



Nawęglanie i azotowanie próżniowe dysz wtrysku paliwa wykonanych ze stali WCL (H11)

Vacuum carburizing and vacuum nitriding of fuel injection nozzles made of hot work tool steel (type WCL H11)

dr inż. M. KORECKI, M. BAZEL, M. SUT, prof. dr hab. inż. P. KULA, dr inż. E. WOŁOWIEC

dr Korecki M., Bazel M., Sut M. - SECO/WARWICK
Prof. Kula P., dr Wołowicz E.
- Politechnika Łódzka



W KILKU SŁOWACH

Poniższy artykuł opisuje najnowsze osiągnięcia w dziedzinie obróbki cieplnej dysz wtrysku paliwa wykonanych ze stali narzędziowej do pracy na gorąco, wykorzystywanych w silnikach wysokoprężnych. W przeprowadzonym badaniu przetestowano różne techniki udoskonalania warstwy z pomocą nawęglania i azotowania próżniowego, które nadają się zwłaszcza do obróbki elementów o skomplikowanych kształtach, takich jak np. ślepy otwór. Pod rozważenie wzięto różne parametry procesowe dotyczące sekwencji procesu oraz jego temperatury i zbadano ich wpływ na mikrostrukturę, twardość i równomierność warstwy. Rozwinięto kompleksową metodę obróbki, na którą składają się procesy termochemiczne oraz hartowanie w gazie pod wysokim ciśnieniem (HPGQ) i odpuszczanie. Cały proces został przeprowadzony w jednokomorowym piecu próżniowym wyposażonym w system nawęglania (LPC) i azotowania (LPN) niskociśnieniowego oraz hartowania w gazie pod wysokim ciśnieniem.

Dysze wtrysku paliwa (Rys.1.) są kluczowym elementem silnika wysokoprężnego mającym wpływ na jego własności eksploatacyjne, w tym zużycie paliwa oraz niezawodność pracy. Odgrywają też kluczową rolę w emisji szkodliwych substancji. W czasie cyklicznej pracy podlegają różnorodnym obciążeniom, pracują w podwyższonej temperaturze pod ogromnymi ciśnieniami (1500-3000 bar) i pod wpływem intensywnych przepływów cieczy (ponad 100 m/s) [1]. Z tego względu dysze ulegają przyspieszonemu



SUMMARY

The article describes the newest achievements in heat treatment of fuel injection nozzles made of hot work tool steel applied in diesel engines. Different methods of surface properties improvement has been used by means of vacuum carburizing and vacuum nitriding, especially suitable for elements characterized by difficult shape geometry like blind hole. Variables process parameters has been considered in terms of sequence and temperature, and their influence on surface microstructure, hardness and case uniformity. Complex technology was discovered involving thermo-chemical process supplemented by high pressure gas quenching (HPGQ) and tempering. All technological steps was performed in a single chamber vacuum furnaces equipped with LPC, LPN and HPGQ.

zużyciu i uszkodzeniom (Rys.2) [2]. Konstrukcja dysz musi zapewniać odpowiednią wytrzymałość, udarność i odporność na zmęczenie oraz ścieranie kanałów przepływowych. Do budowy dysz używane są średnio i wyżej stopowe stale, które dodatkowo mają utwardzoną powierzchnię. Wytrzymałość korpusu typowo mieści się w zakresie 1000-1500 MPa dla stali 20MnCr5, 17CrNiMo6, EN39B, 18CrNi8, a zwiększoną twardość powierzchniową (ponad 60 HRC) uzyskuje się w procesie utwardzania powierzchniowego po wcześniejszym nawęglaniu. Odpowiedni proces obróbki cieplnej prowadzony jest w pie-



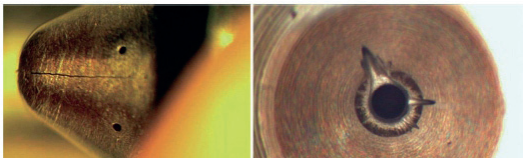
cach próżniowych realizujących nawęglanie próżniowe (LPC) oraz hartowanie w gazie pod wysokim ciśnieniem (10 bar i więcej).

Nawęglanie próżniowe umożliwia uzyskanie równomiernej warstwy w cienkich i skomplikowanych kształtem kanałach dyszy niedostępnych dla tradycyjnych atmosfer nawęglających. Z kolei hartowanie w gazie eliminuje problem usuwania zanieczyszczeń po hartowaniu w oleju. W niektórych rozwiązaniach do utwardzenia warstwy powierzchniowej używa się azotowania zamiast nawęglania.

