



## **Analiza wpływu parametrów napawania laserowego LMD na wybrane właściwości napoin wytworzonych z proszku HS6-5-2c na stali 1.4923**

WOJCIECH CHRZANOWSKI, WOJCIECH NAPADŁEK,  
ZDZISŁAW BOGDANOWICZ

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Mechanicznej, ul. gen. S. Kaliskiego 2,  
00-908 Warszawa, wojciech.chrzanowski@wat.edu.pl, wojciech.napadlek@wat.edu.pl,  
zdzislaw.bogdanowicz@wat.edu.pl

**Streszczenie.** W pracy zaprezentowano wyniki badań napoin wytworzonych technologią napawania laserowego LMD (*Laser Metal Deposition*) z zastosowaniem różnych parametrów wiązki laserowej. Na powierzchni podłoży ze stali 1.4923 w kształcie prostopadłościanów wytworzono napoiny wielościgowe z proszków HS6-5-2c o różnym stopniu przykrycia. W ramach prób napawania laserowego wytworzono próbki, na których następnie przeprowadzono badania topografii powierzchni, obserwację mikrostruktury oraz pomiary twardości w poszczególnych strefach warstwy wierzchniej podłoża, to jest w strefie napoiny, strefie wpływu ciepła (SWC) oraz w strefie materiału rodzimego. Obserwację i analizę powierzchni napoin oraz mikrostruktury w przekroju poprzecznym próbek po napawaniu LMD zrealizowano z zastosowaniem mikroskopii optycznej ze światłowodową transmisją obrazu. Pomiary twardości wykonano, używając twardościomierza Vickersa FLC-50A. Na podstawie obserwacji mikroskopowych stwierdzono, że uzyskane napoiny mają regularny i powtarzalny kształt. Ponadto na powierzchniach wytworzonych napoin oraz w strefie wtopienia materiału napoiny z materiałem podłoża nie zauważono występowania wad procesowych. Twardość uzyskanych napoin wynosiła 500-700 HV<sub>0,1</sub>. Wytworzone na bazie proszku HS6-5-2c napoiny poddano badaniom odporności na erozję, które wykazały znacznie wyższą odporność na zużycie erozyjne (nawet ok. pięciokrotnie) w porównaniu z materiałem podłoża (stal 1.4923) bez napawania.

**Słowa kluczowe:** stal 1.4923, proszek stopowy HS6-5-2c, napawanie laserowe LMD, warstwa wierzchnia, geometria napoiny, skład chemiczny, mikrostruktura, twardość, erozja

DOI: 10.5604/01.3001.0054.2901

## 1. Wprowadzenie

Wzrost wymagań stawianych przez przemysł nowoczesnym materiałom konstrukcyjnym, narażonym na zużycie w trudnych warunkach pracy (korozja, erozja, temperatura), powoduje, że nieustannie trwają prace nad nowymi rozwiązaniami projektowymi i technologicznymi umożliwiającymi poprawę trwałości eksploatacyjnej materiałów. W celu poprawy właściwości materiału bazowego najczęściej wytwarzane są warstwy wierzchnie lub powłoki, których celem jest m.in. zmniejszenie współczynnika tarcia przy jednoczesnym zwiększeniu odporności na zużycie przez tarcie, odporności na korozję lub erozję. Procesy te realizuje się różnymi metodami wykorzystywanymi przez inżynierię powierzchni (obróbka cieplno-chemiczna, technologie PVD/CVD, napawanie, natryskiwanie cieplne, anodowanie i inne) [1-3].

Właściwości materiałów konstrukcyjnych czy narzędziowych zależą głównie od mikrostruktury rdzenia wyrobu, a także stanu warstwy wierzchniej. Obecnie wiele zespołów badawczych [4-10] zajmuje się problemem zwiększania odporności na zużycie erozyjno-korozyjne. Prace te polegają na stosowaniu „lepszyc” materiałów (o zwiększonej wytrzymałości, odpornych na zużycie) oraz/lub modyfikacji ich warstwy wierzchniej. W przypadku regeneracji elementów maszyn kształt elementu najczęściej odbudowywany jest przez napawanie, natryskiwanie materiału lub wycięcie, a następnie wstawianie lub wlutowanie nowego fragmentu elementu. Zużycie warstwy wierzchniej generuje dodatkowe koszty, są one związane nie tylko z zakupem nowych elementów lub ich regeneracją, lecz także przede wszystkim z kosztem ich wymiany (koszt prac regeneracyjnych, przestojów, ponownego uruchomienia itp.) [2-3, 12-13].

Przez dziesiątki lat powszechnie wykorzystywane technologie wytwarzania uległy znacznemu rozwojowi. Opracowane zostały nowe technologie, dzięki którym możliwe jest wytwarzanie elementów o coraz bardziej złożonym kształcie geometrycznym i unikatowych właściwościach użytkowych. Najczęściej wymieniane metody wytwarzania/produkcji to tzw. przemysłowe techniki wytwarzania, wśród których można wyróżnić: obróbkę skrawaniem (ubytkową), obróbkę plastyczną oraz odlewanie [13]. Jednak oprócz wymienionych wyżej trzech głównych technologii wytwarzania coraz częściej zaczęto wykorzystywać techniki przyrostowe w produkcji i regeneracji części maszyn i narzędzi.

Innowacyjność technik wytwarzania 3D stwarza możliwość przeprowadzania różnego rodzaju badań i testów. Skłania to wielu badaczy do inicjowania szczegółowych prac w zakresie doboru wytwarzania i identyfikacji istotnych z praktycznego punktu widzenia właściwości użytkowych wytwarzanych elementów z warstwami technologicznymi zwiększającymi ich trwałość i niezawodność.

Napawanie przyrostową technologią laserową (LMD) umożliwia wytwarzanie elementów maszyn przez nakładanie kolejnych warstw i trwałe łączenie ich ze sobą. Każda kolejna warstwa formowana jest w odpowiednim obszarze przekroju trójwymiarowego elementu. Nałożenie i połączenie warstw ze sobą pozwala na wyprodukowanie

wyrobu końcowego. Ponadto wytwarzanie przy użyciu technik przyrostowych może przebiegać w pełni automatycznie, a rola człowieka może być ograniczona jedynie do przygotowania i kontrolowania procesu. Wytwarzanie przez nakładanie kolejnych warstw materiału pozwala na otrzymywanie geometrii elementów, które bardzo trudno wykonać przy użyciu innego rodzaju procesów wytwarzania. Dlatego też coraz częściej w wielu gałęziach przemysłu kształtowanie przyrostowe jest jedyną techniką pozwalającą na uzyskanie określonego wyrobu [12-14]. Przyrostowe techniki wytwarzania umożliwiają również tworzenie warstw wierzchnich, wykorzystując materiał podłoża. Może być to użyte w procesie regeneracji, ale także w produkcji gotowych elementów. Wykorzystanie materiału podłoża umożliwia ponadto skrócenie czasu wytwarzania oraz znaczące obniżenie kosztów produkcji.

