

Stanisław W. KRUCZYŃSKI, Ryszard WOŁOSZYN, Marek STĘPNIEWSKI

ZAŁOŻENIA KONSTRUKCYJNE ŚWIECY DO SPALANIA MIESZANKI POWIETRZA Z GAZEM ZIEMNYM

Streszczenie

W artykule przedstawiono parametry świecy zapłonowej stosowanej do zapłonu mieszanki powietrza z gazem ziemnym. Uwzględniając specyfikę spalania gazu ziemnego, przedstawiono główne założenia konstrukcyjne dla zwiększenia jej trwałości i niezawodności działania. Pokazano najnowsze kierunki rozwoju konstrukcji świec zapłonowych do spalania mieszanek powietrza i gazu ziemnego.

WSTĘP

Wprowadzanie coraz to bardziej rygorystycznych wymogów Unii Europejskiej w zakresie ochrony środowiska powoduje większe wykorzystanie paliw gazowych (LPG, CNG i LNG) w zasilaniu silników samochodowych. Szczególnie w transporcie publicznym widoczne jest coraz powszechniejsze stosowanie gazu ziemnego jako paliwa alternatywnego. Stosowanie tych paliw nie wymaga zmian samej konstrukcji silnika, a jedynie zamontowanie dodatkowego układu paliwowego. Układy te cieszą się rosnącą popularnością na rynku, szczególnie na rynku pozafabrycznym.

Prace badawcze nad wykorzystaniem gazu ziemnego jako paliwa alternatywnego w zasilaniu silników spalinowych są stymulowane rosnącymi wymaganiami ekologicznymi, wprowadzającymi stopniowe zmniejszanie poziomu emisji poszczególnych substancji szkodliwych emitowanych przez silnik, co w wielkich obszarach zurbanizowanych (duże miasta, tereny przemysłowe) staje się znaczącym już problemem.

Gaz ziemny bardzo dobrze miesza się z powietrzem, tworząc jednorodne mieszanki. Silnik zasilany tym paliwem nie wymaga stosowania układu wzbogacania składu mieszanki podczas zimnego rozruchu. Jednak z uwagi na wysoką energię aktywacji potrzebną do jego zapłonu, prędkość rozprzestrzeniania się laminarnego płomienia mieszanki gazowo-powietrznej jest mniejsza od innych paliw. Jest to szczególnie niekorzystne podczas pracy silnika przy małych i średnich obciążeniach. Wydłuża bowiem okres spalania, pogarszając sprawność obiegu.

Przedłużenie procesu spalania na suw rozprężania powoduje wzrost obciążenia cieplnego silnika i warunki pracy świecy zapłonowej. Ponadto wydłużony okres spalania sprawia, że w chwili otwarcia zaworu wylotowego zarówno ciśnienie, jak i temperatura spalin są wyższe, niż przy spalaniu tradycyjnych paliw węglowodorowych. Mniejszej prędkości spalania gazu ziemnego przeciwdziała się, stosując większe wartości kąta wyprzedzenia zapłonu lub początku wtrysku inicjującej dawki oleju napędowego, modyfikację układu zapłonowego pod kątem podniesie-

nia energii wyładowania, podwyższenie wartości stopnia sprężania w stosunku do silników o ZI, zwarte komory spalania i zawirowanie ładunku.

Silniki zasilane gazem pracujące wg obiegu Otto – podobnie jak konwencjonalne silniki zasilane benzyną wykorzystują do zapłonu mieszanki gazowo-powietrznej wyładowanie elektryczne pomiędzy elektrodami świecy zapłonowej. Mieszanka palna jest tworzona zazwyczaj poza cylindrem silnika lub w cylindrze w trakcie procesu napełniania. Z uwagi na właściwości gazu ziemnego, zwłaszcza dużą wartość energii aktywacji, układy zapłonowe tych silników charakteryzują się wysoką energią wyładowania (napięcie fazy przebiccia wyładowania elektrycznego na elektrodach świecy zapłonowej ma wartość min. 30 kV). Dlatego też ważnym elementem układu zapłonowego w silnikach zasilanych gazem ziemnym (lub biogazem) jest świeca zapłonowa, która powinna zapewniać pewny zapłon w całym zakresie obciążeń i prędkości obrotowych silnika. Niezmienne parametry świecy powinny być utrzymane w całym okresie eksploatacyjnym (możliwie jak najdłuższym) zalecanym przez producenta.

Dlatego można postawić pytanie: jak warunki panujące w komorze spalania silnika zasilanego gazem ziemnym wpływają na konstrukcję świecy zapłonowej?

