

## Deposits in spark ignition engines – formation and threats

*The paper reports on both the processes of harmful deposits formation in spark ignition engines and their threats related to engine operation. The connection of a dynamic development of piston engines and fuel injection systems with increasing problems of deposits formation on various engine parts has been discussed at length. The effect of fuel composition, engine design and its operating parameters on the formation of a variety of engine deposits has been described. Possible causes of deposits formation have also been indicated. The paper confirms great importance of modern deposit control detergents and state-of-the-art technology of manufacturing of injection systems components in counteracting this detrimental phenomenon.*

Key words: engine deposits, engine fuels, detergents, operation of combustion engines

### Osady w tłokowych silnikach spalinowych ZI – tworzenie i zagrożenie

*W artykule omówiono procesy tworzenia szkodliwych osadów w tłokowych silnikach spalinowych ZI i zagrożenia, jakie one stwarzają podczas eksploatacji silników. Przedyskutowano powiązanie rozwoju silników tłokowych oraz układów wtrysku paliwa z narastającymi problemami powstawania osadów na różnych elementach silników. Opisano wpływ kompozycji paliwa, konstrukcji silnika i warunków jego eksploatacji na różne osady silnikowe. Wskazano możliwe przyczyny tworzenia osadów. Podkreślono ogromne znaczenie dodatków detergentowych, a także zmian w technologii wykonywania i obróbki elementów układów wtrysku paliwa w przeciwdziałaniu szkodliwym procesom tworzenia osadów.*

Słowa kluczowe: osady silnikowe, paliwa silnikowe, dodatki detergentowe, eksploatacja silników spalinowych

#### 1. Introduction

The phenomenon of deposit formation on the inner parts of the engine components and the inner and outer parts of the fuel injection system components (particularly injectors and high pressure pumps) has been an issue for many years. However, only after the introduction of exhaust emission reduction legislation, has extended research been initiated aiming at determining of the causes for the deposits, the mechanisms of their formation, the factors facilitating the growth of the deposits and detergents preventing the formation of the same on vital operating elements of engines and fuel systems. The need for such research originated in the necessity to meet stringent environment protection legislation. This led to the introduction of increasingly sophisticated designs of engines and implementation of strategies of control of multiple fuel injection, mixture formation and combustion process. It turned out, however, that the deposits formed inside the engines could significantly disturb the efficient coexistence of these technologies and solutions. Initially, only organic deposits (composed of carbon and hydrogen, but also containing oxygen, sulfur, nitrogen and other elements) were subjected to analysis. The deposits form on the surfaces of: combustion chambers in the cylinder heads, piston crowns, intake and exhaust valves, intake and exhaust ducts and manifolds as well as injection nozzles (formerly also carburetor mixing chambers). It has also been confirmed that deposits appear on key components of both diesel and gasoline engines. It has also been rather quickly ascertained that for gasoline engines the greatest perils (in terms of engine performance) are deposits forming in the combustion chambers, on intake valves, inside the intake ducts and on the injection nozzles. The size and composition

#### 1. Wstęp

Zjawisko powstawania osadów na wewnętrznych powierzchniach elementów tłokowych silników spalinowych oraz zewnętrznych i wewnętrznych powierzchniach podzespołów układów wtrysku paliwa (zwłaszcza wtryskiwaczy i wysokociśnieniowych pomp wtryskowych) jest znane od wielu lat. Jednak dopiero od czasu wprowadzenia przepisów zmniejszających emisję składników szkodliwych do atmosfery przez silniki spalinowe rozpoczęto szerokie badania mające na celu ustalenie przyczyn powstawania osadów, mechanizmów ich tworzenia, czynników sprzyjających procesom przyrostu osadów, a zwłaszcza środków zapobiegających ich osadzaniu się na powierzchniach kluczowych, roboczych elementów silników oraz układów paliwowych. Potrzeby takich badań wynikały z konieczności spełnienia przez silniki coraz ostrzejszych przepisów w zakresie ochrony środowiska naturalnego człowieka. Wiązało się to z wprowadzaniem coraz bardziej złożonych konstrukcji silników oraz strategii sterowania procesami precyzyjnego, dzielonego na części wtrysku paliwa, zaawansowanych strategii tworzenia mieszanki palnej i sterowania procesami spalania w silnikach. Okazało się jednak, że współdziałanie tak złożonych technologii i rozwiązań silników może być w sposób istotny zakłócanie tworzonymi w nich osadami. Początkowo badaniom poddawano wyłącznie osady organiczne składające się głównie z węgla i wodoru, ale często zawierające również tlen, siarkę, azot i inne pierwiastki. Osady takie powstają na powierzchniach: komór spalania w głowicach, denek tłoków, zaworów dolotowych i wylotowych, przewodów oraz kanałów dolotowych i wylotowych, a także końcówek wtryskiwaczy układów wtrysku paliwa (wcześniej także komór mieszankowych gaźników) tłokowych silników

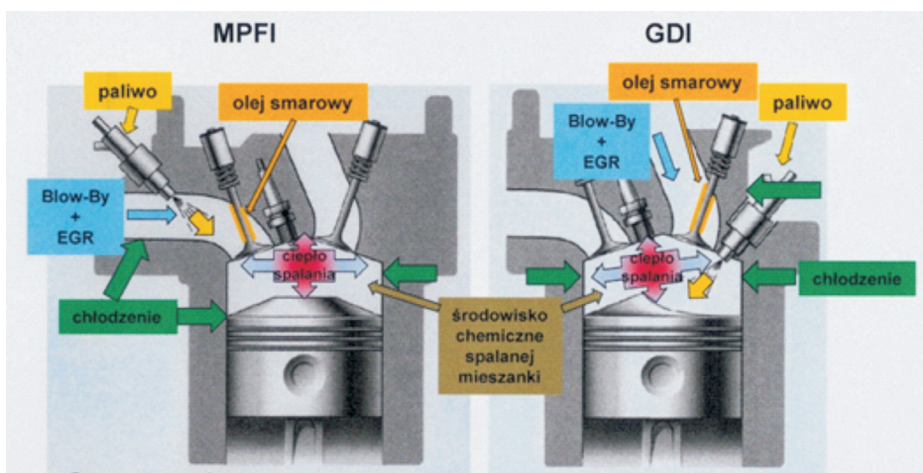


Fig. 1. Phenomena and factors influencing the formation of deposits in MPFI and GDI spark ignition engines

Rys. 1. Zjawiska i czynniki oddziałujące na tworzenie osadów w silnikach ZI z MPFI oraz ZI z GDI [Legenda: paliwo – fuel, olej smarowy – engine oil, chłodzenie – cooling, ciepło spalania – combustion heat, środowisko chemiczne spalanej mieszanki – chemical environment of the combusted mixture]

of these deposits are influenced by a variety of phenomena as shown in Fig. 1.

The most important in the formation of coke deposits and resins are the processes of thermodynamic oxidation and degradation of fuel and engine oil during operation. The deposits also form following incomplete combustion of fuel and engine oil (inside engine combustion chambers). Deposits on intake valve heads are formed because the engine oil needed to lubricate the valve guides flows down the valve stems and penetrates the valve seals (depending on the engine deterioration level and engine viscosity) to get to the hot valve heads. Fuel thermal stability (depending on its molecular composition) is important in the formation of deposits. In terms of thermal stability of fuel, we may distinguish two ways of deposit formation – low-temperature self-oxidation referred to as the ‘contamination’ and high-temperature thermal decomposition (pyrolysis) referred to as the ‘coking’ [1]. For the formation of the precursors of deposits, compounds containing oxygen, nitrogen and sulfur are of vital importance, let alone small amounts of metals contained in the fuel that catalyze the oxidation process (zinc and copper). The polarity of compounds forming the precursors of deposits and the interaction between them on the surface of metals on which they deposit also have great influence on the formation of deposits. Extensive research allowed establishing that the most important for carbon deposit formation are the components of fuel of the highest boiling temperature in the following order: aromates, diolefins, olefins, naphthenes and, to a lower extent, paraffins [2, 3]. The heating of the metal surface to a temperature higher than the boiling temperature of the fuel components prevents or limits the formation of deposits and leads to flaking and detaching of the deposits already formed, thus accelerating the process of self-cleaning. However, even at the temperature of above 350 °C, the formation of carbon deposits is possible. They form as a result of decomposition of hydrocarbons to free carbon and hydrogen or a condensation/polymerization of

spalinowych. Stwierdzono też, że występują one na kluczowych, roboczych elementach zarówno silników ZI, jak i ZS. Szybko też ustalono, że dla silników ZI osadami najbardziej zagrażającymi ich poprawnej pracy, w rozumieniu zachowania deklarowanych przez producentów osiągnięć w czasie oraz walorów użytkowo-eksploatacyjnych, są te, które tworzą się w komorach spalania, na zaworach dolotowych, w kanałach dolotowych i na końcówkach wtryskiwaczy paliwa. Na wielkość i skład tych osadów ma wpływ wiele zjawisk i czynników, które przedstawiono na rys. 1.