W pewnych aplikacjach stosuje się dysze wtryskowe wykonane z jeszcze bardziej wytrzymałych stali, np.: narzędziowych do pracy na gorąco. Wówczas zdecydowanie wzrasta wytrzymałość korpusu (ponad 2000 MPa), jednak powierzchnia nadal wymaga dodatkowego wzmocnienia.



rys.1



rys.2

W niniejszym artykule przedstawiono kompleksowe procesy oraz wyniki obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej dysz wtryskowych wykonanych ze stali narzędziowej do pracy na gorąco realizowanych w piecu próżniowym. W procesach zastosowano nawęglanie i azotowanie próżniowe (LPC i LPN), hartowanie w gazie, wyrażanie oraz odpuszczanie.

Przedmiot i cel prób i badań

Przedmiotem prób były dysze wtryskowe wykonane ze stali X37CrMoV5-1 (1.2343, H11) o geometrii przedstawionej na Rys. 3.

Celem testów było wytworzenie na powierzchni dyszy (w szczególności na powierzchniach wewnętrznych) równomiernej warstwy utwardzonej przy zachowaniu odpowiedniej twardości rdzenia. Odpowiednie warstwy były

wytwarzane metodą nawęglania i azotowania próżniowego.



rys.3

Wposażenie badawcze

Do prób wykorzystano standardowy jednokomorowy piec próżniowy Seco/Warwick typu 15.0VPT-4035/36IQCN (Rys.4) o przestrzeni roboczej 600/600/900 mm wyposażony w system nawęglania (LPC) i azotowania (LPN) próżniowego oraz hartowanie w gazie pod wysokim ciśnieniem. Nawęglanie realizowano za pomocą mieszanki gazów acetylen (C_2H_2), etylen (C_2H_4) i wodór (H_2), natomiast do azotowania użyto amoniaku (NH_3). Wsad o masie 250 kg brutto zbudowany był z wałków balastowych, wśród których zostały umieszczone badane dysze wtryskowe. Wsad odzwierciedlał standardowe warunki panujące w procesach przemysłowych.



rys.4

Proces LPC

Wykonano 4 serie procesów opartych na nawęglaniu próżniowym. Przed nawęglaniem wykonano przedazotowanie w technologii Pre-NitLPC® [3] w celu ograniczenia rozrostu ziaren austenitu w wysokiej temperaturze. Sekwencja całego procesu technologicznego polegała na: przedazotowaniu, następnie nawęglaniu próż-



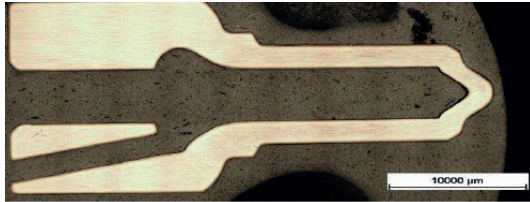


niowym (w technologii FineCarb®[4]) w różnych temperaturach, po czym następowała powtarzająca się dla wszystkich sekwencja hartowania (bezpośredniego) w 5 bar azotu, wymrażania w -75°C przez 2 h i odpuszczania w czasie 2 h w temperaturze 200°C.

Procesy nawęglania przeprowadzono w 4 temperaturach: 860, 920, 950 i 1020°C celując w każdym przypadku w stężenie powierzchniowe węgla na poziomie 0,60 % oraz umowną grubość warstwy ok. 0,4 mm.

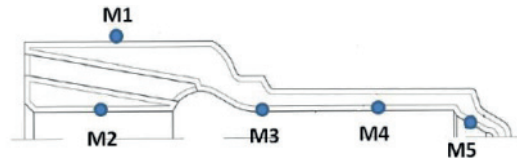
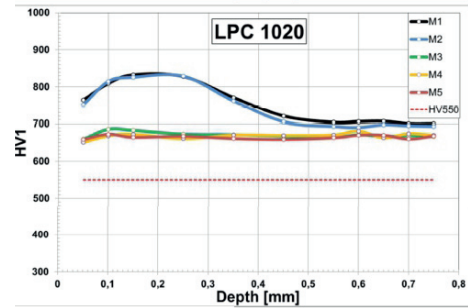
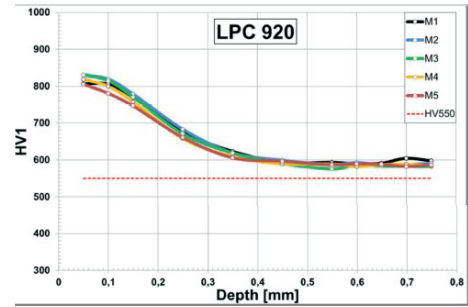
Całkowite czasy w sekwencji nawęglania i dyfuzji dla poszczególnych procesów przedstawiały się następująco:

- LPC 860 C = 10 min, D = 70 min
- LPC 920 C = 4 min, D = 40 min
- LPC 950 C = 4 min, D = 20 min
- LPC 1020 C = 2 min, D = 6 min



rys.5

Na Rys.5. przedstawiono przekrój wzdłużny przez dyszę po procesie nawęglania LPC w temperaturze 920°C. Uzyskano równomierną warstwę na zewnątrz i w wewnętrznych kanałach dyszy, co jest znamienne dla nawęglania próżniowego. Równomierność uzyskanych warstw w poszczególnych procesach zobrazowano na Rys.6. w postaci profili twardości w wybranych



rys.6

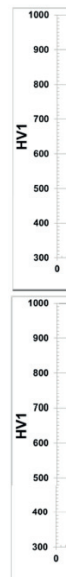
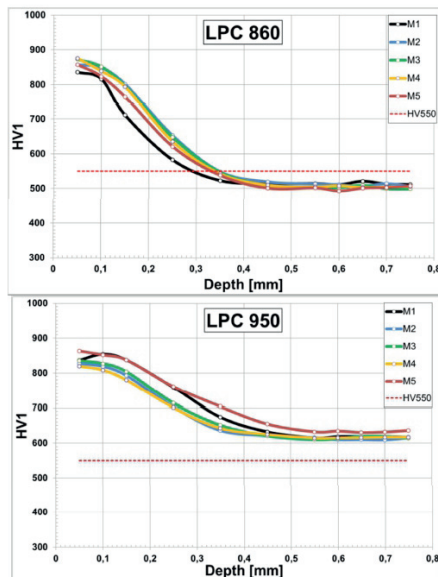
Po procesie LPC 860 uzyskano równomierną warstwę utwardzoną na zewnętrznych i wewnętrznych powierzchniach dyszy. Osiągnięto twardość na powierzchni około 850 HV i w rdzeniu 500 HV, przy umownej grubości warstwy 0,35 mm dla kryterium twardości rdzenia + 50 HV. W procesie LPC 920 wytworzono równomierną warstwę o twardości powierzchniowej 820 HV i grubości 0,30 mm przy twardości rdzenia 590 HV.

Również w procesie nawęglania w 950°C (LPC 950) osiągnięto właściwą równomierność i parametry warstwy: grubość 0,35 mm, twardość powierzchniowa 850 HV i rdzeń 620 HV.

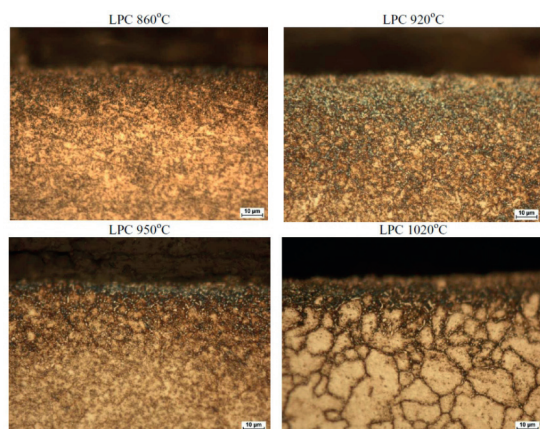
Jedynie proces LPC 1020 nie osiągnął zadowalających wyników. Warstwa powstała tylko na zewnętrznych powierzchniach dyszy, podczas gdy wewnątrz nie występuje w ogóle. Osiągnęła maksymalną twardość 850 HV, a w rdzeniu 680 HV. Profil twardości w warstwie zewnętrznej wykazuje spadek przy samej powierzchni, co sugeruje powstanie nieprawidłowej mikrostruktury.

Porównanie mikrostruktury warstwy przy powierzchni po poszczególnych procesach przedstawiono na Rys.7.

Cechą charakterystyczną są globularne wę-



gliki w osnowie martenzytu. Ich wielkość oraz ilość wzrasta wraz ze wzrostem temperatury procesu. W wyższych temperaturach tworzą wyraźne struktury, siatkę po granicach ziaren austenitu, jak w procesie LPC 1020.



rys.7

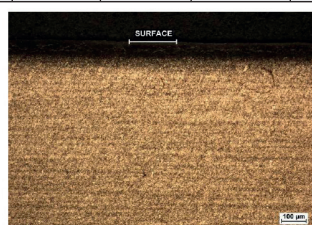
Proces LPN

Wytworzenie warstwy naazotowanej nastąpiło w wyniku kompleksowego procesu składającego się z następujących faz: austenitizacji w 1030°C, hartowania w 5 bar azotu, odpuszczania w 580°C w czasie 2 h oraz azotowania próżniowego w temperaturze 560°C przez 4 h.

