

# Wyznaczanie rozkładów temperatury, gradientów temperatury oraz naprężeń termicznych w zaworze wylotowym pokrytym warstwą nagaru

Aleksander Hornik

## 1. Wstęp

Intensywny rozwój współczesnych napędów pojazdów samochodowych odbywa się głównie w dwóch kierunkach. Pierwszym z nich są pojazdy napędzane silnikami wyłącznie elektrycznymi, gdzie energię niezbędną do napędu pojazdu czerpie się z baterii akumulatorów. Wadą tego typu napędu są nadal:

- ograniczony zasięg;
- niedostateczna liczba punktów ładowania;
- ciężar samych akumulatorów w stosunku do ich pojemności elektrycznej;
- wysoka cena zakupu pojazdu (duży koszt wyprodukowania akumulatora).

Drugim kierunkiem, nie mniej obiecującym w rozwoju pojazdów, stały się samochody z napędem hybrydowym spalinowo-elektrycznym. Dzięki ulepszaniu zarówno elementów układu napędowego, jak i silników czy układów sterowania ich pracą producenci uzyskali zadowalające parametry trakcyjne, tj. wysoką dynamikę, obniżenie zużycia paliwa czy duży zasięg pojazdu.

Udoskonalenie napędu hybrydowego wymaga przede wszystkim udoskonalania jego części spalinowej, gdyż to silnik spalinowy odpowiada za generowanie zasadniczej części energii służącej do napędu pojazdu. Ponadto do wymienionych wymagań parametrów techniczno-eksploatacyjnych, opłacalności produkcji, ekonomii użytkowania należy dołożyć restrykcje wynikające z coraz ostrzejszych norm ochrony środowiska naturalnego. Możliwość spełnienia wymienionych kryteriów, przy zachowaniu poprawnej pod względem technicznym pracy silnika, ograniczone są przez odporność poszczególnych jego elementów na zmienne obciążenia cieplne i przekroczenia wartości, które pogarszają warunki pracy silnika, zmniejszają jego żywotność, a w skrajnym przypadku mogą doprowadzić do jego unieruchomienia. Jednym z najbardziej obciążonych cieplnie elementów komory spalania silnika spalinowego są zawory wylotowe, gdyż podczas suwu pracy silnika mają kontakt z gorącym czynnikiem od strony komory spalania, a w czasie suwu wydechu gorące spaliny omywają powierzchnie przyłgni, jak i trzonka zaworu w kanale wydechowym. Z tych względów panuje tendencja do zwiększenia trwałości zaworów wylotowych do uzasadnionego maksimum, ponieważ ich

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono modelowanie obciążeń cieplnych w zaworze wylotowym pokrytym warstwą nagaru w początkowej fazie pracy doładowanego silnika z zapłonem samoczynnym. W obliczeniach wykorzystano dwustrefowy model procesu spalania [1], metodę elementów skończonych (MES). Modelowanie przeprowadzono przy użyciu warunków brzegowych III rodzaju. W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano rozkłady temperatury, gradientów temperatury oraz naprężeń termicznych. Naprężenia te powodują wzrost mikro-pęknięć na powierzchni zaworu, które ostatecznie prowadzą do defektów materiału, uszkodzeń zaworu, a w konsekwencji nawet silnika.

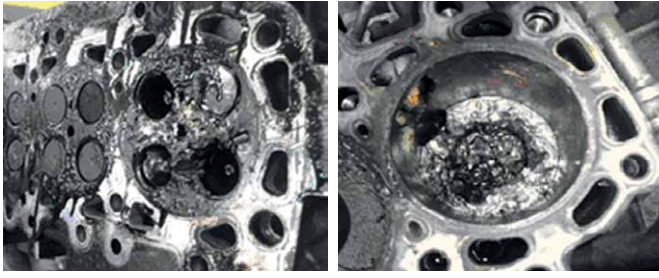
Słowa kluczowe: analiza i modelowanie, obliczenia numeryczne, zawór wylotowy, MES

**Abstract:** This paper presents the modelling of the heat loads in the exhaust valve with using the layer of carbon deposit in initial phase of work of the turbocharged Diesel engine. In calculations used the two-zone combustion model [1], finite elements method (FEM). Modelling was conducted by use of III kind of the boundary conditions. As a result of the calculations were obtained distributions of temperature, thermal gradients and thermal stresses. These stresses cause the growth of micro cracks in the area of the valve, which finally give occasion to the defect of material, the damage of the valve and engine failure.