Największe znaczenie w tworzeniu osadów koksowych, a także w postaci żywicy odgrywają procesy termicznego utleniania i degradacji paliwa oraz oleju smarowego w warunkach pracy silnika. Osady takie powstają też na skutek procesów niezupełnego spalania paliwa i oleju smarowego np. w komorach spalania silników. W odniesieniu do osadów na grzybkach zaworów dolotowych, olej smarowy niezbędny do smarowania przewodniczących zaworów spływa po trzonkach zaworowych, a następnie przedostając się przez uszczelniacze (w stopniu uzależnionym od wielkości zużycia silnika i lepkości oleju), spływa na gorące grzybki zaworów, tworząc osady. W tworzeniu osadów istotna jest też stabilność termiczna paliwa zależna od jego budowy cząsteczkowej. Biorąc pod uwagę stabilność termiczną paliwa, można wyróżnić dwie drogi tworzenia osadów, tj. przez niskotemperaturowe samoutlenianie zwane „zanieczyszczeniem” oraz wysokotemperaturowy rozkład termiczny (piroliza) zwany „zakoksowywaniem” [1]. Dla formowania prekursorów osadów mają znaczenie związki zawierające tlen, azot oraz siarkę, a także znajdujące się w paliwach, najczęściej w śladowych ilościach, metale stanowiące katalizatory procesów utleniania paliwa (np. cynk i miedź). Duże znaczenie w powstawaniu osadów przypisuje się też polarności związków tworzących prekursorów osadów i interakcjom pomiędzy nimi a powierzchnią metali, na które się osadzają. Szerokie badania pozwoliły ustalić, że najistotniejsze dla tworzenia osadów węglowych mają składniki paliwa o najwyższej temperaturze wrzenia, a zatem w kolejności: aromaty, diolefiny, olefiny, nafteny i w mniejszym stopniu parafiny [2, 3]. Nagrzewanie się powierzchni metali do temperatury wyższej od temperatury wrzenia składników paliwa zapobiega lub ogranicza powstawanie osadów, a dla osadów już osadzonych na takiej powierzchni powoduje ich łuszczenie i odrywanie, a zatem przyspiesza procesy samooczyszczania. Jednak nawet przy temperaturze powyżej 350 °C możliwe jest tworzenie osadów węglowych. Powstają one na skutek rozkładu

hydrocarbons to larger, polynuclear aromatic hydrocarbons (PAH) that form the deposits as a consequence [1]. Metallic catalysts usually accelerate the process of formation of deposits by polymerization and thermal decomposition of fuel. Often, the fuel additives, including detergents, have a higher boiling temperature and a lower thermal resistance than the components of the base fuel. Consequently, the deposit formation intensifies on the surface of the engine components heating to temperatures lower than the boiling temperature of these additives [3]. For example, in indirect injected gasoline engines the temperature of the injection nozzles may reach above 100 °C and in direct injected gasoline engines this temperature reaches approx. 180 °C. In direct injected diesel engines the temperature of the nozzles is 300–350 °C [3, 4]. The temperature of the upper surface of the intake valve heads of spark ignition engines

węglowodorów do wolnego węgla i wodoru, lub kondensacji/polimeryzacji węglowodorów do większych wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (PAH), które następnie tworzą osady węglowe [1]. Metaliczne katalizatory zazwyczaj przyspieszają procesy inicjowania i powstawania osadów przez polimeryzacje i termiczny rozkład paliwa. Często składniki pakietów uszlachetniających paliwa, w tym dodatki detergentowe, mają wyższą temperaturę wrzenia niż składniki paliwa bazowego, a przy tym niską odporność termiczną. W wyniku tego na powierzchniach elementów silnika nagrzewających się do temperatury niższej niż temperatura wrzenia tych dodatków intensyfikują one procesy tworzenia osadów [3]. Przykładowo, w odniesieniu do silników ZI z pośrednim wtryskiem paliwa temperatura, do której nagrzewają się końcówki wtryskiwaczy sięga powyżej 100 °C, a w silnikach ZI z bezpośrednim wtryskiem paliwa do około 180 °C. Z kolei w silnikach ZS z bezpośrednim wtryskiem paliwa do około 300–350 °C [3, 4]. Temperatura górnych powierzchni grzybków zaworów dolotowych silników ZI dochodzi do 350 °C. Równocześnie średnia temperatura powierzchni komór spalania zmienia się w szerokim zakresie począwszy od 120 °C w obszarze kanałów przepływu czynnika chłodzącego silnik do około 320 °C w obszarze gniazd zaworów wylotowych silnika i do ponad 800 °C na powierzchni zaworów wylotowych [4]. Gdy stosuje się EGR, gazy spalinowe doprowadzane do układu dolotowego silnika, zawierają gorące cząstki i produkty spalania, a także prekursor osadów. Sprzyja to procesom formowania osadów oraz ich wzrostowi, zwłaszcza w przewodach i kanałach dolotowych, na końcówkach wtryskiwaczy silników ZI z SPI i MPFI oraz na zaworach dolotowych. Na rysunku 2 przedstawiono najważniejsze czynniki mające wpływ na procesy tworzenia i wzrostu osadów węglowych.

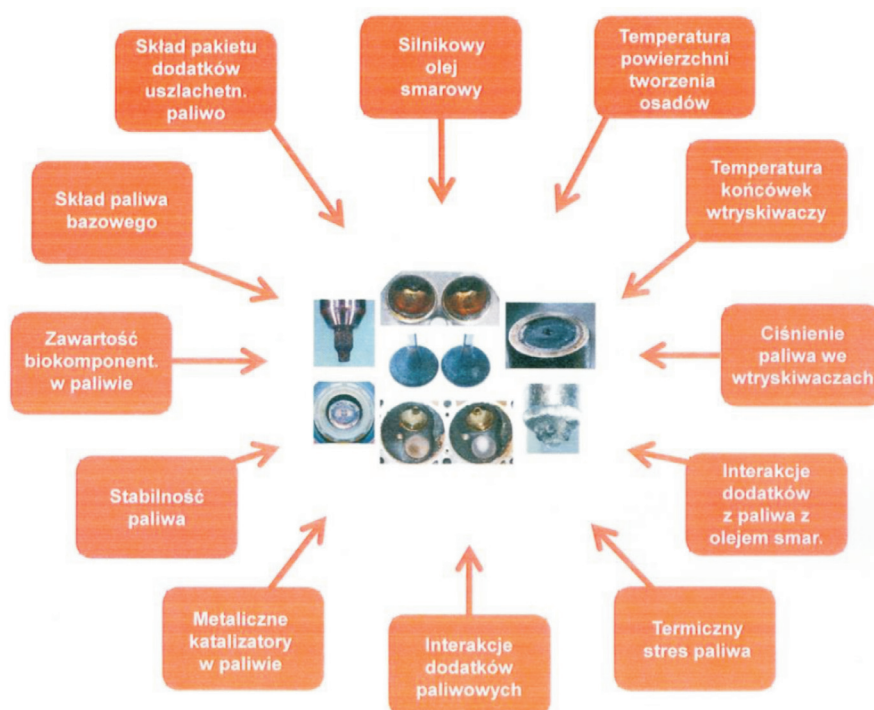


Fig. 2. Factors influencing the formation and buildup of deposits in piston combustion engines

Rys. 2. Najważniejsze czynniki szczegółowe wpływające na tworzenie, wzrost i skład osadów w tłokowych silnikach spalinowych [Legenda kolejno od 12 zgodnie z ruchem wskazówek zegara: engine oil, temperature of the deposit formation surface, temperature of the injection nozzles, fuel pressure in the injectors, interaction of the fuel additives and the engine oil, fuel thermal stress, interactions of the fuel additives, metallic catalysts in the fuel, fuel stability, content of bio-components in the fuel, composition of base fuel, composition of the fuel additives]

reaches 350 °C. At the same time the average temperature on the surface of combustion chambers varies widely starting from 120 °C in the area of the cooling ducts, 320 °C in the area of the exhaust valves and 800 °C on the surface of the exhaust valves [4]. If EGR is applied, the exhaust gas is fed to the engine intake system, containing hot products of combustion and the precursors of deposits. This facilitates the increase of the process of deposit formation particularly in the intake ducts, injection nozzles of SPI and MPFI spark

## 2. Osady na wtryskiwaczach silników ZI z pośrednim wtryskiem paliwa (SPI i MPFI)

Wtryskiwacze układów SPI oraz MPFI są precyzyjnie wykonane i muszą odmierzać, w sposób bardzo dokładny, ilość wtryskiwanego do kolektora/ów dolotowego/ych paliwa. Do ich poprawnego działania niezbędne jest utrzymanie czystych powierzchni (bez osadów) w obszarach otworka wylotowego paliwa i części czopika iglicy poruszającej



ignition engines and the intake valves. Figure 2 presents the most significant factors influencing the processes of carbon deposit formation and buildup.

## 2. Deposits on the injectors of SPI and MPFI indirect injected spark ignition engines

SPI and MPFI injectors are precisely manufactured and must accurately measure the amount of fuel injected into the manifold. For the injectors to operate properly, clean deposit-free surfaces near the injector outlet hole and the pintle are necessary, which is also the case for the fuel flow channels and the edges of the injector holes (single and multi-hole injectors). In order to obtain the required precision of fuel dosage and its proper atomization, the circumferential gap between the edge of the fuel dosing hole and the pintle must be of approx. 0.05 mm. Any contamination by the adhered coke deposits has direct influence on the amount of fuel released by the injector. This, in turn, may result in uncontrolled changes of the excess air coef-

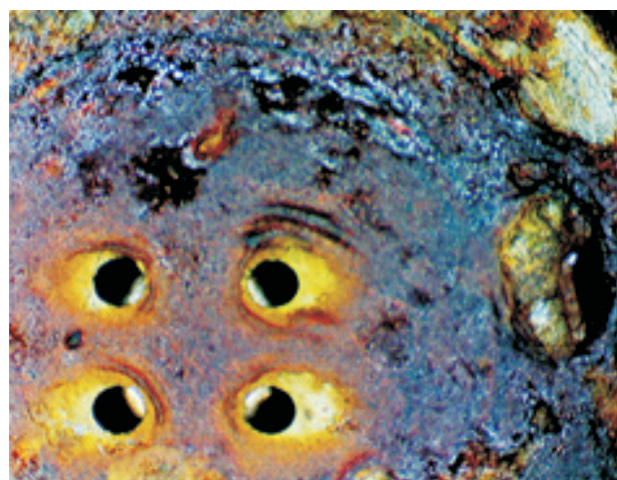


Fig. 3. Example deposits on the nozzle of a multihole spark ignition MPFI injector

