

Evaluation of the strength of IN625 layers deposited on WCL steel using the Directed Energy Deposition method

Ocena wytrzymałości warstw IN625 napawanych na stal WCL metodą Directed Energy Deposition

MARCIN MAŁYSZA
ROBERT ŻUCZEK
ŁUKASZ ZIĘBA*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2025.11.9>

The aim of this study was to investigate the feasibility of using Directed Energy Deposition (DED) technology for depositing a nickel-based superalloy IN625 onto a WCL tool steel substrate in the context of component regeneration and repair under high load conditions. The process was carried out at different laser powers (1100 W and 1300 W), followed by tensile testing and microhardness measurements. The analysis showed that with increasing laser power, both the yield strength ($R_{p0.2}$) and tensile strength (R_m) increased, albeit at the expense of reduced elongation (A). The microhardness results confirmed the presence of a transition zone with increased hardness (up to ~600 HV), resulting from the formation of intermetallic phases and quenching transformations in the WCL steel. The IN625 cladding exhibited a characteristic dendritic structure, while the substrate was dominated by martensitic transformations.

Keywords: Directed Energy Deposition (DED), IN625 cladding, WCL tool steel, additive manufacturing technologies

Celem pracy było zbadanie możliwości zastosowania technologii Directed Energy Deposition (DED) do napawania nadstopu niklu IN625 na podłożu ze stali narzędziowej WCL w kontekście regeneracji i naprawy elementów pracujących w warunkach wysokich obciążeń. Proces prowadzono przy różnych mocach lasera (1100 W i 1300 W), a następnie wykonano próby rozciągania oraz pomiary mikrotwardości. Analiza wykazała, że wraz ze wzrostem mocy lasera rosną wartości granicy plastyczności ($R_{p0.2}$) i wytrzymałości na rozciąganie (R_m), jednak kosztem obniżenia wydłużenia A . Wyniki mikrotwardości potwierdziły obecność strefy przejściowej o podwyższonej twardości (do ~600 HV), wynikającej z wydzielenia faz międzymetalicznych oraz przemian hartowniczych w stali WCL. Napawina IN625 wykazywała charakterystyczną strukturę dendrytyczną, natomiast w podłożu dominowały przemiany martenzytyczne.

Słowa kluczowe: Directed Energy Deposition (DED), napawanie IN625, stal narzędziowa WCL, technologie przyrostowe

Wprowadzenie

Współczesny przemysł stoi przed wyzwaniem poprawy trwałości i efektywności eksploatowanych elementów maszyn oraz narzędzi, szczególnie w sektorach o wysokiej intensywności obciążeń, takich jak energetyka, lotnictwo, przemysł chemiczny oraz motoryzacyjny. W tych obszarach awarie i zużycie komponentów prowadzą do kosztownych przestojów i strat produkcyjnych. Przykładowo w sektorze produkcji ciężkich maszyn w 2023 roku godzinowy koszt przestoju osiągał kwoty zbliżone do 300 000 USD [1]. Jednym z kluczowych kierunków rozwoju technologii inżynierskich jest regeneracja newralgicznych elementów zamiast ich całkowitej wymiany, co pozwala nie tylko ograniczyć koszty, ale także zmniejszyć zużycie surowców i energii. Badania z zakresu utrzymania ruchu wskazują, że największy udział w kosztach wsparcia technicznego stanowią części zamienne – zarówno ich zużycie, jak i utrzymywanie zapasów blisko odbiorcy oraz transport [2]. Tradycyjne techniki regeneracji, takie jak napawanie łukowe, plazmowe czy spawanie laserowe, umożliwiają odtworzenie geometrii zużytych powierzchni, jednak charakteryzują się ograniczeniami w zakresie kontroli mikrostruktury, powstawania dużych naprężeń reszkowych czy szerokiej strefy wpływu ciepła [3]. W tym kontekście coraz większe znaczenie zdobywają technologie, które pozwalają na precyzyjne nanoszenie materiału, kontrolę parametrów procesu oraz uzyskiwanie połączeń o korzystniejszych właściwościach. Istnieje kilka kluczowych technologii wytwarzania przyrostowego stosowanego w procesie napraw. Należą do nich m.in. metody LPBF – Laser Powder Bed Fusion oraz DED – Direct Energy Deposition. Technologia LPBF polega na budowaniu elementu warstwa po warstwie z proszków polimerowych lub metalowych. Proces rozpoczyna się od podziału modelu 3D na warstwy. Następnie cienka warstwa proszku jest nanoszona na platformę roboczą, a laser lub wiązka elektronowa spieka lub topi cząstki proszku zgodnie z kształtem warstwy

