

# Warunki natryskiwania HVOF powłoki $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ na stal 316L

HVOF spraying process conditions of coating  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$  deposited onto 316L steel

## Streszczenie

Natryskiwanie cieplne jest metodą modyfikacji powierzchni pokrewną spawalnictwu, wytwarzane z jej zastosowaniem powłoki są połączone z podłożem adhezyjnie lub mechanicznie, w niektórych przypadkach dyfuzyjnie lub lokalnie nawet metalurgicznie [1]. Odbywa się to poprzez dostarczenie materiału powłokowego w postaci proszku lub drutu do palnika, za pomocą którego materiał powłokowy jest topiony lub nagrzewany do temperatury bliskiej topnienia. Następnie przyspieszone w strumieniu gazów cząstki materiału z dużą prędkością uderzają w powierzchnię natrykiwaną, tworząc powłokę. Natryskiwanie powłok na podłoże stalowe Cr-Ni austenityczne nierdzewne budzi zwykle wątpliwości związane z trudnościami uzyskania wystarczająco wysokiej przyczepności, gdyż pokrywająca naturalnie stal chromową powłoka tlenku chromu stanowiąca o odporności korozyjnej, niestety obniża przyczepność powłok natryskanych separując powłokę od metalicznego podłoża. Celem pracy było opracowanie warunków natryskiwania metodą HVOF powłoki  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$  na podłożu stali 316L z uzyskaniem możliwie wysokiej przyczepności. Szczególną uwagę poświęcono przygotowaniu powierzchni oraz zapewnieniu cząstkom natrykiwanym dostatecznie wysokiej energii kinetycznej.

**Słowa kluczowe:** natryskiwanie HVOF; powłoki; natryskiwanie cieplne

## Abstract

Thermal spray process is a method of modifying the surface and it is related to welding technology. In this way produced coatings are connected to the substrate adhesively or mechanically, and in some cases even diffusion or locally metallurgically [6]. This is done by providing the coating material in the form of powder or wire to the torch. Coating material is melted or heated close to the melting temperature. The coating material particles are accelerated in gas stream to high velocity, then they impact to the substrate surface. Spraying the coating on the substrate Cr-Ni austenitic stainless steel substrate usually raises concerns about difficulties with obtaining sufficiently high adhesion, because steel chrome is usually covered by chromium oxide which protects against corrosion, but additionally reduces the adhesion of sprayed coatings by isolating coating of metallic substrates. The aim of the work was to develop conditions for HVOF spraying method of  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$  coatings on the steel 316L substrate. Particular attention was given to preparing the surface of the substrate and ensuring a sufficiently high kinetic energy.

**Keywords:** HVOF spraying process; coatings; thermal spraying

## Charakterystyka natryskiwania płomieniowego naddźwiękowego HVOF

Natryskiwanie cieplne jest metodą, która po odpowiednim przygotowaniu podłoża, umożliwia nanoszenie powłok właściwie na każdy rodzaj materiału. Najczęściej stosuje się ją do pokrywania metali, ale jest również wykorzystywana do nanoszenia powłok na ceramikę, polimery, a nawet drewno [8]. Ze względów ekonomicznych, stosuje się ją do pokrywania elementów wykonanych z materiałów gorszych niż materiał powłoki, m.in. dlatego metoda ta znalazła szerokie zastosowanie w dziedzinie regeneracji

części maszyn. Dawniej tę metodę nazywano metalizacją natryskową ze względu na stosowanie jej wyłącznie do wytwarzania powłok metalowych. Obecnie metoda natryskiwania cieplnego pozwala na tworzenie powłok w zasadzie o dowolnym składzie chemicznym, stosując do tego celu metale, ceramikę, a także tworząc powłoki kompozytowe o żądanych właściwościach [2]. To co wyróżnia proces natryskiwania na tle innych metod regeneracji to sposób tworzenia się powłoki i jej połączenia

Inż. Monika Niedzielska; dr hab. inż. Tomasz Chmielewski, prof. PW – Politechnika Warszawska.