Rys. 3. Przykładowe osady na końcówce wielootworowego wtryskiwacza silnika ZI z MPFI

się w otworze wylotowym paliwa, a dla wtryskiwaczy jedno- lub wielootworowych kanału/ów wypływu paliwa i krawędzi otworków wylotowych. W celu uzyskania wymaganej precyzji ilościowego dozowania paliwa oraz jego właściwego rozpylenia, obwodowa szczelina pomiędzy krawędzią otworka dozującego paliwo a poruszającym się w nim czopikiem iglicy wtryskiwacza ma szerokość około 0,05 mm. Zatem jej jakiegokolwiek zanieczyszczenie przez przywierające do niej osady koksowe ma bezpośredni wpływ na wielkość wypływu paliwa. To z kolei może wpływać na niekontrolowane zmiany współczynnika nadmiaru powietrza tworzonej mieszanki palnej oraz związane z tym konsekwencje. Przykładowo, w układach jednopunktowego wtrysku benzyny (SPI) wymagana jest zazwyczaj symetryczna struga paliwa wtryskiwanego do wspólnego dla wszystkich cylindrów silnika odcinka kanału dolotowego. Jeśli w wyniku zanieczyszczenia otworka wylotowego wtryskiwacza nastąpi zniekształcenie i zmiana kierunku rozpylanej strugi paliwa, to powstaną duże różnice w rozkładzie ilości paliwa doprowadzanego do poszczególnych cylindrów silnika. Będzie to prowadziło do zwiększenia emisji szkodliwych składników spalin do atmosfery, trudności w uruchamianiu silnika, nierównej pracy podczas nagrzewania silnika, a nawet wypadania zapłonów. Dla układów wielopunktowego wtrysku paliwa (MPFI), zniekształcone, na skutek powstałych osadów, strugi paliwa poszczególnych wtryskiwaczy będą częściowo trafiały w ścianki kanałów układu dolotowego. Przy równocześnie gorszej jakości rozpylanego paliwa i różnicach w natężeniu dopływu paliwa do poszczególnych cylindrów doprowadzi to do narastających różnic w składzie mieszanki palnej tworzonej w cylindrach silnika i związanych z tym konsekwencji. Jak stwierdzono, praca silnika w warunkach ustalonych, niezależnie czy na biegu jałowym, czy przy wyższych prędkościach obrotowych nie sprzyja powstawaniu osadów na tego typu wtryskiwaczach [5]. Dopiero po wyłączeniu rozgrzanego silnika paliwo pozostałe w kanalikule wylotowym wtryskiwacza i na powierzchni czopika (jeśli jest to wtryskiwacz czopikowy) jest poddawane wygrzewaniu w wysokich temperaturach. Prowadzi to początkowo do odparowania lekkich frakcji paliwa i pozostawienia cienkiego filmu ciężkich frakcji na powierzchniach wtryskiwaczy. Następnie węglowodory te utleniają się i w postaci gum i żywic przylegają do powierzchni wtryskiwaczy – rys. 3.

Osady takie mogą też wiązać cząstki zanieczyszczeń będące produktami spalania, które przedostają się do układu dolotowego przez EGR lub system przewietrzania skrzyni korbowej [5]. Przy tym wymagany jest czas co najmniej kilkudziesięciu minut unieruchomienia silnika, aby prekursorosadów mogły się spolimeryzować i utworzyć osady. Jeśli silnik będzie uruchomiony wcześniej, to prekursorosadów mogą być wymyte z wtryskiwaczy przez przepływające paliwo.

Duże znaczenie dla szybkości i ilości powstawania osadów ma konstrukcja i sposób obróbki wtryskiwacza, a także temperatura, do jakiej nagrzewa się jego końcówka. Zależy to nie tylko od warunków pracy silnika, ale także od sposobu i miejsca zamontowania wtryskiwacza.

ficient of the mixture and its consequences. For example, in single port injection systems (SPI) a symmetrical fuel spray is usually required injected to a common (for all cylinders) intake duct. If the injector hole is contaminated and a distortion and change of the direction of the spray occurs, significant differences in the distribution of fuel to individual cylinders will result. This will lead to increased exhaust emissions, engine start issues, uneven engine operation during warm-up or even misfires. For multiport injection systems (MPFI), fuel sprays of individual injectors distorted by the deposits will partly aim at the walls of the intake duct. A deteriorated quality of the atomized fuel and differences in the flow intensity of fuel to individual cylinders will lead to growing differences in the mixture composition inside the cylinders and its consequences. As has been confirmed, steady state operation, whether idle or under load at higher engine speeds, prevents the formation of deposits in this type of injectors [5]. Only after stopping the engine, the fuel left in the injector hole and on the injector pintle (if pintle type injector is applied) is subject to heating at higher temperatures. This initially leads to evaporation of the light fuel fractions and a deposition of a thin film of fractions on the surface of the injectors. The hydrocarbons are then oxidized and stick to the injector surfaces in the form of rubbers and resins – Fig. 3.

Such deposits may also bond particles that are products of combustion penetrating the intake system through EGR or following crankcase ventilation [5]. For the precursors of deposits to polymerize and form, a time of at least a few dozen minutes of the engine stopped is required. If the engine is started earlier the precursors may be flushed from the injectors by the flowing fuel.

The injector design and method of its machining as well as the temperature of the needle in operation are of great importance for the deposits formation rate and their amount. This depends not only on the engine operating conditions but the location of the injector and its method of fitting.

### 3. Deposits on the injectors of direct injected spark ignition engines

Unlike SPI and MPFI indirect injected engines, the deposits of direct injected (GDI) engines on the injectors are formed under steady state operating conditions. In GDI engines the injectors are located directly in the combustion chamber. Depending on the fitting of the injector, the formation of a stratified charge may be realized through: directing the fuel spray towards the spark plug by injecting it onto the chamber wall (wall-guided), injection of the fuel into a swirl inside the combustion chamber to direct it onto the spark plug (air guided) or directing the fuel spray straight on the spark plug (spray guided). The coke deposits formed on the injection nozzle distort the injection of the fuel spray influencing its shape and penetration. This has an adverse effect on the process of mixture formation and the combustion process inside the combustion chamber. At the same time the average size of the atomized fuel drop increases, which slows down the process of mixture formation. The

### 3. Osady na wtryskiwaczach silników ZI z bezpośrednim wtryskiem paliwa

W przeciwieństwie do silników z wtryskiem pośrednim typu SPI lub MPFI, w silnikach z wtryskiem bezpośrednim (GDI) osady na wtryskiwaczach tworzą się też w warunkach ustalonych parametrów pracy silnika. W silnikach GDI wtryskiwacze umieszczone są bezpośrednio w komorach spalania. W zależności od sposobu zamontowania tam wtryskiwacza, tworzenie uwarstwionego ładunku mieszanki palnej może być realizowane za pomocą: kierowania strumienia rozpylonego paliwa w pobliże świecy zapłonowej przez jego odbicie od odpowiednio ukształtowanego denka tłoka (*wall-guided*), albo wtryskiwania paliwa do odpowiednio ukształtowanego w cylindrze wiru powietrznego przenoszącego strumień paliwa w pobliże świecy zapłonowej (*air guided*), albo bezpośredniego kierowania strumienia paliwa z wtryskiwacza w pobliże świecy zapłonowej (*spray guided*). Utworzone na końcówce wtryskiwacza osady koksowe zniekształcają wtryskiwane strugi paliwa, wpływając zarówno na ich kształt, jak i zasięg. Ma to bardzo niekorzystne oddziaływanie na przebieg tworzenia mieszanki palnej i procesy spalania w komorze spalania silnika. Równocześnie występuje też wzrost średniej wielkości kropli rozpylanego paliwa, co spowalnia proces powstawania mieszanki paliwowo-powietrznej. Z kolei wzrost oporów ruchu iglicy wtryskiwacza zniekształca czasowy i ilościowy przebieg cyklu otwierania i zamykania elektromagnetycznego wtryskiwacza benzyny względem zadanego, elektrycznego impulsu sterującego pracą wtryskiwacza. W rezultacie wszystko to zmniejsza sprawność silnika i jego osiągi, a równocześnie powoduje wzrost emisji szkodliwych składników spalin oraz zużycia paliwa.

Dla silników ZI z bezpośrednim wtryskiem paliwa, podobnie jak w silnikach z wtryskiem pośrednim, zasadniczy wpływ na procesy tworzenia osadów na końcówkach wtryskiwaczy ma wysoka temperatura. Zależy ona nie tylko od warunków pracy silnika (zwłaszcza wielkości obciążenia), ale także od miejsca zamontowania wtryskiwaczy w komorach spalania oraz efektywności odprowadzania od nich ciepła (przebiegu kanałów płynu chłodzącego w głowicy i bloku silnika). Centralne zamontowanie wtryskiwacza paliwa w komorze spalania silnika GDI powoduje jego większe nagrzewanie (do około 180–200 °C), tj. do temperatury około 15–20 °C wyższej aniżeli w sytuacji umieszczenia go z boku komory spalania, z dala od zaworu wylotowego [5]. Umiejscowiony z boku komory wtryskiwacz jest często dodatkowo chłodzony powietrzem doprowadzanym do komory spalania przez zawór(ory) dolotowy(e). Tworzeniu osadów sprzyja też podwyższona zawartość siarki i olefin w paliwie oraz bezpośrednie oddziaływanie na wtryskiwacz gazów spalanej w komorach silnika mieszanki, a także wysokie ciśnienie. Osady zazwyczaj zaczynają powstawać w obszarze wylotu otworków wtryskiwacza paliwa, a następnie przesuwają się w głąb kanałików otworków wtryskiwacza, zwłaszcza na powierzchnie, na których pozostaje zwilżające je paliwo po zakończeniu wtrysku. Osady takie są wynikiem procesów termicznego utleniania paliwa i jego polimeryzacji, osadza-



increase in the injector needle motion resistance changes the temporal and qualitative course of opening/closing of the electromagnetic injector against the set controlling impulse. As a result, all the mentioned phenomena reduce the engine efficiency and its performance at the same time increasing the exhaust emissions and fuel consumption.