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

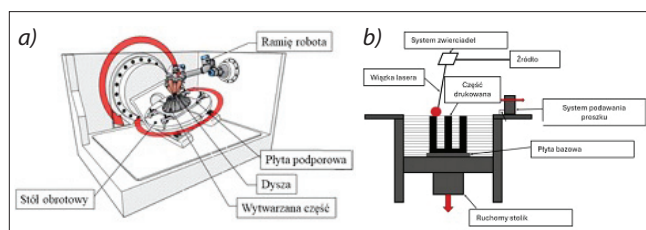


Fig. 1. Additive manufacturing technologies: a) DED – Directed Energy Deposition [4], b) LPBF – Laser Powder Bed Fusion [5]
Rys. 1. Technologie wytwarzania przyrostowego a) DED – Direct Energy Deposition [4], b) LPBF – Laser Powder Bed Fusion [5]

modelu. Po utworzeniu każdej warstwy platforma obniża się o jej grubość i proces jest powtarzany aż do uzyskania pełnego elementu. Na końcu przeprowadza się post-processing – odzysk niewykorzystanego proszku i ewentualną obróbkę cieplną gotowego wyrobu [4]. Natomiast metoda DED to rodzaj technologii przyrostowej, która stosowana jest do osadzania materiałów takich jak stale nierdzewne i narzędziowe, stopy niklu, tytanu, kobaltu oraz kompozyty. Proces polega na wykorzystaniu źródła ciepła o wysokiej gęstości energii, które tworzy ciekłe jezioro w podłożu i jednocześnie stapia materiał podawany w postaci proszku lub drutu. Kolejne ścieżki i warstwy nakładają się zgodnie z podziałem modelu CAD. Technologia ta jest szczególnie przydatna w naprawie elementów o dużej wartości, wypełnianiu pęknięć, regeneracji i modernizacji części eksploatowanych [5]. Na rys. 1 przedstawiony został schematycznie proces wytwarzania przyrostowego wymienionymi wyżej metodami.

Materiały, metodyka badań i wyniki

W publikacji omówiono zastosowanie technologii DED jako jedną z możliwości jej aplikacyjności do naprawy narzędzi i elementów eksploatowanych w wysokich temperaturach i środowisku korozyjnym, co stanowi obiecujące rozwiązanie w zakresie szybkiego serwisowania i naprawy komponentów maszyn. W realizowanym projekcie łączenia, nadstopów niklu na przykładzie IN625 o wysokiej odporności korozyjnej i termicznej z twardymi stalami narzędziowymi WCL przeprowadzono analizy prowadzące do zwiększonej trwałości regenerowanych elementów. W tab. 1 został przedstawiony skład wykorzystanego proszku.

TABLE I. Standard chemical composition of IN625 powder [wt.%] used in the cladding process

TABLICA I. Normatywny skład proszku IN625 [udział %] wykorzystanego w procesie napawania

	Fe	Ni	Cr	Mo	Ti	Si	C	Nb
In625	4,5	62	22	9,0	0,2	0,15	0,25	3,5

TABLE II. Laser operating parameters during IN625 deposition on WCL

TABLICA II. Parametry pracy lasera podczas nakładania IN625 na WCL

Polska	Moc lasera [W]	Wysokość warstwy [in]	Przepływ [g/min]	Szybkość kontur [in/min]	Szybkość wypełnienia [in/min]	Szerokość wypełnienia [in]	Uwagi
P1	1100	0,02	14,1	40	40	0,05	Brak pęknięć
P5	1300	0,02	14,1	40	40	0,05	Brak pęknięć