## 2. Cel pracy i przedmiot badań

Celem pracy było wytworzenie technologią napawania laserowego (LMD) funkcjonalnych napoin z proszku HS6-5-2c na stali 1.4923 (X22CrMoV12-1) stanowiącej materiał podłoża, określenie ich wymiarów geometrycznych oraz ocena wybranych właściwości mechanicznych i erozyjnych tych napoin. W trakcie badań właściwości napawanej stali 1.4923 określono twardość, mikrostrukturę oraz skład chemiczny napoin, a także porównano odporność na zużycie erozyjne wytworzonych warstw (wybranych napoin) z materiałem podłoża bez warstwy napawanej. Materiałem do badań była stal wysokostopowa 1.4923 w stanie po ulepszeniu cieplnym, przeznaczona między innymi do pracy w podwyższonej temperaturze, np. dla zastosowań przemysłowych na łopaty turbin parowych. Skład chemiczny zastosowanej stali wg normy PN-EN 10088-1 przedstawiono w tabeli 1. Do wytwarzania napoin użyto proszku HS6-5-2c, o wielkości cząstek w przedziale 30-130  $\mu\text{m}$ . Podany przez producenta skład chemiczny proszku przedstawiono w tabeli 2.

TABELA 1

Skład chemiczny stali 1.4923 [PN-EN 10088-1]

Skład chemiczny % mas.									
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Fe
0,18÷ 0,24	0,40÷ 0,90	0,18÷ 0,24	max. 0,025	max. 0,015	11,00÷ 12,50	0,30÷ 0,80	0,80÷ 1,20	0,25÷ 0,35	reszta

TABELA 2

Skład chemiczny proszku HS6-5-2c

Pierwiastek	C	Cr	Mo	W	V	Si	P, S	Fe
Udział [% mas]	0,86-0,94	3,8-4,5	4,7-5,2	5,9-6,7	1,7-2,1	0-0,45	max. 0,03	reszta

### 3. Metodyka i wyniki badań

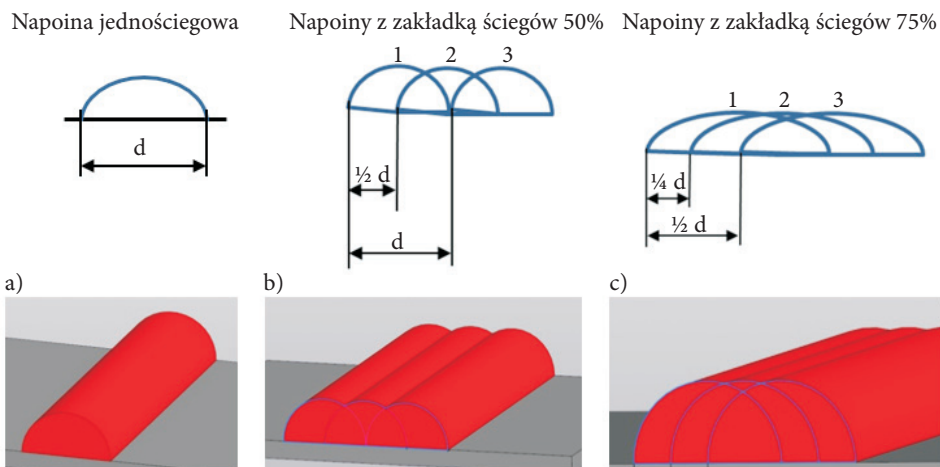
Wszystkie napoiny (ścieżki) wytworzone były z proszku HS6-5-2c na podgrzane do 600°C podłoże ze stali stopowej 1.4923. Ze względu na wysoki równoważnik zawartości węgla CEV (obliczony na podstawie wzoru opracowanego przez Międzynarodowy Instytut Spawalnictwa [16], po uwzględnieniu grubości próbek wynosi 2,69) konieczne było podgrzanie przed napawaniem podłoża do temperatury ok. 600°C. Proces laserowego napawania realizowano na stanowisku TruLaser Cell 3008 z wykorzystaniem argonu jako gazu osłonowego (wydatek gazu — 8 l/h). Parametry zmienne procesu wytwarzania napoin z proszku HS6-5-2c zamieszczono w tabeli 3, a schematy poglądowe wykonania próbek z napoinami przedstawiono na rysunku 1.

TABELA 3  
Parametry zmienne procesu wytwarzania próbek metodą napawania laserowego technologią LMD

Nazwa ścieżki/ wariantu napawania	Liczba ściegów, zakładka kolejnych ściegów na siebie	Moc [W]	F — prędkość [mm/ min]
1	jeden ścieg	700	550
2	jeden ścieg	800	550
3	jeden ścieg	900	550
4	jeden ścieg	700	600
5	jeden ścieg	800	600
6	jeden ścieg	900	600
7	jeden ścieg	700	650
8	jeden ścieg	800	650
9	jeden ścieg	900	650
10	liczba ściegów 3, zakładka ściegów na siebie 50% wg rysunku nr 1	800	650
11	liczba ściegów 5, zakładka ściegów na siebie 50% wg rysunku nr 1	800	650
12	liczba ściegów 3, zakładka ściegów na siebie 75% wg rysunku nr 1	800	650
13	liczba ściegów 5, zakładka ściegów na siebie 75% wg rysunku nr 1	800	650

Parametry stałe zastosowane podczas napawania próbek technologią LMD to:

