

# Tłokowe silniki spalinowe zasilane wodorem – wyzwania

## Hydrogen fuelled internal combustion engines – challenges

Zbigniew Stępień, Wiesława Urzędowska

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

**STRESZCZENIE:** W artykule opisano potencjał wodoru jako kluczowego nośnika energii w przyszłości. Wskazano przy tym, że spośród znanych paliw alternatywnych wodór stanowi najlepsze rozwiązanie w zakresie ograniczenia lub nawet całkowitego wyeliminowania niebezpiecznych emisji, w tym GHG z pojazdów. Dlatego wodór jest powszechnie postrzegany jako perspektywiczne, zrównoważone paliwo, i to zarówno do zasilania tłokowych silników spalinowych, jak i ogniw paliwowych. Ze względu na zaawansowany rozwój tłokowych silników spalinowych i ich szeroką dostępność mogą one pełnić rolę technologii pomostowej dla szerokiego rozpowszechnienia wodoru jako paliwa. W konsekwencji tłokowy silnik spalinowy zasilany wodorem może stanowić technologię przejściową wykorzystywaną jako napęd różnego typu pojazdów samochodowych, a w szczególności ciężarowych. W dalszej części artykułu szeroko opisano wyzwania, jakie w dalszym ciągu pozostają do rozwiązania, aby zasilane wodorem silniki spalinowe stały się konkurencyjną alternatywą zarówno dla silników napędzanych paliwami węglowodorowymi, jak i napędów elektrycznych. Wyzwania te podzielono na pięć obszarów. W każdym z nich opisano problemy techniczne, konstrukcyjne i materiałowe wymagające dalszych badań i poszukiwania rozwiązań bądź doskonalenia stosowanych już środków zaradczych. W pierwszym obszarze zwrócono uwagę na szkodliwe oddziaływanie wodoru na metale i ich stopy oraz inne materiały. Dyfuzja cząsteczek wodoru w głąb materiału powoduje zmiany w strukturze, a następnie może prowadzić do tzw. kruchości wodorowej, wynikających stąd mikropęknięć wewnątrz materiałów i tzw. korozji wodorowej. Ponadto bardzo niska smarność wodoru powoduje przedwczesne zużycie elementów współpracujących ze sobą, jak zawory dolotowe i przyłgnie gniazd zaworowych silnika, iglice wtryskiwaczy i ich gniazda. W drugim obszarze opisano potrzebę dalszej optymalizacji procesów zasilania wodorem, jego zapłonu oraz strategii procesu spalania. Wynika to z konieczności przeciwdziałania przedwczesnemu zapłonowi paliwa i zapobiegania procesom nienormalnego spalania. W trzecim obszarze opisano problemy związane z konstrukcyjnym adaptowaniem i optymalizacją głowic cylindrowych. Jest to wymagane dla ich dostosowania do silników zasilanych wodorem. W głowicach tych muszą być umieszczone wtryskiwacze (wtrysk typu DI) o zwiększonej, w porównaniu z konwencjonalnymi silnikami, wydajności i odpowiednio ukształtowane (zoptymalizowane pod kątem większego odprowadzenia ciepła) kanały płynu chłodzącego. Zwrócono też uwagę na inne elementy konstrukcyjne silnika i systemy współdziałające z silnikiem, które muszą być dostosowane w przypadku zasilania wodorem. W czwartym obszarze przedstawiono wyzwania związane z dalszą optymalizacją wielokrotnego, precyzyjnie sterowanego bezpośredniego wtrysku wodoru do silnika. Piąty, ostatni obszar dotyczył układu smarowania silnika i oleju smarowego. Wskazano na odmiennie przebiegający proces stopniowej utraty właściwości smarnych oleju w porównaniu do oleju smarowego eksploatowanego w silnikach spalinowych zasilanych paliwami konwencjonalnymi. W przypadku silników spalinowych zasilanych wodorem olej smarowy jest szybko rozcieńczany dużą ilością wody przedostającą się do niego z procesu spalania wodoru. Ponadto możliwość jego przedostawania się do komór spalania silnika w powiązaniu z tendencją do tworzenia się osadów na powierzchniach komór spalania tworzy zagrożenie powstawania tzw. *hot spots*, a zatem miejsc powodujących inicjowanie nienormalnego procesu spalania.

Słowa kluczowe: tłokowe silniki spalinowe, wodór jako paliwo do silników spalinowych, wyzwania, perspektywy rozwoju.

**ABSTRACT:** The article describes the potential of hydrogen as a key energy carrier of the future. It points out that among the known alternative fuels, hydrogen is the best solution for reducing or even completely eliminating hazardous emissions, including GHG from vehicles. Therefore, hydrogen is widely seen as a promising sustainable fuel, for powering both internal combustion engines and fuel cells. Due to the advanced development of internal combustion engines and their wide availability, they can act as a bridging technology for the widespread adoption of hydrogen as a fuel. Consequently, the hydrogen-fuelled internal combustion engine could be an intermediate technology for use as a propulsion system for various types of motor vehicles, particularly heavy trucks. The remainder of this article broadly describes the challenges that still need to be addressed for hydrogen-powered internal combustion engines to become a competitive alternative to both hydrocarbon-fuelled engines and battery electric vehicles. These challenges are divided into five areas. Each of them describes technical, constructional and material problems that require further research and the search for solutions or improvement of already applied countermeasures. The first area focuses on the harmful effects of hydrogen on metals and their alloys

---

Autor do korespondencji: Z. Stępień, e-mail. [zbigniew.stepien@inig.pl](mailto:zbigniew.stepien@inig.pl)

Artykuł nadesłano do Redakcji: 08.10.2021 r. Zatwierdzono do druku: 03.11.2021 r.

and other materials. The diffusion of hydrogen molecules deep into the material causes changes in the structure and can then lead to so-called hydrogen embrittlement resulting in micro-cracks inside the materials and so-called hydrogen corrosion. In addition, the very low lubricity of hydrogen causes premature wear of mating components such as engine intake valves and valve seats, injector needles and their seats. The second area describes the need for further optimisation of hydrogen supply, ignition and combustion strategies. This is due to the need to prevent premature ignition of fuel and to prevent abnormal combustion processes. The third area describes problems related to the structural adaptation and optimisation of cylinder heads. This is required for their adaptation to hydrogen-fuelled engines. These heads must incorporate injectors (DI injection) with improved performance compared to conventional engines and appropriately shaped (optimised for greater heat dissipation) coolant passages. Attention is also drawn to other engine components and systems that must be adapted for hydrogen operation. The fourth area presented challenges to further optimise multiple, precisely controlled direct hydrogen injection into the engine. The fifth and final area focused on the engine lubrication system and lubricating oil. A different process of gradual loss of lubricating properties of oil was indicated in comparison to lubricating oil used in internal combustion engines fuelled with conventional fuels. In the case of hydrogen-fuelled internal combustion engines, the lubricating oil is quickly diluted by large amounts of water entering it from the hydrogen combustion process. In addition, the possibility of its penetration into the combustion chambers of the engine, combined with the tendency to form deposits on the surfaces of the combustion chambers, creates the risk of the formation of so-called "hot spots", i.e. places causing the initiation of abnormal combustion processes.

Key words: internal combustion engines, hydrogen as a fuel for internal combustion engines, challenges, prospects for development.

