

Analysis of the microstructure and microhardness of the Stellite 1–WCL steel joint produced by the Direct Energy Deposition method

Analiza mikrostruktury i mikrotwardości połączenia Stellite 1 i stali WCL wytworzonego metodą Direct Energy Deposition

MARCIN MAŁYSZA
ROBERT ŻUCZEK
PIOTR WIELICZKO
ŁUKASZ ZIĘBA *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2025.12.10>

The study presents the results of investigations on the microstructure, chemical composition, and microhardness of the cobalt alloy Stellite 1 joined to WCL tool steel, produced by the Direct Energy Deposition (DED) method. Analyses were conducted using scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). Based on EDS results from two layers, the nature of element diffusion was determined, and the joint zones were identified: the deposit, the transition zone, and the heat-affected zone (HAZ). A gradient distribution of elements was observed, indicating an extensive diffusion zone. Microhardness results confirmed the transition from the hard structure of the deposit to the softer substrate. It was found that the joint is characterized by structural continuity.

Keywords: Direct Energy Deposition (DED); Stellite 1–WCL joint; microstructure; microhardness; diffusion; heat-affected zone (HAZ)

W pracy przedstawiono wyniki badań mikrostruktury, składu chemicznego oraz mikrotwardości połączenia stopu kobaltu Stellite 1 ze stalą narzędziową WCL, wytworzonego metodą Direct Energy Deposition (DED). Analizy przeprowadzono z wykorzystaniem mikroskopii skaningowej (SEM) oraz mikroanalizy rentgenowskiej (EDS). Na podstawie wyników EDS z dwóch warstw określono charakter dyfuzji pierwiastków oraz zidentyfikowano strefy połączenia: napoinę, strefę przejściową i strefę wpływu ciepła (HAZ). Zarejestrowano gradientowy rozkład pierwiastków, wskazujący na rozległą strefę dyfuzyjną. Wyniki mikrotwardości potwierdziły przejście od twardej struktury napoiny do miększego podłoża. Stwierdzono, że połączenie charakteryzuje się ciągłością strukturalną.

Słowa kluczowe: Direct Energy Deposition, mikrostruktura połączenia Stellite 1 i WCL, mikrotwardość połączenia Stellite 1 i WCL

Wstęp

Technologie przyrostowe, w tym Direct Energy Deposition, znajdują szerokie zastosowanie w inżynierii materiałowej, w sektorze napraw, regeneracji

i wzmacniania elementów. W procesie DED materiał w postaci proszku lub drutu dostarczany jest do obszaru oddziaływania skoncentrowanego źródła energii. Umożliwia to precyzyjne nanoszenie kolejnych warstw materiału [1], [2]. Technologia jest stosowana do napawania, np. stopów kobaltu takich jak Stellite 1, na stale narzędziowe lub konstrukcyjne. Pozwala to uzyskać gradientowe połączenie materiałów o różnych właściwościach [3]. Stop Stellite 1 jest klasycznym przedstawicielem grupy stopów kobaltu, opracowanych przez firmę Haynes Stellite. Charakteryzuje się odpornością na zużycie, korozję i działanie wysokich temperatur. Jest to stop o osnowie kobaltowej (γ -Co), w której rozpuszczone są pierwiastki stopowe, takie jak Cr, W oraz C. Wysoka zawartość C oraz Cr sprawia, że Stellite 1 należy do najtwardszych i najbardziej odpornych na ścieranie odmian tej grupy materiałów. Wykazuje on bardzo dobre właściwości eksploatacyjne w warunkach tarcia, erozji i korozji w wysokich temperaturach, dzięki czemu jest stosowany jako materiał do napawania powierzchni roboczych narzędzi, zaworów, łopatek turbin czy elementów pomp i armatury przemysłowej. Mikrostruktura stopu ma eutektyczny charakter, zapewniający ciągłość i odporność na pękanie twardych węglików typu M_7C_3 , $M_{23}C_6$, $W_{23}C_6$ oraz M_6C , gdzie „M” oznacza głównie atomy Cr, W i Co oraz lokalnych eutektyk Co–Cr–C o strukturze dendrytycznej, które powstają podczas krystalizacji [4]. Podczas procesu stapiania laserowego uzyskuje się drobną mikrostrukturę, co dodatkowo zwiększa odporność na ścieranie wraz z zapewnianiem twardości ok. 520–600 HV.

