

Właściwości mechaniczne powłok $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25(Ni20Cr)}$ natryskiwanych zimnym gazem

Mechanical properties of cold gas spray $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25(Ni20Cr)}$ coatings

DOMINIKA SOBOŃ
WOJCIECH ŻÓRAWSKI
MEDARD MAKRENEK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.2.22>

Proces natryskiwania zimnym gazem to najnowocześniejsza metoda natryskiwania cieplnego. W artykule przedstawiono wyniki badań powłoki wytworzonej w tym procesie z proszku $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25(Ni20Cr)}$ na podłożu ze stopu Al 7075. Ponadto pokazano wyniki własnych badań mikrostruktury i analizy właściwości mechanicznych uzyskanej powłoki. Zastosowane parametry natryskiwania pozwoliły na wytworzenie powłoki charakteryzującej się spójną mikrostrukturą i znikomą porowatością.

SŁOWA KLUCZOWE: natryskiwanie zimnym gazem, właściwości mechaniczne, powłoki, $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25(Ni20Cr)}$

The cold gas spraying process is the most modern method of thermal spraying. The article presents the coating produced in this process from $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25(Ni20Cr)}$ powder on the Al 7075 alloy substrate. The properties of microstructure and mechanical properties of the deposited coating are also shown. The process parameters of the applied powder allowed to obtain coatings characterized by a consistent microstructure and negligible porosity.

KEYWORDS: cold gas spraying, mechanical properties, coating, $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25(Ni20Cr)}$

Proces natryskiwania zimnym gazem umożliwia otrzymanie powłok o wyjątkowych właściwościach mechanicznych oraz dużym potencjalnie innowacyjnym. Właściwości powłok powstałych w tym procesie nie są możliwe do uzyskania innymi metodami natryskiwania cieplnego [1–2].

Formowanie powłoki, czyli osadzanie proszku, odbywa się poprzez odkształcanie plastyczne jego ziaren w wyniku uderzania w podłoże z dużą prędkością, w temperaturze znacznie niższej niż jego temperatura topnienia [3]. W ten sposób możliwe jest otrzymanie powłoki o korzystnych naprężeniach ściskających. Podczas procesu natryskiwania zimnym gazem wysoka energia ziaren proszku podczas ich uderzania w powierzchnię powoduje poprawę właściwości mechanicznych powłoki [4].

Zakres materiałów wykorzystywanych w procesie natryskiwania zimnym gazem obejmuje czyste metale, stopy oraz cermetale [5–7].

Powłoki cermetalowe są zbudowane z metalowej osnowy i twardej fazy wzmacniającej. Charakteryzują się one szeregiem podwyższonych właściwości mechanicznych i są stosowane w przemyśle ze względu na strukturalną integralność oraz wysoką odporność na temperaturę i zużywanie się. Połączenie fazy ceramicznej z metalową umożliwia osiągnięcie wyższej wytrzymałości na pękanie [8]. Powłoki cermetalowe $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25(Ni20Cr)}$, uzyskiwane

w procesach termicznych, znalazły zastosowanie jako powłoki antykorozyjne elementów maszyn oraz zwiększające ich odporność na zużycie [9].

Dzięki zastosowaniu procesu natryskiwania zimnym gazem nie dochodzi do degradacji węglików Cr_3C_2 do ich odpowiedników o niższej twardości (Cr_{23}C_6). Zastosowanie proszków cermetalowych w postaci mieszanin zapewnia lepszą sprawność osadzania [10]. W tym procesie cząstki ceramiczne nie odkształcają się plastycznie, lecz osadzają się w fazie plastycznej metalu.

Zaletą procesu natryskiwania zimnym gazem jest możliwość zachowania składu fazowego proszku w osadzonej powłoce [11]. Głównymi czynnikami wpływającymi na właściwości mechaniczne powstałych powłok oraz na ich mikrostrukturę są parametry natryskiwania oraz morfologia użytego proszku [12–13].

Metodyka badań

Powłoki $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25(Ni20Cr)}$ nanoszono z zastosowaniem systemu natryskiwania zimnym gazem Impact Innovations 5/8 (rys. 1) oraz z wykorzystaniem proszku i Diamalloy 3004, Oerlikon Metco Inc., Westbury, NY, USA.