## Wstęp

Paliwo alternatywne musi być technicznie możliwe do wytworzenia, ekonomicznie opłacalne, łatwo przekształcać się w inną formę energii podczas spalania, być bezpieczne w użyciu i jak najmniej szkodliwe dla środowiska. Wodór ma potencjał, aby w przyszłości stać się kluczowym nośnikiem energii. Choć wodór nie występuje swobodnie w przyrodzie, może być produkowany z różnych źródeł, takich jak reforming parowy gazu ziemnego, gazyfikacja węgla i elektroliza wody. Jego szerokie wykorzystywanie może zmniejszyć globalną zależność od paliw kopalnych i zmniejszyć pochodzące z pojazdów samochodowych emisje składników regulowanych i gazów cieplarnianych. Spośród innych, znanych paliw alternatywnych wodór stanowi najlepsze rozwiązanie, pozwalające na największe ograniczenie lub całkowite wyeliminowanie niebezpiecznych emisji z pojazdów i ich wpływu na środowisko. Dlatego wodór jest powszechnie postrzegany jako perspektywiczne, zrównoważone paliwo także w transporcie, i to zarówno do zasilania tłokowych silników spalinowych, jak i ogniw paliwowych. Ze względu na zaawansowany rozwój tłokowych silników spalinowych i ich szeroką dostępność mogą one pełnić rolę technologii pomostowej dla szerokiego rozpowszechnienia wodoru jako paliwa. W konsekwencji tłokowy silnik spalinowy zasilany wodorem może stanowić technologię przejściową wykorzystywaną jako napęd różnego typu pojazdów samochodowych, a w szczególności ciężarowych. Takie rozwiązanie wydaje się racjonalne, dopóki ogniwa paliwowe nie staną się wystarczająco niezawodne i w pełni opłacalne w sektorze pojazdów użytkowych zarówno pod względem technologicznym, jak i ekonomicznym. Specyficzne właściwości wodoru, jak duża szybkość spalania i szeroki zakres palności, a zatem możliwość jego spalania w szerokim zakresie różnej proporcji mieszania z powietrzem, sprzyjają uzyskiwaniu

dużej sprawności silnika (Dreisbach et al., 2021). Ponadto szeroki zakres zapłonu i brak związków węgla w przypadku spalania wodoru powodują, że jedynym szkodliwym składnikiem emitowanym przez silniki spalinowe zasilane wodorem są tlenki azotu ( $\text{NO}_x$ ). Jednak przy odpowiednio zaprojektowanej strategii procesu spalania oraz następczej obróbki spalin emisja  $\text{NO}_x$  prawie nie występuje. Podczas spalania wodoru nie ma też emisji  $\text{CO}_2$ . Dlatego spalinowe silniki wodorowe zaliczane są do neutralnych (zeroemisyjnych) pod względem emisji  $\text{CO}_2$  (ZEV- $\text{CO}_2$ ).

Aby silniki spalinowe stały się konkurencyjną alternatywą zarówno dla silników napędzanych paliwami węglowodorowymi, jak i napędów elektrycznych, niezbędne jest sprostanie kilku wyzwaniom stanowiącym obecnie o ich słabościach. Największe z tych wyzwań można podzielić na pięć obszarów. Pierwszy z nich to szkodliwe oddziaływanie wodoru na metale i ich stopy (powstawanie wodorków, kruchość wodorowa, pękanie spowodowane wydzielaniem się wodoru, powstawanie pęcherzy wodorowych). Ponadto bardzo mała smarność wodoru powoduje przedwczesne zużycie elementów współpracujących ze sobą, jak zawory dolotowe i przylgnie gniazd zaworowych silnika, iglice wtryskiwaczy i ich gniazda (utrata szczelności) itp. Drugi obszar to dalsza optymalizacja procesów zasilania wodorem i strategii procesu spalania w celu przeciwdziałania przedwczesnemu zapłonowi paliwa i zapobiegania nienormalnym procesom spalania. Trzeci obszar stanowią trudne rozwiązania konstrukcyjne głowic silników, zwłaszcza z wtryskiem bezpośrednim (ang. *direct injection*, DI). W głowicach tych muszą być umieszczone wtryskiwacze o zwiększonej w porównaniu z konwencjonalnymi silnikami wydajności i odpowiednio ukształtowane (zoptymalizowane pod kątem większego odprowadzenia ciepła) kanały płynu chłodzącego. Czwarty obszar to wielokrotny, precyzyjnie sterowany wtrysk wodoru w przypadku silników DI. Piąty obszar wiąże się

z układem smarowania silnika i samym olejem smarowym, który jest szybko rozcieńczany dużą ilością wody przedostającą się do niego z procesu spalania wodoru.

Motywacją napisania artykułu było wskazanie i opis najważniejszych wyzwań, jakie obecnie ograniczają zastosowanie silników spalinowych zasilanych wodorem.

### Właściwości wodoru

W tabeli 1 porównano właściwości wodoru i innych paliw stosowanych do zasilania tłokowych silników spalinowych (Srinivasan i Subramanian, 2014; Kumar, 2015; Dimitriou i Tsujimura, 2017; Faizal et al., 2019; Al-Baghdadi, 2020). Kolorem czerwonym zaznaczono właściwości mające szczególnie duży wpływ na procesy spalania wodoru w komorze spalania silnika.

Wykorzystanie wodoru jako samodzielnego paliwa lub domieszki do innego paliwa (np. węglowodorowego) do silników spalinowych stwarza możliwość poprawy osiągnięć zarówno w przypadku silników ZI (z zapłonem iskrowym), jak i ZS (z zapłonem samoczynnym). Wodór charakteryzuje się wysoką wydajnością procesu spalania. Wynika to z szerokiej granic palności, dużej szybkości spalania, bardzo małej

energii zapłonu itp. Umożliwia to stabilny przebieg procesu spalania dla mieszanek ubogich i bardzo ubogich, zachęcając do stosowania ich na szeroką skalę jako paliwa do silników spalinowych (Srinivasan i Subramanian, 2014; Kumar, 2015; Dimitriou i Tsujimura, 2017; Faizal et al., 2019; Al-Baghdadi, 2020).

### Bardzo mała gęstość

Bardzo mała gęstość wodoru gazowego stwarza duże problemy związane z przestrzenią magazynową potrzebną do zasilania silnika pojazdu o wymaganym zasięgu. Skutkiem tego jest konieczność sprężania wodoru do wysokiego ciśnienia (najczęściej 350 bar) lub przechowywania go w stanie płynnym (Faizal et al., 2019). Wodór w postaci płynnej wymaga do przechowywania około czterokrotnie większej objętości niż benzyna, a w postaci gazowej – około 19 razy większej objętości (Srinivasan i Subramanian, 2014). Oznacza to, że mieszanka wodorowo-powietrzna ma małą objętościową gęstość energii. Jednakże masowa gęstość energetyczna wodoru jest jedną z największych wśród paliw stosowanych do silników spalinowych.

Dla przykładu, spalanie 1 kg wodoru może dostarczyć prawie trzy razy więcej energii niż olej napędowy lub benzyna (Srinivasan i Subramanian, 2014).

**Tabela 1.** Porównanie właściwości wodoru i innych paliw silnikowych

**Table 1.** Comparison of properties of hydrogen and other motor fuels

| Właściwości   | Wodór                  | Metan                  | Benzyna                        | Olej napędowy                  |
|---|------------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|   | Wzór chemiczny         |                        |                                |                                |
|   | H <sub>2</sub>         | CH <sub>4</sub>        | C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> | C <sub>8</sub> H <sub>20</sub> |
| Zawartość węgla [% mas.]  | 0                      | 75                     | 84                             | 86                             |
| Wartość opałowa [MJ/kg]   | 119,9                  | 45,8                   | 43,9                           | 42,5                           |
| Gęstość (1 bar & 273 K) [kg/m <sup>3</sup> ]  | 0,089                  | 0,72                   | 730–780                        | 830                            |
| Objętościowa zawartość energii (1 bar & 273 K) [MJ/m <sup>3</sup> ]   | 10,7                   | 33,0                   | 33 × 10 <sup>3</sup>           | 35 × 10 <sup>3</sup>           |
| Masa cząsteczkowa [g/mol]   | 2,016                  | 16,043                 | ~110                           | ~170                           |
| Temperatura wrzenia [K]   | 20                     | 111                    | 298–488                        | 453–633                        |
| Temperatura samozapłonu [K]   | 853                    | 813                    | ~623                           | ~523                           |
| Minimalna energia zapłonu w powietrzu (1 bar, mieszanka stechiometryczna) [mJ]                                | 0,02                   | 0,29                   | 0,24                           | 0,24                           |
| Stechiometryczny współczynnik nadmiaru powietrza [mas.]   | 34,4                   | 17,2                   | 14,7                           | 14,5                           |
| Odległość gaszenia płomienia przy ścianie (1 bar & 298 K, mieszanka stechiometryczna) [mm]                    | 0,64                   | 2,1                    | ~2                             | -                              |
| Prędkość rozchodzenia się płomienia laminarnego w powietrzu (1 bar & 298 K, mieszanka stechiometryczna) [m/s] | 1,85                   | 0,38                   | 0,37–0,43                      | 0,37–0,43                      |
| Współczynnik dyfuzji w powietrzu (1 bar & 273 K) [m <sup>2</sup> /s]  | 8,5 × 10 <sup>-6</sup> | 1,9 × 10 <sup>-6</sup> | -                              | -                              |
| Granice palności w powietrzu [vol%]   | 4–76                   | 5,3–15                 | 1–7,6                          | 0,6–5,5                        |
| Adiabatyczna temperatura płomienia (1 bar & 298 K, mieszanka stechiometryczna) [K]                            | 2480                   | 2214                   | 2580                           | ~2300                          |
| Liczba oktanowa (R + M)/2   | 130+                   | 120+                   | 86–94                          | -                              |
| Liczba cetanowa   | -                      | -                      | 13–17                          | 40–55                          |