Key words: analysis and modelling, numerical techniques, exhaust valve, FEM

defekty nie tylko mogą spowodować konieczność naprawy elementów układu zaworowego, lecz mogą nawet doprowadzić do poważnych awarii silnika. Często w takim przypadku naprawa może być ekonomicznie nieopłacalna. Przykład uszkodzenia silnika na skutek odkształceń cieplnych zaworu pokazano na rys. 1.

Podczas długotrwałego użytkowania silnika jednym z podstawowych czynników eksploatacyjnych negatywnie



Rys. 1. Przykładowe uszkodzenie silnika

oddziałujących na jego pracę przez zmianę warunków wymiany ciepła w elementach otaczających komorę spalania jest nagar. Na proces tworzenia nagaru ma wpływ wiele czynników, do których można zaliczyć m.in. [2]:

- niecałkowite spalanie zbyt ciężkiego paliwa;
- obecność w paliwie substancji asfaltowo-żywiczywnych;
- obecność węglowodorów nienasyconych oraz związków siarki;
- zawartość zanieczyszczeń mineralnych, tworzących popiół w procesie spalania;
- spalanie oleju silnikowego na skutek nieszczelności przesterzenia cylindra.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych rozkładów temperatury, gradientów temperatury oraz naprężeń w zaworze wylotowym wysokoobrotowego, doładowanego silnika wysokoprężnego pokrytego warstwą nagaru. Obliczenia te stanowią kontynuację dotychczas prowadzonych prac badawczych na Wydziale Transportu Politechniki Śląskiej [3, 4, 5] i mają na celu wyjaśnienie, w jakim stopniu nagar wpływa na możliwość powstawania uszkodzeń zaworów wylotowych, zwłaszcza w fazach pracy silnika, gdzie występuje niestabilny stan przepływu ciepła (rozruch zimnego silnika).

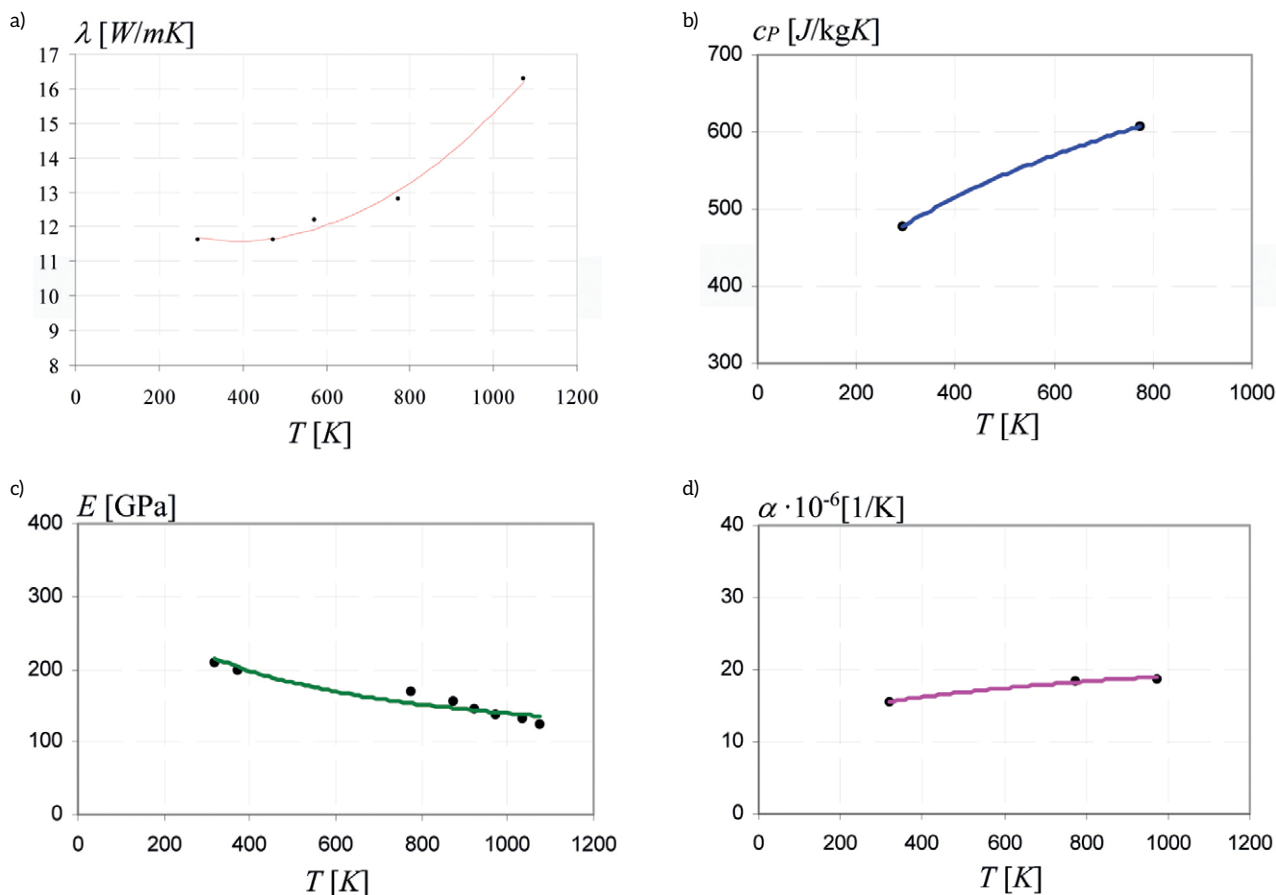
## 2. Modelowanie obciążeń cieplnych zaworu wylotowego