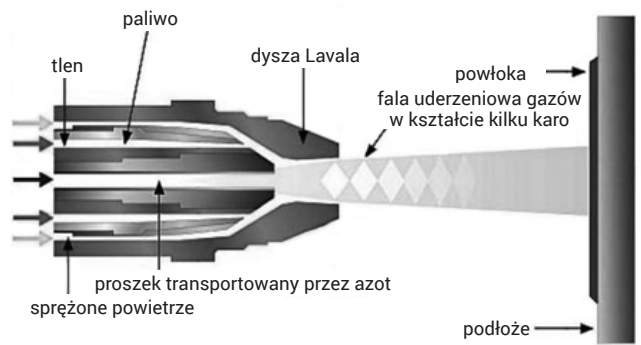
Autor korespondencyjny/Corresponding author: t.chmielewski@wip.pw.edu.pl

z podłożem. Budowa i właściwości warstwy wierzchniej zależą od temperatury i prędkości cząstki materiału podczas zetknięcia z podłożem, charakteru powierzchni natryskiwanej i jej temperatury oraz warunków prowadzenia procesu. Prędkość cząstki materiału podczas natryskiwania HVOF w momencie zetknięcia z podłożem przekracza znacząco prędkość rozprzestrzeniania się dźwięku w powietrzu. Dynamiczne uderzenie w powierzchnię elementu natryskiwanego powoduje wbicie cząstki w nierówności i wypełnienie ich [3]. Z tego względu niezwykle istotne jest przygotowanie powierzchni przed procesem natryskiwania. Materiałowi podłoża nadaje się również odpowiednią chropowatość aby ułatwić zakleszczanie się cząstek w nierównościach. W ten sposób cząstki mechanicznie dopasowują się do podłoża tworząc trwałe połączenie. Podczas lotu oraz w momencie zetknięcia z podłożem cząstka ma w przybliżeniu kształt sfery. Na jej powierzchni tworzy się warstwa tlenków, która powstaje w momencie opuszczenia przez cząstkę dyszy wylotowej palnika i w kontakcie z powietrzem utlenia się. Jest to zjawisko, które jest naturalne dla tego procesu. Gdy cząstka uderza w podłoże zostaje roztopiona, co powoduje pęknięcie kruchej warstwy tlenkowej. Przy zderzeniu dwóch kolejnych cząsteczek w miejscach odsłoniętych z warstwy tlenkowej, cząsteczki ulegają konsolidacji [3], a mechanizm ten może być różny zależnie od warunków. W miejscach gdzie cząsteczki rozdzielone są od siebie warstwą tlenków, mogą tworzyć się niewielkiej objętości pory. W ten sposób tworzy się charakterystyczna dla procesu natryskiwania struktura powłoki. Jest ona niejednorodna, z widocznymi warstwami i zawartością tlenków. Całkowita grubość powłoki jest sumą warstw powstających podczas kolejnych przejść palnika wzdłuż fragmentu natryskiwanej powierzchni. Cząstki w trakcie lotu szybko tracą ciepło ze względu na małą pojemność cieplną, w związku z tym, natryskiwany element nie jest silnie nagrzewany, bo do ok. 100-500 °C. Efektem takiego przebiegu formowania się powłoki jest brak znaczącego wpływu na materiał modyfikowanego elementu. Właściwie przeprowadzony proces technologiczny, nie skutkuje powstaniem istotnych naprężeń w materiale oraz nie powoduje odkształceń i zmian strukturalnych podłoża.

Przyczepność powłok natryskiwanych może być zwiększona poprzez zastosowanie tzw. międzywarstwy podkładowej. Może wykonywana w 1-2 przejściach, tak aby jedynie pokryła podłoże i stanowiła warstwę przejściową. Zazwyczaj jest to miękki materiał, który dodatkowo kompensuje naprężenia. Dawniej stosowane były do tego celu czyste metale głównie brąz i mosiądz. Obecnie stosowane są do tego różne materiały, ale popularnym rozwiązaniem jest proszek związku NiAl, z którego podczas natryskiwania aluminium utlenia się egzotermicznie, a dodatkowo podgrzany w ten sposób nikiel częściowo nawet wtapia się w podłoże [2,3].

Natryskiwanie płomieniowe naddźwiękowe HVOF (*High Velocity Oxygen Fuel*) jest to metoda, która powstała w odpowiedzi na potrzeby uzyskania powłoki o lepszych właściwościach niż powłoki wytwarzane za pomocą natryskiwania płomieniowego poddźwiękowego. Jej rozwój nastąpił wraz z opracowaniem nowej techniki natryskiwania, która pozwoliła na naddźwiękowe wyrzucanie strumienia nadtopionych cząstek proszku, przy ciągłym spalaniu gazu energetycznego. Istota problemu tkwiła w skonstruowaniu palnika, który dzięki swojej budowie pozwalał na uzyskanie nawet 4 razy większej prędkości wyrzucanych cząstek niż klasyczne metody płomieniowe.