### **Szeroki zakres palności**

W porównaniu z innymi paliwami wodór charakteryzuje się szerokim zakresem palności, który zawiera się w granicach od 4% do 76% objętościowej zawartości w powietrzu (Srinivasan i Subramanian, 2014; Faizal et al., 2019) – tabela 1. Jest to duża zaleta, ponieważ umożliwia pracę silnika na ubogiej mieszance. To, w połączeniu z całkowitym spalaniem wodoru, pozwala na większą oszczędność paliwa. Ponadto ze względu na niższą temperaturę spalania zmniejsza się emisja tlenków azotu. Mniejsze straty ciepła przez ścianki komory spalania pozwalają uzyskiwać większą sprawność cieplną silnika (Ciniviz i Köse, 2012).

### **Duża szybkość spalania**

Szybkość spalania mieszaniny wodoru z powietrzem jest około siedmiokrotnie większa niż jakichkolwiek paliw węglowodorowych z powietrzem. Wraz ze wzrostem szybkości spalania przebieg rzeczywisty wykresu indykatorowego zbliża się do idealnego, co oznacza osiągnięcie wyższej sprawności termodynamicznej (Al-Baghdadi, 2020). Gdy stosowana jest mieszanka stechiometryczna, silnik wodorowy najbardziej zbliża się do idealnego obiegu termodynamicznego. W tych warunkach prędkość rozchodzenia się płomienia wodoru jest prawie o rząd wielkości większa niż płomienia benzyny (Kumar, 2015). Coraz większe zubożanie spalanej mieszanki prowadzi do zmniejszania prędkości rozchodzenia się płomienia. Niestety zmniejsza się także sprawność ogólna silnika, ze względu na tzw. balast termodynamiczny nadmiaru powietrza. Ponadto mniejsza moc indykowana silnika pracującego na bardzo ubogiej mieszance, w stosunku do mocy niezbędnej do pokonania oporów mechanicznych silnika, także zmniejsza sprawność ogólną. Równocześnie prędkość rozchodzenia się płomienia i jego adiabatyczna temperatura mają duży wpływ na sprawność cieplną silnika, stabilność procesu spalania i wielkość emisji (Srinivasan i Subramanian, 2014; Kumar, 2015; Faizal et al., 2019).

### **Stechiometryczny stosunek powietrza do paliwa**

Stechiometryczny, masowy stosunek powietrza do paliwa (A/F) dla pełnego spalania wodoru w powietrzu wynosi około 34,4 : 1. Jest to znacznie większa wartość niż w przypadku stosunku A/F 14,7 : 1 wymaganego dla benzyny (Srinivasan i Subramanian, 2014; Kumar, 2015; Faizal et al., 2019).

### **Bardzo mała energia zapłonu**

Minimalna energia zapłonu to minimalna ilość energii potrzebna do zapłonu mieszanki paliwowo-powietrznej przy użyciu źródła zapłonu. Mieszanka wodorowo-powietrzna wymaga do zapłonu tylko 0,02 mJ, co w porównaniu do mieszanki benzynowo-powietrznej, która wymaga 0,24 mJ,

jest energią bardzo małą (tab. 1). Tak mała energia zapłonu stwarza zagrożenie powstawania w sposób niekontrolowany przedwczesnych zapłonów i cofania się płomienia do kanału dolotowego silnika. Taki przedwczesny zapłon może być zainicjowany gorącymi gazami spalinowymi, cząstkami niespalonego oleju smarowego w mieszance paliwowo-powietrznej, gorącymi miejscami w komorze spalania (tzw. *hot spots*) – powstającymi np. na skutek tworzenia się osadów, gorącymi elektrodami świecy zapłonowej itp. (Karim, 2002; Srinivasan i Subramanian, 2014).

### **Wysoka temperatura samozapłonu**

Temperatura samozapłonu wodoru jest wysoka w porównaniu z innymi paliwami (tab. 1). Trudno jest zapalić mieszaninę wodoru i powietrza poprzez podwyższenie jego temperatury na skutek sprężania w cylindrze silnika i zazwyczaj wymagane jest do tego zewnętrzne źródło zapłonu. W konsekwencji temperatura samozapłonu jest ważnym czynnikiem przy określaniu stopnia sprężania silnika, ponieważ wzrost temperatury podczas sprężania jest związany ze stopniem sprężania. Wysoka temperatura samozapłonu wodoru umożliwia stosowanie większej wartości stopnia sprężania niż w silniku zasilanym paliwem węglowodorowym, w tym w silniku z zapłonem samoczynnym (ZS). Większy stopień sprężania ma duże znaczenie, ponieważ pozwala na zwiększenie sprawności cieplnej silnika. Z drugiej strony wysoka temperatura samozapłonu wodoru sprawia, że spowodowanie jego samozapłonu w silniku wysokoprężnym jest trudne (Karim, 2002; Srinivasan i Subramanian, 2014; Al-Baghdadi, 2020).

### **Mała odległość gaszenia płomienia przy ściance**

Jest to najmniejsza odległość od wewnętrznej ścianki cylindra, w której następuje zgaszenie płomienia. Wodór ma odległość gaszenia płomienia 0,64 mm, podczas gdy benzyna 2 mm. Generalnie w porównaniu z innymi paliwami trudniej jest zgasić płomień wodoru, który ma przez to tendencję do palenia się w wąskich szczelinach, np. pomiędzy tłokiem i cylindrem, lub cofania się do kanału dolotowego poprzez nie w pełni zamknięty zawór dolotowy (Karim, 2002, Srinivasan i Subramanian, 2014; Al-Baghdadi, 2020).

### **Duża dyfuzyjność**

Wodór wyróżnia bardzo duża dyfuzyjność. Jego zdolność do rozpraszania się w powietrzu jest znacznie większa niż w przypadku benzyny. Jest to korzystne z dwóch powodów. Po pierwsze, z punktu widzenia jakości mieszanki palnej w silniku, ułatwia to tworzenie jednorodnej mieszaniny paliwa i powietrza. Po drugie, z punktu widzenia bezpieczeństwa, w przypadku wycieku wodoru ulega on szybkiemu rozproszeniu. W ten sposób można uniknąć niebezpiecznych warunków użytkowania

wodoru lub je zminimalizować (Srinivasan i Subramanian, 2014; Kumar, 2015, Faizal et al., 2019).