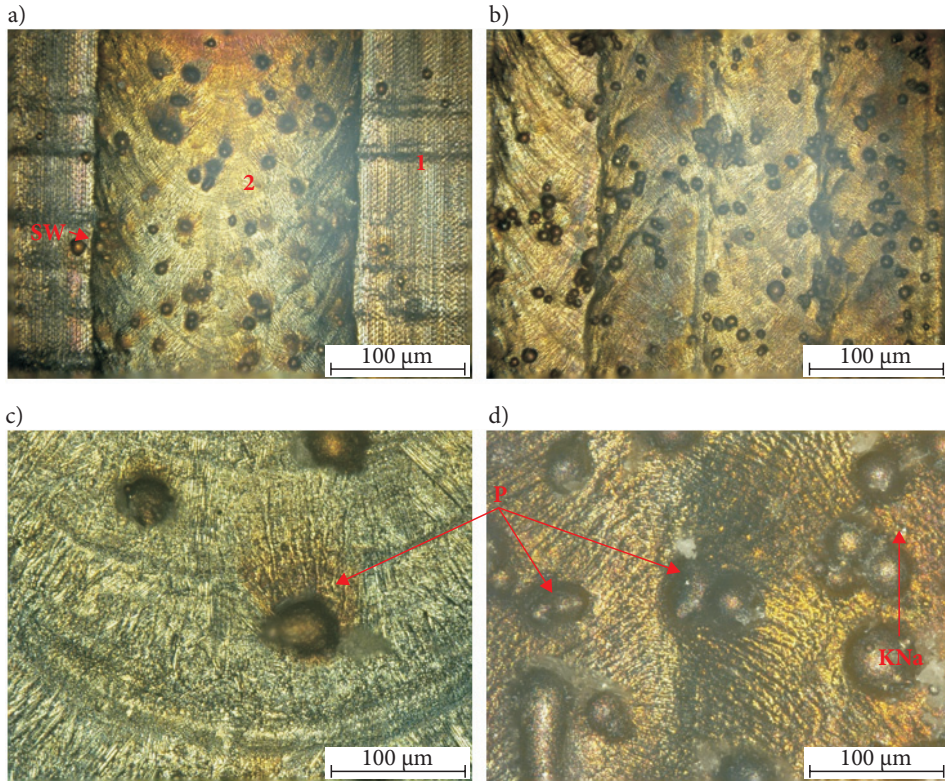
- materiał podłoża — stal konstrukcyjna wysokostopowa 1.4923 (X22Cr-MoV12-1),
- podgrzanie podłoża: 600°C, gaz osłonowy — argon; przepływ gazu 8 l/h,
- wydajność podawania proszku: 10 g/min, kalibracja 15 mm.



Rys. 1. Schemat poglądowy wykonania próbek z napoinami z proszku HS6-5-2c wytworzonymi metodą LMD na podłożu stali 1.4923:  $d$  — średnica wiązki laserowej padającej na powierzchnię próbki, a) napoina jednościegowa, b) napoina wielościegowa z zakładką ściegów 50%, c) napoina wielościegowa z zakładką ściegów 75%

Po napawaniu laserowym LMD przeprowadzono obserwacje powierzchni napoin z zastosowaniem mikroskopu optycznego. Powierzchnie przykładowej napoiny jednościegowej oraz wielościegowej przedstawiono na rysunku 2. W wyniku obserwacji powierzchni lica wytworzonych napoin stwierdzono typową strukturę dendrytyczną z widocznym kierunkiem krystalizacji. Nie zauważono obecności pęknięć, defektów oraz wad powierzchniowych. Na powierzchni napoin występują cząstki proszku częściowo połączone z napoiną (nadtopione powierzchniowo), co jest efektem charakterystycznym dla napawania proszkowego metodą LMD.

Wykonane napoiny poddano również badaniom na przekroju poprzecznym z zastosowaniem mikroskopii optycznej. Przeanalizowano wymiary geometryczne pojedynczych napoin (głębokość wtopienia, szerokość i wysokość napoiny) oraz określono wielkość strefy wpływu ciepła (SWC) — rys. 3. Pomiarów wymiarów geometrycznych pojedynczych napoin wykazały zróżnicowanie w ich wysokości. Największą wysokość uzyskano dla wariantu napawania nr 3 (815  $\mu\text{m}$ ), a najmniejszą dla wariantu nr 1 (600  $\mu\text{m}$ ). Głębokość wtopienia otrzymana podczas napawania wynosiła od ok. 400  $\mu\text{m}$  (wariant nr 4 i 7) do 577  $\mu\text{m}$  (wariant nr 8). Tak duża głębokość wtopienia oznacza między innymi znaczący efekt wymieszania napawanego materiału z materiałem podłoża. Szerokość pojedynczego ściegu napoiny uzyskana podczas napawania wynosiła z kolei od 1,75 do 2,07 mm. Najmniejszą szerokość uzyskano dla wariantu nr 4, a największą dla wariantu nr 5. Dla większości próbek strefa wpływu ciepła po napawaniu wynosiła ok. 570  $\mu\text{m}$ ; natomiast w wariantach nr 5 i 7 ok. 530  $\mu\text{m}$ , a w wariantach nr 2 i 3 aż 630  $\mu\text{m}$ .

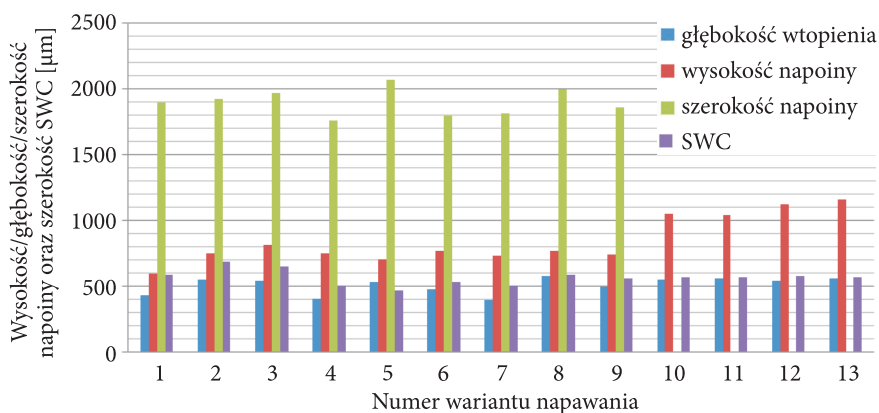
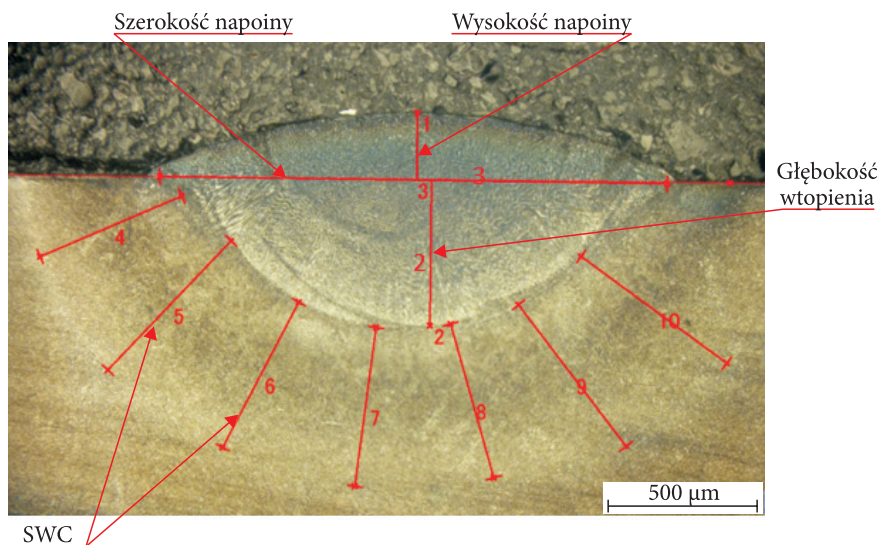