Rys. 1. Stnowisko do natryskiwania zimnym gazem Impact Innovations 5/7

* Mgr inż. Dominika Sobon (dsobon@tu.kielce.pl), dr hab. inż. Wojciech Żórawski, prof. PŚk (ktrwz@tu.kielce.pl) – Katedra Inżynierii Eksploatacji i Przemysłowych Systemów Laserowych, Politechnika Świętokrzyska; dr Medard Makrenek (fizmm@tu.kielce.pl) – Katedra Matematyki i Fizyki, Politechnika Świętokrzyska

Jest to mieszanina proszków Cr_3C_2 i Ni_20Cr w stosunku wagowym 75%/25% [14]. Powłoki natryskiwano na podłożu ze stopu Al 7075 , na próbki o wymiarach $30 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$. Parametry procesu natryskiwania zimnym gazem przedstawiono w tabl. I.

Do scharakteryzowania morfologii proszków i ich przekrojów metalograficznych zastosowano skaningowy mikroskop elektronowy (SEM-E-SEM FEI XL 30). Topografię powłok i kształt profilu badano z wykorzystaniem bezkontaktowego profilografometru 3D Talysurf CCI-Lite. Indentacje przeprowadzono za pomocą urządzenia Nanovea z węglbnikiem Berkovicha, przy obciążeniu 20 mN.

TABLICA I. Parametry procesu natryskiwania zimnym gazem powłok $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25(Ni20Cr)}$

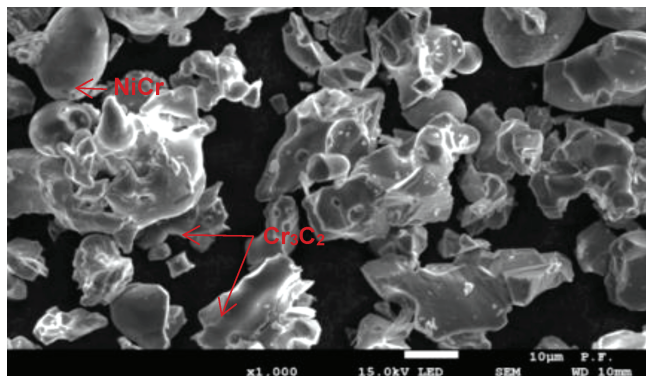
Ciśnienie, MPa	4
Temperatura, °C	800
Odstęp, mm	50
Prędkość podawania proszku, g/min	95
Gaz technologiczny	N_2
Liczba warstw	40

Wyniki badań i dyskusja

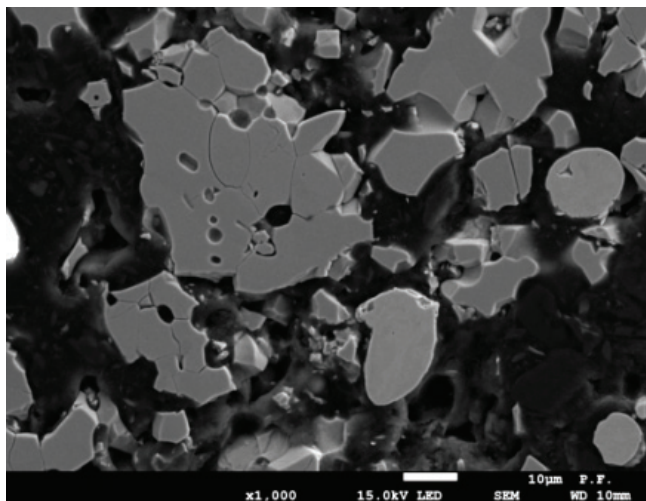
■ Charakterystyka proszków $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25(Ni20Cr)}$.

Morfologię proszku $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25(Ni20Cr)}$ przedstawiono na rys. 2. Proszek do natryskiwania wytworzono jako mieszaninę proszków Cr_3C_2 i Ni_20Cr . Częstki proszku Cr_3C_2 mają nieregularny kształt, a cząstki NiCr – kształt sferyczny. Na rys. 3 pokazano zgląd przekroju ziaren proszku $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25(Ni20Cr)}$.