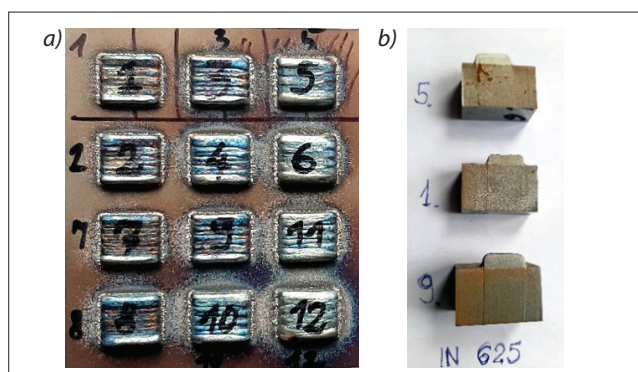


Fig. 2. a) Samples clad with IN625 powder on WCL tool steel, b) cross-section
Rys. 2. a) Próbkki napawane z proszku IN625 na stal narzędziową WCL, b) przekrój poprzeczny

Materiał został napawany na podłożu w maszynie do drukowania RPMI 557XR. Parametry technologiczne mocy lasera zostały przedstawione w tab. 2.

Na rys. 2 przedstawiony został wydrukowany zestaw próbek technologicznych w postaci materiału napawanego IN625 na płytę ze stali WCL.

Z wstępnie przygotowanego materiału wycięte zostały próbki przeznaczone do badania statycznej wytrzymałości na rozciąganie w urządzeniu Zwick Roell AllroundLine Z10. Na rys. 3 przedstawiono obszary połączenia napawanego, z którego wycięte zostały próbki do badań, oraz próbki po ich zniszczeniu.

Urządzenie do badania wytrzymałości na rozciąganie jest wyposażone w dedykowany uchwyt na próbki o zadanym kształcie. Trawers urządzenia w trakcie badań przemieszcza się ze stałą prędkością odkształcenia $6,4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

Wyniki badań wytrzymałościowych zostały zestawione w tab. 3 z zaznaczeniem parametrów technologicznych procesu drukowania.

TABLE III. Summary of tensile test results for samples produced with laser powers of 1100 W and 1300 W

TABLICA III. Zestawienie wyników z próby rozciągania dla próbek wykonanych z mocą lasera 1100 W oraz 1300 W

Oznaczenie próby	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m MPa	A %
Inconel 625granica-1100W-1	384	658	7,85
Inconel 625granica-1100W-2	446	657	7,45
Inconel 625granica-1100W-3	414	662	7,45
Inconel 625granica-1100W-4	421	661	7,94
Inconel 625granica-1300W-1	437	674	7,28
Inconel 625granica-1300W-2	457	670	7,09
Inconel 625granica-1300W-3	516	667	6,78
Inconel 625granica-1300W-4	483	660	6,78
Inconel 625granica-1300W-5 – pęknięcie po granicy	524	658	6,83

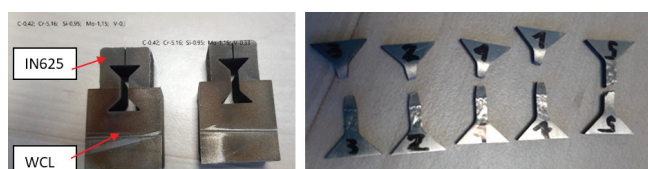


Fig. 3. Cladding area from which the samples were cut
Rys. 3. Obszar napawania, z którego wycięto próbki

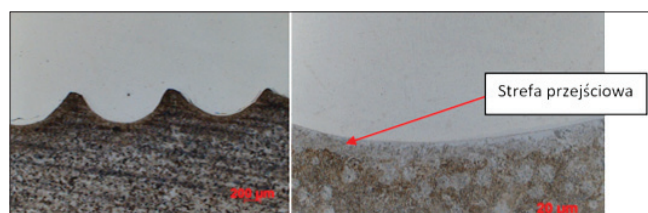


Fig. 4. Optical microstructure of the IN625/WCL substrate interface zone
Rys. 4. Mikrostruktura optyczna strefy połączenia IN625 z podłożem WCL