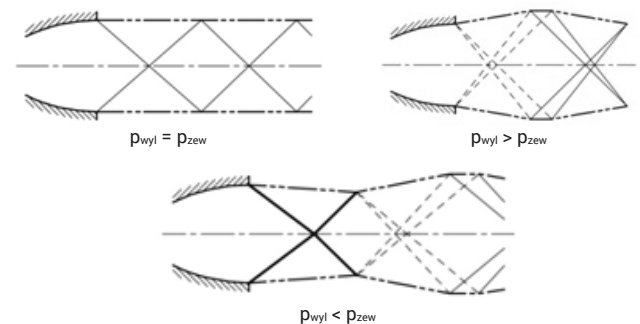
Zasadę działania procesu natryskiwania płomieniowego, naddźwiękowego HVOF obrazuje schemat na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat natryskiwania naddźwiękowego [4]  
Fig. 1. Scheme of supersonic spraying process [4]

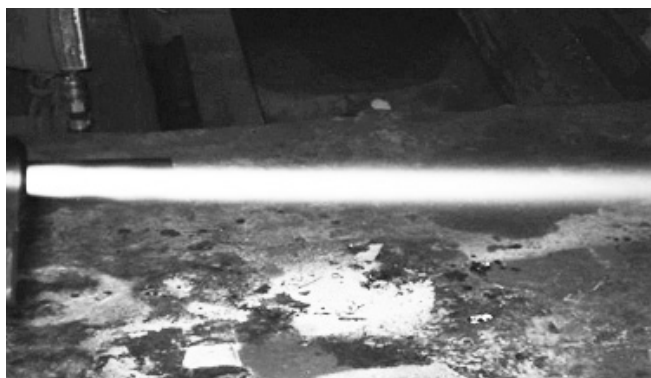
W zależności od rodzaju podawanego paliwa rozróżnia się dwa rodzaje palników: gazowy oraz zasilany paliwem ciekłym. W przypadku gazu, wewnątrz komory chłodzonej wodą, spalany jest propylen, propan, wodór lub acetylen, natomiast jako paliwo ciekłe stosowana jest mieszanka benzyny lotniczej (lub nafty lotniczej) z tlenem lub sprężonym powietrzem. Ze względu na jakość otrzymywanej powłoki, lepsze są palniki zasilane paliwem ciekłym [1]. Zastosowanie paliwa ciekłego jest jednak możliwe tylko przy stosowaniu wysokich wartości ciśnienia w komorze spalania, dlatego ta odmiana natryskiwania często jest nazywana HP/HVOF (*High Pressure*). Paliwo lotnicze zapewnia szybkie spalanie ze względu na wysoką wartość opałową, a odpowiedni skład chemiczny gwarantuje małą ilość powstałych zanieczyszczeń. Nafta lotnicza, tzw. kerozyna, mimo niższej liczby oktanowej od benzyny lotniczej, także jest często wykorzystywana, ze względu na niższą cenę przy równie dobrych rezultatach [5].

Odpowiednie parametry procesu pozwalają na uzyskanie dużej prędkości wylotowej strumienia gazu, która dla palników na paliwo gazowe uzyskuje prędkość ok. 1500 m/s, a dla palników na paliwo ciekłe nawet do 2900 m/s. W procesie natryskiwania dąży się do uzyskania jak największych wartości prędkości nadtopionych lub stopionych cząstek proszku. Największą prędkość cząstek na wylocie z dyszy palnika osiągają palniki na naftę, bo aż 1000÷1200 m/s. W przypadku palników zasilanych gazem, prędkość dochodzi do 1000 m/s [1]. Ciągłe spalanie wewnątrz komory palnika, zapewnia wysokie ciśnienie, co w połączeniu ze specjalną dyszą de Lavalą, umożliwia uzyskanie równomiernego strumienia gazów o prędkości naddźwiękowej. Równomierność strumienia gazów jest ważna, ponieważ w przeciwnym przypadku jakość procesu może być niska. Dysza de Lavalą musi spełnić wymogi geometryczne oraz zapewnione muszą być odpowiednie wartości ciśnienia u jej wylotu, które powinny być równe ciśnieniu otoczenia, tak jak zaprezentowano na rysunek 2. [6].



