

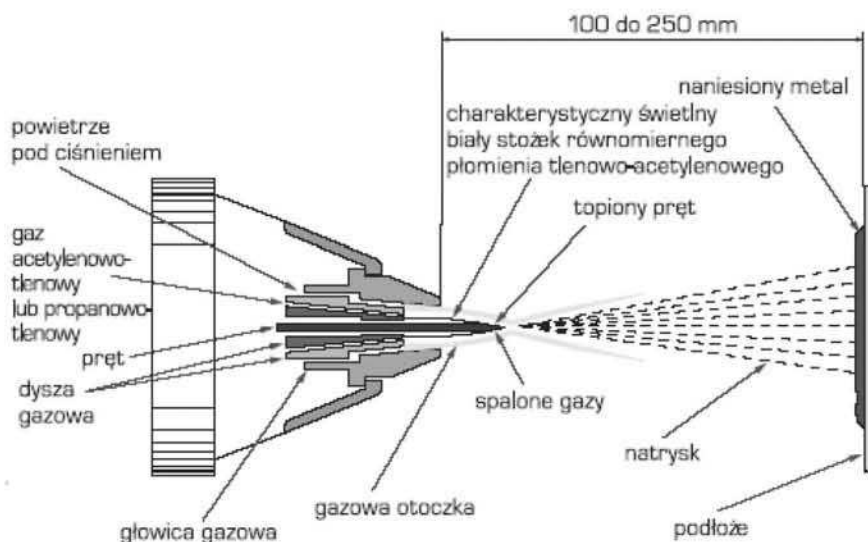
12. Warstwy powierzchniowe nanoszone metodami spawalniczymi

Metodami spawalniczymi są nanoszone warstwy napawanego metalu na powierzchnię lub krawędź materiału podłoża o różnym składzie chemicznym. Zwykle uzyskuje się w ten sposób polepszenie odporności na zużycie ścierne, erozyjne, cieplne lub chemiczne, bez konieczności dysponowania odpowiednio dużym elementem z kosztownego materiału lub trudnego do wytworzenia, albo niewykazującego wymaganych własności w całej objętości. Materiałami, które mogą być nanoszone tymi technologiami są m.in. stale niestopowe, niskostopowe i wysokostopowe, wysokostopowe żeliwa, stopy kobaltu, niklu, miedzi, stale odporne na korozję, cermetale ceramiczne i żaroodporne węgliki, tlenki, borki i krzemki. W przypadku, gdy metal podłoża ulega roztopieniu podczas nanoszenia warstwy powierzchniowej, proces jest napawaniem z wykorzystaniem technologii gazowych i łukowych, w tym także elektrodą otuloną, elektrodą topliwą i nietopliwą w osłonie gazu obojętnego, elektrożużlowo oraz plazmowo. Dla uzyskania wysokiej jakości połączenia z podłożem materiał nanoszony jest podawany w postaci proszku, drutów oraz taśm litych i proszkowych. Nowoczesne **technologie napawania** wykorzystują energię wiązki laserowej i wiązki elektronów do tworzenia powłok o własnościach nieosiągalnych metodami klasycznymi. W przeciwnym razie proces jest **natryskiwaniem cieplnym**, a połączenie jest wyłącznie mechanicznym, a także z udziałem dyfuzyjnego.

Proces **natryskiwania cieplnego** jest sposobem uzyskiwania pokryć materiałami o wymaganych wysokich własnościach eksploatacyjnych, w tym stopami metali, materiałami ceramicznymi, intermetalikami, cermetalami, węglnikami, a nawet materiałami polimerowymi na podłożu z materiałów znacznie mniej kosztownych lub łatwiej dostępnych. Drut lity lub proszkowy, pręt lub proszek materiału pokrycia jest umieszczany w płomieniu gazowym, łuku elektrycznym lub plazmowym, gdzie następuje jego stopienie i rozdrobnienie przez strumień gazu, takiego jak argon, azot, lub sprężone powietrze albo w płomieniu gazowym. Strumień gazu porywając ciekłe cząstki o średnicy $0,01 \pm 0,05$ mm kieruje je na powierzchnię pokrywającego elementu, o którą uderzają, chłodzą się na niej i łączą się z nią. Na podłożu przekazywane jest niewiele ciepła, w wyniku czego jego temperatura podnosi się jedynie do $100 \pm 250^\circ\text{C}$. Natryskiwanie cieplne nie powoduje zatem zmian strukturalnych lub odkształcenia plastycznego podłoża, a tego typu pokrycia mogą być stosowane do cienkich i precyzyjnych

elementów oraz do materiałów podatnych na oddziaływanie ciepła, np. do materiałów polimerowych. Grubość uzyskiwanych pokryć wynosi $0,1 \div 12$ mm.