Analiza wyników prób rozciągania wykazała wpływ mocy lasera na właściwości mechaniczne złączy IN625–WCL. Wraz ze wzrostem mocy z 1100 W do 1300 W zaobserwowano systematyczny wzrost granicy plastyczności $R_{p0,2}$ oraz wytrzymałości na rozciąganie R_m . Wzrost ten świadczy o skuteczniejszym stapianiu proszku i mocniejszym wiązaniu napoiny z podłożem przy wyższej gęstości energii [6]. Równolegle zaobserwowano spadek całkowitego wydłużenia A , co sugeruje, że przy większej energii cieplnej struktura staje się bardziej krucha. Zwiększona zawartość faz międzymetalicznych oraz bardziej intensywne przemiany w strefie przejściowej mogły ograniczyć zdolność materiału do odkształceń plastycznych. Na rys. 4 widać wyraźną strefę napawania o strukturze dendrytycznej w kierunku wzrostu warstw, strefę przejściową i podłoże WCL. Brak występowania makropęknięć i obszarów dużych porowatości wskazuje, że proces DED został przeprowadzony bez defektów spajania. Linie graniczne między strefami są dość wyraźne, co sugeruje pewne różnice mikrostrukturalne i składnikowe między materiałami. W powiększeniu obserwuje się strefę charakteryzującą się drobnoziarnistą strukturą i wyraźne mostki lub przenikanie materiału z depozytu do stali WCL. Lokalnie zaobserwować można występowanie faz wydzielonych, które mogą odpowiadać za podwyższoną twardość w tej strefie.

W strefie przejścia przedstawionej na rys. 5 przeprowadzone zostały badania mikrotwardości.

Pomiar mikrotwardości przeprowadzono w strefie przejściowej tak jak oznaczono to na rys. 5. Wyniki zostały przedstawione w tabeli 4.

TABLE IV. Vickers microhardness at measurement points according to fig. 5, IN625 – WCL

TABLICA IV. Mikrotwardość Vickersa w punktach pomiarowych wg rys. 5 IN625 – WCL

Nr	Próbka P1	Próbka P5	Próbka P9
1	267	264	269
2	576	563	404
3	522	600	517
4	405	435	303

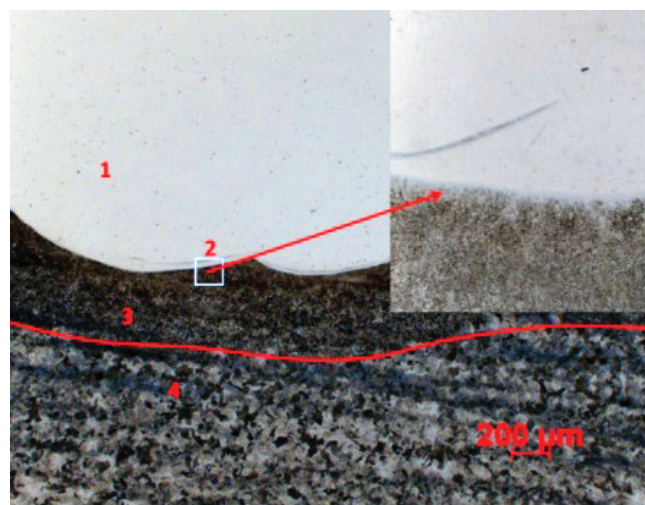


Fig. 5. Locations of the performed microhardness measurements
Rys. 5. Zaznaczone miejsca przeprowadzonych pomiarów mikrotwardości

Rozkład mikrotwardości w badanych punktach potwierdza niejednorodność strukturalną połączenia warstw. W podłożu WCL uzyskano wartości typowe dla tego materiału (ok. 260–270 HV), co wskazuje, że stal zachowała pierwotne właściwości poza strefą wpływu ciepła. W strefie przejściowej zanotowano najwyższe wartości – dochodzące nawet do 600 HV. Tak duże utwardzenie wynika z gwałtownego chłodzenia oraz intensywnej dyfuzji pierwiastków stopowych (Nb, Mo) do strefy kontaktu, sprzyjających wydzielaniu twardych faz międzymetalicznych i węglików [7]. Zjawisko to prowadzi do powstania lokalnie bardzo sztywnych i kruchych obszarów. W obszarze napawania oddległego od strefy łączenia, twardość była umiarkowana (300–430 HV), co sugeruje bardziej jednorodną mikrostrukturę dendrytyczną i mniejszy wpływ przemian fazowych. Takie zróżnicowanie rozkładu twardości wskazuje jednoznacznie, że strefa przejściowa stanowi krytyczne miejsce z punktu widzenia trwałości połączenia powstającego w trakcie napawania. To właśnie tam mogą inicjować się pęknięcia w trakcie obciążeń eksploatacyjnych, zarówno na skutek koncentracji naprężeń, jak i kruchości mikrostruktury.