For direct injected spark ignition engines, similarly to indirect injected engines, the temperature is of key importance in the formation of deposits on the injection nozzles. The temperature depends not only on the engine operating conditions (load) but the location of the injectors in the combustion chamber and efficiency of the heat transfer from the injectors (location of the cooling ducts inside the cylinder head and cylinder block). A central location of the injector in the combustion chamber of a GDI engine results in its greater heating (up to approx. 180–200 °C), i.e. the temperature is approx. 15–20 °C higher than when it is located on the side of the combustion chamber, far from the exhaust valve [5]. The injector placed on the side is additionally cooled with the air fed to the combustion chamber by the intake valve(s). An increased amount of sulfur and olefins contained in the fuel, direct influence of the combustion gas on the injector and high pressure also facilitate the formation of deposits. The deposits usually begin to form in the area of the fuel injector holes and then progress into the injector interior channels particularly to surfaces where the post-injection fuel remains. Such deposits are a result of processes of thermal fuel oxidation and its polymerization (lacquers and resins). Hence, for the deposits to form, high temperature is necessary (higher than T90 of the fuel). Under such conditions, the fuel left in the injector channels after the injection, evaporates forming the precursors of deposits on the walls. If the fuel does not fully evaporate before the subsequent injection, the said precursors are easily flushed and the deposits will not form. Otherwise, (longer engine off periods) the fuel fully evaporates and the precursors strongly adhere to the surface initiating the formation of deposits. The rate of deposit formation is influenced by: the temperature of the surface of the injector channels, fuel flow rate through the injector holes upon engine start, the temperature of the flowing fuel and the precision of machining of the injector channels [6].

jąc się w postaci laków i żywic. Zatem do ich powstania niezbędna jest wysoka temperatura, wyższa niż T90 paliwa. W takich warunkach pozostałe w kanalikach wtryskiwacza po zakończeniu wtrysku paliwo odparowuje, tworząc na powierzchniach kanalików prekursor osadów. Jeśli paliwo nie odparuje całkowicie do rozpoczęcia kolejnego wtrysku, przedmiotowe prekursor są łatwo wymywane i osady nie powstają. W przeciwnym razie (dłuższy czas wyłączenia silnika) paliwo odparowuje całkowicie, a prekursor silnie przywierają do powierzchni, inicjując powstawanie osadów. Na szybkość przyrostu osadów mają wpływ: temperatura powierzchni kanalików wtryskiwacza, natężenie przepływu paliwa przez otworki po uruchomieniu silnika, temperatura przepływającego paliwa i dokładność obróbki powierzchni kanalików [6].

#### 4. Osady na zaworach dolotowych silników ZI z pośrednim wtryskiem paliwa (SPI i MPFI)

Osady na zaworach dolotowych silników ZI z SPI i MPFI mogą występować w postaci kruchych, smolistych, porowatych, lekkich osadów koksowych, tłustych smołowatych osadów powstałych głównie ze smarowego oleju silnikowego i twardych osadów koksowych. Generalnie ich postać i skład zależą od warunków pracy silnika, wpływających na temperaturę nagrzewania powierzchni grzybków zaworów, udziału w ich tworzeniu paliwa oraz stosowanych do jego uszlachetniania dodatków i smarowego oleju silnikowego – rys. 4.

Gdy średnia temperatura powierzchni zaworów dolotowych spada poniżej 200 °C, następuje znaczne zmniejszenie ilości osadów odkładanych na grzybkach zaworów dolotowych. Wzrost obciążenia silnika i temperatury zaworów dolotowych powyżej 200 °C prowadzi do zwiększenia ilości osadów tworzonych na grzybkach zaworów. Po przekroczeniu temperatury zaworów powyżej około 360 °C osady prawie przestają się tworzyć, a wcześniej osadzone na zaworach podlegają procesom samooczyszczenia [3, 5]. Niska temperatura grzybków zaworów zwilżonych kropelkami osiadającego paliwa powoduje jego powolne odparowanie. W miarę podwyższenia temperatury powierzchni grzybka, czas odparowania paliwa skraca się, a szczególnie krótki jest

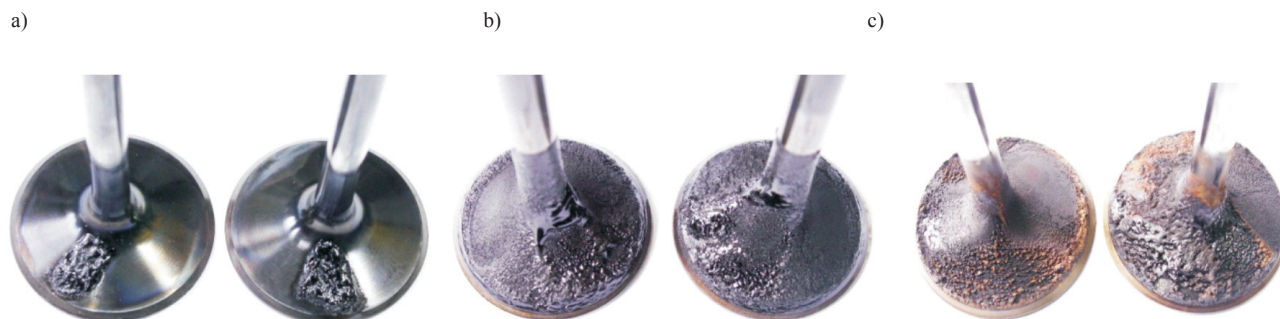


Fig. 4. Various types of organic deposits formed on the intake valves of a Mercedes M102E engine: a) formed because of insufficient use of detergents, b) formed due to low efficiency of the detergents combined with the oil dripping on the valve stems, c) formed due to an overdose of ineffective detergents

Rys. 4. Różne typy osadów organicznych powstałych na zaworach dolotowych silnika Mercedes M102E: a) powstałe na skutek zbyt niskiego poziomu dozowania dodatków detergentowych, b) powstałe na skutek małej skuteczności działania dodatków detergentowych w połączeniu ze ściekaniem oleju smarowego po trzonkach zaworów dolotowych, c) powstałe na skutek przedozowania nieskutecznych dodatków detergentowych

#### 4. Deposits on the intake valves of indirect injected spark ignition engines (SPI and MPFI)

The deposits on the intake valves of spark ignition SPI and MPFI engines may occur in the form of crunchy, tarry, porous and light coke layers, greasy tarry deposits (formed mainly from the engine oil) and hard coke layers. The type and composition of the deposits depends on the engine operating conditions influencing the temperature of the valve heads, the contribution of fuel and applied additives in their formation as well as the type of engine oil – Fig. 4.

When the average temperature of the surface of the intake valves drops below 200 °C the amount of deposits formed on the valve heads is significantly reduced. An increase in the engine load and intake valve temperature above 200 °C generates more deposits on the valve caps. Upon exceeding the temperature of approx. 360 °C the deposits nearly stop forming and the already formed deposits self-clean [3, 5]. Low temperature of the valve heads covered with droplets of fuel results in their evaporation. As the temperature of the valve head grows, the time of fuel evaporation decreases and it is particularly short after the fuel boiling temperature is exceeded. Upon further growth of the valve temperature (above Leidenfrost temperature) the fuel droplets remain boiling and no longer moisturize the surface but vividly move above it blocking the formation of deposits. It is noteworthy that the Leidenfrost phenomenon pertains to delayed evaporation of liquid. In a certain range of temperatures the time needed for the droplet of a certain constant mass and initial temperature to fully evaporate is longer the higher the temperature of the surface. The performed research allowed ascertaining that the critical temperatures for deposits on the intake valves fall in the range between 230 and 350 °C [5]. From the point of view of the influence of fuel on the deposit formation, the amount of aromatic and olefin hydrocarbons, sulfur and fuel additives contained in the fuel of high boiling temperatures and low thermal resistance is of paramount significance. This is impactful on the rate of the processes of thermal degradation and fuel oxidation. The formation of deposits is also influenced by oxygen compounds contained in the fuel (ethanol). High content of metallic elements in the deposits on the intake valves, (Zn and Ca) indicates a high contribution of the engine oil in the formation of the said deposits, though these elements may also come from metallic additives in the fuel. When SPI or MPFI systems are applied, the injector located in the intake manifold directs the fuel onto the intake valve head, which results in flushing of part of the deposits and eventually prevents their excessive adherence to the valve surface.