Rys. 2. Zależność kształtu strumienia gazów od wartości ciśnienia na wylocie dyszy de Lavalą;  $p_{wyjl}$  – ciśnienie na wylocie dyszy,  $p_{zew}$  – ciśnienie zewnętrzne [6]  
Fig. 2. The dependence of the stream shape on gas pressure at the Laval nozzle outlet [6]

Widoczny na rysunku 2 pierwszy z lewej schemat, przedstawia strumień równomierny. Charakterystyczne dla procesu natryskiwania naddźwiękowego jest zjawisko powstawania uderów romboidalnych (rys. 3), które są widoczne nieuzbrojonym okiem i świadczą o powstaniu fali uderzeniowej.



Rys. 3. Strumień gazów z widoczną falą uderzeniową; palnik JP5000 [11]

Fig. 3. Gas steam with visible shock wave; torch JP5000 [11]

Natryskiwanie HVOF umożliwia uzyskanie własności powłok, jak: stosunkowo niska porowatość oraz duża przyczepność o kombinowanym charakterze adhezyjno-mechanicznym. Lokalnie, połączenie może również bazować na wiązaniach atomowych (metalicznych), zapewniając stosunkowo dużą przyczepność. Warunki powstawania powłoki wpływają bezpośrednio na jej właściwości. Cząstki wyrzucane z naddźwiękową prędkością, posiadają wysoką energię kinetyczną. Na skutek zderzenia z materiałem podłoża następuje głębokie uplastycznienie cząstek materiału powłokowego, co jest widoczne po ich charakterystycznym ułożeniu [7÷9]. Metoda HVOF jest również ceniona za stosunkowo niski stopień utlenienia powłok, co przekłada się na polepszenie ich własności eksploatacyjnych. Procesem natryskiwania płomieniowego naddźwiękowego HVOF steruje się m.in. poprzez zmianę odległości wylotu dyszy palnika od materiału podłoża [10], wydajności podawania proszku oraz wartości ciśnienia gazu palnego. W ten sposób istnieje możliwość regulowania temperatury padających cząstek, która wpływa na jednorodność struktury, twardość powłoki oraz obecność tlenków.

## Natryskiwanie powłoki

Celem pracy było opracowanie warunków natryskiwania metodą HVOF powłoki  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$  na podłożu stali 316L. Zakres pracy obejmował wykonanie powłok ochronnych uzyskanych metodą natryskiwania naddźwiękowego HVOF na odpowiednim podłożu, preparatykę próbek oraz ocenę jakości uzyskanych powłok na podstawie badań. Zaplanowano szerokie spektrum badań obejmujące obserwacje makro i mikroskopowe oraz pomiary mikrotwardości i przyczepności powłok. Do badań metalograficznych przygotowano zgłądy, natomiast pozostałe testy wykonywano bezpośrednio na próbkach odpowiednio przystosowanych kształtem i wymiarami do badań przyczepności. Ze stali 316L zostały wykonane próbki w kształcie walca o średnicy 20 mm i wysokości 5 mm. Kształt próbek był podyktowany wybraną początkowo metodą badania przyczepności. Tak przygotowane elementy miały również mocowane współosiowo nakrętki, dzięki którym możliwe było zamocowanie próbek w uchwycie do natryskiwania. Jako materiał do natryskiwania wybrano proszek kompozytowy  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ . Osnowę stanowi plastyczna faza NiCr, a wzmocnienie twarde cząstki węgla chromu. Do natryskiwania zastosowano mieszankę

w proporcji 75 ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ) do 25 (NiCr). Taka kompozytowa struktura pozwala na połączenie zalet plastycznej osnowy i twardych, odpornych na ścieranie węglików, co pozwala na zwiększenie odporności na zużycie erozyjne pokrywanych elementów maszyn. Jest to materiał przeznaczony na powłoki, charakteryzujące się dużą odpornością na zużycie ściernie, erozję i utlenianie. W badaniach stosowano palnik HVOF JP 5000 zasilany kerozyną czyli tzw. naftą lotniczą.