### Wyzwania związane z zasilaniem tłokowych silników spalinowych wodorem

#### Procesy nienormalnego spalania

W silnikach ZI (o zapłonie iskrowym) napędzanych wodorem występowanie nienormalnego spalania wciąż pozostaje jednym z głównych problemów i ograniczeń, stanowiących wyzwanie do rozwiązania. Bardzo mała energia zapłonu, szeroki zakres palności i mała odległość gaszenia płomienia przy ścianie oraz duża prędkość rozchodzenia się płomienia to w przypadku wodoru główne przyczyny występowania nienormalnego spalania. Nienormalne spalanie wiąże się z powstawaniem przedwczesnego zapłonu, zapłonu powierzchniowego i z możliwością cofania się płomienia do układu dolotowego. Przedwczesny zapłon występuje w komorze spalania silnika podczas suwu sprężania, gdy początek spalania następuje przed momentem zapłonu. Zapłon powierzchniowy to rodzaj niekontrolowanego zapłonu inicjowanego przez gorące miejsca w komorze spalania, tzw. *hot spots*. Wskazuje się przy tym na rozgrzane elektrody świecy zapłonowej, zawory wylotowe, rozgrzane kropelki oleju smarowego przedostające się do komory spalania silnika (zjawisko *low speed pre ignition*) oraz osady węglowe uformowane na powierzchniach elementów komory spalania. Cofanie się płomienia odnosi się do zdarzeń, w których mieszanka wodoru i powietrza spala się podczas procesu napełniania cylindra, zwykle w kanale lub kolektorze dolotowym. Występowanie spalania nienormalnego stanowi barierę w zakresie dalszej poprawy sprawności i zwiększenia mocy silników zasilanych wodorem (Al-Baghdadi, 2005, 2020). Ogólnie rzecz biorąc, przedwczesny zapłon może być spowodowany zarówno wysoką temperaturą gazów w komorze spalania, jak i pozostałością niespalonego ładunku z poprzedniego procesu spalania. Prawdopodobieństwo wystąpienia przedwczesnego zapłonu jest większe, gdy mieszaniny wodoru i powietrza zbliżają się do składu stechiometrycznego. Ponadto eksploatacja silnika przy zwiększonej prędkości obrotowej i obciążeniu sprzyja powstawaniu przedwczesnego zapłonu ze względu na wyższe temperatury gazów (Ringler et al., 2004; Verhelst i Wallner, 2009). Przedwczesny zapłon prowadzi do wystąpienia maksymalnego ciśnienia w cylindrze przed górnym martwym położeniem tłoka, niepożądanego nadmiernie szybko przebiegającego procesu spalania mieszanki paliwowo-powietrznej, zwiększonych strat ciepła przez ścianki komory spalania, wysokiego średniego ciśnienia i temperatury spalania oraz zwiększonych emisji. W konsekwencji znacznie ogranicza to osiągi silnika i może doprowadzić do

jego uszkodzeń mechanicznych (Al-Baghdadi, 2009). Do samozapłonu mieszanki paliwowo-powietrznej dochodzi w przypadku nadmiernego zwiększenia temperatury przy równocześnie występującym wysokim ciśnieniu sprężonej mieszanki. Następuje wówczas gwałtowne uwolnienie energii, generujące fale ciśnienia o wysokiej amplitudzie, objawiające się występowaniem stuku. Amplituda fal ciśnienia wywołanych silnym spalaniem stukowym może spowodować uszkodzenie silnika na skutek zwiększonych naprężeń mechanicznych i termicznych. Właściwości mieszanki wodorowo-powietrznej sprzyjają występowaniu spalania stukowego. Główną różnicą pomiędzy cofaniem się płomienia do układu dolotowego a przedwczesnym zapłonem wstępnym jest czas, w którym pojawiają się te anomalie procesu spalania. Przedwczesny zapłon występuje podczas suwu sprężania, gdy zawory dolotowe są już zamknięte, natomiast cofanie się płomienia – przy otwartych zaworach dolotowych. Skutkuje to spalaniem i wzrostem ciśnienia w kolektorze dolotowym, co może spowodować uszkodzenie układu dolotowego silnika (Kirchweger, 2002; Liu et al., 2008; Verhelst i Wallner, 2009). Jak wykazują wyniki dotychczasowych badań, nadmiar powietrza w trybie ubogiego spalania mieszanki działa jak gaz obojętny i stanowi skuteczny sposób obniżenia temperatury spalania, a co za tym idzie – elementów silnika stykających się ze spalonym ładunkiem. Pozwala to na znaczne ograniczenie występowania nienormalnego spalania. Jednak praca w zakresie ubogiej mieszanki ogranicza moc silnika zasilanego wodorem (Eichlseder et al., 2009).

#### Strategie wtrysku i tworzenia mieszanki oraz zapłonu

Wybór i równoczesna optymalizacja strategii wtrysku, tworzenia mieszanki oraz zapłonu stanowi ogromne wyzwanie w przypadku tłokowych silników spalinowych zasilanych wodorem. W dążeniu do zwiększenia sprawności silników, poprawienia ich osiągow, zmniejszenia zużycia paliwa oraz ograniczenia emisji  $\text{NO}_x$  opracowano już i w dużej części zbadano wiele różnych kombinacji strategii wtrysku i tworzenia mieszanki oraz zapłonu (rys. 1).

Początkowo do zasilania silników spalinowych wodorem stosowano systemy gaźnikowe. Wykorzystanie takiego zasilania pozwala na łatwe dostosowanie silnika konwencjonalnego do zasilania wodorem. Jak się jednak okazało, gaźnik nie nadaje się do zasilania silnika wodorem, ponieważ powoduje niekontrolowane spalanie w nieprzewidywalnych momentach cyklu pracy silnika (Al-Baghdadi, 2005, 2020). Duża ilość mieszanki wodorowo-powietrznej w kolektorze dolotowym sprzyja występowaniu przedwczesnego zapłonu, którego skutki opisano wyżej. Obecnie do zasilania silników wodorem stosuje się wyłącznie układy jedno- lub wielopunktowego wtrysku pośredniego (PFI) lub niskociśnieniowego albo wysokociśnieniowego



**Rys. 1.** Różne kombinacje strategii wtrysku i tworzenia mieszanki oraz zapłonu w silnikach spalinowych zasilanych wodorem

**Fig. 1.** Different combinations of injection and mixture formation as well ignition strategies for hydrogen-fuelled internal combustion engines

wtrysku bezpośredniego (rys. 1). W przypadku pośredniego wtrysku paliwa wodór jest wtryskiwany do kolektora dolotowego, po rozpoczęciu procesu napełniania cylindra, za pomocą wtryskiwaczy, dawniej sterowanych mechanicznie, a obecnie – elektronicznie. Sterowanie elektroniczne daje znacznie większe możliwości w zakresie regulowania czasu wtrysku i momentu jego rozpoczęcia. Jednak na skutek bardzo małej energii zapłonu oraz małej odległości gaszenia płomienia przy ścianie powstaje do rozwiązania szereg wyzwań, z których najważniejsze to: przedwczesny zapłon, spalanie stukowe oraz możliwość cofania się płomienia do układu dolotowego. Ponadto wodór wypiera powietrze we wlocie kolektora i dlatego ogranicza wielkość mocy jednostkowej silnika. PFI zwiększa też ilość traconej energii wymaganej do sprężenia mieszanki podczas suwu sprężania w porównaniu z DI i późnym wtryskiem wodoru (Yip et al., 2019). W tym systemie wtrysku samo powietrze jest oddzielnie dostarczane na samym początku suwu ssania w celu rozrzedzenia i ochłodzenia pozostałych z poprzedniego procesu spalania gazów spalinowych i schłodzenia gorących obszarów w komorze spalania. Pozwala to na ograniczenie powstawania przedwczesnego zapłonu i osłabienie jego skutków (Ciniviz i Köse, 2012; Srinivasan i Subramanian, 2014). W przypadku wtrysku bezpośredniego (DI) wodór jest bezpośrednio wtryskiwany do komór spalania silnika, z ciśnieniem wyższym lub znacznie wyższym niż w przypadku wtrysku pośredniego. Wynika to z możliwości stosowania wtryskiwaczy niskociśnieniowych lub wysokociśnieniowych. W przypadku wtryskiwacza niskociśnieniowego paliwo jest wtryskiwane bezpośrednio do komory spalania zaraz po zamknięciu zaworu wlotowego, gdy ciśnienie w cylindrze jest niskie. Niezbędne jest stosowanie specjalnych wtryskiwaczy

