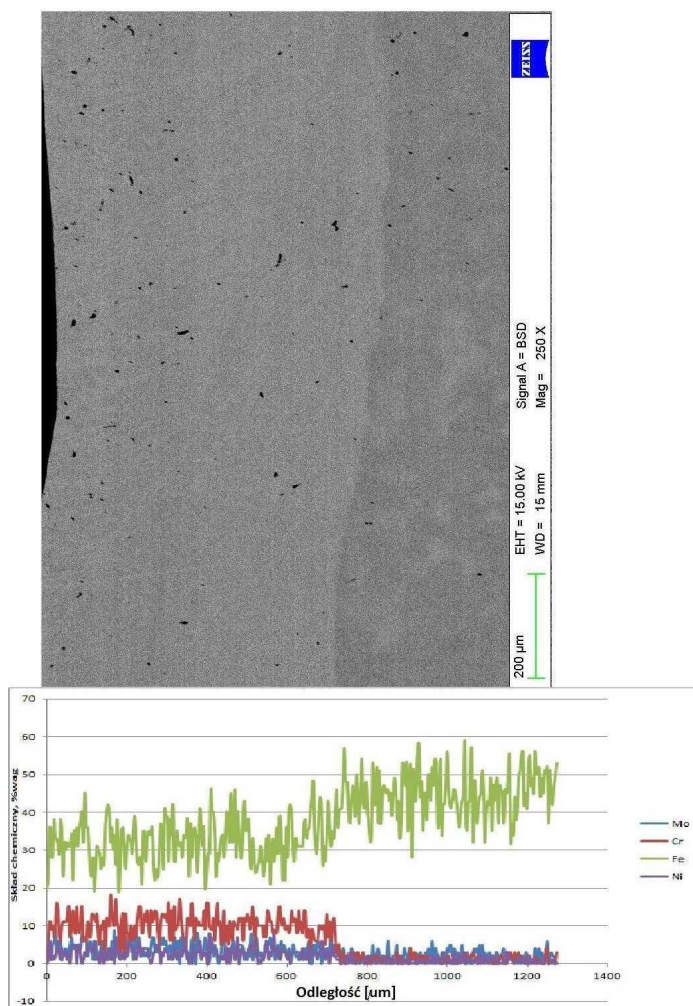
Rysunek 7. Widok warstwy wierzchniej próbki nr 1

Figure 7. Top surface's view of sample No 1





Rysunek 8. Widok ściegów próbki nr 1  
Figure 8. Top surface's view of sample No 1



Rysunek 9. Analiza EDS z wykresem rozkładu stężenia pierwiastków dla próbki nr 3  
Figure 9. EDS analysis with graph of elements dispersion for sample No 3

Przykładowy wynik analizy EDS rozkładu stężenia pierwiastków przedstawiono na rysunku 9. Stwierdzono, że w obszarze napoiny znajdują się pierwiastki Fe, Cr, Ni, Mo w ilości zbliżonej do nominalnej w stali X2CrNiMo17-12-2. W strefie przejściowej zaobserwowano znaczne zmniejszenie zawartości pierwiastków do dolnego zakresu wartości granicznych, natomiast znacznie zwiększony jest udział procentowy żelaza. Słabe wymieszanie materiału podłoża z materiałem napawanym widoczne jest w przypadku próbki 1, co wynika z małej mocy wiązki laserowej i związanym z tym płytkim wtopieniem materiału. Zwiększanie mocy wiązki lasera powoduje lepsze łączenie się obu materiałów.

## 5. WNIOSKI

Zrealizowane badania oraz analiza otrzymanych wyników pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- wysokość, szerokość oraz jakość nałożonej warstwy w postaci napoiny zależą od mocy wiązki lasera oraz prędkości liniowej głowicy: im większa moc wiązki, tym skuteczniejszy przetop materiału dodatkowego. Prędkość liniowa wpływa na głębokość wtopienia oraz kształt lica napoiny;
- mikrotwardość warstwy napawanej stalą X2CrNiMo17-12-2 jest około 80 HV 0.1 większa niż materiału podłoża (tj. stali S235JR). Twardość w poszczególnych strefach próbek jest zróżnicowana, a największą jej wartość uzyskano w strefach przejściowych poszczególnych materiałów, tj. miejscach łączenia się napoiny z materiałem rodzimym;
- napawanie metodą laserową stali konstrukcyjnej S235JR stalą austenityczną kwasoodporną X2CrNiMo17-12-2 zapewnia jej skuteczną ochronę przed działaniem korozji oraz agresywnego środowiska.

## PODZIĘKOWANIA

Autorzy składają podziękowania firmie Plasma SYSTEM S.A. z Siemianowic Śląskich za możliwość wytworzenia materiału oraz Panu mgr. inż. Wojciechowi Pakiele z Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych Politechniki Śląskiej za pomoc w realizacji badań.

## LITERATURA

1. L.A. Dobrzański, A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, *Kształtowanie struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2013.
2. J. Gawroński, *Podstawy procesów metalurgicznych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2012.
3. A. Klimpel, *Technologie laserowe*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2012.
4. M. Nowicki, *Lasery w technologii elektronicznej i obróbce materiałów*, WNT, Warszawa, 1978.
5. J. Kusiński, *Lasery i ich zastosowanie w inżynierii materiałowej*, WN „Akapit”, Kraków, 2000.
6. A. Klimpel, J. Dziubiński, *Technologia napawania*, Skrypt uczelniany nr 1144, Gliwice, 1983.
7. Norma: PN-EN 10025:2002.
8. Norma: PN-EN 571-1.