Deposits on the intake valves distort the process of quantitative mixture formation by uncontrolled changes of the  $\lambda$  excess air coefficient. Large deposits on the valve heads will render the filling of the combustion chamber less efficient by reducing the intake of air and fuel (or the air-fuel mixture already formed in the intake manifold). This results in reduced engine performance and increased fuel consumption and exhaust emissions. Large deposits on the intake valves may also prevent the valves from full closing,

po przekroczeniu temperatury wrzenia paliwa. Dalszy wzrost temperatury zaworu (powyżej temperatury Leidenfrosta) powoduje, że kropelki paliwa, pozostając w stanie wrzenia, nie zwilżają już powierzchni, ale gwałtownie poruszają się ponad powierzchnią, nie powodując tworzenia osadów. Warto przypomnieć, że zjawisko Leidenfrosta dotyczy opóźnionego parowania cieczy. W pewnym zakresie temperatur czas potrzebny do całkowitego odparowania kropli o określonej, stałej masie i temperaturze początkowej jest tym większy, im wyższa jest temperatura gorącego podłoża. Przeprowadzone badania pozwoliły ustalić, że krytyczne temperatury powstawania osadów na zaworach dolotowych zawierają się w granicach od 230 do 350 °C [5]. Z punktu widzenia wpływu paliwa na tendencje do tworzenia osadów największe znaczenie ma ilość zawartych w nim węglodorów aromatycznych i olefinowych, siarki oraz składników stanowiących dodatki uszlachetniające o wysokich temperaturach wrzenia i niskiej odporności termicznej. Ma to wpływ na szybkość procesów termicznej degradacji i utleniania paliwa. Na tworzenie osadów oddziałują także związki tlenowe zawarte w paliwie, w tym etanol. Duża zawartość pierwiastków metalicznych w osadach na zaworach dolotowych, w tym Zn i Ca, wskazuje na duży udział smarowego oleju silnikowego w tworzeniu przedmiotowych osadów, chociaż pierwiastki te mogą też pochodzić z metalicznych dodatków uszlachetniających stosowanych w paliwie. Równocześnie, gdy stosuje się SPI lub MPFI, umieszczony w kolektorze dolotowym wtryskiwacz kieruje wtryskiwane paliwo na powierzchnię grzybka zaworu dolotowego, co powoduje wymywanie części osadów i w rezultacie nie dopuszcza do nadmiernego utrzymywania się ich na powierzchni grzybka zaworu.

Osady na zaworach dolotowych zakłócają proces ilościowego tworzenia mieszanki palnej w komorach spalania silnika przez niekontrolowane zmiany współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$ . Przy dużej ilości osadów wytworzonych na grzybkach zaworów dolotowych powodują one zmniejszenie napełnienia komór spalania silnika, ograniczając do nich dopływ powietrza (lub wstępnie przygotowanej w kolektorze dolotowym mieszanki paliwowo-powietrznej) poprzez kanały dolotowe i paliwa. Powoduje to zmniejszenie osiągnięć silnika oraz zwiększenie zużycia paliwa i emisji szkodliwych składników spalin. Duża ilość osadów powstałych na zaworach dolotowych może też utrudniać lub uniemożliwiać ich całkowite zamknięcie, prowadząc do ich wypalenia wraz z gniazdami zaworowymi. Gdy wytworzą się osady, zwłaszcza o porowatej strukturze, działają one jak gąbka, wchłaniając paliwo do porów osadów, a następnie uwalniając je przez odparowanie i desorpcję. Prowadzi to do zakłóceń ilości doprowadzonego do komór spalania paliwa w określonym przedziale czasowym, zmniejsza szybkość odparowania kropli paliwa, a zatem wpływa na niekorzystne, niekontrolowane zmiany współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda$  mieszanki palnej.

#### 5. Osady na zaworach dolotowych silników ZI z bezpośrednim wtryskiem paliwa (GDI)

W silnikach GDI paliwo jest wtryskiwane wprost do komory spalania silnika. Zatem górna powierzchnia



leading to their burning together with the valve seats. When deposits form, particularly those of a porous structure, they act like a sponge absorbing the fuel inside and then releasing it by evaporation and desorption. This distorts the amount of fuel fed to the combustion chamber in time, reduces the fuel droplet evaporation rate, thus having adverse effect on the excess air coefficient ( $\lambda$ ).

### 5. Deposits on the intake valves of direct injected spark ignition engines (GDI)

In GDI engines the fuel is injected directly into the combustion chamber. The upper surface of the intake valve head is never flushed with fuel and has no contact with it. The fuel additives cannot prevent the deposits from forming on these valves nor can they flush the deposits formed on the upper part of the valve surface, which constitutes a serious problem for the engineers. In the engines fitted with the said fuel injection system, the deposits on the intake valves are attributed to

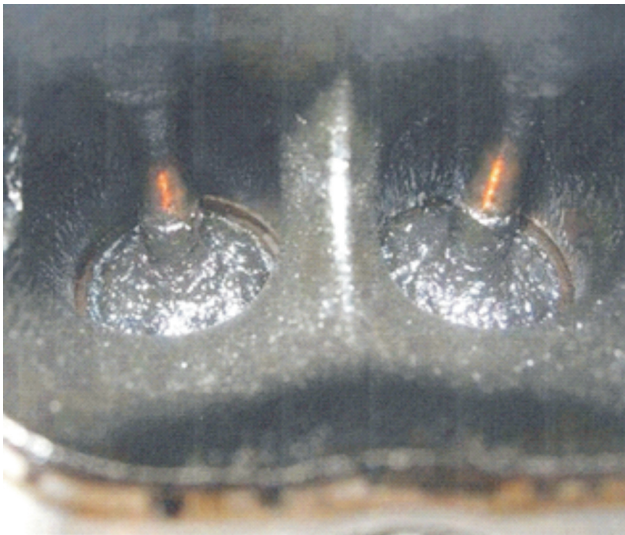


Fig. 5. Deposits in the intake ducts and intake valves of a GDI spark ignition engine [6]

*Rys. 5. Osady w kanałach dolotowych oraz na zaworach dolotowych silnika ZI z GDI [6]*

engine oil flowing down the valve stems and penetrating the seals on their way to the valve heads. On hot surfaces of the valve caps the oil undergoes a process of thermal degradation leading to the formation of coke deposits and resins. They are 80–90% organic (soot) and 10–20% non-organic products with a high content of metallic elements such as: Ca, Mo, Zn, P and S. As the vehicle mileage increases, the play between the valve stem and the valve guide increases and the seals wear out, which leads to increased penetration of oil reaching the intake valve heads and formation of deposits. An additional issue is the growing use of low viscosity oils (0W-30, 5W-30 or even 0W-20) that more easily penetrate the valve seals. Positive crank ventilation systems (PCV) allow fuel and oil vapor to get to the intake system and deposit on the valve heads and the intake ducts, thus intensifying the

grzybka zaworu dolotowego nigdy nie jest omywana i nie ma styczności z paliwem. Dlatego dodatki detergentowe stosowane w paliwie nie mogą przeciwdziałać tworzeniu się osadów, ani zmywać osadów utworzonych na górnej powierzchni grzybka zaworu, co stanowi duży problem dla producentów silników. Przy takim rozwiązaniu wtrysku paliwa za tworzenie osadów na grzybkach zaworów odpowiada smarowy olej silnikowy, spływający po trzonkach zaworów, a następnie przedostający się przez współpracujące z trzonkami uszczelniacze na grzybki zaworowe. Na rozgrzanych powierzchniach grzybków zaworów olej podlega procesom degradacji termicznej, na skutek której powstają osady koksowe i w postaci gum żywicznych. Stanowią one w 80–90-procentach produkty organiczne (sadza), a w 10–20-procentach produkty nieorganiczne z dużą zawartością pierwiastków metalicznych, jak: Ca, Mo, Zn, P i S. W miarę zwiększania przebiegu silnika, wzrastające luzy w złożeniu trzonka zaworu i prowadnicy oraz coraz większe zużycie uszczelniaczy zaworowych prowadzi do rosnącego przedostawania się oleju smarowego na grzybek zaworu dolotowego i wzrost tworzonych osadów. Dodatkowym problemem jest też coraz powszechniejsze stosowanie olejów smarowych o niskiej lepkości (0W-30, 5W-30, a nawet 0W-20), które łatwiej przedostają się na powierzchnie zaworów dolotowych. Ponadto układy przewietrzania skrzyni korbowej (PCV) powodują przedostawanie się do kolektora dolotowego nie w pełni odparowanego paliwa oraz par oleju smarowego, które osiadają na grzybkach zaworów dolotowych i w kanałach dolotowych, intensyfikując procesy powstawania osadów koksowych. Podobnie niekorzystny wpływ na wielkość tworzenia przedmiotowych osadów ma stosownie systemu EGR, który przez doprowadzenie spalin do układu dolotowego silnika intensyfikuje procesy rozwoju osadów w kanałach dolotowych i na zaworach dolotowych silnika – rys. 5 [6].

Osady występujące na zaworach dolotowych silnika GDI mają szczególnie niekorzystny wpływ na sprawność napełniania cylindrów silnika i przebieg procesów spalania oraz wylotu spalin, a to ma bardzo niekorzystny wpływ na poprawne funkcjonowanie silnika wyposażonego w system zmiennych faz rozrządu, a dodatkowo coraz częściej w układ zmieniający wielkość otwarcia zaworów (skok zaworów) w zależności od warunków pracy silnika. Zakłócone w czasie i w zakresie ilości oraz jakości tworzonego ładunku procesy dolotu oraz tworzenia mieszanki, a następnie jej spalania i wylotu spalin znacząco wpływają na osiągi silnika, wielkość emisji składników szkodliwych do atmosfery, a także ilość zużywanego paliwa.

### 6. Osady w komorach spalania silników ZI z pośrednim wtryskiem paliwa (SPI i MPFI)

Osady w komorach spalania silnika powstają na skutek kondensacji częściowo utlenionego w podwyższonej temperaturze paliwa i smarowego oleju silnikowego na powierzchni denka tłoka i części komory spalania umieszczonej w głowicy silnika. W wyniku rozkładu termicznego powstają tam prekursorzy osadów, a następnie paliwo podlega



coke contamination process. EGR has a similar effect that intensifies the processes of deposit formation on the valves and intake ducts by feeding exhaust gas to the intake system of an engine – Fig. 5 [6].

Deposits on the intake valves of a GDI engine are particularly bad for the cylinder filling efficiency, the process of combustion and the exhaust emissions. This, in turn, influences the operation of engines fitted with variable valve timing or the increasingly used variable valve lift. The distorted intake and mixture formation processes in terms of quantity and timing (including the process of combustion and exhaust) significantly influence the engine performance, the exhaust emissions and the consumption of fuel.