(zapewniających wymagane natężenie wpływu wodoru i wykonanych z materiałów odpornych na oddziaływanie wodoru). Jednakże do tej pory wtryskiwacze takie nie zostały jeszcze w pełni dopracowane i wymagają dalszego rozwoju (Dreisbach et al., 2021). Wskazane jest także stosowanie specjalnych głowic cylindrowych, pozwalających zoptymalizować ruch ładunku tworzonej mieszanki, i właściwej zabudowy i ustawienia wtryskiwaczy. W przypadku wtryskiwacza wysokociśnieniowego paliwo jest wtryskiwane bezpośrednio do komory spalania pod koniec suwu sprężania (Gandhi, 2015). Dzięki dużej dyfuzyjności wodoru szybko się on rozprasza i miesza z powietrzem, jednak krótki czas procesu mieszania w przypadku DI nie zapewnia tworzenia mieszanki

w pełni jednorodnej. Stosowanie tego rodzaju wtrysku pozwala na osiągnięcie największej sprawności cieplnej i mocy jednostkowej silnika. Bezpośredni wtrysk paliwa rozwiązuje problem przedwczesnego zapłonu w kolektorze dolotowym, ale stwarza problemy w zakresie kontroli przedwczesnego zapłonu w komorze spalania (Ciniviz i Köse, 2012). Bezpośredni wtrysk wodoru pozwala ograniczyć ryzyko cofania się płomienia. Ponadto większa wartość opałowa mieszanki palnej w komorze spalania w porównaniu z ubogą mieszanką tworzoną przy PFI daje potencjał w zakresie osiągnięcia większej mocy jednostkowej silnika (Dreisbach et al., 2021). W celu uzyskania największej mocy jednostkowej, najmniejszego zużycia paliwa i najlepszych osiągnięć w przejściowych zakresach pracy silnika – niezbędne jest stosowanie DI z wysokociśnieniowymi wtryskiwaczami paliwa, pozwalające na dyfuzyjne tworzenie mieszanki podobne do występującego w silnikach o zapłonie samoczynnym (ZS) (Dreisbach et al., 2021). Przy tym dla stabilnego inicjowania zapłonu wodoru korzystne jest stosowanie pilotażowego wtrysku oleju napędowego (Dreisbach et al., 2021). Generalnie wymagany jest dalszy rozwój różnych strategii wtrysku i chłodzenia tworzonej mieszanki palnej oraz zapłonu, aby ograniczyć emisję NOx i problem powstawania przedwczesnego zapłonu (Dimitriou i Tsujimura, 2017).

### **Problemy z oddziaływaniem wodoru na materiały**

Wszystkie metale mające kontakt z wodorem podlegają procesom degradacji zwanej kruchością wodorową. Zjawisko to zachodzi na skutek dyfundowania atomów wodoru do materiału, co prowadzi do jego kruchości. Na stopień kruchości ma wpływ zarówno ilość zaabsorbowanego wodoru, jak i mikrostruktura materiału. Przy tym ilość zaabsorbowanego wodoru zależy od

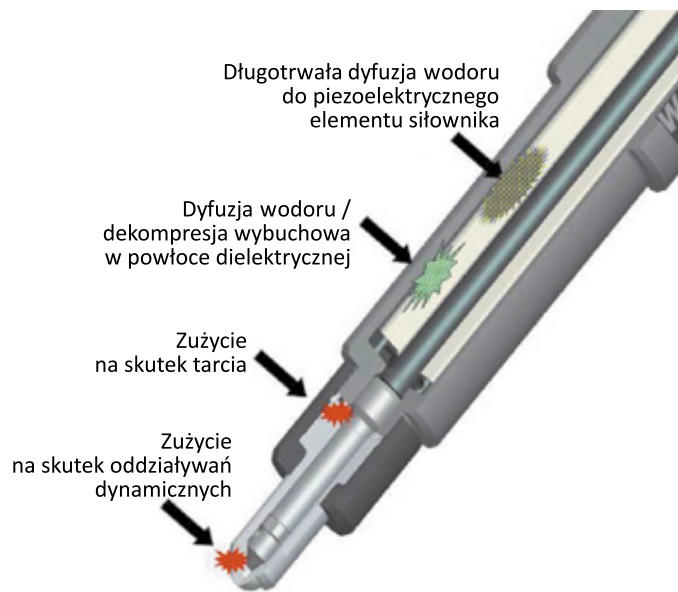
jego ciśnienia, temperatury i czasu. Konsekwencją występowania kruchości jest pęknięcie materiału (Walter et al., 2021). Przeprowadzone badania wykazały, że metalami najbardziej odpornymi na kruchość wodorową są: mosiądz i stopy miedzi, aluminium i stopy aluminium oraz copper berillium (Madina i Azkarate, 2009). Inne zagrożenie powstające na skutek stosowania wodoru jako paliwa wynika z jego „czystego” spalania. Spalanie takie charakteryzuje się brakiem powstawania koksowych osadów jako produktów spalania. To w połączeniu z małą smarnością i lepkością wodoru znacznie przyspiesza cierne zużycie współpracujących ze sobą elementów. Prowadzi to do braku smarowania w miejscach współdziałania elementów roboczych silnika, takich jak zawory i gniazda zaworowe lub elementy układu wtrysku paliwa. Ponadto mała lepkość wodoru powoduje zmniejszenie tłumienia dynamicznych oddziaływań współpracujących elementów. Skutkuje to silniejszymi uderzeniami, gdy ruchome części osiągają swoje skrajne położenia (Welch et al., 2008a; Yip et al., 2019).

Kluczowym wyzwaniem zwłaszcza w przypadku wtryskiwaczy wodoru stosowanych we wtrysku bezpośrednim jest zapewnienie ich niezawodnego działania przez cały okres eksploatacji.

Podstawą konstrukcyjną takich wtryskiwaczy jest zazwyczaj wtryskiwacz stosowany we wtrysku bezpośrednim silnika ZS. Charakteryzuje się on dużą odpornością na zużycie. Jednak interakcje materiałów konstrukcyjnych tego typu wtryskiwaczy z wodorem o specyficznych właściwościach, a przy tym pomijalnie „złych właściwościach” smarnych stawiają wtryskiwaczom wodoru znacznie większe wymagania (Welch et al., 2008b; Yip et al., 2019). W konsekwencji występują duże problemy, z których główne dotyczą (rys. 2):

- przedwczesnego zużycia związanego z dużą częstotliwością i energią uderzeń na styku końcówki iglicy wtryskiwacza z gniazdem;
- nadmiernego zużycia pomiędzy ślizgowo współpracującą częścią prowadzącą iglicy z cylindryczną powierzchnią rozpylacza paliwa;
- dyfuzji wodoru do powłoki dielektrycznej lub siłownika piezoelektrycznego integralności uszczelnienia w kompensatorze hydraulicznym.

Podczas otwierania i zamykania otworków wylotowych paliwa w rozpylaczu wtryskiwacza – poruszająca się z bardzo dużą częstotliwością iglica współpracuje w sposób dynamiczny z gniazdem rozpylacza, uderzając swoją stożkowo zakończoną końcówką w jego przyłgnię. Ta interakcja między iglicą wtryskiwacza a gniazdem jest w rzeczywistości uderzeniem ślizgowym. Przy tym pewna ilość energii kinetycznej jest rozpraszana w punktach styku na skutek sprężystego ściskania i ścinania na powierzchni współpracujących materiałów. Zaobserwowano, że podczas docierania powierzchnia styku



**Rys. 2.** Charakterystyczne uszkodzenia elementów wtryskiwacza związane z oddziaływaniem wodoru (Welch et al., 2008a)

**Fig. 2.** Characteristic hydrogen-related damage to injector components (Welch et al., 2008a)

tych elementów ulega pewnemu odkształceniu plastycznemu do czasu osiągnięcia stanu równowagi. Zazwyczaj powierzchnia styku ma kształt pierścienia o nominalnej szerokości około 250 mikronów (Welch et al., 2008a, 2008b). Śladowe właściwości smarne wodoru oraz możliwe zanieczyszczenia sprawiają, że często obserwuje się nieszczelności spowodowane cząstkami stałymi w strumieniu wodoru i niewielkimi uszkodzeniami mechanicznymi powierzchni po 1 mln do 10 mln cykli (Welch et al., 2008a). Nieszczelności takie powodują niekontrolowane przedostawanie się wodoru do komór spalania i możliwość powstawania nienormalnego procesu spalania (Yamane, 2018). Obecnie zarówno robocza, stożkowa końcówka iglicy, jak i przyłgnię gniazda rozpylacza są wykonywane z hartowanych stali narzędziowych o różnym składzie (Welch et al., 2008a). Ponadto w iglicach stosuje się różne powłoki ochronne o bardzo dużej twardości. Jednak to nie zabezpiecza w wystarczającym stopniu tych elementów wtryskiwaczy przed przedwczesnym zużyciem. W związku z tym prowadzone są badania z różnymi powłokami na powierzchni czołowej stożka iglicy oraz różne rodzaje obróbki cieplno-chemicznej mającej na celu zwiększenie odporności powierzchni dynamicznie współpracujących elementów. Wybrane na iglice materiały poddawane są działaniu wodoru w różnych warunkach w celu lepszego zrozumienia mechanizmów dyfuzji i zjawisk niszczącego oddziaływania wodoru na metale. Celem jest zminimalizowanie zużycia adhezyjnego i zminimalizowanie przecieków pomiędzy stożkiem iglicy a gniazdem rozpylacza (Welch et al., 2008a). Dodatkowo wódór, ze względu na swoją dużą dyfuzyjność, może przenikać przez różne materiały. Może to powodować