Stal WCL należy do grupy wysokowęglowych stali narzędziowych do pracy na gorąco, zawierających głównie pierwiastki Cr, W, V i Mo. Materiał ten przeznaczony jest na części narażone na obciążenia cieplno-mechaniczne, takie jak formy odlewnicze czy elementy pracujące w wysokiej temperaturze [5]. Stal WCL ma strukturę osnowy martenzytycznej lub bainityczno-martenzytycznej oraz posiada rozproszone węgliki typu $M_{23}C_6$, M_6C oraz MC. Węgliki te odpowia-

* Mgr inż. Marcin Małysza – marcin.malysza@kit.lukasiewicz.gov.pl, <https://orcid.org/0000-0002-7484-1393> – Sieć Badawcza Łukasiewicz – Krakowski Instytut Technologiczny.

Dr inż. Robert Żuczek – robert.zuczek@kit.lukasiewicz.gov.pl, <https://orcid.org/0000-0002-2663-7099> – Sieć Badawcza Łukasiewicz – Krakowski Instytut Technologiczny.

Mgr inż. Piotr Wieliczko – piotr.wieliczko@kit.lukasiewicz.gov.pl, <https://orcid.org/0000-0003-0605-4088> – Sieć Badawcza Łukasiewicz – Krakowski Instytut Technologiczny.

Mgr inż. Łukasz Zięba – lukasz.zieba@arp.pl, Centrum B+R Grupy ARP S.A.

dają za utwardzenie dyspersyjne, a także za stabilność termiczną. Podczas eksploatacji lub oddziaływania cieplnego mogą ulegać koalescencji, rozpuszczeniu lub redystrybucji, co ma kluczowe znaczenie dla charakteru strefy wpływu ciepła [6], [7], [8].

Materiały, metodyka badań i wyniki

W ramach realizowanych prac przeprowadzono proces DED z użyciem lasera światłowodowego. Proszek Stellite 1 podawano w atmosferze ochronnej. Zastosowano parametry zapewniające dobrą przyczepność i ograniczenie pęknięć, które zostały przedstawione w tab. 1.

Table 1. Printing parameters of Stellite 1 material on WCL substrate

Tablica 1. Parametry druku materiału Stellite 1 na podłożu WCL

Moc lasera [W]	Wysokość warstwy [in]	Przepływ [g/min]	Szybkość kontur [in/min]	Szybkość wypełnienia [in/min]	Szerokość wypełnienia [in]	Uwagi
1300	0,02	14,1	40	40	0,05	brak pęknięć

Wytworzone zostały próbki w postaci napawanych wysp na podłożu ze stali WCL. Przekrój oraz płyta z napawanymi wyspami została przedstawiona na rys. 1.

Analiza mikrostruktury wykonana przy użyciu skaningowej mikroskopii elektronowej w połączeniu z lokalną analizą składu chemicznego metodą EDS umożliwiła szczegółową ocenę budowy warstwy napawanej Stellite 1, naniesionej na stal WCL metodą Direct Energy Deposition. Obserwacje wykonane na przekrojach poprzecznych pozwoliły wyróżnić trzy charakterystyczne strefy mikrostrukturalne: war-



Fig. 1. Cross-section of the Stellite 1 joint with the WCL substrate
Rys. 1. Przekrój połączenia Stellite 1 z podłożem WCL