Rys. 2. Powierzchnia jednościegowej napoiiny z proszku HS6-5-2c (a, c) oraz napoiiny wielościegowej (b, d) — wariant napawania 11; 1 — podłoże, 2 — napoiina, SW — strefa wtopienia, KNa — kierunek napawania, P — niestopione cząstki proszku

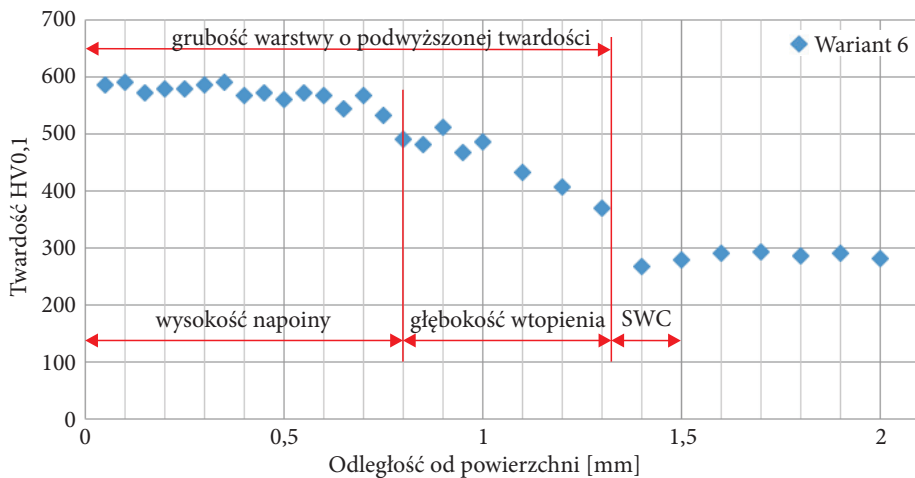
Pomiar twardości materiału po napawaniu wykonano metodą Vickersa przy obciążeniu 100 g. Pomiar rozpoczynano 50 µm od powierzchni napoiiny i realizowano w głąb napoiiny oraz materiału podłoża na odległości 2 mm od powierzchni. Wyniki uzyskane dla reprezentacyjnej napoiiny (wariant procesu nr 6) przedstawiono na rysunku 4.

Najwyższą twardość wynoszącą ponad 650 HV<sub>0,1</sub> uzyskano dla próbek napawanych jednym ściegiem wykonanych w wariantcie nr 4. Z kolei najniższą twardość (ok. 520 HV<sub>0,1</sub>) otrzymano dla próbek napawanych w wariantach nr 1 oraz 5. Najwyższy wzrost twardości (ok. 700 HV<sub>0,1</sub>) uzyskano dla próbek wykonanych w wariantcie procesu napawania nr 12 i 13, tj. próbek wykonanych w napawaniu wielościgowym (stopień nakładania kolejnych ściegów na poprzedni 75%). W trakcie badań stwierdzono wysoką jednorodność twardości w napoiinie i materiale podłoża. Najwyższa twardość w każdej z badanych próbek występowała przy powierzchni, w miarę oddalania się od niej twardość malała, aż do osiągnięcia

twardości materiału podłoża ok. 300 HV0,1 (rys. 4). Na rysunku 5 przedstawiono wyniki pomiaru grubości warstwy o podwyższonej mikrotwardości w porównaniu do podłoża oraz maksymalnej twardości uzyskanej w trakcie pomiaru materiału napoin i podłoża w przekroju poprzecznym. Najlepszy efekt w zakresie zarówno uzyskanej grubości warstwy, jak również maksymalnej twardości otrzymano dla wariantów napawania nr 12 i 13.

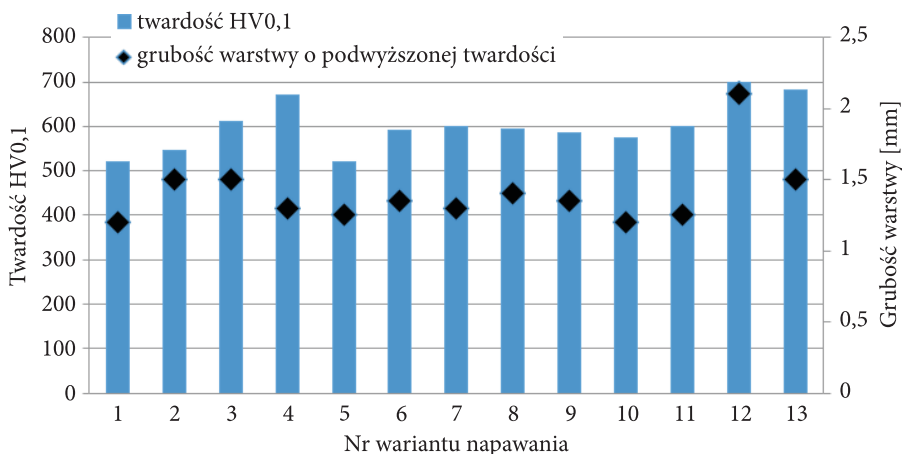


Rys. 3. Wymiary geometryczne napoin (wysokość, głębokość wtopienia, szerokość) oraz szerokości strefy wpływu ciepła (SWC) dla napoin wielościęgowych (wariantów 10-13) bez określenia szerokości napoin; linia pomiarowa 1 — wysokość napoiny, linia pomiarowa 2 — głębokość wtopienia, linia pomiarowa 3 — szerokość napoiny, linie pomiarowe 4-10 — szerokość SWC



Rys. 4. Rozkład twardości w funkcji odległości od powierzchni materiału próbki wykonanej w wariantcie nr 6 napawania laserowego LMD proszkiem stopowym HS6-5-2c na podłożu stali 1.4923