pojawienie się pęcherzyków i w konsekwencji rozwarstwienie powłoki epoksydowej stosowanej na stosie piezoelektrycznym wtryskiwaczy paliwa. Po obniżeniu nacisku oddziałującego na stos piezoelektryczny prowadzi to do wewnętrznego zwarcia (Antunes et al., 2009). Przeprowadzone badania wykazały, że przenikanie wodoru do materiału piezoelektrycznego powoduje degradację jego właściwości piezoelektrycznych z powodu zmian wewnętrznych momentów dipolowych w kryształach spowodowanych tworzeniem się wiązań OH- (Welch et al., 2008a).

### Zmiany konstrukcyjno-materiałowe zespołów silnika

Specyficzne właściwości wodoru jako paliwa do zasilania tłokowych silników spalinowych wiążą się z koniecznością wprowadzenia różnych modyfikacji zarówno samego silnika, jak i współpracujących z nim układów i systemów zewnętrznych. Obszary i elementy konstrukcyjne silnika podlegające zmianom przedstawiono na rysunku 3.

### Głowica cylindrów

Bardzo mała energia zapłonu, mała odległość gaszenia płomienia przy ścianie i duża szybkość spalania wywołują zagrożenie związane z procesami nienormalnego spalania. Nieregularnie występujące procesy nienormalnego spalania powodują niekontrolowane skoki temperatury i ciśnienia w krytycznych węzłach roboczych, takich jak zawory lub gniazda zaworów, co może prowadzić do skrócenia okresu trwałości zmęczeniowej i wynikających z tego dużych kosztów wymiany. Prowadzi to też do nieregularnych, dużych obciążeń elementów układu korbowo-tłokowego. Ważne jest zatem szczególnie

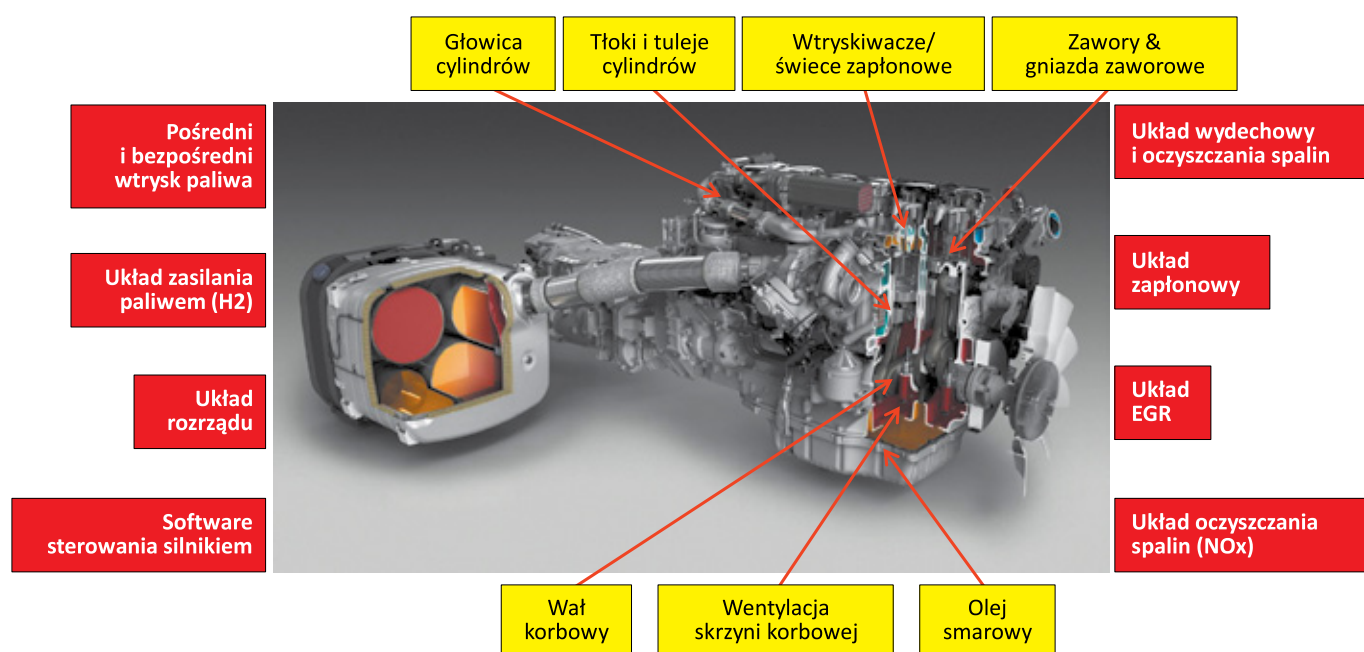
efektywne chłodzenie głowicy cylindrowej, a zwłaszcza komór spalania dla ograniczenia występowania tzw. *hot spots*. W tym celu konieczna jest zazwyczaj modyfikacja kanałów płynu chłodzącego w głowicy, szczególnie w okolicy komór spalania, tak aby zintensyfikować proces chłodzenia komór spalania. Zaleca się stosowanie głowic wielozaworowych z chłodzonymi (np. sodem) zaworami wylotowymi. Modyfikacji podlegają też tłoki w celu zmniejszenia obwodowej szczeliny pomiędzy koroną tłoka i tuleją cylindrową (zmniejszenie prawdopodobieństwa występowania płomienia przyściennego) (Stockhausen et al., 2002; Verhelst i Wallner, 2009). Wymagane jest stosowanie odpowiedniego sterowania fazami rozrządu i późnego wtrysku paliwa (w przypadku DI), aby zapewnić lepsze usunięcie pozostałości gazów spalinowych i chłodzenie komór spalania przepływem powietrza po procesie spalania (Tang et al., 2002; Berckmüller et al., 2003). Konieczna jest też optymalizacja układu smarowania silnikiem i sterowanie natężeniem przepływu oleju zależnym od stopnia obciążenia silnika (Swain et al., 1996).

### Zawory i gniazda zaworowe

Bardzo mała smarność wodoru wymaga stosowania odpowiednich materiałów na zawory i gniazda zaworowe, aby ograniczyć ich szybkie zużycie (Tang et al., 2002; Berckmüller et al., 2003).

### Układ przewietrzania skrzyni korbowej silnika

Przewietrzanie skrzyni korbowej jest w przypadku silników zasilanych wodorem jeszcze ważniejsze niż dla silników zasilanych benzyną. Podobnie bowiem jak w przypadku tych



Rys. 3. Obszary i elementy konstrukcyjne tłokowego silnika spalinowego podlegające zmianom

Fig. 3. Areas and components of the internal combustion engine which must be modified



silników niespalone paliwo może przedostawać się do skrzyni korbowej. Ponieważ jednak wodór ma bardzo małą energię zapłonu (dużo mniejszą niż benzyna), to gdy niespalony dostanie się do skrzyni korbowej, stwarza duże zagrożenie zapłonu. Zapłon wodoru w skrzyni korbowej może doprowadzić do pożaru silnika. Ponadto gdy wodór zapala się w skrzyni korbowej, następuje nagły wzrost ciśnienia. Aby uwolnić to ciśnienie, na pokrywie zaworów należy zamontować zawór nadcisnieniowy (Kumar, 2015). Układ przewietrzania skrzyni korbowej powinien też minimalizować przedostawanie się oleju do komory spalania. Wynika to z tego, że spalane kropelki oleju są potencjalnym źródłem emisji cząstek stałych i powstawania niekontrolowanego, losowo występującego zjawiska przedwczesnego zapłonu. Skuteczne usuwanie wodoru ze skrzyni korbowej wymagane jest też ze względu na wcześniej opisane niszczące działanie wodoru na elementy metalowe (Dreisbach et al., 2021).