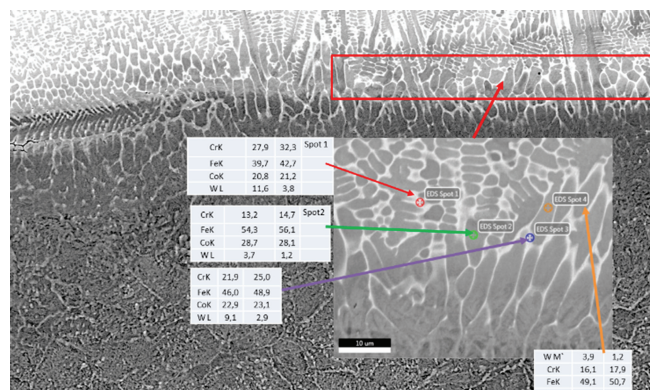


Fig. 2. EDS measurement showing the distribution of elements in individual zones of the Stellite 1 to WCL joint – Layer 1
Rys. 2. Pomiar EDS określający rozkład pierwiastków w poszczególnych strefach połączenia Stellite 1 z WCL – Warstwa 1

stwę napawaną, strefę przejściową oraz strefę wpływu ciepła. W warstwie napawanej w górnej części przedstawionej na rys. 2 zaobserwowano dendrytyczną strukturę, typową dla procesów laserowego napawania stopów na bazie Co. Osnowę stanowi faza γ -Co, w której znajdują się wydzielenia węglkowe. Analiza EDS przeprowadzona w punktach pomiarowych (Spot 1–3) wykazała zawartość kobaltu ($\sim 20\%$), chromu ($\sim 28\%$) i wolframu ($\sim 12\%$), przy stosunkowo niewielkim udziale żelaza, którego stężenie rośnie w kierunku podłoża. Obserwowane wydzielения mają nieregularną morfologię i są bogate w Cr i W, co wskazuje na obecność węglków typu Cr_7C_3 i W_{23}C_6 , a także eutektyk Co–Cr–C, powstających w późnych etapach krzepnięcia. Tego rodzaju mikrostruktura jest typowa dla Stellite 1 napawanego metodami o wysokiej gęstości energii, gdzie szybkie chłodzenie prowadzi do powstania drobnokrystalicznej eutektyki kobaltowo-chromowej [9].

Strefa przejściowa pełni kluczową funkcję w zapewnieniu ciągłości między materiałami o różnym składzie chemicznym i współczynniku rozszerzalności cieplnej. Zrównoważona dyfuzja żelaza i kobaltu pozwala uzyskać gradientowy rozkład twardości, co

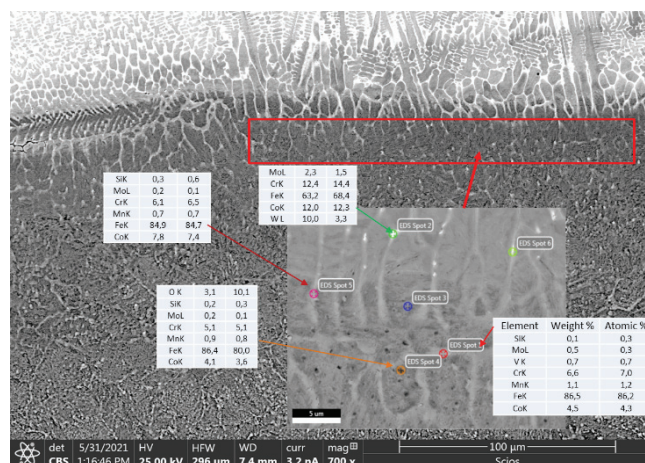


Fig. 3. EDS measurement showing the distribution of elements in individual zones of the Stellite 1 to WCL joint – Layer 2
Rys. 3. Pomiar EDS określający rozkład pierwiastków w poszczególnych strefach połączenia Stellite 1 z WCL – Warstwa 2