Rys. 4. Palniki do natryskiwania naddźwiękowego HVOF JP 5000

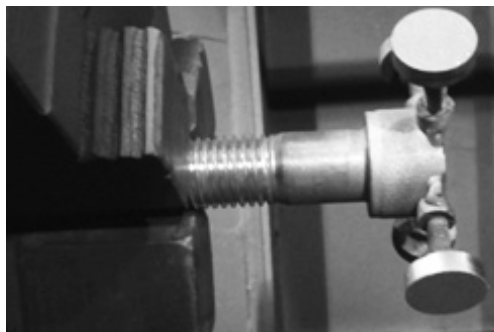
Fig. 4. HVOF spraying gun JP 5000

Palnik JP 5000 pokazany na rysunku 4. jest tzw. palnikiem drugiej generacji, stosowanym do natryskiwania naddźwiękowego HP/HVOF zasilany paliwem ciekłym.

Niezwykle ważnym elementem procesu natryskiwania jest odpowiednie przygotowanie powierzchni pod powłokę. Dobre połączenie jest uwarunkowane czystością powierzchni oraz odpowiednią chropowatością. Przygotowanie powierzchni polega na usunięciu wszelkich zanieczyszczeń, odtłuszczeniu oraz nadaniu chropowatości zapewniającej maksymalną przyczepność. Próbkę ze stali 316L zostały oczyszczone za pomocą benzyny ekstrakcyjnej, a następnie wyśrutowane ziarnami korundu do klasy czystości Sa 3 zgodnie z ISO 8501-1.

Przed natryskiwaniem próbki zostały oczyszczone nierdzewną metalową szczotką żeby pozbyć się z powierzchni ziaren korundu. Tak przygotowane próbki były montowane w obrotowym uchwycie po 4 sztuki (rys. 5). Prędkość obwodowa została ustalona na 53 m/min, a posuw na 5 mm/obrót.

Bezpośrednio przed natryskiwaniem powłok, próbki były wstępnie nagrzewana do temperatury ok. 100 °C, żeby pozbyć się ewentualnych zanieczyszczeń. Dodatkowo zmniejszenie różnicy temperatury pomiędzy natryskiwanyymi cząstkami a podłożem, powoduje zmniejszenie naprężeń powstających w powłoce podczas stygnięcia, a także może korzystnie wpłynąć na przyczepność powłoki [3]. Ważny jest również czas pomiędzy przygotowaniem procesu a samym natryskiwaniem. Powinien być on możliwie jak najkrótszy, aby zminimalizować ryzyko zanieczyszczenia powierzchni przygotowanej do natryskiwania, a także powstawaniu na powierzchni tlenków metali [3].



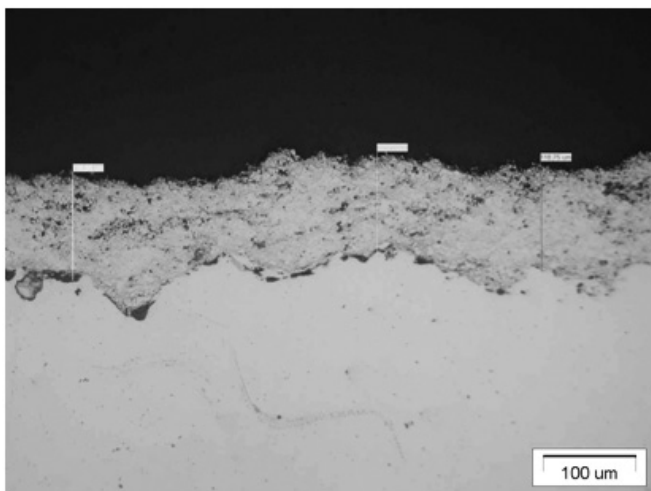
Rys. 5. Próbki w uchwycie przygotowane do procesu natryskiwania  
Fig. 5. The samples in the handle prepared to the spraying process



Próbki były natryskiwane w kilku etapach, ze względu na szybkie nagrzewanie się. Podczas procesu natryskiwania temperatura powierzchni próbki była kontrolowana za pomocą pirometru, w celu nieprzekroczenia wartości temperatury rejestrowanej na powierzchni -130 °C. Podczas natryskiwania ze względu na możliwość przegrzania materiału proces był przerywany, co mogło skutkować utlenianiem warstw powłoki. Grubość powłoki ograniczono do wartości ok. 130 µm.