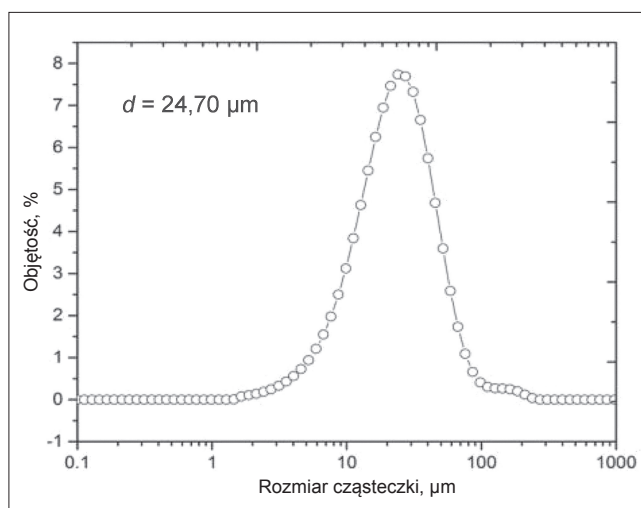
Cząstki proszku $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25(Ni20Cr)}$ charakteryzują się wyraźną porowatością i licznymi pęknięciami na przekrojach.



Rys. 2. Morfologia proszku $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25(Ni20Cr)}$



Rys. 3. Zgląd przekroju ziaren proszku $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25(Ni20Cr)}$



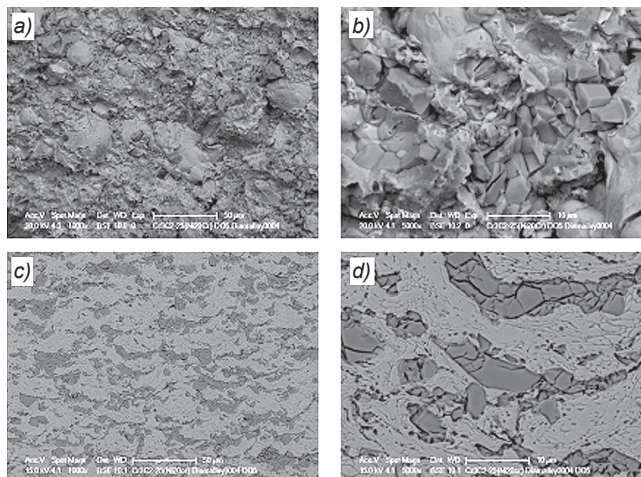
Rys. 4. Rozkład wielkości ziaren proszku $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25(Ni20Cr)}$

Rozkład wielkości ziaren proszku zaprezentowano na rys. 4. W proszku zauważalna jest obecność dużej frakcji drobnych ziaren.

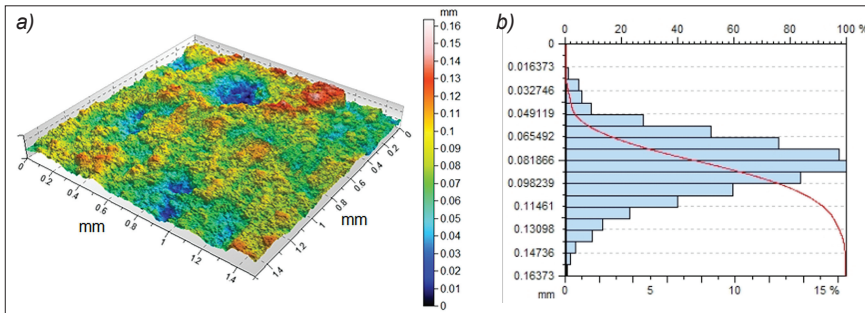
■ Charakterystyka powłok $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$. Na rys. 5a oraz 5b przedstawiono morfologię powierzchni powłoki $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25 (Ni20Cr)}$ uzyskanej w procesie natryskiwania zimnym gazem. W rozkładzie wielkości ziaren proszku wystąpiły zmiany, które znajdują odzwierciedlenie w morfologii i chropowatości powierzchni.

Powłoki $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25(Ni20Cr)}$ mają gładką powierzchnię z drobnymi ziarnami. Ceramiczne cząstki Cr_3C_2 są na prezentowanych powierzchniach znacznie cieńsze niż w początkowym stadium. Pęknięcie i rozbijanie cząstek Cr_3C_2 na mniejsze fragmenty wystąpiło podczas ich uderzania z dużą prędkością o osadzone cząstki (rys. 5c i 5d). Małe cząstki ceramiczne występujące w mikrostrukturze mogą mieć wpływ na ograniczanie propagacji pęknięć [15].