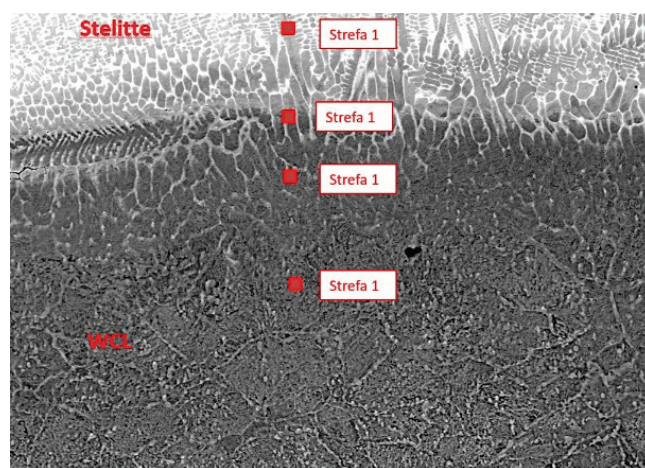


Fig. 4. Zones of microhardness measurements in the joint of the two materials
Rys. 4. Strefy pomiarów mikrotwardości na połączeniu dwóch materiałów

poprawia odporność połączenia na cykliczne obciążenia cieplne [10]. Podłoże i strefa wpływu ciepła (HAZ) zostały przedstawione na rys. 3. W głębszych warstwach materiału podłoża (oznaczonych jako Warstwa 2) analiza EDS wykazała skład typowy dla strefy wpływu ciepła (HAZ) Fe – 63–86%, Cr – 5–14%, Co – 3–12%, W – do 10 %. Obecność pierwiastków pochodzących z warstwy napawanej (Co, W, Cr) w strukturze stali WCL jednoznacznie wskazuje na wystąpienie rozległej strefy dyfuzyjnej, w której nie doszło do stopienia, lecz zachodziły intensywne procesy wymiany masy w warunkach wysokiej temperatury. Osnową HAZ jest ferryt (α -Fe) wzbogacony w pierwiastki stopowe, natomiast lokalnie obserwuje się wydzielenia węglików Cr_{23}C_6 i M_6C (Fe, Co, W) oraz faz międzymetalicznych, takich jak Fe_7W_6 . Występowanie tych faz potwierdzają również badania [11], [12], w których przedstawiono, że w procesach laserowego napawania stopów kobaltu na stale narzędziowe tworzy się szeroka strefa reakcji dyfuzyjnej o mieszanym składzie Fe–Co–Cr–W, wpływająca na lokalne umocnienie podłoża.

W strefie HAZ mogą również zachodzić przemiany mikrostrukturalne typowe dla stali narzędziowych: częściowa rekrytalizacja, rozrost ziarna oraz rozpad metastabilnych faz pochodzących z obróbki cieplnej stali WCL. Efektem tych procesów jest modyfikacja twardości – od zwiększonej w pobliżu połączenia wskutek wydzielenia węglików Cr_{23}C_6 i M_6C , po zmniejszoną w głębszych partiach podłoża, gdzie zachodzi odpuszczanie struktury martenzytycznej [13].

Charakterystyka rozkładu twardości została przeprowadzona w 4 strefach, pokazanych na rys. 4.

Wyniki mikrotwardości wskazują na wyraźny gradient właściwości w kierunku od powierzchni napawanej do wnętrza podłoża. Najwyższe wartości ~ 710 HV występują w warstwie napawanej Stellite 1, wynikającej z obecności twardych faz węglkowych oraz eutektycznej struktury. W strefie przejściowej obserwuje się spadek twardości do poziomu ~ 630 HV. Wynika to z częściowego rozcieńczenia materiału napawanego składnikami pochodzącymi z podłoża oraz powstawania faz mieszanych Fe–Co–Cr. Zjawisko to jest potwierdzeniem intensywnej dyfuzji pierwiastków podczas procesu DED i odpowiada za łagodne przejście właściwości mechanicznych między warstwą napawaną, a podłożem. Obecność lokalnych wydzielen węglików Cr i W w strefie przejściowej wpływa korzystnie na odporność połączenia na zużycie, jednak nadmierne ich nagromadzenie może prowadzić do kruchości, jeśli proces nie jest prawidłowo kontrolowany [14], [15]. W strefie wpływu ciepła (HAZ) zanotowano dalszy spadek mikrotwardości w zakresie ~ 610 HV. Jest to spowodowane wysoką temperaturą i gradientem cieplnym podczas procesu napawania, który prowadzi do częściowego rozpadu struktury zahartowanej stali WCL oraz do procesów rekrytalizacji i odpuszczania. Jednocześnie w HAZ dochodzi do wydzielenia węglików Cr_{23}C_6 i M_6C (Fe, Co, W), które częściowo kompensują spadek twardości, jednak nie są w stanie utrzymać jej na tym samym poziomie co w warstwie napawanej [16], [17]. Najniższe wartości