1. WARUNKI PRACY ŚWIECY ZAPŁONOWEJ

Świecę zapłonową stanowią dwie odizolowane od siebie elektrody, włączone w obwód prądu elektrycznego. Przepływ prądu przyjmuje postać wyładowania iskrowego w sprężonej mieszance powietrza i gazu ziemnego. Ładunki elektryczne są przenoszone przez cząsteczki gazu. Pod wpływem powstającego pola elektrycznego jony dodatnie gazu zaczynają przemieszczać się w kierunku elektrody ujemnej, a jony ujemne i swobodne elektrony – w kierunku elektrody dodatniej. W miarę podwyższania się napięcia na elektrodach ruch jonów staje się intensywniejszy, aż – poprzez kolejne zderzenia - doprowadza do powstania nowych jonów. Następuje jonizacja lawinowa cząsteczek gazu na całej drodze pomiędzy elektrodami, która przyjmuje formę gwałtownego wyładowania iskrowego.

Gaz otaczający drogę jonizacji lawinowej nagrzewa się do tego stopnia, że zaczyna świecić, co jest widoczne w postaci iskry. Przeskokowi iskry towarzyszy trzask, wywołany falami dźwiękowymi rozszerzającego się od nagrzania gazu. Ta część wyładowania nosi nazwę wyładowania pojemnościowego i stanowi tzw. czoło iskry. Natomiast napięcie, przy którym rozpoczyna się wyładowanie iskrowe nazywa się napięciem zapłonu lub przebiccia. Po zmniejszeniu się oporności gazu gwałtownie obniża się napięcie pomiędzy elektrodami, do takiej wartości, która pozwala na kontynuowanie rozpoczętego wyładowania w postaci łuku elektrycznego. Ta część wyładowania ma nazwę wyładowania indukcyjnego i stanowi tzw. ogon iskry. Gdy natężenie prądu odpowiednio się zmniejszy, wówczas łuk zostanie zerwany i iskra zgaśnie.

Omówiony przebieg wyładowania zachodzi tylko wtedy, kiedy gaz – znajdujący się w szczelinie pomiędzy elektrodami – jest nieruchomy. W rzeczywistości ruchy wirowe sprężonej mieszanki powodują znaczne zakłócenia w procesie wyładowania iskrowego. Może dochodzić do wygaszania iskry i ponownego jej przeskoku. Wyładowanie ma wtedy postać serii iskier, co nie wpływa ujemnie na zapłon mieszanki.

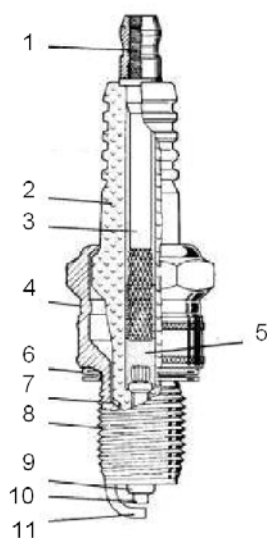
Do wywołania zapłonu mieszanki podczas pracy silnika wystarcza pojawienie się czoła iskry, ze względu na utrzymywanie się intensywnej jonizacji gazu. Natomiast podczas rozruchu zimnego silnika zapłon bogatej i niejednorodnej mieszanki jest powodowany ogonem iskry. Jego cieplne oddziaływanie na mieszankę wokół elektrod sprzyja odparowaniu paliwa i zwiększa skłonność do zapalenia.

Wymagania stawiane świecy są następujące:

- odporność mechaniczna,
- odporność cieplna,
- odporność elektryczna,

- odporność chemiczna,
- utrzymywanie właściwej temperatury pracy.