Modelowanie obciążeń cieplnych zaworu wylotowego przeprowadzono na podstawie zmieniających się okresowo warunków brzegowych III rodzaju. Warunki te są scharakteryzowane przez temperaturę  $T$  czynnika roboczego oraz przez współczynnik przejmowania ciepła  $\alpha$  [6, 7]. Temperaturę czynnika roboczego panującą w cylindrze silnika podczas jego pracy wyznaczono w oparciu o zmierzoną wartość ciśnienia indykatorowego, wykorzystując [1]:

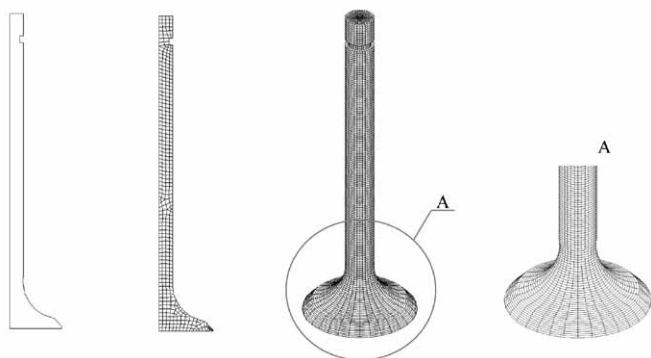
- model dwustrefowy dla procesu spalania;
- pozostałe modele przemian termodynamicznych dla suwów napełniania oraz sprężania;
- pomiar temperatury strumienia spalin dla wydechu.

reklama

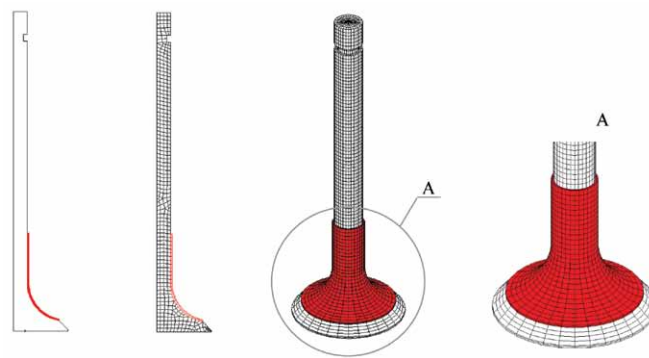
reklama



Rys. 2. Wykres zmian: a) współczynnika przewodności cieplnej  $\lambda$ ; b) ciepła właściwego materiału  $c_p$ ; c) modułu Younga  $E$ ; d) współczynnika rozszerzalności liniowej  $\alpha$  w funkcji temperatury