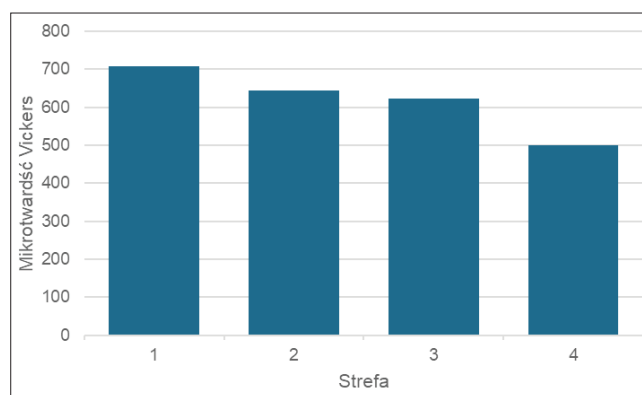


Fig. 5. Results of Vickers microhardness measurements for individual zones

Rys. 5. Wyniki pomiarów mikrotwardości w skali Vickersa dla poszczególnych stref

mikrotwardości ~ 500 HV wykazuje materiał podłoża. W tej strefie nie obserwowano znaczącego wpływu dyfuzji Co i W, co potwierdza ograniczony zasięg oddziaływania cieplnego w głębszych warstwach materiału. Zestawienie pomiarów zostało przedstawione na rys. 5.

Wnioski

- Proces napawania metodą Direct Energy Deposition pozwolił na skuteczne połączenie Stellite 1 ze stalą narzędziową WCL, tworząc ciągłą i związaną warstwę.
- Analiza mikrostruktury ujawniła strefowość połączenia. W warstwie napawanej zidentyfikowano strukturę dendrytyczną z osnową γ -Co z wydzieleniami węglików Cr_7C_3 i W_{23}C_6 , które odpowiadają za wysoką twardość. Strefa przejściowa charakteryzowała się silną dyfuzją pierwiastków Fe, Co, Cr, W, co wskazuje na intensywne oddziaływanie cieplne procesu.
- Rozkład mikrotwardości w przekroju połączenia potwierdził obecność wyraźnego gradientu twardości – od bardzo twardej warstwy napawanej do podłoża o niższej twardości. Spadek twardości jest stopniowy, co świadczy o uformowanej strefie przejściowej.
- W wyniku procesu DED doszło do częściowej modyfikacji strefy wpływu ciepła HAZ. W jej obrębie nastąpiły przemiany mikrostrukturalne (przegrzanie, rekrytalizacja i wydzielenie węglików), które wpływają na lokalne zwiększenie twardości.
- Kontrola parametrów procesu jest kluczowa dla utrzymania korzystnych właściwości użytkowych.

Podziękowania

Przedstawione wyniki zostały opracowane w ramach projektu finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, MAZOWSZE/0157/19-00 pt. „Opracowanie i wdrożenie kompletnej linii technologicznej do przyrostowego odtwarzania, regeneracji i ulepszania części instalacji przemysłowych dla przedsiębiorstw z branży naftowej i chemicznej – w celu skrócenia czasu i obniżenia kosztów ich pozyskania”