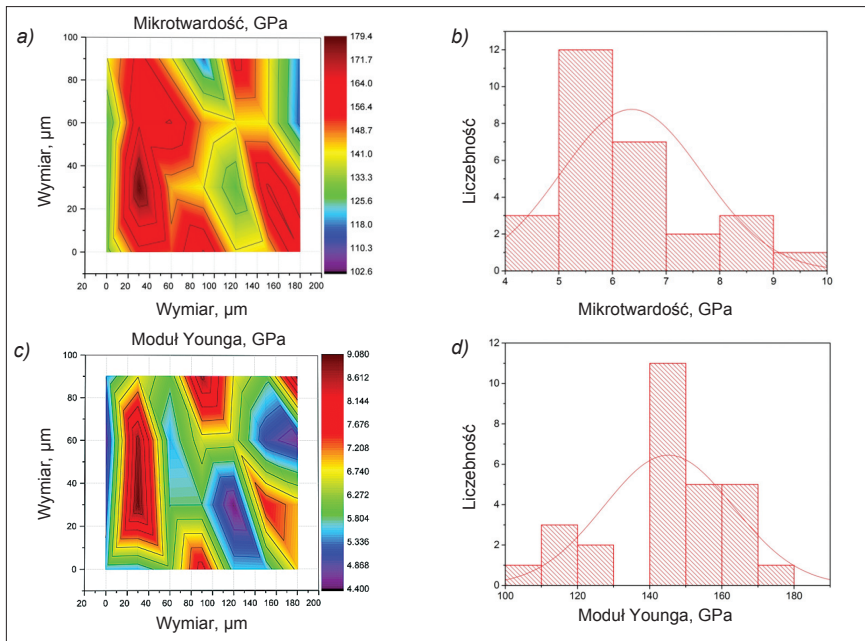
Na rys. 6 pokazano topografię powierzchni, histogram głębokości oraz krzywą nośną. Otrzymane wyniki wskazują na wysoką chropowatość powierzchni (R_a rzędu $16,3 \pm 160,3 \mu\text{m}$). Parametry topografii powierzchni zestawiono w tabl. II. Zbadana powłoka ma asymetrię z ujemnym pochyleniem wysokości powierzchni. Wartość kurtozy wyniosła 3,2, co świadczy o tym, że powierzchnia jest wolna od ekstremalnych cech szczytowych oraz dolinowych. Wyniki wykazują zgodność z morfologią powierzchni (rys. 4).



Rys. 5. Mikrostruktura powierzchni (a, b) oraz zgląd (c, d) powłoki $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25(Ni20Cr)}$ natryskanej zimnym gazem



Rys. 6. Ukształtowanie powierzchni, histogram głębokości z krzywą nośną dla powłoki na dystansie 50 mm



Rys. 7. Mapa rozkładu i histogramy dla powłoki $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25(\text{Ni}20\text{Cr})$: a)–b) mikrotwardość, c)–d) moduł Younga

TABLICA II. Parametry topografii powierzchni (zgodnie z ISO 25178)

Wysokość średniokwadratowa powierzchni S_q , μm	12,8
Asymetria S_{sk}	-0,31
Kurtoza S_{ku}	3,2
Maksymalna wysokość piku S_p , μm	43,0
Maksymalna głębokość wgłębienia S_v , μm	69,4
Maksymalna wysokość S_z , μm	112,4
Średnia arytmetyczna wysokości S_a , μm	10,2

W celu potwierdzenia właściwości mechanicznych powłok $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25(\text{Ni}20\text{Cr})$ natrykiwanych zimnym gazem zbadano ich twardość i moduł Younga. Twardość otrzymanej powłoki wyniosła 627 HV0,3, natomiast wartość modułu Younga – 145,9 GPa. Na rys. 7 przedstawiono mapę rozkładu, histogram twardości i moduł Younga powłoki.

Wnioski

W artykule omówiono wyniki badań właściwości mechanicznych oraz mikrostruktury powłoki $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25(\text{Ni}20\text{Cr})$, natrykiwanej zimnym gazem na podłożu z Al 7075. Przeprowadzony eksperyment pozwolił na otrzymanie powłoki o zwartej mikrostrukturze oraz znikomej porowatości.