Aby ułatwić dobór świecy do danego silnika wprowadzono pojęcie wartości cieplnej świecy, która stanowi miarę jej obciążenia cieplnego. Wyraża się ją w postaci wskaźnika (najczęściej liczbowego), który określa zdolność świecy do odprowadzania i rozpraszania ciepła przejmowanego z komory spalania. Im większa jest wartość cieplna świecy, tym zdolność odprowadzania ciepła jest wyższa. Tego typu świece nazywa się popularnie zimnymi. Wadą ich jest zwiększona skłonność do zanieczyszczania się nagarem. Znajdują zastosowanie w silnikach o wysokim stopniu sprężania oraz w silnikach wysokoobrotowych, w których panują wysokie temperatury cyklu pracy. Im mniejsza jest wartość cieplna świecy, tym trudniej odprowadza ona ciepło i szybciej się nagrzewa. Stwarza to możliwość wywoływania niekorzystnych samozapłonów. Zaletą takiej świecy jest skłonność do samooczyszczania się. Takie świece, zwane gorącymi, są wykorzystywane w silnikach o niskim stopniu sprężania i małej mocy, w których występują niższe temperatury spalania. Eksploatacja świec zapłonowych powoduje ich zużycie wskutek erozji iskrowej. Prowadzi ona do stopniowego usuwania materiału z elektrod, a tym samym powiększania przerwy pomiędzy nimi. Zjawisko to występuje zawsze, lecz należy temu przeciwdziałać, przez co przedłuża się żywotność świec zapłonowych. Jedną z metod jest stosowanie świec wieloelektrodowych, w których wyładowanie rozkłada się pomiędzy poszczególne elektrody boczne. Tego typu świece nie są jednak zalecane do silników zasilanych gazem z uwagi na mniejszą energię zapłonu, która rozkłada się na większą liczbę elektrod. Silniki gazowe powinny być wyposażane w świece jednoelektrodowe, najlepiej z nieco zmniejszoną przerwą, gdyż zapewnia to większą energię wyładowania elektrycznego. Na rys.1 pokazano typową konstrukcję świecy zapłonowej.



Rys. 1. Przykładowa konstrukcja świecy zapłonowej: 1 – nakrętka mocująca przewodu wysokiego napięcia, 2 – izolator ceramiczny, 3 – kołek kontaktowy, 4 – korpus świecy, 5 – szklohemetyk, 6 – uszczelka zewnętrzna, 7 – uszczelka wewnętrzna, 8 – gwintowana część korpusu świecy, 9 – stożek izolatora, 10 – elektroda środkowa, 11 – elektroda boczna

2. KIERUNKI ROZWOJU KONSTRUKCJI ŚWIECY

Świece zapłonowe dla zapłonu iskrowego silnika z paliwem gazowym posiadają swoją konstrukcję w sposób nadrzędny przyporządkowaną do pracy z paliwem gazowym, a w drugiej kolejności do pracy z paliwem benzynowym. Jej konstrukcja zapewnia właściwie dobre parametry iskry oraz jej energię, gwarantującą każdorazowy zapłon mieszanki gazowo-

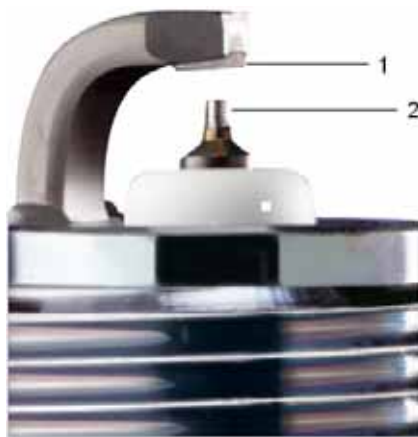
powietrznej pomimo utrudnień spowodowanych paliwem gazowym. Szczególnie jest to ważne w okresie zimowym, gdzie wyraźnie dają się odczuć różnice w jakości paliwa gazowego lub nieodpowiednich proporcji propanu i butanu.

Głównymi elementami świecy zapłonowej, które mogą podlegać modyfikacji wykonania są:

- elektroda główna,
- elektroda boczna (masowa),
- izolator.

W minionych latach w konstrukcji świec zapłonowych stosowano na elektrody srebro, które charakteryzowało się najlepszą przewodnością ciepła (szybko odprowadzało ciepło od elektrody). Obecnie jest rzadko stosowane i zostało wyparte przez platynę, iryd oraz inne metale i stopy. Czyste metale przewodzą ciepło lepiej niż ich stopy, ale z kolei np. czysty nikiel jest bardzo wrażliwy na oddziaływanie produktów spalania w komorze silnika. Natomiast dodatki do niklu, manganu, chromu i krzemu podwyższają chemiczną odporność szczególnie przeciw agresywnemu oddziaływaniu gazów komory spalania. Z kolei dodatek aluminium i itru podwyższa odporność oksydacyjną stopu. Stosowana na elektrody świec platyna posiada jeden z najbardziej korzystnych parametrów przewodzenia ciepła i prądu, a także jest odporna na korozję. Wadą jej jest wysoka cena, dlatego stosowana jest w możliwie najmniejszej ilości. Produkuje się albo świece z platyną tylko na elektrodzie środkowej, albo również na bocznej. Temperatura topnienia platyny wynosi 1800°C, w związku z czym sama końcówka elektrody może mieć mały rozmiar, co skutkuje niskim napięciem zapłonu i wypadaniem zapłonów.