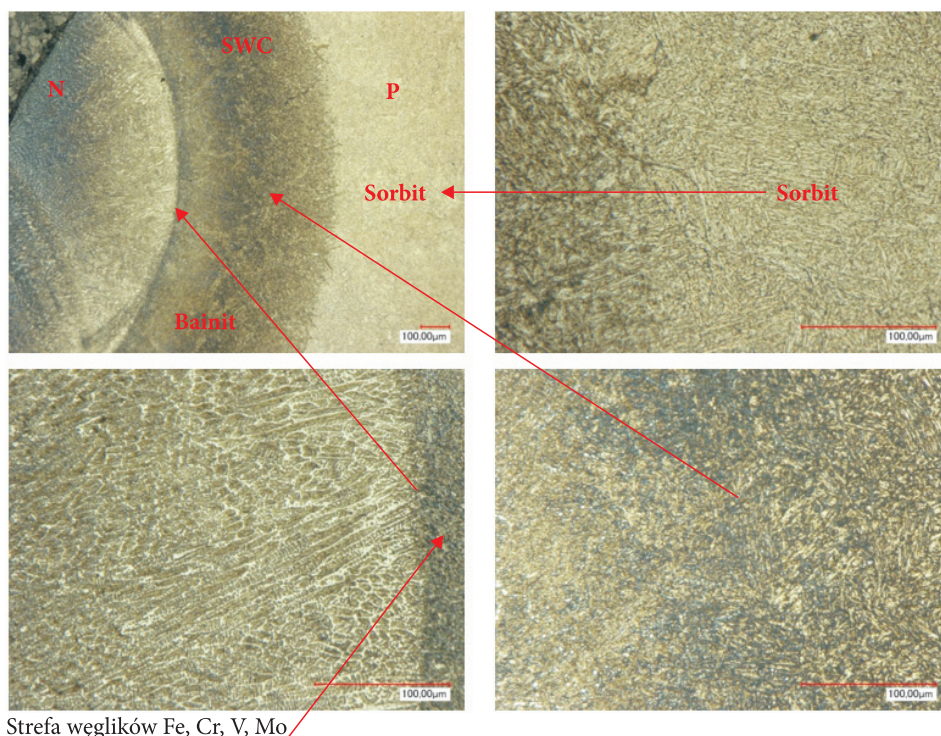
Wyniki obserwacji oraz analizy mikrostruktury w przekrojach poprzecznych wytworzonych napoin przedstawiono na rysunku 6. Uzyskano mikrostrukturę dendrytyczną z charakterystycznym kierunkiem krystalizacji prostopadle lub pod niewielkim kątem ( $\sim 70-90^\circ$ ) do powierzchni materiału bazowego. W strefie wpływu ciepła (SWC) uzyskano mikrostrukturę typową dla bainitu z niewielkimi wydzieleniami węglików (Fe, Cr, V, Mo) głównie w obszarze wokół napoiny w strefie wtopienia w podłożu na grubości ok. 10  $\mu\text{m}$ .



Rys. 5. Grubość warstwy (napoiny) o podwyższonej twardości w stosunku do podłoża oraz jej maksymalna twardość w przekroju poprzecznym



Materiał podłoża poza SWC ma mikrostrukturę typową dla martenzytu wysokoodpuszczonego (sorbitu). Jest to mikrostruktura, którą uzyskano podczas obróbki cieplnej (ulepszenie cieplne) wykonanej w procesie przygotowywania materiału bazowego stali 1.4923 do napawania. Brak zmian mikrostruktury materiału podłoża w trakcie napawania świadczy o tym, że zastosowane przed napawaniem podgrzewanie podłoża do 600°C nie miało istotnego wpływu na właściwości wytrzymałościowe i strukturalne materiału podłoża.



Rys. 6. Mikrostruktura powierzchni przekroju poprzecznego napoiny i materiału podłoża (stali 1.4923): N — napoina, SWC — strefa wpływu ciepła, P — podłoże

#### 4. Metodyka i wyniki badań odporności na erozję

Zużyciem erozyjnym nazywamy niszczenie materiału przez oddziaływanie strumienia cząstek padających na jego powierzchnię pod różnym kątem, który może się zmieniać od 0 do 90° w zależności od warunków pracy czy konstrukcji elementów i podzespołów maszyny. Medium przenoszącym cząsteczki może być powietrze lub ciecz.

Proces ten zależy od prędkości, twardości, wielkości, kształtu, masy cząstek oraz temperatury mieszaniny [8, 10]. Erozja jest bardzo niekorzystnym i trudnym do przewidzenia zjawiskiem. Na taki rodzaj zużycia szczególnie narażone są różnego rodzaju maszyny przepływowe, rurociągi, a także łopatkę turbin silników odrzutowych czy turbin parowych. Erozja przyczynia się do zmiany geometrii narażonych na nią elementów maszyn, co skutkuje skróceniem ich żywotności, zmniejszeniem sprawności czy degradacją elementów powodującą poważną awarię urządzenia [9].

Próbki przygotowane do badania odporności na erozję miały kształt walców o średnicy 25 mm i wysokości 15 mm. Powierzchnię próbek ze stali 1.4923 i powierzchnię napoin wykonanych technologią napawania laserowego LMD z proszku HS6-5-2c szlifowano na laboratoryjnej szlifierce talerzowej na papierze ściernym P320, tak aby uzyskać zbliżoną chropowatość powierzchni dla wszystkich badanych próbek. Przeprowadzone pomiary chropowatości powierzchni próbek przeznaczonych do badania odporności na erozję wykazały, że średnia wartość parametru chropowatości  $R_a$  zawierała się w przedziale od 0,16 do  $\pm 0,05 \mu\text{m}$ .

Odporność na erozję określono zarówno dla materiału 1.4923 po obróbce cieplnej, jak również materiału z wytworzoną podczas napawania laserowego LMD warstwą HS6-5-2c. Jako medium robocze w badaniach erozji zastosowano wodę pobieraną z sieci wodociągowej, która podawana była pod ciśnieniem 150 barów na powierzchnię badanych próbek przez myjkę ciśnieniową. Do strumienia wody dodawano proszek (kulki szklane o granulacji 70-110  $\mu\text{m}$ ) w ilości ok. 60 g/min. W trakcie badań w komorze roboczej wytworzono także atmosferę pary wodnej, która pochodziła z wytwornicy pary i miała temperaturę 120°C.