### **Smarowy olej silnikowy**

Spaliny silnika zasilanego wodorem zawierają znacznie większą ilość pary wodnej w porównaniu ze spalinami silników zasilanych płynnymi paliwami konwencjonalnymi, a nawet gazem ziemnym. Podwyższona zawartość wody w oleju smarowym prowadzi do przyspieszonej utraty właściwości smarnych, efektów wymywania oraz do zwiększonej korozji elementów wewnętrznych silnika. W związku z wynikami przeprowadzonych badań zaleca się stosowanie oleju o właściwościach deemulgujących i oleju syntetycznego, który tworzy roztwór z wodą. Ponadto powinno się stosować olej bezpopiołowy, aby uniknąć tworzenia się osadów, a w konsekwencji *hot spots* (Kiesgen et al., 2006).

### **System wtrysku paliwa**

Niezbędne jest używanie wtrysku wodoru z odpowiednią regulacją w czasie. Jedną z opcji jest stosowanie wtrysku typu PFI i takie zaprogramowanie czasu wtrysku, aby w początkowej fazie procesu napełniania stworzyć okres chłodzenia powietrza i aby koniec wtrysku następował w fazie końcowej tego procesu. Jednak cały wodór powinien być wprowadzony do komory spalania, nie pozostając w kolektorze, gdy zawór wlotowy się zamyka. Z niektórych badań wynika natomiast, że w tym przypadku konieczne są dalsze prace optymalizacyjne. W przypadku wtrysku typu PFI konieczność zapewnienia dużego natężenia wtrysku wodoru można rozwiązać poprzez zastosowanie wielu wtryskiwaczy. Inną opcją jest wykorzystanie wtrysku typu DI i wtryskiwanie całej ilości wodoru do komory spalania podczas suwu sprężania. Jednak w tym przypadku konieczne są wtryskiwacze o dużym natężeniu przepływu z przepływami chwilowymi około 4–6 g/sek. przy ciśnieniu zasilania 100 barów (Welch et al., 2008b; Verhelst i Wallner, 2009).

### **Układ zapłonowy**

Aby uniknąć niekontrolowanego zapłonu spowodowanego resztkową energią zapłonu, układ zapłonowy należy prawidłowo uziemić lub zmienić oporność elektryczną przewodu zapłonowego (Kondo et al., 1997; Verhelst i Sierens, 2001). Należy przewidzieć układ zapłonowy o wysokim napięciu wyjściowym, ponieważ zapłon mieszanin wodorowych wymaga zwiększonego napięcia zapłonu wtórnego (prawdopodobnie z powodu mniejszej koncentracji jonów w płomieniu wodorowym w porównaniu z płomieniem węglowodorowym) (Kondo et al., 1997; Verhelst i Sierens, 2001). Należy unikać świec zapłonowych z elektrodami platynowymi, ponieważ mogą one być katalizatorem utleniania wodoru. Zaleca się stosowanie świec zapłonowych o dużej wartości cieplnej, aby temperatura elektrody świecy zapłonowej nie przekroczyła granicy samozapłonu, co stworzyłoby zagrożenie w postaci powstania zapłonu wstecznego (Das, 2002).

### **Podsumowanie**

Już obecne, a w szczególności przyszłe cele dotyczące drastycznego ograniczenia emisji CO<sub>2</sub>, i to w krótkim czasie (w UE pakiet „Fit for 55”), stanowią duże wyzwanie dla przemysłu motoryzacyjnego. Należy jednak pamiętać, że oprócz coraz bardziej rozpowszechnionych zespołów napędowych akumulatorowo-elektrycznych i ogniw paliwowych także paliwa bezemisyjne dają możliwość znacznego obniżenia emisji CO<sub>2</sub> przez konwencjonalne, tłokowe silniki spalinowe. Wśród nich wodór zasługuje na szczególną uwagę jako nośnik energii. Jego wykorzystanie do zasilania tłokowych silników spalinowych budzi coraz większe zainteresowanie, ponieważ nie zawiera on żadnych związków węgla i podczas spalania nie powoduje emisji CO<sub>2</sub>. Tłokowe silniki spalinowe mogą znaleźć zastosowanie zarówno w sporcie samochodowym i samochodach osobowych (Toyota), jak i w samochodach ciężarowych (MAN, Deutz, Cummins) oraz maszynach pozadrogowych (JCB). Obecne prace badawcze nad zaawansowanymi silnikami spalinowymi zasilanymi wodorem koncentrują się na osiągnięciu sprawności cieplnej wyższej niż 45% przy jednoczesnym utrzymaniu niskiego poziomu emisji NO<sub>x</sub>. Aby osiągnąć te cele, nowoczesne silniki spalinowe zasilane wodorem wykorzystują strategię bezpośredniego wtrysku paliwa (DI). Pozwala to zwiększyć sprawność objętościową i złagodzić problemy związane z nienormalnym spalaniem. Jednakże rozpowszechnienie silników spalinowych zasilanych paliwem wodorowym wiąże się z kilkoma wyzwaniami, z których najważniejsze to:

- dalszy rozwój strategii wtrysku i tworzenia mieszanki oraz zapłonu;

- równoczesna optymalizacja procesów zasilania, zapłonu i strategii procesów spalania w celu uniknięcia procesów nienormalnego spalania;
- rozwiązanie problemów materiałowych związanych ze szkodliwym oddziaływaniem wodoru na materiały;
- rozwiązanie problemów dotyczących smarowania – odpowiedni olej smarowy;
- dostosowanie konstrukcji silników i współpracujących z nimi systemów do eksploatacji na paliwie wodorowym. Ponadto tłokowe silniki spalinowe napędzane wodorem mogą być zintegrowane z silnikami elektrycznymi w hybrydowych układach napędowych (Walter et al., 2021). Oprócz korzyści w zakresie sprawności i zasięgu poruszania się prowadzi to do atrakcyjnych synergii funkcjonalnych i dodatkowych stopni swobody w zakresie strategii projektowania i eksploatacji, które należy wziąć pod uwagę.