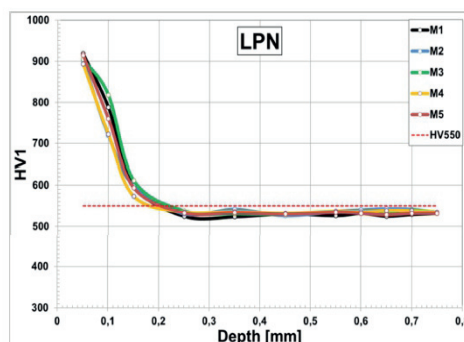
Wyniki przeprowadzonego procesu przedstawiono na Rys.8 w postaci profilu twardości zmierzonych w wybranych miejscach na zewnątrz i wewnątrz dyszy (M1-5). Uzyskano bardzo równomierną warstwę utwardzoną w wyniku azotowania o twardości powierzchniowej ponad 900 HV na głębokości 0,1 mm oraz grubości prawie 0,2 mm przy twardości rdzenia 530 HV.

W wyniku przeprowadzonych procesów uzyskano następujące rezultaty:

Process	Surface hardness	Core hardness	Case depth	Case uniformity
	[HV/HRC]	[HV/HRC]	[mm]	
LPC 860	850/66	500/49	0,35	good
LPC 920	820/65	590/55	0,30	very good
LPC 950	850/66	620/56	0,35	good
LPC 1020	850/66	680/59	0-0,40	insufficient
LPN	>900/67	530/51	0,18	very good



rys.8



Podsumowanie

Procesy nawęglania i azotowanie próżniowego umożliwiają uzyskanie równomiernych warstw utwardzonych na powierzchniach w trudnodostępnych miejscach dysz wtrysku paliwa wykonanych ze stali narzędziowej X37CrMoV5-1. W przypadku nawęglania próżniowego osiągalne są twardości na powierzchni powyżej 800 HV dla temperatury odpuszczania 200 °C (twardość maleje wraz ze wzrostem temperatury odpuszczania). Twardość rdzenia zależy od temperatury hartowania, jest tym większa im większa jest temperatura, w testach od 49 do 59 HRC i również zależy od temperatury odpuszczania. Nawęglanie w temperaturze 1020 °C nie uzyskało poprawnej równomierności i mikrostruktury (siatka węglików) z powodu dużej intensywności procesu (niekontrolowanej) i tendencji do tworzenia węglików w stali. Procesy LPC w tej temperaturze wymagają dopracowania.

Obiecujące wyniki uzyskano w procesie azotowania próżniowego, równomierność warstwy i najwyższą twardość powierzchniową, ponad 900 HV oraz stabilność parametrów warstwy w wysokich temperaturach, ponad 500 °C.

W świetle przeprowadzonych badań należy stwierdzić, że technologia utwardzania warstwy wierzchniej na drodze nawęglania i azotowania próżniowego dysz wtrysku paliwa wykonanych ze stali narzędziowej do pracy na gorąco została opracowana, sprawdzona i jest gotowa do wdrożenia przemysłowego.

Dalsze badania dotyczyć będą opanowania procesów LPC w wysokich temperaturach oraz stosowania kombinowanych warstw nawęglanych i azotowanych.

References

1. P. J. Blau, N. Yang, "Materials for high pressure fuel injection systems", US Dept. of Energy, poster presentation May 10, 2011
2. http://www.dieselpowermag.com/tech/1211dp_why_diesel_fuel_injectors_fail/viewall.html
3. Kula, P.; Pietrasik, R.; Dybowski, K.; Korecki, M.; Olejnik, J. Prentit LPC - the modern technology for automotive, New Challenges. In Heat Treatment and Surface Engineering, Dubrownik-Cavtat, Croatia, 2009, 165-170.
4. Kula, P.; Korecki, M.; Pietrasik, R.; Wołowicz, E.; Dybowski, K.; Kołodziejczyk, Ł.; Atraszkiewicz, R.; Krasowski, M. FineCarb® - the flexible system for low pressure carburizing. New options and performance, The Japan Society for Heat Treatment 2009, 49 (1), 133-136.