Podczas procesu nastąpiła deformacja plastyczna ziaren $\text{Ni}20\text{Cr}$, natomiast cząstki Cr_3C_2 wskutek silnego uderzenia uległy częściowej defragmentacji. Powierzchnia otrzymanej powłoki wykazuje zauważalną chropowatość, co jest spowodowane rozległym rozkładem granulometrycznym zastosowanych proszków, jak również zróżnicowanym oddziaływaniem cząstek Cr_3C_2 na natrykiwaną powierzchnię.

Praca finansowana z środków na naukę NCN w Polsce (projekt nr 2017/25/B/ST/8/02228).

LITERATURA

- Góral A., Żórawski W. „Charakterystyka mikrostruktury powłok $\text{Ni-Al}_2\text{O}_3$ natrykiwanych zimnym gazem”. *Przegląd Spawalnictwa*. 9 (2015): s. 34–37.
- Grujicic M., Saylor J.R., Beasley D.E., De-Rosset W.S., Helfrich D. “Computational analysis of the interfacial bonding between feed-powder particles and the substrate in the cold-gas dynamic-spray process”. *Appl. Surf. Sci.* 219 (2003): s. 211–227.
- Silva F.S., Cinca N., Dosta S., Cano I.G., Guilemany J.M., Benedetti A.V. “Cold gas spray coatings: basic principles, corrosion protection and Applications”. *Eclética Química Journal*. 42, 2017.
- Kim G.E., Champagne V.K., Trexler M., Sohn Y. “Processing nanostructured metal and metal-matrix coatings by thermal and cold spraying”. Woodhead Publishing Limited, 2011, s. 615–662.
- Kay C.M., Karthikeyan J. “High Pressure Cold Spray”. ASM International, 2016.
- Villafuerte J. “Modern Cold Spray, Materials, Process and Applications”. Springer, 2015.
- Soboń D., Żórawski W., Makrenek M. „Zastosowanie powłok tytanowych uzyskanych w technologiach przyrostowych z wykorzystaniem procesu natrykiwania zimnym gazem”. *Mechanik*. 12 (2018): s. 1147–1149.
- Sevillano F., Poza P., Munez C.J., Vezzu S., Rech S., Trentin A. “Cold-sprayed $\text{Ni-Al}_2\text{O}_3$ coatings for applications in power generation industry”. *Journal of Thermal Spray Technology*. 22, 5 (2013): s. 772–782.
- Mrdak M. “Mechanical properties and microstructure of vacuum plasma sprayed $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25(\text{Ni}20\text{Cr})$ coatings”. *Vojnotehnički Glasnik/Military Technical Courier*. LXIII, 2 (2015): s. 47–63.
- Singh H., Sidhu T.S., Karthikeyan J., Kalsi S.B.S. “Development and characterization of $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ coated superalloy by novel cold spray process”. *Mater. Manuf. Process*. 31, 11 (2015): s. 1476–1482.
- Ajdelsztajn L., Jodoin B., Schoenung J.M. “Synthesis and mechanical properties of nanocrystalline Ni coatings produced by cold gas dynamic spraying”. *Surf. Coat. Tech.* 201 (2006): s. 1166–1172.
- Wolfe D.E., Eden T.J., Potter J.K., Jaroh A.P. “Investigation and characterization of Cr_3C_2 -based wear-resistant coatings applied by the cold spray process”. *J. Therm. Spray Techn.* 15, 3 (2006): s. 400–412.
- Luo X.-T., Li Y.-J., Li C.-J. “A comparison of cold spray deposition behavior between gas atomized and dendritic porous electrolytic Ni powders under the same spray conditions”. *Mater. Lett.* 163 (2016): s. 58–60.
- Fernandez R., Jodoin B. “Effect of particle morphology on cold spray deposition of chromium carbide-nickel chromium cermet powders”. *J. Therm. Spray Techn.* 26 (2017): s. 1356–1380.
- Góral A., Żórawski W., Makrenek M. “The effect of the standoff distance on the microstructure and mechanical properties of cold sprayed $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25(\text{Ni}20\text{Cr})$ coating”. *Surface and Coatings Technology*. 361 (2019): s. 9–18.