Badanie odporności na erozję wykonano na stanowisku do modelowych badań warstw wierzchnich i powłok technologicznych w środowisku wody, pary wodnej oraz z możliwością oddziaływania ścierniwa na badaną powierzchnię (rys. 7). W trakcie badań na stanowisku w komorze na obrotowej tarczy umieszczono dwanaście próbek, po sześć z materiału stali stopowej 1.4923 oraz z materiału stali 1.4923 z napoiną z proszku HS6-5-2c wykonaną technologią napawania laserowego LMD, co umożliwiło jednoczesne badania porównawcze stali 1.4923 oraz ww. stali z warstwą napawaną.

Badania porównawcze odporności na erozję stali 1.4923 po ulepszeniu cieplnym oraz stali 1.4923 po napawaniu proszku HS6-5-2c metodą LMD rozpoczęto od mycia w płuczce ultradźwiękowej (czas mycia 180 sekund, aceton). Po myciu próbki zważono na wadze firmy OHAUS typ „Pioneer” model PA413CM/1 o dokładności odczytu 0,001 g. Pomiar masy próbek wykonywano trzykrotnie. Na powierzchniach przeznaczonych do badania odporności na erozję wykonano pięć pomiarów chropowatości powierzchni z zastosowaniem profilometru Hommel-Etamic T1000 Basic z oprogramowaniem Turbo Detawin v1.34. Po pomiarach masy próbek, chropowatości powierzchni oraz obserwacji topografii powierzchni

próbki zamocowano w tarczy obrotowej, przy zapewnieniu ich stałego położenia względem tarczy. W trakcie badań stosowano następujące parametry:

- medium robocze: woda,
- wypełnienie komory roboczej: para o temperaturze 120°C,
- ciśnienie strugi wodnej: 150 barów,
- odległość dyszy (głowicy) od powierzchni próbki: 50 mm,
- prędkość obrotowa tarczy: 100 obr/min,
- kąt padania medium roboczego na próbkę: 45°,
- dodatek ścierniwa (kulek szklanych), wydajność podawania: ok. 60 g/1 min.

Uchwyt z przewodem ciśnieniowym do podawania wody pod ciśnieniem



Komora robocza do badań odporności na erozję

Sterowanie pracą uchwytu na próbki

Zbiornik na wodę z filtrami

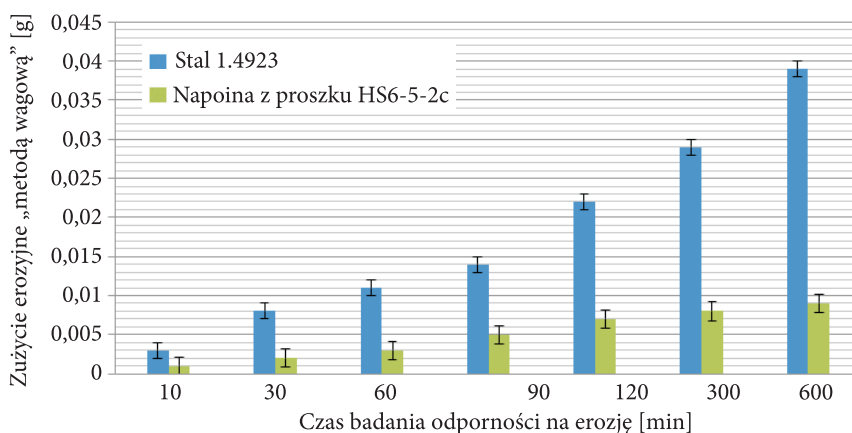
Źródło pary - wytwornica

Ścierniwo – kulki szklane

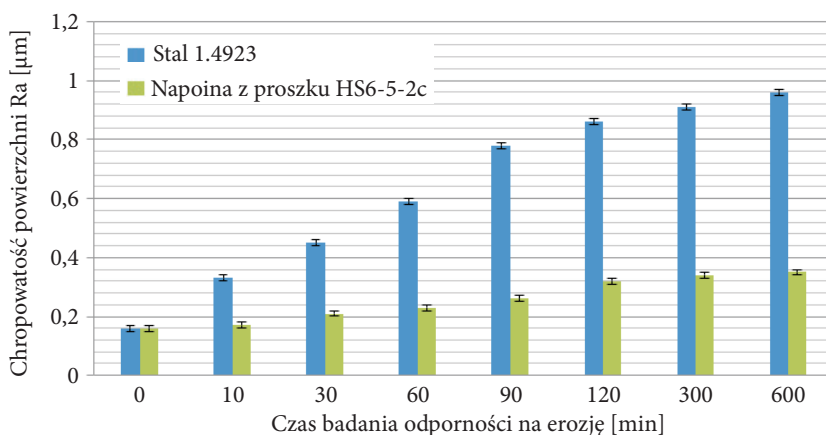
Rys. 7. Stanowisko do modelowych badań erozji powierzchni materiałów i powłok technologicznych w środowisku wody, pary wodnej, z możliwością oddziaływania ścierniwa na badaną powierzchnię

Dopływ pary do komory uruchomiono około 60 sekund przed rozpoczęciem podawania medium wodnego z kulkami szklanymi, tak aby para wypełniła komorę stanowiska. Badanie porównawcze odporności na erozję prowadzono w etapach czasowych jak na rysunku 8. Po każdym etapie badań próbki demontowano, myto w płuczce ultradźwiękowej, ważono, wykonywano pomiar chropowatości oraz obserwację powierzchni na mikroskopie optycznym analogicznie do procesu podczas preparatyki próbek przed badaniem. Wykresy zużycia erozyjnego (ubytku materiału) stali 1.4923 oraz napoiny z proszku HS6-5-2c w postaci histogramu wykonanego na podstawie wyników uzyskanych podczas badania odporności na erozję zaprezentowano na rysunku 8. Z uzyskanych badań wynika jednoznacznie,

że średni ubytek masy próbek z napoiną typu HS6-5-2c w trakcie 600-minutowego testu wynosił 0,009 gramów, a średni ubytek masy próbek ze stali 1.4923 w tym samym czasie to prawie 0,04 gramów, czyli był około 4,5-krotnie większy. Średnie wartości parametru chropowatości  $R_a$  zmierzone na powierzchni sześciu próbek poddanych badaniu odporności na erozję przedstawiono na rysunku 9. Pomiary chropowatości powierzchni również potwierdziły znaczny wzrost rozwinięcia powierzchni próbek wykonanych ze stali 1.4923 ( $R_a$  wynoszące 0,16 przed badaniem do  $R_a$  0,96 po badaniach). Dla materiału napoiny także stwierdzono wzrost, ale był on znacznie mniejszy i wyniósł tylko z  $R_a$  wynoszącego 0,16 przed badaniem do  $R_a$  0,35 po badaniach odporności na erozję.