Rys. 3. Etapy tworzenia modelu dyskretnego zaworu wylotowego

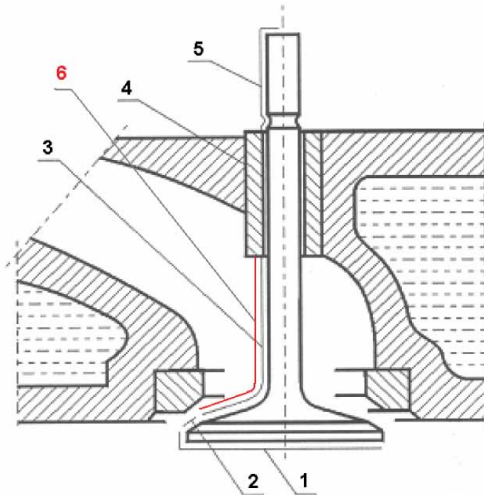


Rys. 4. Etapy tworzenia modelu dyskretnego warstwy nagaru

### 3. Warunki jednoznaczności

W przypadku analizy niustalonego przepływu ciepła w zaworze należy uwzględnić warunki jednoznaczności, do których należą warunki fizyczne, początkowe i geometryczne [7]. Do obliczeń numerycznych na materiał zaworu wylotowego przyjęto stal austenityczną o oznaczeniu X53CrMnNi21-9. Ponadto do przeprowadzenia obliczeń dla niestacjonarnego przepływu ciepła niezbędne było przyjęcie sześciu podstawowych

właściwości fizycznych zastosowanego materiału: przewodność cieplna  $\lambda$ , właściwa pojemność cieplna  $c_p$ , gęstość  $\rho$ , moduł Younga  $E$ , współczynnik rozszerzalności cieplnej  $\alpha$  oraz liczba Poissona  $\nu$ . Dla współczynnika przewodności cieplnej  $\lambda$ , ciepła właściwego materiału  $c_p$ , modułu Younga  $E$ , współczynnika rozszerzalności liniowej  $\alpha$  przyjęto zmienne wartości w funkcji temperatury [8] (rys. 2).



- 1 - powierzchnia talerzyka od strony komory spalania
- 2 - powierzchnia styku przylgni z gniazdem
- 3 - powierzchnia trzonka zaworu w kanale wylotowym pod warstwą nagaru
- 4 - powierzchnia trzonka zaworu w przewodnicy
- 5 - powierzchnia trzonka ponad głowicą
- 6 - warstwa nagaru na powierzchni trzonka w kanale wylotowym

Rys. 5. Szkic zaworu wylotowego na tle głowicy silnika

W obliczeniach numerycznych warstwę nagaru zamodelowano w postaci modelu geometrycznego z uwzględnieniem jego własności fizycznych według literatury: współczynnik przewodności cieplnej  $\lambda = 0,11 \text{ W/mK}$ , gęstość właściwa  $\rho = 1100\text{--}2000 \text{ kg/m}^3$  oraz ciepło właściwe nagaru  $c_p = 0,84\text{--}1,84 \text{ kJ/kgK}$  [9].

Analizując obciążenia cieplne w obliczeniach numerycznych, przyjęto, że w chwili początkowej rozkład temperatury był stały i równy temperaturze otoczenia.

#### 4. Warunki geometryczne

Modele geometryczne zaworu oraz warstwy nagaru wykonano za pomocą elementu bryłowego trójwymiarowego izoparametrycznego 8-węzłowego typu (SOLID) i wymiarze 1 mm dostępnego w systemie COSMOS/M [10]. Model geometryczny zaworu powstał w oparciu o element rzeczywisty silnika. Poszczególne etapy tworzenia modeli zaworu i warstwy nagaru przedstawiono na rysunkach numer 3 i 4.

Geometryczny model zaworu wylotowego składa się z 13 233 elementów, 16 598 węzłów, 96 krzywych, 49 powierzchni.