Na powierzchniach elektrody środkowej i bocznej nakładane są metale szlachetne, które stanowią właściwe elektrody przewodzące wyładowanie iskrowe. Obecnie można to wykonywać poprzez spawanie laserowe lub zgrzewanie oporowe. W zależności od rodzaju stosowanego metalu połączenie go z niklowo-miedzianym rdzeniem będzie stanowić o trwałości całej świecy zapłonowej. Dlatego właściwe wykonanie połączenia tych metali z rdzeniem elektrody środkowej ma wpływ na odprowadzenia ciepła (także przez wykonaną spoinę). Niewłaściwa spoina powoduje podniesienie temperatury w obszarze elektrody środkowej. Podstawowym warunkiem uzyskania dobrego połączenia jest bardzo dokładne zestawienie (bez szczeliny) elementów łączonych. Jakakolwiek szczelina powoduje brak połączenia. Spoinę tworzy stopiony materiał drutu (metal szlachetnego) i nadtopiony materiał rdzenia elektrody środkowej, co może spowodować pojawienie się podtopień tworzących karby konstrukcyjne. Istotne jest, aby połączenie w miejscu spawania nie obniżało zdolności w odprowadzeniu przyjmowanego ciepła od gorących spalin i jednocześnie spoina nie ulegała erozyjnemu zużyciu.

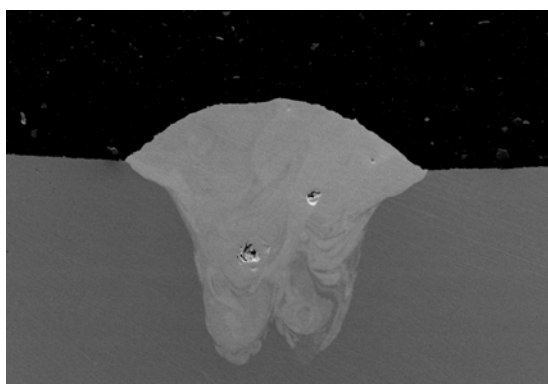


Rys. 2. Widok połączeń metali szlachetnych na elektrodach świecy zapłonowej: 1 – elektroda boczna, 2 – elektroda środkowa,

Coraz więcej silników wyposaża się seryjnie w takie świece pomimo ich wyższej ceny. Powodem tego jest fakt, iż posiadają one dłuższą żywotność i zapobiegają wypadaniu zapłonów, co z kolei wydłuża żywotność reaktora katalitycznego. Obok tych materiałów na elektrody świece stosuje się złoto i pallad.

Obecnie optymalnym materiałem na elektrody świece jest iryd, który ma zdecydowanie wyższą temperaturę topnienia (2466°C) niż platyna. Poza tym posiada większą twardość i wytrzymałość mechaniczną, przez co jest praktycznie niezniszczalny i odporny na wszelkiego rodzaju zużycia korozyjne. Iryd jest zazwyczaj stosowany jako stop z platyną lub rodem (powlekany cienką warstwą rodu lub platyny), w celu zlikwidowania jego tendencji do korozji poprzez utlenianie (ucieczka tlenków). Tak jak wszystkie materiały stosowane na elektrody środkowe, także iryd i jego powłoki muszą zostać odpowiednio wypolerowane, celem zlikwidowania porów i uzyskania jednolitej powierzchni. Podobnie jak w przypadku platyny, świece irydowe uzyskuje się poprzez laserowe spawanie irydu z rdzeniem elektrody bazowej. Średnica elektrody środkowej wynosi od 0,4 do 0,6 mm. Im cieńsza elektroda tym konieczne niższe napięcie dla uzyskania iskry. Ma to jednak swoją praktyczną granicę. Wysokie obciążenia mechaniczne w komorze spalania mogą doprowadzić do odkształcenia zbyt cienkiej elektrody. Obszerne testy badawcze pokazują, że środkowe elektrody o średnicy 0,6 mm są optymalne. Również w praktyce świece irydowe o średnicy elektrody 0,6 mm okazały się najbardziej niezawodne. Świece irydowe są wyjątkowo drogie nie tylko ze względu na koszt irydu, ale również ze względu na konieczność stosowania urządzeń wysokiej technologii do ich produkcji, np. spawanie laserowe. Świece irydowe wykazują obok doskonałych właściwości roboczych również długi okres eksploatacji.

Spawanie laserowe daje dobre połączenie rdzenia elektrody z metalem (platyna, iryd), a w wyniku tego występuje prawidłowe odprowadzenie ciepła przez elektrodę i spoinę. Podnosi to jednocześnie okres niezawodnej pracy świece zapłonowej.