## 6. Deposits in the combustion chamber of indirect injected SPI and MPFI spark ignition engines

Deposits in combustion chambers are formed as a result of condensation of fuel and engine oil partly oxidized in elevated temperature on the piston crown and in the cylinder head part of the combustion chamber. Following a thermal decomposition, precursors of deposits are formed there and then the fuel undergoes polymerization [3, 5]. The most fundamental for the formation of deposits (influencing their rate of formation and size) is the condensation of their precursors on the surface of the combustion chamber. As the deposits grow, their insulation properties increase the temperature of the combustion chamber walls. As a consequence, the precursors of deposits (of decreased volatility) will condensate on the combustion chamber walls, thus contributing to further formation of deposits. [3]. Eventually, the temperature of the combustion chamber walls will be too high for any precursors (originating both from fuel and engine oil) to condensate, which will lead to a stabilization of the deposit formation. This boundary temperature depends on the composition of fuel and the engine oil. For

procesom polimeryzacji [3, 5]. Podstawowa dla procesów tworzenia osadów jest kondensacja ich prekursorów na powierzchniach komory spalania oraz temperatura powierzchni komór spalania, mająca zasadniczy wpływ na szybkość i wielkość powstawania osadów. W miarę zwiększania grubości osadów, ich właściwości izolacyjne powodują wzrost temperatury powierzchni komory spalania. W konsekwencji coraz mniej lotne prekursory osadów będą kondensowały na powierzchniach komory, przyczyniając się do dalszego zwiększania grubości osadów [3]. Ostatecznie temperatura powierzchni będzie zbyt wysoka do kondensacji jakichkolwiek prekursorów osadów pochodzących zarówno z paliwa, jak i smarowego oleju silnikowego, co doprowadzi do stabilizacji wzrostu osadów. Ta graniczna temperatura zależy od składu paliwa i oleju silnikowego. Dla benzyny zazwyczaj wynosi około 310 °C, a dla smarowych olejów silnikowych jest wyższa o około 60 °C [5]. Zarówno dla benzyny, jak i oleju smarowego decydują o niej składniki o najwyższej temperaturze wrzenia [3]. Uformowane na powierzchni komór spalania osady podlegają też różnym mechanizmom usuwania. Rozróżnia się tu mechanizmy chemiczne, jak: utlenianie i gazyfikacja, fizyczne, jak: desorpcja i odparowanie składników lotnych i gazowych, a także mechaniczne usuwanie osadów przez ścieranie, łuszczenie spowodowane różnicą rozszerzalności cieplnej osadów i powierzchni, do której przylegają oraz wymywanie [1, 3–5] – rys. 6.

Wiele nowoczesnych pakietów dodatków detergentowych zawiera oleje nośne i różne dodatki składkowe o wyższych temperaturach wrzenia względem składników paliwa bazowego. W rezultacie mogą one przyczyniać się do wzrostu tworzenia osadów w komorach spalania zależnie od ich składu i wielkości dozowania do paliwa.

Osady powstałe w komorach silnika mają istotny wpływ na pogarszanie się osiągnięć silnika. W miarę ich przyrostu zmniejsza się objętość komór spalania silnika, a równocześnie

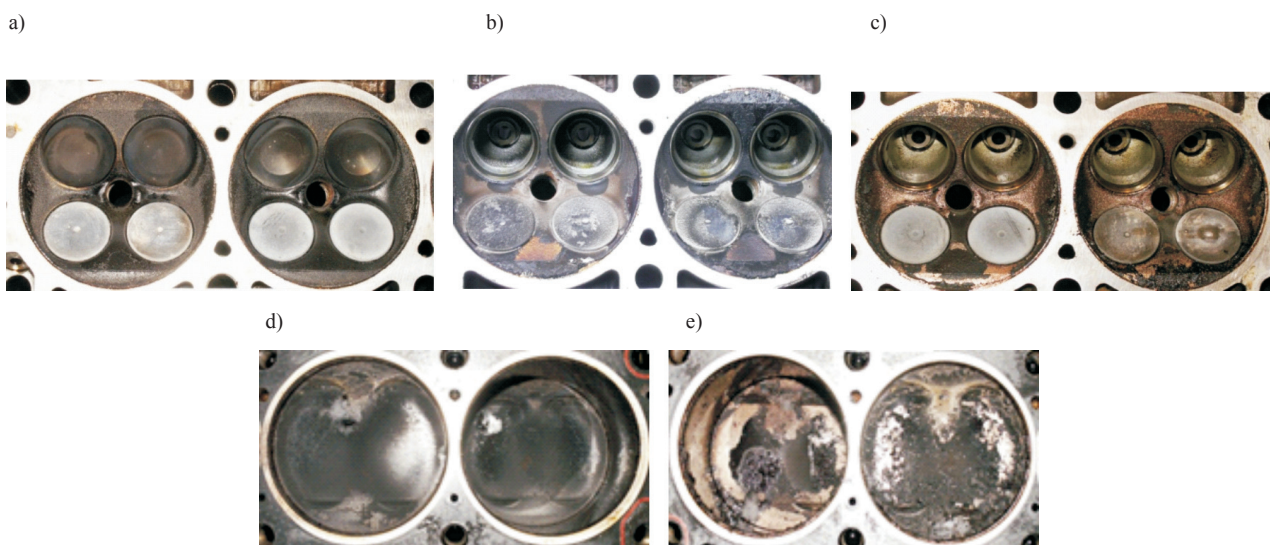


Fig. 6. Deposit formation in the combustion chamber (a) on piston crowns (d) the removal of the same (b, c) on piston crowns (e) in an engine of Mercedes M111

Rys. 6. Procesy tworzenia osadów w komorach spalania (a) i na denkach tłoków (d) oraz usuwania osadów w komorach spalania (b, c) i na denkach tłoków (e) silnika Mercedes M111

gasoline, it is usually approx. 310 °C and for engine oils this temperature is higher by approx. 60 °C [5]. For both gasoline and engine oil, it is the components of the highest boiling temperature that decide about the boundary temperature [3]. Deposits formed on the surface of the combustion chamber walls are subject to a variety of removal mechanisms. We may distinguish chemical mechanisms such as: oxidation, gasification, physical mechanisms such as: desorption and evaporation of the volatile and gaseous components and mechanical removal by abrasion or flaking resulting from thermal expansion of the deposits and the surface to which they adhere [1, 3–5] – Fig. 6.

A multitude of modern additives contain carrier oils and additional components of higher boiling temperatures compared to the base fuel. As a result they may contribute to the growth of the deposit formation in the combustion chamber depending on their composition and dosage.

Deposits inside the combustion chamber significantly influence the engine performance. As they grow the, volume of the combustion chamber decreases and the compression ratio grows, which facilitates the process of knock combustion, hence the need to use fuel of higher octane number. Additionally, the tendency for knock combustion may be increased by increasing of the charge temperature inside the combustion chamber due to the insulating properties of the deposits that reduce the heat transfer from the chamber. Deposits may have a catalytic influence on combustion and result in the formation of hotspots - additional sources initiating uncontrolled mixture ignition. The porous structure of deposits in the combustion chamber allows adsorption of fuel, its unburned components and the products of fuel combustion and then their release in the subsequent combustion processes, which increases the exhaust emissions (HC in particular).

A dangerous phenomenon is the flaking of deposits from the surface of the combustion chambers. They may get between the exhaust valves and the contact surface of the cylinder head preventing (or limiting) the valves from closure. This leads to a reduced compression ratio, difficult engine start, increased HC emissions an even burning of the valves together with their seats.

### 7. Deposits in combustion chambers of direct injected spark ignition engines (GDI)

The formation of deposits inside combustion chambers of direct injected spark ignition engines is similar to those of indirect injected ones. The structure of the deposits is also similar as is their interaction during the charge exchange processes, particularly cylinder filling and combustion (including the tendency to knock combustion) [7, 8]. In direct injected engines the deposits formed inside the combustion chamber have an additional adverse effect on the quality of the stratified mixture, particularly if it is assisted by the wall guided direct injection. The formation of a stratified mixture is realized by ‘surface guiding’ of dispersed fuel spray mixed with air and bounced from the surface of the appropriately shapes piston crown. The deposits formed on

wzrasta stopień sprężania, co prowadzi do występowania tendencji do spalania stukowego, a zatem potrzeby stosowania benzyny o wyższej liczbie oktanowej. Dodatkowo tendencje do spalania stukowego mogą być zwiększane przez podwyższanie temperatury ładunku w komorze spalania na skutek izolacyjnych właściwości osadów, a w wyniku tego – utrudnionego odprowadzenia ciepła z komór spalania. Ponadto osady mogą mieć katalityczny wpływ na reakcje spalania w komorach silnika i powodować powstawanie gorących miejsc w komorach (tzw. hotspots), a zatem dodatkowych ognisk inicjujących proces niekontrolowanego zapłonu mieszanki. Ponadto porowata struktura osadów w komorach spalania umożliwia adsorbowanie paliwa i niespalonych składników paliwa, jak również produktów spalania, a następnie ich uwalnianie w kolejnych procesach spalania, przyczyniając się do zwiększenia emisji, w szczególności HC.

Niebezpiecznym zjawiskiem jest też proces łuszczenia i odrywania się osadów z powierzchni komór spalania. Mogą one przedostać się pomiędzy przylgnie i zawory wylotowe, uniemożliwiając ich zamknięcie lub powodując ich nieszczelne zamykanie. Prowadzi to do zmniejszenia ciśnienia sprężania w cylindrach, utrudnionego rozruchu silnika, zwiększonej emisji HC, a nawet wypalenia zaworów wraz z ich gniazdami.