Podsumowanie

- Zwiększanie mocy lasera w procesie DED prowadzi do poprawy właściwości wytrzymałościowych złączy IN625–WCL (wyższe $R_{p0,2}$ i R_m), lecz równocześnie ogranicza wydłużenie.
- Analiza wyników wskazuje, że moc 1300 W zapewnia najbardziej korzystne połączenie wytrzymałości i ciągliwości, co czyni ten wariant parametrem optymalnym dla badanego układu.
- Strefa przejściowa pomiędzy napoiną a stalą WCL charakteryzuje się największymi zmianami mikrostrukturalnymi – obecność faz międzymetalicznych, węglików oraz struktur hartowniczych powoduje wzrost twardości do wartości krytycznych (~600 HV).

- Gradientowy charakter mikrostruktury i lokalne skoki twardości wskazują na strefę przejściową jako potencjalne miejsce inicjacji uszkodzeń i pęknięć eksploatacyjnych.
- Uzyskane wyniki potwierdzają przydatność technologii DED w regeneracji i naprawie elementów pracujących w trudnych warunkach, jednak efektywne zastosowanie wymaga kontroli parametrów procesu oraz ewentualnej obróbki cieplnej w celu poprawy jednorodności mikrostruktury.

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] „Siemens Brochure template A4 portrait”. Dostęp: 3 października 2025. [Online]. Dostępne na: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:1b43afb5-2d07-47f7-9eb7-893fe7d0bc59/TCOD-2024_original.pdf
- [2] „Reducing costs of spare parts supply systems via static priorities”, ResearchGate, sie. 2025, doi: 10.1142/S0217595909002377.
- [3] C. J. Page, T. Devermann, J. Biffin, i N. Blundell, „Plasma augmented laser welding and its applications”, Sci. Technol. Weld. Join., t. 7, nr 1, s. 1–10, luty 2002, doi: 10.1179/136217102225001313.
- [4] „Powder Bed Fusion 3D Printing in Precision Manufacturing for Biomedical Applications: A Comprehensive Review”, ResearchGate, paź. 2025, doi: 10.3390/ma17030769.
- [5] „Directed Energy Deposition (DED) Additive Manufacturing: Physical Characteristics, Defects, Challenges and Applications”, ResearchGate, sie. 2025, doi: 10.1016/j.mattod.2021.03.020.
- [6] „State of the Art in Directed Energy Deposition: From Additive Manufacturing to Materials Design”, ResearchGate, sie. 2025, doi: 10.3390/coatings9070418.
- [7] „Precipitates in Additively Manufactured Inconel 625 Superalloy”, ResearchGate, kwi. 2025, doi: 10.3390/ma12071144.
- [8] „Laves phases: a review of their functional and structural applications and an improved fundamental understanding of stability and properties”, ResearchGate, doi: 10.1007/s10853-020-05509-2.
- [9] „Effect of Nb addition on the microstructure and mechanical properties of Inconel 718 fabricated by laser directed energy deposition | Request PDF”, ResearchGate, sie. 2025, doi: 10.1016/j.matchar.2021.111601.
- [10] M. J. Kim i C. Saldana, „Thin wall deposition of IN625 using directed energy deposition”, J. Manuf. Process., t. 56, s. 1366–1373, sie. 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.04.032.
- [11] „Enhanced mechanical properties and deformation mechanisms in DED Inconel 625 via printing path switching”, ResearchGate, sie. 2025. Dostęp: 3 października 2025. [Online]. Dostępne na: https://www.researchgate.net/publication/389756079_Enhanced_mechanical_properties_and_deformation_mechanisms_in_DED_Inconel_625_via_printing_path_switching
- [12] „Mechanical Performance of Inconel 625 Alloy Processed by L-DED Additive Manufacturing”, w ResearchGate, doi: 10.26678/ABCM.COBEM2023.COB2023-1350. ■