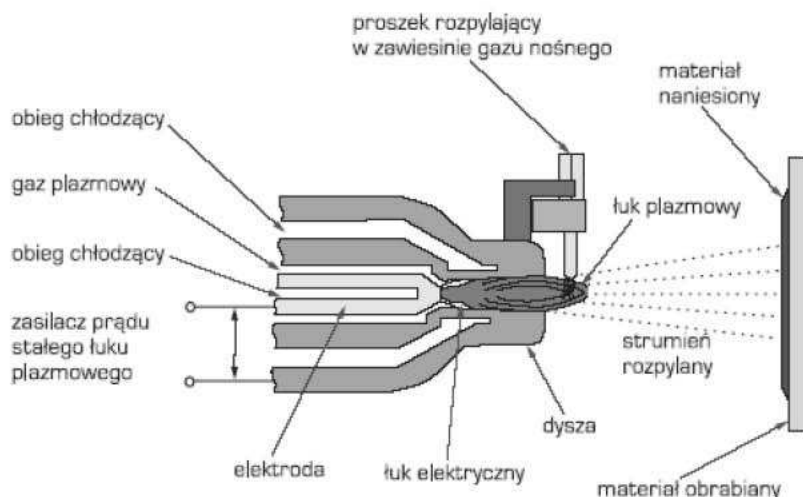
W celu wykonania natryskiwania cieplnego stosowane są palniki z płomieniem gazowym (rys. 37), do których nanoszony materiał może być dostarczany w postaci drutu, pręta lub proszku. Ze względu na relatywnie niską temperaturę oraz stosunkowo niewielką szybkość cząsteczek natryskiwanego materiału, uzyskiwana powłoka charakteryzuje się porowatością do 10% i stosunkowo małą przyczepnością. Z tego względu stosowany jest proces natryskiwania naddźwiękowego HVOF (*high-velocity oxyfuel*), w którym natryskiwane krople są unoszone przez naddźwiękowy strumień gorącego gazu. Uderzanie tych cząsteczek o podłoże z dużą energią kinetyczną wpływa na zwiększenie gęstości powłoki oraz na poprawę jej przyczepności do podłoża.



Rysunek 37. Schemat palnika acetylenowo-tlenowego do natryskiwania cieplnego (opracowano według METCO, Inc.)

Do najprostszych metod wykorzystujących łuk elektryczny, należy **natryskiwanie łukowe**. Łuk jarzy się pomiędzy dwoma drutami litymi lub proszkowymi podawanymi z taką samą prędkością. Strumień gazu podawany w obszar łuku powoduje rozpylenie roztopionego metalu i kieruje go na podłoże. Proces jest efektywny, gdyż niemal cała włożona energia elektryczna jest użytkowana do roztopienia materiału drutów.

W przypadku **natryskiwania plazmowego** (rys. 38) gaz tworzący plazmę, służy równocześnie jako źródło ciepła oraz jako czynnik przyspieszający natryskiwany materiał. Ze względu na temperaturę procesu, która osiąga $8000 \div 20000^{\circ}\text{C}$, do natryskiwania mogą być stosowane wszystkie możliwe materiały, a jakość pokryć jest bardzo wysoka, gdyż cechują się minimalną porowatością i bardzo dobrą przyczepnością do podłoża, co wynika z bardzo dużej prędkości roztopionych cząstek natryskiwanego materiału w strumieniu plazmy. Uzyskiwane powłoki mogą być również cieńsze niż w przypadku pozostałych metod [1, 2, 77].



Rysunek 38. Schemat palnika do natryskiwania plazmowego (opracowano według METCO, Inc.)

W tabelicy 11 porównano kilka podstawowych metod natryskiwania cieplnego.

Pokrycia natryskiwane cieplnie zyskały liczne zastosowania praktyczne, a wśród nich zapewniające:

- ochronę przeciwkorozyjną – Zn lub Al natryskiwane na żeliwa lub stale powodują zwiększenie odporności na korozję, w wyniku czego przedłuża się trwałość mostów, budynków i innych elementów infrastruktury; wewnętrzne powierzchnie kotłów mogą być pokrywane stopami wysokochromowymi w celu zwiększenia ich żaroodporności i odporności na korozję;
- utwardzanie powierzchniowe – stosowane gdy wymagana jest mniejsza grubość niż możliwa do uzyskania przez napawanie; typowymi zastosowaniami są cylindry silników samochodowych, pierścienie tłokowe, elementy maszyn tekstylnych, elementy pomp i łożysk;

Tablica 11

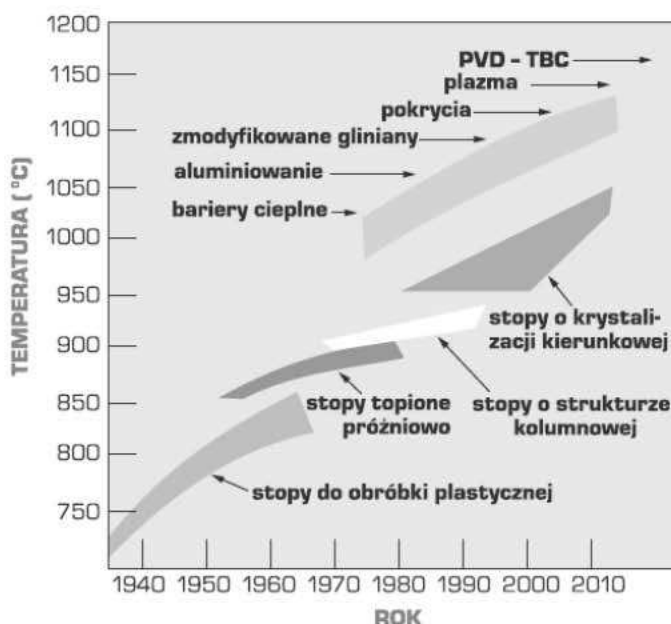
Porównanie podstawowych metod natryskiwania cieplnego (opracowano według E.P. Degarmo, J.T. Blacka i R.A. Kohsera oraz A. Klimpla)