Rys. 3. Widok przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego wtopionej platynowej nakładki na elektrodzie bocznej

Ważną częścią świece zapłonowej jest jej izolator. Widoczna jest tylko jego część zewnętrzna. Reszta znajduje się w korpusie świece, a końcówka wraz z elektrodą środkową wystaje do komory spalania silnika. Izolator musi być odporny na wysokie temperatury i mechaniczne obciążenia. Stopa izolatora leży wewnątrz komory spalania, gdzie po napełnieniu jest najpierw chłodzona, a następnie, przy spalaniu, poddawana wysokim temperaturom i ocieplana. Dzieje się to kilkanaście razy na sekundę. Dlatego izolatory są wykonywane ze specjalnej ceramiki.

Składa się ona z Al_2O_3 i minimalnych ilości składników dodatkowych w celu polepszenia właściwości izolatora. Ważne jest, aby materiał ceramiczny został zagęszczony i ujednoczony zanim zostanie poddany wypalaniu w temperaturach wielokrotnie wyższych niż te panujące w komorze spalania. Część zewnętrzna izolatora jest glazurowana, co zapobiega osadzaniu zanieczyszczeń, które mogą chłonać wilgoć i powodować niekontrolowane wyładowania po-

między elektrodą środkową a korpusem. Dodatkowym zabezpieczeniem są rowki na izolatorze, wydłużające drogę upływu prądu. Część izolatora wystająca do komory spalania jest polerowana, co zmniejsza skłonność do osiadania nagaru.

PODSUMOWANIE

Zastosowanie gazu ziemnego do zasilania silników spalinowych istotnie zmienia warunki, w jakich eksploatowana jest świeca zapłonowa (temperatura, środowisko, erozja elektryczna), a tym samym obniża się jej trwałość. Dlatego aby podnieść trwałość świecy, światowi producenci poszukują nowych rodzajów materiałów na elektrody świecy. Wprowadzane są nowe materiały takie jak itr, iryd, platyna, srebro itp. Stosuje się, nie zawsze z dobrym efektem, pokrywanie elektrod tymi metalami lub wykonywanie tylko niewielkiej części elektrody. Stąd istotnym problemem staje się łączenie metali w elektrodach świecy.

Tak wykonane świece zapłonowej z zastosowaniem metali szlachetnych w pełni odpowiadają zastosowaniu ich w silnikach zasilanych gazem ziemnym. Wykonanie w taki sposób elektrod:

- umożliwia równomierne rozprzestrzenianie się płomienia w komorze silnika, co poprawia osiągi samochodu (nie jest tak odczuwalna różnica w mocy w stosunku do benzyny),
- zmniejsza ryzyko korozji, które z uwagi na dużo wyższą temperaturę spalania gazu ziemnego jest większe niż przy spalaniu benzyny,
- utrzymuje efektywność zapłonu, co w konsekwencji wydłuża żywotność świecy,
- zapewnia wysoką elastyczność termiczną czyli odporność na „zarzucanie” i obciążenia cieplne.

BIBLIOGRAFIA

1. Baczewski K., Kałdoński T.: *Paliwa do silników o zapłonie iskrowym*, WKŁ, Warszawa, 2005.
2. Bosch R. GmbH: *Automotive Electric/Electronic Systems*.
3. Demidowicz R.: *Zapłon*, WKiŁ, Warszawa, 1993.
4. Szymański Z., Hoffman J.: *Fizyka Spawania Laserowego*. WIPPT PAN, Warszawa, 2004.
5. www.bosch.pl
6. Katalog świec zapłonowych GAS-SUPER, ISKRA Zakłady Precyzyjne sp. z o.o., Kielce 2006.
7. Katalog świec zapłonowych U-SUPER, ISKRA Zakłady Precyzyjne sp. z o.o., Kielce 2006.

DESIGN INTENT SPARK PLUG FOR COMBUSTION AIR MIXTURES WITH NATURAL GAS

Abstract

The article presents the parameters used spark plug to ignite the mixture of air with natural gas. Given the specificity of the combustion of natural gas, presents the main design intent to increase its durability and reliability. Showing the latest design trends for spark plugs for combustion of mixtures of air and natural gas.

Recenzent: prof. dr hab. inż. **Andrzej Ambrozik** – Politechnika Świętokrzyska

Autorzy:

prof. nadzw. dr hab. inż. **Stanisław Kruczyński** – Politechnika Warszawska

dr inż. **Ryszard Wołoszyn** – Politechnika Radomska

dr inż. **Marek Stępniewski** – Politechnika Radomska