LITERATURA

- [1] T. DebRoy et al., *Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties*, Prog. Mater. Sci., t. 92, s. 112–224, mar. 2018, doi: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.
- [2] D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, C. Emmelmann, *Additive manufacturing of metals*, Acta Mater., t. 117, s. 371–392, wrz. 2016, doi: 10.1016/j.actamat.2016.07.019.
- [3] W. Yang, K. Zhang, D. Zeng, J. Liu, F. Li, W. Liu, *Microstructure evolution and wear behavior of Stellite12 coating prepared by laser-directed energy deposition on H13 steel*, Mater. Today Commun., t. 41, s. 110960, grudz. 2024, doi: 10.1016/j.mtcomm.2024.110960.
- [4] *Stellites: properties, applications and machining perspective: a review*, ResearchGate. Dostęp: 9 października 2025. [Online], https://www.researchgate.net/publication/303943746_Stellites_properties_applications_and_machining_perspective_a_review
- [5] A.K. Gonzalez-Moran et al., *Improved mechanical and wear properties of H13 tool steel by nitrogen-expanded martensite using current-controlled plasma nitriding*, J. Mater. Res. Technol., t. 25, s. 4139–4153, lip. 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.06.221.
- [6] V. Braga et al., *Microstructural and mechanical aspects of laser metal deposited H13 powder for die repair*, Mater. Today Commun., t. 29, s. 102945, grudz. 2021, doi: 10.1016/j.mtcomm.2021.102945.
- [7] *Powder bed fusion 3D printing in precision manufacturing for biomedical applications: a comprehensive review*, ResearchGate, paź. 2025, doi: 10.3390/ma17030769.
- [8] *Directed Energy Deposition (DED) additive manufacturing: physical characteristics, defects, challenges and applications*, ResearchGate, sie. 2025, doi: 10.1016/j.mat-tod.2021.03.020.
- [9] *Microstructural characterization and microscopy analysis of laser cladding Stellite12 and tungsten carbide*, ResearchGate, sie. 2025, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.08.007.
- [10] *Microstructure and wear properties of a novel mixed stellite coating deposited on H13 steel using laser cladding technology* / Transactions of the Indian Institute of Metals. Dostęp: 9 października 2025. [Online], <https://link.springer.com/article/10.1007/s12666-024-03444-3>
- [11] *Impact of diffusion coating and laser treatment on microstructure and mechanical properties of steel* / Request PDF, ResearchGate, sie. 2025, doi: 10.36868/ejmse.2024.09.04.245.
- [12] Y. Gao et al., *Effect of the laser cladding parameters on microstructure and elevated temperature wear of FeCrNiTiZr coatings*, Materials, t. 17, nr 18, s. 4444, wrz. 2024, doi: 10.3390/ma17184444.
- [13] *Microstructure and mechanical properties of a martensitic stainless steel (0.2%C-12%Cr) after quenching and partitioning (Q&P) process*, ResearchGate, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.04.018.
- [14] S.P. Singh, P.K. Verma, S. Singh, M. Kapoor, R. Balu, *Microstructural characterization and electrochemical behaviour of HVOF sprayed WC-Co-Cr coatings on 316L boiler steel stainless steel*, Results Surf. Interfaces, t. 16, s. 100248, sie. 2024, doi: 10.1016/j.rsufi.2024.100248.
- [15] Y. Cai, Y. Chen, S.M. Manladan, Z. Luo, F. Gao, L. Li, *Influence of dilution rate on the microstructure and properties of FeCrCoNi high-entropy alloy coating*, Mater. Des., t. 142, s. 124–137, mar. 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2018.01.007.
- [16] Q. Yu et al., *Comparative investigation on the microstructure and corrosion properties of surfacing cobalt alloys by various methods*, Surf. Coat. Technol., t. 494, s. 131386, paź. 2024, doi: 10.1016/j.surfcoat.2024.131386.
- [17] R. Dharavathu, K. Shetty, G. Muvvala, *A study on laser cladding of Stellite 6 by conventional and high-speed laser cladding process*, Surf. Coat. Technol., t. 515, s. 132623, lis. 2025, doi: 10.1016/j.surfcoat.2025.132623. ■