## Charakteryzacja właściwości powłoki

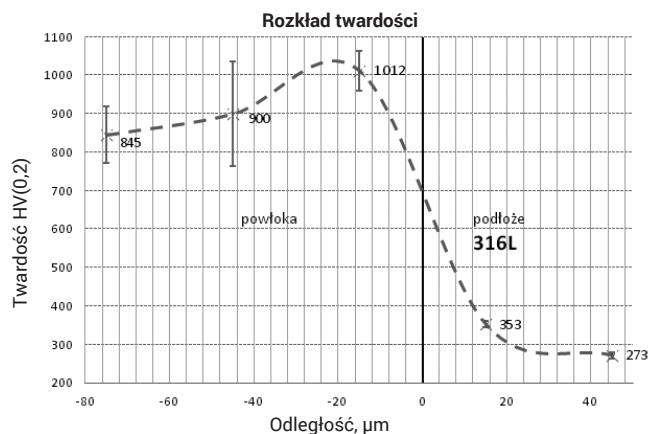
W ramach charakteryzacji właściwości natryskanych powłok, wykonano badania metalograficzne, pomiar twardości oraz przyczepności powłoki. Poniżej przedstawiono właściwości powłoki, która charakteryzowała się najwyższą przyczepnością. Na rysunku 6 pokazano mikrostrukturę próbki z serii natryskanej z zastosowaniem parametrów przedstawionych w tabelicy I. Struktura powłoki świadczy o jej dobrej jakości, materiał jest gęsto upakowany, ziarna proszku rozdrobnione i głęboko uplastycznione, połączenie z podłożem ciągłe z nielicznymi zanieczyszczeniami tlenkowymi. Powłoka wykonana była w 3 przejściach (w celu niedopuszczenia do przegrzania), które pozostawiły w strukturze powłoki pasma utlenienia.



Rys. 6. Mikrostruktura powłoki Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr natryskanej na podłożu stalowe 316L

Fig. 6. Microstructure of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coating sprayed on the 316L steel substrate

Na rysunku 7 przedstawiono wykres rozkładu twardości wykonanego w kierunku grubości powłoki. Pomiar wykonywano na wcześniej przygotowanych zglądach metalograficznych. Odciski lokalizowano w odstępach co 30µm wzdłuż jednej linii pomiarowej. Na wykresie przedstawiono wartość średnią czterech pomiarów z odchyleniem standardowym.



Rys. 7. Rozkład twardości na przekroju powłoki

Fig. 7. Hardness distributions in cross-section of the coating

Do pomiaru przyczepności powłoki wykorzystano próbę odrywania polegającą na jednoosiowym rozciąganiu próbki na maszynie wytrzymałościowej (ZD10). Pomiar polegał na określeniu wartości naprężenia odrywającego przy którym natryskana powłoka traciła spójność. Do powłoki wykonanej na próbkach przyklejane były stemple, które pełniły również rolę uchwytów w maszynie wytrzymałościowej, które były przyklejane do powierzchni próbek specjalnym, wysokoadhezyjnym klejem. Rzeczywisty pomiar przyczepności powłoki do podłoża następuje jedynie wówczas gdy powłoka oderwie się od powierzchni próbki lub ulegnie wewnętrznemu rozwarstwieniu, bez naruszenia połączenia klejowego. Z tego względu należało zwrócić dużą uwagę na technologię klejenia, a w szczególności na przygotowanie powierzchni powłoki i stempla do klejenia. Próbki były klejone do uchwytów za pomocą kleju Epidian 57 z utwardzaczem Z-1 (w proporcji wagowej 10:1). Klej był nakładany równomiernie, w niewielkich ilościach. Dodatkowo po sklejeniu, stempel był dociskany do próbki, w celu uzyskania właściwej szerokości szczeliny. Wyciśnięty nadmiar kleju był oczyszczany, tak aby wypływka nie wpłynęła na wynik pomiaru. Klej był dodatkowo wygrzewany w temperaturze 80 °C przez 6h, aby wzmocnić klejone połączenie.