## Literatura

- Al-Baghdadi M.A.R.S., 2005. Development of a pre-ignition submodel for hydrogen engines. Proc. IMechE: *Journal of Automobile Engineering*, 219(10): 1203–1212. DOI: 10.1243/095440705X34883.
- Al-Baghdadi M.A.R.S., 2009. Measurements and predictions of pre-ignition limited operating conditions of a four stroke spark ignition engine fueled with hydrogen. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 2: 269–277.
- Al-Baghdadi M.A.R.S., 2020. An overview of hydrogen as an alternative fuel. *Encyclopedia*: 1–22. DOI: 10.32545/encyclopedia202006.0003.v1 (dostęp: 24.08.2021).
- Antunes J.M.G., Mikalsen R., Roskilly A.P., 2009. An experimental study of a direct injection compression ignition hydrogen engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(15): 6516–6522. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.05.142.
- Berckmüller M., Rottengruber H., Eder A., Brehm N., Elsässer G., Müller-Alander G., Schwarz G., 2003. Potentials of a charged SI-hydrogen engine. *SAE Technical Paper*, No. 2003-01-3210. DOI: 10.4271/2003-01-3210.
- Ciniviz M., Köse H., 2012. Hydrogen use in internal combustion engine. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 1(1): 1–15.
- Das L.M., 2002. Near-term introduction of hydrogen engines for automotive and agricultural application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27(5): 479–487. DOI: 10.1016/S0360-3199(01)00163-X.
- Dimitriou P., Tsujimura T., 2017. A review of hydrogen as a compression ignition engine fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(38): 24470–24486.
- Dreisbach R., Arnberger A., Zukancic A., Wieser M., Kunder N., Plettenberg M., Raser B., Eichlseder H., 2021. The heavy-duty hydrogen engine and its realization until 2025. *42<sup>nd</sup> International Vienna Motor Symposium*, 29–30 April 2021.
- Eichlseder H., Klell M., Sartory M., Schaffer K., Leitner D., 2009. Potential of synergies in a vehicle for variable mixtures of CNG and hydrogen. *SAE Technical Paper* No. 2009-01-1420. DOI: 10.4271/2009-01-1420.
- Faizal M., Chuah L.S., Lee C., Hameed A., Lee J., Shankar M., 2019. Review of hydrogen fuel for internal combustion engines. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 42(3): 35–46. DOI: 10.26480/jmerd.03.2019.35.46.
- Gandhi R.D., 2015. Use of hydrogen in internal combustion engine. *International Journal of Engineering, Management & Sciences*, 2(4): 1–9. ISSN-2348-3733.
- Karim G.A., 2002. Hydrogen as a spark ignition engine fuel. *Chemical Industry*, 56(6): 256–263.
- Kiesgen G., Kluting M., Bock C., Fischer H., 2006. The new 12-cylinder hydrogen engine in the 7 series the H<sub>2</sub> ICE age has begun. *SAE Technical Paper* No. 2006-01-0431. DOI: 10.4271/2006-01-0431.
- Kirchweger W., 2002. Investigations on the use of an alternative fuel in an internal combustion engine. *Graz University of Technology*. Master's thesis.
- Kondo T., Lio S., Hiruma M., 1997. A study on the mechanism of backfire in external mixture formation hydrogen engines – about backfire occurred by the cause of the spark plug. *SAE Technical Paper*, No. 971704. DOI: 10.4271/971704.
- Kumar N., 2015. Hydrogen use in internal combustion engine. *The International Journal of Advanced Culture Technology*, 3(2): 87–99. DOI: 10.17703/IJACT.2015.3.2.87.
- Liu X.-H., Liu F.-S., Zhou L., Sun B.-G., Schock H.J., 2008. Backfire prediction in a manifold injection hydrogen internal combustion engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33: 3847–3855.
- Madina V., Azkarate I., 2009. Compatibility of materials with hydrogen. Particular case: Hydrogen embrittlement of titanium alloys. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(14): 5976–5980. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.01.058.
- Ringler J., Gerbig F., Eichlseder H., Wallner T., 2004. Insights into the development of a hydrogen combustion process with internal mixture formation. *Proceedings 6<sup>th</sup> International Symposium on Internal Combustion Diagnostics, Baden Baden, Germany*.
- Srinivasan C.B., Subramanian R., 2014. Hydrogen as a spark ignition engine fuel technical review. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, 14(5): 111–117.
- Stockhausen W.F., Natkin R.J., Kabat D.M., Reams L., Tang X., Hashemi S., Szwabowski S.J., Zanardelli V.P., 2002. Ford P2000 hydrogen engine design and vehicle development program. *SAE Technical Paper*, No. 2002-01-0240. DOI: 10.4271/2002-01-0240.
- Swain M.R., Schade G.J., Swain M.N., 1996. Design and testing of a dedicated hydrogen-fueled engine. *SAE Technical Paper*, No. 961077. DOI: 10.4271/961077.
- Tang X., Stockhausen W.F., Kabat D.M., Natkin R.J., Heffel J.W., 2002. Ford P2000 hydrogen engine dynamometer development. *SAE Paper*, No. 2002-01-0242.
- Verhelst S., Sierens R., 2001. Hydrogen engine – specific properties. *Int. J. Hydrogen Energy*, 26(9): 987–990. DOI: 10.1016/S0360-3199(01)00026-X.
- Verhelst S., Wallner T., 2009. Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 35(6): 490–527. DOI: 10.1016/j.pecs.2009.08.001.
- Walter L., Sommermann A., Hyna D., Malischewski T., Leistner M., Hinrichsen F., Wöhner P., Schmitt J., McMackin M., 2021. The H<sub>2</sub> combustion engine – the forerunner of a zero emissions future. *42<sup>nd</sup> International Vienna Motor Symposium*, 29–30 April 2021.
- Welch A., Mumford D., Munshi S., Holbery J., Boyer B., 2008a. Hydrogen direct injection technology – challenges and opportunities. *NHA Annual Hydrogen Conference*. <https://nha.confex.com/nha/2008/techprogram/P4181.HTM> (dostęp: 30.08.2021).
- Welch A., Mumford D., Munshi S., Holbery J., Boyer B., Younkins M., 2008b. Challenges in developing hydrogen direct injection technology for internal combustion engines. *SAE Technical Paper*, No. 2008-01-2379. DOI: 10.4271/2008-01-2379.

Yamane K., 2018. Hydrogen-fueled ICE, successfully overcoming challenges through high-pressure direct injection technologies: 40 years of Japanese hydrogen ICE research and development. *SAE Technical Paper*, No. 2018-01-1145. DOI: 10.4271/2018-01-1145.

Yip H.L., Srna A., Yuen A.C.Y., Kook S., Taylor R.A., Yeoh G.H., Medwell P.R., Chan Q.N., 2019. A review of hydrogen direct injection for internal combustion engines: towards carbon-free combustion. *Applied Sciences*, 9(22): 4842. DOI: 10.3390/app9224842.



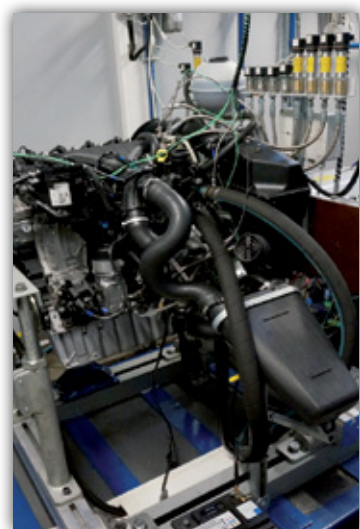
Dr hab. inż. Zbigniew STĘPIEŃ, prof. INIG – PIB  
Kierownik Zakładu Oceny Właściwości  
Eksploatacyjnych  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A  
31-503 Kraków  
E-mail: [zbigniew.stepien@inig.pl](mailto:zbigniew.stepien@inig.pl)



Mgr inż. Wiesława URZĘDOWSKA  
Zastępca Dyrektora ds. Technologii Nafty  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A  
31-503 Kraków  
E-mail: [wieslawa.urzedowska@inig.pl](mailto:wieslawa.urzedowska@inig.pl)

## OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU OCENY WŁAŚCIWOŚCI EKSPLOATACYJNYCH

- ocena w testach laboratoryjnych właściwości fizykochemicznych oraz użytkowo eksploatacyjnych wg najnowszych procedur badawczych zarówno europejskich jak i amerykańskich:
  - » paliw ciekłych, biopaliw i biokomponentów,
  - » materiałów smarowych w tym: olejów silnikowych, przekładniowych i przemysłowych zarówno świeżych, jak i przepracowanych;
- pełny zakres usług w zakresie nowoczesnego planowania, monitorowania i oceny zmian właściwości olejów smarowych w eksploatacji, doradztwo i ekspertyzy w zakresie problemów powstających na skutek użytkowania olejów niewłaściwej jakości lub ich niewłaściwej eksploatacji;
- szeroki zakres ocen stanowiskowych właściwości trybologicznych paliw, środków smarowych oraz cieczy hydraulicznych;
- oceny liczb oktanowych i cetanowych w testach silnikowych wg procedur europejskich i amerykańskich;
- jedyne w kraju oceny właściwości użytkowo-eksploatacyjnych paliw silnikowych prowadzone na silnikowych stanowiskach badawczych wg ogólnoeuropejskich procedur opracowanych przez CEC i wymaganych między innymi przez Światową Kartę Paliw;
- oceny kompatybilności dodatków do paliw i olejów smarowych, usługi eksperckie w zakresie problemów związanych z niekompatybilnością wymienionych produktów w eksploatacji;
- usługi eksperckie w zakresie wpływu jakości paliw na możliwości powstania dysfunkcji i uszkodzeń silnikowych układów wtrysku paliwa;
- doradztwo w zakresie eksploatacji silnikowych układów oczyszczania spalin wyposażonych w filtry cząstek stałych.



Kierownik: dr inż. hab. Zbigniew Stępień, prof. INiG – PIB Adres: ul. Łukasiewicza 1, 31-429 Kraków  
Telefon: 12 617 75 78 Faks: 12 617 75 22 E-mail: [zbigniew.stepien@inig.pl](mailto:zbigniew.stepien@inig.pl)



INSTYTUT NAFTY I GAZU  
– Państwowy Instytut Badawczy