### 7. Osady w komorach spalania silników ZI z bezpośrednim wtryskiem paliwa (GDI)

Tworzenie osadów w komorach spalania silników ZI z GDI przebiega w sposób podobny do tych w silnikach z wtryskiem pośrednim. Podobna jest też w obydwu przypadkach struktura osadów i ich oddziaływanie na zaburzenia procesów wymiany ładunku, a w szczególności napełniania cylindrów i spalania, a także wzrost tendencji do spalania stukowego [7, 8]. Jednak w odniesieniu do silników GDI wytworzone w komorach spalania osady mają też niekorzystny wpływ na jakość tworzenia uwarstwionej mieszanki palnej, zwłaszcza gdy jest ono wspomagane przez rodzaj wtrysku bezpośredniego zwany „wall guided”, czyli kierowany ścianką. Wtedy tworzenie uwarstwowionego ładunku mieszanki palnej jest realizowane przez powierzchniowe kierowanie rozproszonego strumienia paliwa, zmieszanego z powietrzem odbitego od powierzchni odpowiednio ukształtowanego denka tłoka. Powstałe na powierzchni tłoka osady zaburzają procesy odparowania paliwa oraz jego wymieszania z powietrzem, które mają zasadnicze znaczenie przy tworzeniu ładunku mieszanki uwarstwionej. Przedmiotowe osady powodują też wzrost emisji NO<sub>x</sub>, zwłaszcza przy niższych prędkościach obrotowych pracy silnika, kiedy część rozpylonego paliwa jest adsorbowana przez osady, co wpływa na niekontrolowane podwyższenie współczynnika nadmiaru powietrza tworzonej mieszanki.

### 8. Środki przeciwdziałające powstawaniu osadów

Niekorzystnym skutkiem spowodowanym tworzeniem się przedmiotowych osadów można przeciwdziałać różnymi sposobami, w tym szczególnie przez stosowanie w paliwach substancji aktywnych o działaniu detergentowym. Substancje (dodatki) takie nie oddziałują na procesy chemiczne



the surface of the piston distort the fuel evaporation processes and its mixing with air. These processes are vital for the formation of a stratified mixture. The discussed deposits also lead to increased emission of  $\text{NO}_x$ , particularly at lower engine speeds when part of the atomized fuel is adsorbed by the deposits, which causes uncontrolled increase of the mixture excess air coefficient.

## 8. Deposit countermeasures

The disadvantageous consequence of deposit formation can be counteracted with a variety of ways, including, in particular, the application of active detergents contained in the fuel. The additives do not influence the chemical processes of deposit formation but prevent their adherence on the engine and injection system surfaces (keep clean) and flush the already existing deposits (clean up). The action of the detergents consists in creating of a protection layer on metal surfaces blocking the precursors and then deposits from depositing on the surface [9]. Chemicals and active detergents are organic compounds always containing the atoms of nitrogen. They are heavily polar and this property ensures the ability to clean and adhere to metal surfaces [9]. Detergent additives should allow a maximum dispersion of the fuel droplets in the gaseous phase to ensure complete combustion of its components, should not form solid or polymer products of thermal conversions that may turn into deposits and facilitate dispersion of the already existing deposits formed on the surfaces of intake and injection systems. The efficiency of the detergents depends on the composition and structure of the deposits to be acted upon.

Another, frequently applied method of counteracting deposit formation are modifications to the design or technology of production of engine components (injection systems in particular). The machining of the injector outlet channels and their shape is of particular significance. Deposits formed inside these channels and around the outlet holes may accumulate and absorb fuel, thus contributing to the formation of diffusion flame, which increases the emission of particulate matter. For several years, the outlet injector holes have been made with the electrical discharge machin-

tworzenia samych osadów, ale zapobiegają osadzaniu się ich na powierzchniach wewnętrznych silnika oraz układu wtrysku paliwa (*keep clean*) i usuwają już nagromadzone osady (*clean up*). Działanie substancji stanowiących dodatki detergentowe polega na wytwarzaniu warstwy ochronnej na powierzchniach metalu niedopuszczającej do tworzenia się na niej początkowo prekursorów, a następnie osadów [9]. Związki chemiczne stosowane jako substancje aktywne o działaniu detergentowym to organiczne związki zawierające zawsze atomy azotu. Są one silnie polarne i ta właściwość zapewnia im z jednej strony właściwości detergentowe, a z drugiej umożliwia silne przywieranie do powierzchni metalu [9]. Dodatki detergentowe powinny umożliwiać maksymalne zdyspergowanie cząstek paliwa w fazie gazowej w celu zapewnienia całkowitego spalania jego komponentów, nie tworzyć stałych ani polimerowych produktów przemian termicznych, które mogą być odkładane jako osady, a także ułatwiać dyspergowanie osadów utworzonych na powierzchniach elementów układu dolotowego i wtryskowego silnika. Skuteczność dodatków detergentowych zależy od składu i struktury osadów, na które oddziałują.

Innym często stosowanym sposobem przeciwdziałania powstawaniu osadów są zmiany w budowie lub technologii produkcji podzespołów i elementów silników, a zwłaszcza układów wtrysku paliwa. Duże znaczenie przywiązuje się do kształtu i obróbki kanalików wylotowych paliwa z wtryskiwaczy. Tworzone w przedmiotowych kanalikach i wokół otworków wylotowych osady mogą akumulować i absorbować paliwo oraz przyczyniać się do powstawania płomienia dyfuzyjnego, zwiększając emisję cząstek stałych. Od kilku lat otworki wylotowe paliwa wykonywane są za pomocą obróbki elektroerozyjnej (EDM). Zazwyczaj od strony wpływu paliwa otworki ma czołowe, walcowe pogłębienie, które ma wpływ na zasięg rozpylanej strugi i ogranicza ilość tworzonych osadów wokół otworka – rys. 7a. Jednak biorąc pod uwagę wymagania zmniejszania emisji cząstek stałych (PN/PM) z silników GDI wynikające z przepisów Euro-6c, począwszy od 2012 r. wprowadzono nową technologię wykonywania otworków wtrysku paliwa, stosując obróbkę laserową Femto-Second Laser Drilling

Process [10]. Umożliwia ona precyzyjną obróbkę powierzchni kanalików wylotowych (bez roztopiania materiału i tworzenia zadziórów oraz nierówności), co znacznie ogranicza ilość tworzonych osadów koksowych – rys. 7b i c. Obróbka taka daje też możliwość wykonania otworków o ostrych (niezaokrąglonych) krawędziach wylotu paliwa, co wpływa na poprawę rozpylania paliwa [10].

Już obecnie, a także w przyszłości zapobieganie procesom tworzenia osadów na elementach układów dolotowych silników

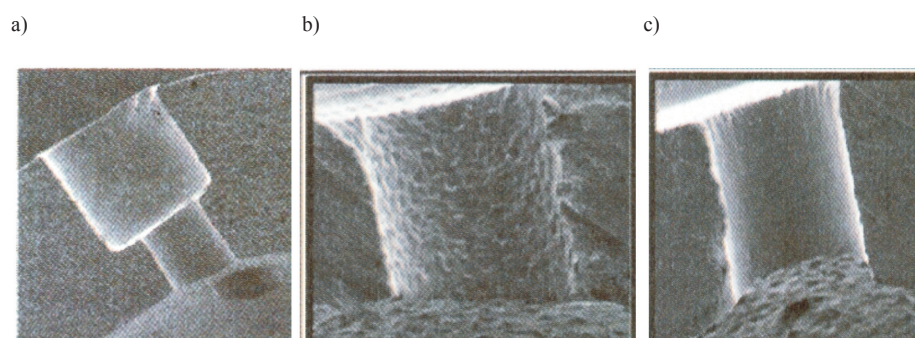


Fig. 7. Cross-sections of the injector fuel outlet channels: a) cross-section of a typical injector outlet channel (GDI), b) channel made with the EDM method, c) channel made with the Femto-Second Laser Drilling Process [10]

Rys. 7. Przekroje kanalików wypływu paliwa z wtryskiwacza: a) przekrój typowego kanalka wtryskiwacza układu GDI, b) kanalik wykonany obróbką EDM, c) kanalik wykonany obróbką Femto-Second Laser Drilling Process [10]

ing technology (EDM). Usually, the outlet hole has a front conical deepening that influences the fuel spray penetration and limits the formation of deposits around the hole – Fig. 7a. However, given the requirements related to the emission of particulate matter (PN/PM) from direct injected GDI engines (Euro-6c) effective since 2012, a new technology of injector outlet hole production was introduced, referred to as the Femto-Second Laser Drilling Process [10]. This method allows precise machining of the surface of the injector outlet channels (without melting the material and producing sharp and uneven surface) only to significantly reduce the amount of coke deposits – Fig. 7b and c. Such a method of machining ensures outlet holes of sharp (unrounded) edges, which improves fuel atomization [10].

Preventing deposits from forming on surfaces of intake and injection systems (injectors in particular) is and, for years to come, will be decisive of the parameters declared by the engine manufacturers, i.e. engine's mechanical and environmental (CO<sub>2</sub>) performance.

## 9. Conclusions

The phenomenon of deposit formation on cylinder inner surfaces of spark ignition and diesel engines has been known for decades and has been frequently discussed in literature. The problem is becoming increasingly important and the number of relevant investigations is gradually growing. It is caused by the threats related to proper engine operation, particularly in terms of the performance declared by the manufacturers. A rapid engine development is constantly forced by the exhaust emissions and fuel consumption requirements. Meeting these requirements forces the application of systems ensuring very accurate, repeatable (usually) multiple injection and implementation of complex strategies of mixture formation and combustion. Additionally, the course and organization of these processes are rigidly optimized to the operating conditions of the engine and aftertreatment systems. One of the important factors that may adversely influence the precision of control of the said processes are deposits formed on the engine components (intake systems, injectors and surfaces inside them). An increasing number of factors contributing to the formation of deposits are gradually discovered along with the mechanisms of their formation, increment and self-cleaning. Recently, consequent research has been conducted on the influence of deposits on the engine operating parameters, particularly on the operation of sophisticated, precisely manufactured and controlled injection systems. As a result, the number of deposits distinguished in terms of their composition and areas of formation is growing. Mutual interactions between the components of fuel, oil, engine elements and the operating conditions make the determination of the mechanism of deposit formation a very difficult problem, which is why forecasting e.g. the fuel stability (particularly fuel containing biocomponents) on the qualitative and quantitative deposit formation still remains a challenge for the research centers.