Powierzchnia stempla klejonego do próbki wynosiła 200,96 mm<sup>2</sup>. Przyczepność była obliczona z poniższego wzoru:

$$S = \pi * (d/2)^2 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (1)$$

$$\text{Przyczepność} = F / S \text{ [N/mm}^2\text{ = MPa]} \quad (2)$$

gdzie:

F – siła odrywania

S – powierzchnia klejenia stempla do powłoki

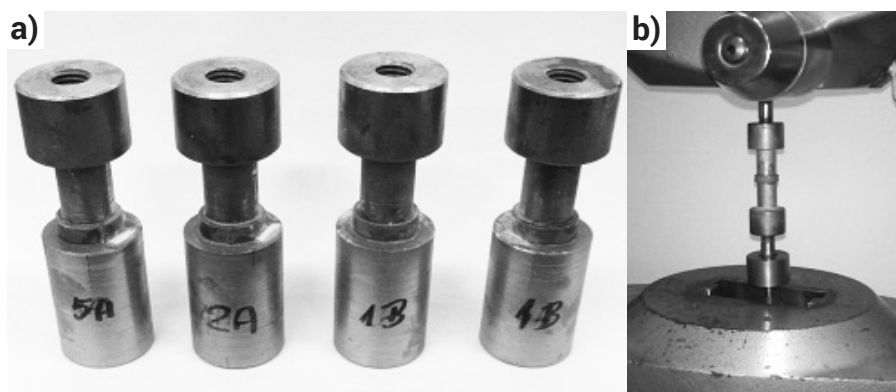
d – średnica przekroju poprzecznego stempla od strony powłoki

Najwyższą przyczepność powłoki zarejestrowano (wartość średnia z czterech pomiarów) dla zestawu parametrów natryskiwania przedstawionych w tabelicy I wynosiła 62,94 MPa. Na rysunku 9 pokazano widok powłoki po próbie przyczepności, w której przelom zlokalizowany jest w objętości powłoki.

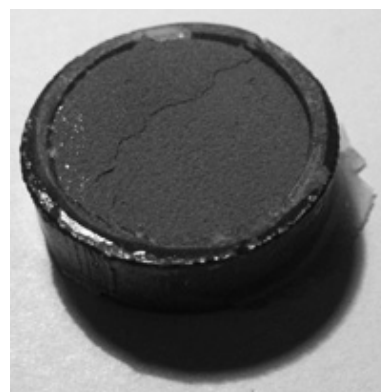
Tablica I. Parametry procesu natryskiwania przy których uzyskano najwyższą przyczepność powłoki

Table I. Parameters set of the spraying process that achieved the highest adhesion

Parametry procesu natryskiwania						
proszek	tlen	kerozyna	azot	ciśnienie spalania	woda chłodząca	odległość od powierzchni
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> -NiCr 65 g/min	849 l/min, 10,9 bar	24,0 l/h, 7,7 bar	10,0 l/min	7,3 bar	22,1 l/min, 10,4 bar, temp. in 8 °C, temp. out 19 °C	370 mm



**Rys. 8.** Próbkki natryskane: a) próbki przyklejone obustronnie do uchwytów maszyny ZD10, b) sposób zamocowania próbek w maszynie wytrzymałościowej  
**Fig. 8.** Sprayed samples: a) both sides of the sample glued to the fixture b) a method of fixing the samples in a testing machine



**Rys. 9.** Próbkka natryskana po badaniu przyczepności – powłoka rozwarstwiona  
**Fig. 9.** Sprayed sample after the adhesion test - coating delaminated

## Podsumowanie i wnioski

Natryskiwanie naddźwiękowe HVOF jest odpowiednią metodą do wytwarzania powłok ochronnych oraz regenerowania elementów maszyn. Różnorodność materiałów, które mogą być wykorzystane do natryskiwania daje wręcz nieograniczone możliwości doboru odpowiedniego materiału powłokowego. Oprócz tradycyjnych powłok metalowych, czy ceramicznych wykorzystywane są różne sposoby komponowania proszków do natryskiwania. Dzięki temu tworzone są powłoki cermetalowe i kompozytowe, dzięki którym możliwe jest uzyskanie właściwości, których nie posiadają klasyczne materiały. W ten sposób powstają powłoki, które cechują się wysoką twardością przy jednoczesnej plastyczności materiału powłokowego, która zapewnia odporność na zużycie zmęczeniowe i pękanie. Natryskiwanie termiczne powłok na podłoża ze stali nierdzewnych o istotnie dużym stężeniu chromu, zwykle kojarzone jest z trudnością uzyskania wysokiej przyczepności co jest uzasadnione [9÷11]. Powodem utrudnień w uzyskaniu przyczepności jest powłoka tlenku chromu naturalnie występująca w tego typu stalach. Powłoka tlenku chromu separuje materiał natryskanej powłoki od czystego metalicznego podłoża utrudniając uzyskanie wysokiej przyczepności. Podczas prowadzonych badań dowiedziono, że ten technologiczny problem może być rozwiązany poprzez staranne oczyszczenie powierzchni przed natryskiwaniem z zastosowaniem pneumatycznego śrutowania korundem do wysokiej czystości z dodatkowym odtłuszczeniem powierzchni. Następnie, niezwłocznie należy rozpocząć proces natryskiwania, przed naturalnym powstaniem powłoki pasywacyjnej. Czynnikiem wspomagającym uzyskanie wysokiej przyczepności jest również wysoki poziom energii kinetycznej cząstek w strumieniu natryskowym, które podczas dynamicznych zderzeń z powierzchnią materiału modyfikowanego mechanicznie dezintegrują tlenkową powłokę.