Metoda	Źródło ciepła	Temperatura procesu, °C	Nanoszony materiał	Prędkość uderzających cząstek, m/s	Przyczepność	Wydajność, kg/h
Natryskiwanie płomieniowe – drutem	płomień	3000	metale	180	●	9
– proszkiem			metale, ceramika, materiały polimerowe	30	●	7
Natryskiwanie naddźwiękowe HVOF			metale, węgliki	600÷1200	○	14
Łukowa	łuk	5000÷6000	tylko metale	250	●	30
Natryskiwanie plazmowe	elektryczny	8000÷20000	wszystkie	250÷1200	●	1÷25
Oznaczenia: ○ bardzo wysoka, ● wysoka, ● średnia, ● niska.						

- naprawę ubytków powierzchniowych – powierzchnie uszkodzone w wyniku wad technologicznych lub w trakcie eksploatacji mogą być regenerowane przez uzupełnienie ubytków; najczęściej dotyczy to elementów silników lotniczych;
- przewodnictwo elektryczne – możliwe jest zapewnienie przewodnictwa elektrycznego na powierzchni słabych przewodników lub materiałów nieprzewodzących prądu elektrycznego; Cu, Al lub Ag są natryskiwane na podłoże ze szkła lub materiałów polimerowych oraz odwrotnie na powierzchnie przewodników są nanoszone warstwy izolacyjne z Al_2O_3 ;
- porowatość powierzchni – porowate pokrycia Co lub Ti, a także materiałów ceramicznych są natryskiwane na implanty medyczne w celu zapewnienia adhezji i wzrostu kości lub tkanek;
- pokrywanie metalami szlachetnymi lub o dużych kosztach – stosowane gdy niemożliwe jest wykonanie konwencjonalnego platerowania; ze względu na czynniki technologiczne lub ekonomiczne;
- efekty dekoracyjne – materiały dekoracyjne są natryskiwane na różne produkty oraz na elementy obiektów architektonicznych;
- odbicie światła – przez natryskiwanie Al na powierzchnię szkła uzyskuje się lustra.

Obecnie najczęściej stosowanymi w przemyśle spawalniczymi technologiami nakładania warstw wierzchnich metalicznych, cermetalowych i ceramicznych są procesy **natryskiwania ciepłego** oraz **napawania łukowego** – MMA, GTA, SSA, GMA i PTA. Spawalnicze procesy napawania łukowego powodują częściowy rozpad i utlenienie składników warstw metalowych i ceramicznych, nawet w przypadku prowadzenia procesu w atmosferach ochronnych, oraz znaczne naprężenia i odkształcenia spawalnicze napawanych części.

Zastosowanie pokryw ochronnych, aluminiowych lub modyfikowanych na osnowie aluminium, takich jak: Al-Si, Al-Cr, Al-Pt, Pt-AlCr umożliwia zwiększenie maksymalnej temperatury powyżej 1100°C, w której spełniane są wymagania odpowiednich własności użytkowych przez stopy Ni krystalizowane kierunkowo oraz monokryształy. Rozwój materiałów na elementy turbin gazowych determinowany jest bowiem przede wszystkim zwiększeniem temperatury pracy (rys. 39).



Rysunek 39. Rozwój materiałów oraz pokryw ochronnych determinowany wzrostem temperatury pracy elementów turbin do roku 2010 (według P. Saho i G.W. Gowarda)

Dalsze możliwości zwiększania temperatury poprzez modyfikację składu chemicznego stopów lub technologii otrzymywania elementów są coraz bardziej ograniczone. Pokrycia

opisywane ogólnie jako MeCrAlY, gdzie Me to Co, Ni, NiCo, a także CoNiCrAlYHfSi oraz CoCrAlYSi oraz **pokrycia typu barier cieplnych TBC** (ang.: *thermal barrier coating*), tworzących izolację cieplną chroniącą stop przed oddziaływaniem wysokiej temperatury. Materiałem na te pokrycia jest $ZrO_2-Y_2O_3$ lub Al_2O_3 , $Al_2O_3+5\%$ Ni, a jako międzywarstwy stosowane są pokrycia typu Me-CrAl. Rodzaj i morfologia warstw w różnym stopniu oddziałują na trwałość zmęczeniową stopów niklu z pokryciami. Najkorzystniej zachowują się warstwy adhezyjno-dyfuzyjne.

Z pewnością na szczególną uwagę zasługują także **technologie detonacyjne nanoszenia warstw powierzchniowych** [2-4].