New technologies and design solutions introduced in the production of combustion engines subject them to an increasing thermal stress, turn them into sophisticated machines

oraz układów wtrysku paliwa (zwłaszcza wtryskiwaczy) będzie decydowało o zachowaniu przez nie parametrów pracy deklarowanych przez producenta, a w wyniku tego osiągnięć silnika i spełniania przepisów w zakresie emisji szkodliwych składników spalin, w tym CO<sub>2</sub>.

## 9. Podsumowanie

Zjawisko powstawania osadów na wewnętrznych powierzchniach tłokowych silników spalinowych zarówno ZI, jak i ZS jest znane od kilkudziesięciu lat i było wielokrotnie opisywane. Jednak w miarę upływu czasu problem przedmiotowych osadów nabiera coraz większego znaczenia i dlatego stopniowo rośnie ilość związanych z nimi badań. Jest to spowodowane narastającymi zagrożeniami, jakie stwarzają one dla poprawnego funkcjonowania silników, a w szczególności zachowania deklarowanych przez ich producentów osiągnięć podczas eksploatacji. Szybko postępujący rozwój silników jest wymuszany nieustannie rosnącymi wymaganiami w zakresie zmniejszania emisji szkodliwych składników spalin oraz zużycia paliwa. Spełnienie tych wymagań wiąże się między innymi z koniecznością stosowania bardzo precyzyjnego, powtarzalnego wtrysku zazwyczaj dzielonych dawek paliwa i złożonych strategii tworzenia i spalania ładunku w komorze spalania silnika. Dodatkowo przebieg i organizacja tych procesów są ściśle optymalizowane do warunków pracy silnika i układu oczyszczania spalin. Jednym z istotnych czynników mogących niekorzystnie wpływać na niezbędną precyzję sterowanie przedmiotowymi procesami są osady tworzone na elementach roboczych silnika, w układach dolotowych, a szczególnie na wtryskiwaczach i we wtryskiwaczach układów wtrysku paliwa. Stopniowo rozpoznawana jest coraz większa ilość czynników mających wpływ na powstawanie osadów oraz mechanizmów ich tworzenia, przyrostu, ale także samooczyszczania. W ostatnich latach konsekwentnie rozszerzane są badania w zakresie wpływu osadów na właściwości użytkowe silników spalinowych, a przede wszystkim na funkcjonowanie coraz bardziej złożonych, precyzyjnie wykonanych i sterowanych układów wtrysku paliwa. W rezultacie sukcesywnie zwiększa się też ilość rozróżnianych typów osadów ze względu na ich skład jak i obszary odkładania się. Wzajemne interakcje występujące pomiędzy składem paliw, olejów smarowych, konstrukcjami silników oraz warunkami ich eksploatacji sprawiają, że określenie mechanizmów tworzenia osadów jest bardzo trudne. Dlatego prognozowanie np. wpływu stabilności paliwa, zwłaszcza zawierającego biokomponenty na jakościowe i ilościowe tworzenie osadów, pozostaje w dalszym ciągu wyzwaniem dla ośrodków badawczych.

Nowe technologie i rozwiązania konstrukcyjne wdrażane w tłokowych silnikach spalinowych sprawiają, że stają się one coraz bardziej termicznie obciążone, skomplikowane, a zarazem podatne na oddziaływanie różnych czynników mogących wpływać na ich pracę. W konsekwencji szkodliwe osady tworzone na skutek procesów chemicznych i termicznych zachodzących podczas pracy silników stanowią coraz większe zagrożenie zarówno dla poprawnego ich funkcjonowania, jak i spełniania przepisów w zakresie



prone to a variety of factors impactful on their operation. Consequently, the harmful deposits formed as a result of chemical and thermal processes taking place during engine operation are becoming a growing threat to proper operation and environmental performance (CO<sub>2</sub>). The simultaneous changes in the technology of fuel production (including the introduction of biocomponents), new engine oil formulas and the popularization of GDI engines, EGR systems and HPCR for diesel engines spawn new mechanisms of deposit formation. It is likely that the importance of future development and introduction of methods to counteract the formation of deposits will grow in the pursuit to meet the ever-growing environmental and operational requirements.

ograniczenia emisji składników szkodliwych, w tym CO<sub>2</sub>. Równoczesne zmiany technologii produkowanych paliw, w tym wprowadzanie do nich biokomponentów, nowe formułacje olejów smarowych oraz rozpowszechnienie silników GDI i systemów EGR, a także HPCR dla silników ZS sprzyjają powstawaniu nowych mechanizmów tworzenia osadów. Wiele wskazuje na to, że w przyszłości opracowanie i wprowadzenie różnych środków przeciwdziałających powstawaniu opisanych osadów będzie nabierało jeszcze większego znaczenia w dążeniu do spełniania przez silniki coraz ostrzejszych wymagań proekologicznych i użytkowo-eksploatacyjnych.

### Abbreviations/Wykaz skrótów

MPI	Multi Port Fuel Injection/ <i>wielopunktowy wtrysk paliwa</i>	SPI	Single Port Injection/ <i>jednopunktowy wtrysk</i>
GDI	Gasoline Direct Injection/ <i>bezpośredni wtrysk benzyny</i>	PCV	Positive Crankcase Ventilation/ <i>przewietrzanie skrzyni korbowej</i>
PAH	Polynuclear Aromatic Hydrocarbons/ <i>wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne</i>	EDM	Electrical Discharge Machining/ <i>obróbka elektroiskrowa</i>
EGR	Exhaust Gas Recirculation/ <i>recyrkulacja spalin</i>	HPCR	High Pressure Common Rail/ <i>wysokociśnieniowy układ wtryskowy common rail</i>

### Bibliography/Literatura

- [1] Orhan A., Semith E. Carbon Deposit Formation From Thermal Stressing of Petroleum Fuels – Prepr. Pap.-Am. Chem. Soc., Div. Fuel Chem. 2004, 49(2), 764.
- [2] Kolobielski M., McCaleb F. Gasoline and Engine Oils: Literature Review, New Laboratory Oxidation Method and Significance of Olefins in Fuel – Report No. 2296, U.S. Army MERD Command, Government Accession No. ADA 086740.
- [3] Stępień Z. Intake valve and combustion chamber deposits formation – the engine and fuel related factors that impacts their growth. Nafta-Gaz, kwiecień 2014, nr 4/2014, s.28-34. Wydawnictwo Instytutu Nafty i Gazu, ISSN 0867-8871.
- [4] Stępień Z. The reasons and adverse effect of internal diesel injector deposits formation – Przyczyny powstawania i szkodliwy wpływ wewnętrznych osadów we wtryskiwaczach silników o zapłonie samoczynnym. Combustion Engines (Silniki Spalinowe), No 1/2014 (156), PL ISSN 0138-0346, s. 20-29.
- [5] Kalghatgi G. Fuel/Engine Interactions. SAE International, ISBN 978-0-7680-6458-2.
- [6] Trinidad O. Gasoline Direct Injection. Southern Illinois University Carbondale. Presentation Spring 3 – 2011.
- [7] Parsinejad F., Biggs W. Direct Injection Spark Ignition Engine Deposit Analysis: Combustion Chamber and Intake Valve Deposits. SAE Paper 2011-01-2110.
- [8] de Goede S., Rabe T., Bekker R., Mtongana S. and Edwards J. Characterisation of Combustion Chamber Deposits Formed in Direct Injection Spark Ignition (DISI) Engines during an On-Road Vehicle Trial. SAE Paper 2010-01-2155.
- [9] Żak G., Ziemiański L., Stępień Z., Wojtasik M. Problemy związane z tworzeniem się osadów na elementach układów wtryskowych nowoczesnych silników Diesla – przyczyny, metody badań, przeciwdziałanie. Nafta-Gaz, wrzesień 2013, nr 9/2013, s.702-708. Wydawnictwo Instytutu Nafty i Gazu ISSN 0867-8871.
- [10] Kazour J., Befrui B., Husted H., Raney M., Varble D. Innovative Sprays and Particulate Reduction with GDI Injectors. SAE Technical Paper 2014-01-1441.
- [11] Stępień Z. Obecne i przyszłe silnikowe metody oceny właściwości detergentowych olejów napędowych. KONMOT 2014.
- [12] Amelin A. Theory of Fog Condensation; 2nd Edition, augmented and revised, edited by Derygagin, B.V., 1967.
- [13] Rosner D., Seshadri K. Experimental and theoretical studies of the laws governing condensate deposition from combustion gases, 18th Symposium on Combustion, Waterloo, Canada 1990.
- [14] Davis J. A New Theory of Aerosol Deposition From Turbulent Fluids; Chemical Engineering Science, Tg. 38 (1), 1983.
- [15] Amelin A. Theory of Fog Condensation; 2nd Edition, augmented and revised, edited by Derygagin, B.V., 1967.

Zbigniew Stępień, DEng. – Assistant Professor, Head of Laboratory of Engine and Tribological Research, Deputy Head of the Chair of Operational Properties Assessment of Oil and Gas Institute at National Research Institute in Krakow.



Dr inż. Zbigniew Stępień – adiunkt, kierownik Laboratorium Badań Silnikowych i Trybologicznych, z-ca kierownika Zakładu Oceny Właściwości Eksploatacyjnych w Instytucie Nafty i Gazu w Państwowym Instytucie Badawczym w Krakowie.

e-mail: [stepien@inig.pl](mailto:stepien@inig.pl)