Na podstawie uzyskanych wyników sformułowano wnioski:

- 1) Natryskiwanie naddźwiękowe HVOF zasilane kerozyną jest odpowiednią metodą do wytwarzania ochronnych powłok regeneracyjnych nawet na podłożu stali austenitycznych nierdzewnych.
- 2) Na przyczepność powłok natryskiwanych wpływa sposób przygotowania powierzchni przed procesem natryskiwania oraz energia kinetyczna cząstek materiału powłokowego w strumieniu natryskowym.
- 3) Metoda natryskiwania naddźwiękowego HVOF pozwala na wykonanie powłok ochronnych o dużej przyczepności na stali nierdzewnej mimo dużej zawartości chromu w materiale. Za pomocą palnika JP 5000 wykonano powłokę ochronną z materiału  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ , której przyczepność wynosiła średnio 62,94 MPa
- 4) Przerwy wykonywane podczas natryskiwania ze względu na nagrzewanie się powierzchni przedmiotu, powinny być krótsze. Zbyt długie odstępy czasu w nakładaniu poszczególnych warstw powłoki powodowały zauważalne utlenienie się powierzchni materiału, co skutkowało rozwarstwieniem powłoki podczas testów przyczepności.

*Autorzy artykułu dziękują Panu Andrzejowi Radziszewskiemu, właścicielowi firmy RESURS (ul. Czarodzieja 12 w Warszawie) za pomoc i umożliwienie przeprowadzenia prób natryskiwania.*

## Literatura

- [1] A. Klimpel: Napawanie i natryskiwanie cieplne, Wydawnictwo Naukowe Techniczne, 2000.
- [2] "www.pnc.pl", PNC S.C., Natryskiwanie cieplne powłok, 2015. [Online].
- [3] J. Brennek, Z. Brodzki, T. Drażkiewicz, S. Gębalski, Z. Kowalski: Poradnik Metalizacji Natryskowej, Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Techniczne, 1959.
- [4] RESURS, "resurs.pl," [Online]. [Accessed 2016].
- [5] K. Górski, W. Górski, Napędy lotnicze, Materiały pędne i smary, Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 1986.
- [6] W. Sobieraj, Aerodynamika, Warszawa: Wydawnictwo WAT, 2015.
- [7] T. Chmielewski: Wykorzystanie energii kinetycznej tarcia i fali detonacyjnej do metalizacji ceramiki, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Mechanika, 242, 3-157, 2012.
- [8] T. Chmielewski, D. Golański: Selected properties of Ti coatings deposited on ceramic AlN substrates by thermal spraying, Welding International, vol. 27 (8), pp. 604-609, 2013.
- [9] T. Chmielewski, Z. Sheng: Natryskiwanie powłok na bazie wybranych faz międzymetalicznych metodą High Efficiency Hypersonic Plasma Spraying, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Mechanika, s. 49-58, 2006.
- [10] T. Chmielewski, J. Jakubowski: Żaroodporne powłoki INCONEL 625 natryskiwane termicznie na podłoża ze stali stopowych, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Mechanika, 229, s. 143-153, 2009.
- [11] T. Chmielewski, Nakładanie plazmowe warstw chromowych z dodatkami na podłoża ze stali chromowych, Przegląd Spawalnictwa, vol. 73 (8-9), s. 56-57, 2001.