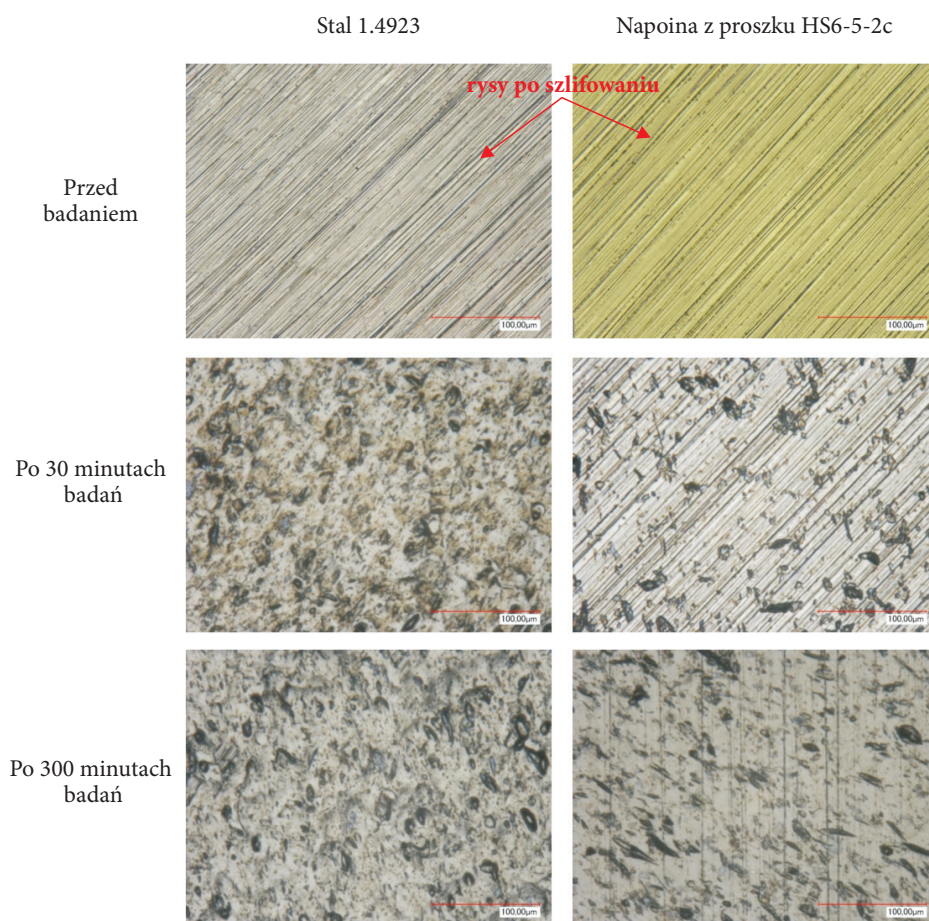
Rys. 8. Zużycie erozyjne (ubytek masy materiału — „metoda wagowa”) stali 1.4923 oraz napoiny wytworzonej metodą laserową LMD z użyciem proszku HS6-5-2c



Rys. 9. Chropowatość powierzchni stali 1.4923 oraz napoiny z proszku HS6-5-2c uzyskana z pomiarów powierzchni próbek poddanych badaniu odporności na erozję

Obserwacje powierzchni próbek na mikroskopie optycznym potwierdziły wyniki otrzymane podczas pomiaru ubytku masy próbek „metodą wagową”, a także wyniki pomiaru chropowatości powierzchni.

Wybrane zdjęcia topografii powierzchni wykonane przed rozpoczęciem testu, po 30 minutach oraz po 300 minutach badania odporności na zużycie erozyjne zaprezentowano na rysunku 10. Z analizy powierzchni próbek wynika, że próbki z materiału stali 1.4923 już po 10 minutach testu wykazują ślady zużycia erozyjnego, a w trakcie trwania testu powierzchnie próbek ulegały dalszemu zużywaniu (degradacji). Próbki z wytworzoną laserowo napoiną z proszku HS6-5-2c wykazały 4,5-krotnie mniejsze zużycie erozyjne w trakcie testu w porównaniu z materiałem stali 1.4923. Nawet po 600-minutowym teście widoczne były jeszcze ślady po obróbce mechanicznej powierzchni napoiny.



Rys. 10. Topografia powierzchni próbek przed badaniem oraz po badaniach odporności na zużycie erozyjne po różnym czasie procesu erozyjnego

## 5. Podsumowanie i wnioski końcowe

W wyniku wielościegowego napawania laserowego metodą LMD uzyskano napoiny o twardości od 500 do 700 HV<sub>0,1</sub>. Pomiędzy warstwą napawaną a podłożem występuje strefa przejściowa (strefa wpływu ciepła) o twardości od ok. 280 do 500 HV<sub>0,1</sub>. Twardość materiału wyjściowego po ulepszeniu cieplnym pozostała na niezmiennym poziomie i wynosiła od 300 do 320 HV<sub>0,1</sub>. Wytworzone powierzchnie napoin miały regularny i powtarzalny kształt z widocznymi cząstkami nieprzetopionego proszku na ich powierzchni. Jest to charakterystyczne i dopuszczalne dla procesu napawania laserowego proszkami stopowymi. W mikrostrukturze napoin stwierdzono występowanie uprzywilejowanego kierunku krystalizacji, a wzrost dendrytów podczas krzepnięcia i krystalizacji następował w różnych kierunkach, tj. prostopadle oraz pod różnymi kątami do powierzchni materiału rdzenia, zależnie od kierunków odprowadzenia ciepła. Warstwy wytworzone po napawaniu charakteryzują się wysoką jednorodnością, bez porów zamkniętych, rzadziny i wtrąceń tlenkowych, z wyraźną granicą wtopienia w materiał rodzimy. Badanie wybranych właściwości warstw wierzchnich wytwarzanych technologią laserową LMD z proszku HS6-5-2c na podłożu stali 1.4923 pozwoliło na sformułowanie następujących wniosków:

1. Napoiny wykonane technologią laserową LMD pomimo znacznego wymieszania materiału napoiny z podłożem cechowały się dobrą jakością; nie stwierdzono obecności pęknięć, innych defektów wewnętrznych oraz powierzchniowych.
2. Twardość wytworzonych warstw była wyższa niż materiału podłoża i wynosiła od 500 do ponad 700 HV<sub>0,1</sub> (dwukrotnie wyższa niż materiał wyjściowy). Najwyższa twardość w każdej z badanych próbek występowała przy powierzchni, w miarę oddalania się od powierzchni malała w sposób płynny aż do osiągnięcia twardości materiału podłoża.
3. Badania metalograficzne ujawniły mikrostrukturę dendrytyczną z charakterystycznym kierunkiem krystalizacji skierowanym głównie prostopadle lub pod niewielkim kątem do powierzchni materiału bazowego. W strefie wpływu ciepła (SWC) uzyskano mikrostrukturę typową dla bainitu z niewielkim wydzieleniem węglików (Fe, Cr, V, Mo) występujących głównie w strefie wtopienia proszku stopowego w podłożu o szerokości ok. 10 μm. Materiał podłoża poza SWC ma mikrostrukturę typową dla sorbitu.
4. Badania odporności na erozję w środowisku wody, pary wodnej oraz ścierniwa warstw wierzchnich ze stali 1.4923 i warstwy napawanej wykonanej metodą wielowarstwowego napawania laserowego LMD z użyciem proszku HS6-5-2c wykazały ok. 4,5-krotnie mniejsze zużycie próbek z warstwą technologiczną (napoiną) w porównaniu do materiału bez napawania.

Artykuł opracowano na podstawie zrealizowanego projektu badawczego nr PBS3/B5/37/2015 pt.: *Innowacyjna technologia laserowego napawania, hartowania i ablacyjnego strukturyzowania w procesach wytwarzania elementów funkcjonalnych podzespołów parowych turbin energetycznych.*

Artykuł wpłynął do redakcji 24.11.2023. Zatwierdzono do publikacji 12.12.2023.

Wojciech Chrzanowski <https://orcid.org/0000-0002-0425-4134>

Wojciech Napadłek <https://orcid.org/0000-0002-0535-8939>

Zdzisław Bogdanowicz <https://orcid.org/0000-0002-4514-8610>

#### LITERATURA

- [1] KLIMPEL A., *Napawanie i natryskiwanie cieplne*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
- [2] LAVERNIA E.J., WU Y., *Spray atomization and deposition*, John Wiley, Chichester, New York 1996.
- [3] DOBRZAŃSKI L.A., *Introduction on the importance of the materials structure and properties forming processes for contemporary industrial production*, Open Access Library, vol. 1, 2011.
- [4] KORPELA SEppo A., *Steam Turbines. Principles of Turbomachinery*, Chapter 5, John Wiley & Sons Inc., USA 2012.
- [5] DOBRZAŃSKI J., HERNAS A., *Trwałość i niszczenie elementów kotłów i turbin parowych*, WPŚ, Gliwice 2003.
- [6] TOBOTA K., CHMIELEWSKI T., *Napawanie laserowe powłok ochronnych na powierzchniach roboczych łopatek turbin parowych*, Przegląd Spawalnictwa, 88, 12, 2016, 38-42.
- [7] IWANIAK A., HETMAŃCZYK M., *Zabezpieczanie łopatek turbin parowych przed niszczeniem erozyjnym powłokami ochronnymi napawanymi laserowo*, Tribologia, 2, 2012, 31-39.
- [8] LISZEWSKI M., KRUPICZ B., *Badanie odporności erozyjnej wybranych materiałów*, Tribologia, 4, 2010, 313-322.
- [9] ZBROWSKI A., MIZAK W., *Analiza systemów wykorzystywanych w badaniach uderzeniowego zużycia erozyjnego*, Problemy Eksploatacji, 3, 2011, 235-250.
- [10] JURA S., SUCHOŃ J., *Zużycie erozyjne stopów żelaza jedno- i wielofazowych*, Krzepnięcie Metali i Stopów, PAN Oddział Katowice, nr 34, 1997.
- [11] DOBRZAŃSKI L.A., KLOC-PTASZNA A., MATULA G., *Gradient tool WC/HS6-5-2 materials produced using the powder metallurgy method*, Archives of Materials Science and Engineering, 31,1, 2008, 9-12.
- [12] DOBRZAŃSKI L.A., ACHELNIK-FRANCZAK A., *Metalowe materiały mikroporowate i lite do zastosowań medycznych i stomatologicznych*, Open Access Library, Annal VII (1), 2017.
- [13] GRUDZIŃSKI K., *Ćwiczenia laboratoryjne z wytrzymałości materiałów*, Politechnika Szczecińska, Szczecin 1972.
- [14] KOWALEWSKI Z., *Ćwiczenia laboratoryjne z wytrzymałości materiałów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
- [15] PN-EN ISO 4957:2018-09 *Stale narzędziowe*, 2018.
- [16] TASAK E., ZIEWIEC A., *Spawalność materiałów konstrukcyjnych*, Tom 1: *Spawalność stali*, Wydawnictwo „JAK”, Kraków 2009.

W. CHRZANOWSKI, W. NAPADŁEK, Z. BOGDANOWICZ

**Analysis of influence of LMD laser surfacing parameters on selected properties of surfacings produced from HS6-5-2c powder on 1.4923 steel**

**Abstract.** This paper presents the results of testing surfacings produced by LMD (Laser Metal Deposition) laser deposition technology for different laser beam parameters. On the surface layer of rectangular-shaped samples, made of 1.4923 steel, multiwall surfacing was produced from HS6-5-2c powder with different degrees of coverage. As a part of the laser deposition verification and testing, surface topography, microstructure and hardness tests were carried out in the deposition zone, heat affected zone, and the zone of the parent material. The surface of the surfacing and the microstructure in cross-section were observed on an optical microscope with fibre-optic image transmission. Hardness measurements were made in the cross-section of the sample using a Vickers FLC-50A hardness tester. Based on the observations, it was found that the obtained surfacings have a regular and repeatable shape. There were no welding defects on the surfaces of the produced surfacings and in the zone of fusion of the surfacing material with the substrate material. The hardness of the surfacings was obtained in the range of 500-700 HV0.1. The surfacings produced by LMD technology were subjected to erosion resistance tests, which showed significantly higher (about 5 times higher) resistance to erosion wear of the produced surface layers (surfacings based on HS6-5-2c powder) in comparison with the substrate material, i.e., steel 1.4923.

**Keywords:** steel 1.4923, HS6-5-2c alloy powder, LMD laser deposition, surface layer, deposition geometry, chemical composition, microstructure, hardness, erosion

**DOI:** 10.5604/01.3001.0054.2901