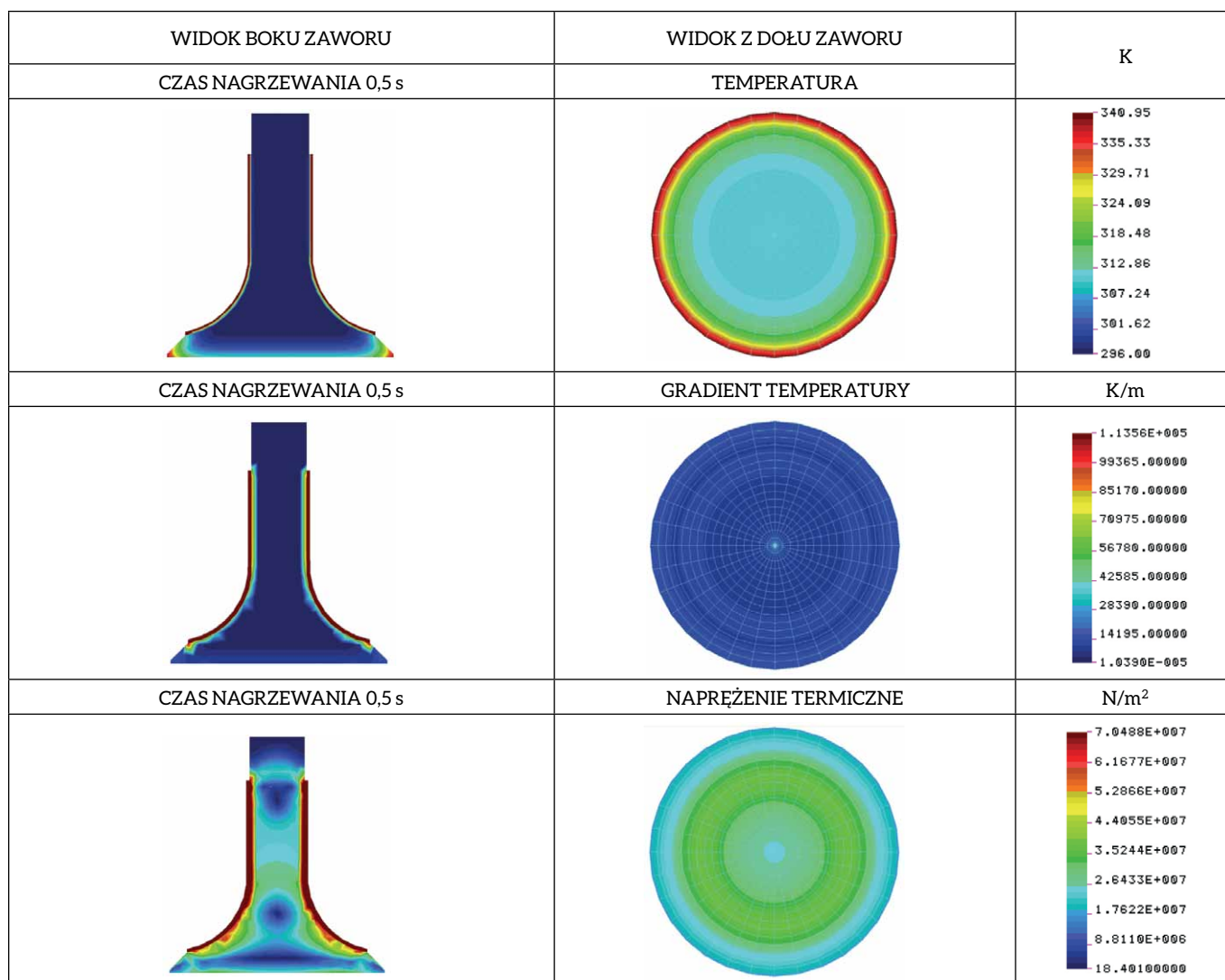
Geometryczny model warstwy nagaru składa się z 1848 elementów, 2871 węzłów, 74 krzywych, 16 powierzchni.

#### 5. Warunki brzegowe

Dla przeprowadzenia obliczeń numerycznych konieczne było zdefiniowanie sześciu powierzchni wymiany ciepła, którym przypisano określone warunki wymiany ciepła (rys. 5) [6].

#### 6. Wyniki obliczeń numerycznych

W przeprowadzonych numerycznych eksperymentach badano obciążenia cieplne zaworu wylotowego pokrytego warstwą nagaru zlokalizowanego na powierzchni trzonka zaworowego. Obliczenia przeprowadzono dla zaworu wylotowego doładowanego silnika wysokoprężnego z bezpośrednim wtryskiem paliwa do komory spalania o pojemności skokowej  $2390 \text{ cm}^3$  i mocy znamionowej  $85 \text{ kW}$  osiąganą przy prędkości obrotowej  $4250 \text{ min}^{-1}$ . Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono kolejne fazy nagrzewania się zaworu po 0,5 s i 5 s pracy silnika i odpowiadające im rozkłady temperatury, gradienty temperatury oraz naprężenia termiczne występujące w zaworze. Na podstawie uzyskanych wyników obliczeń można zaobserwować, że podczas nagrzewania się zaworu wydechowego rosną gradienty temperatury i naprężenia termiczne. Maksymalne wartości gradientów temperatury występują bezpośrednio pod warstwą nagaru (około  $325\,126 \text{ K/m}$  po 5 s). Natomiast maksymalne



Rys. 6. Kolejne fazy nagrzewania się zaworu wylotowego

wartości naprężeń występują na końcach powierzchni czołowej zaworu (około  $2,35209e+008$  K/m po 5 s).

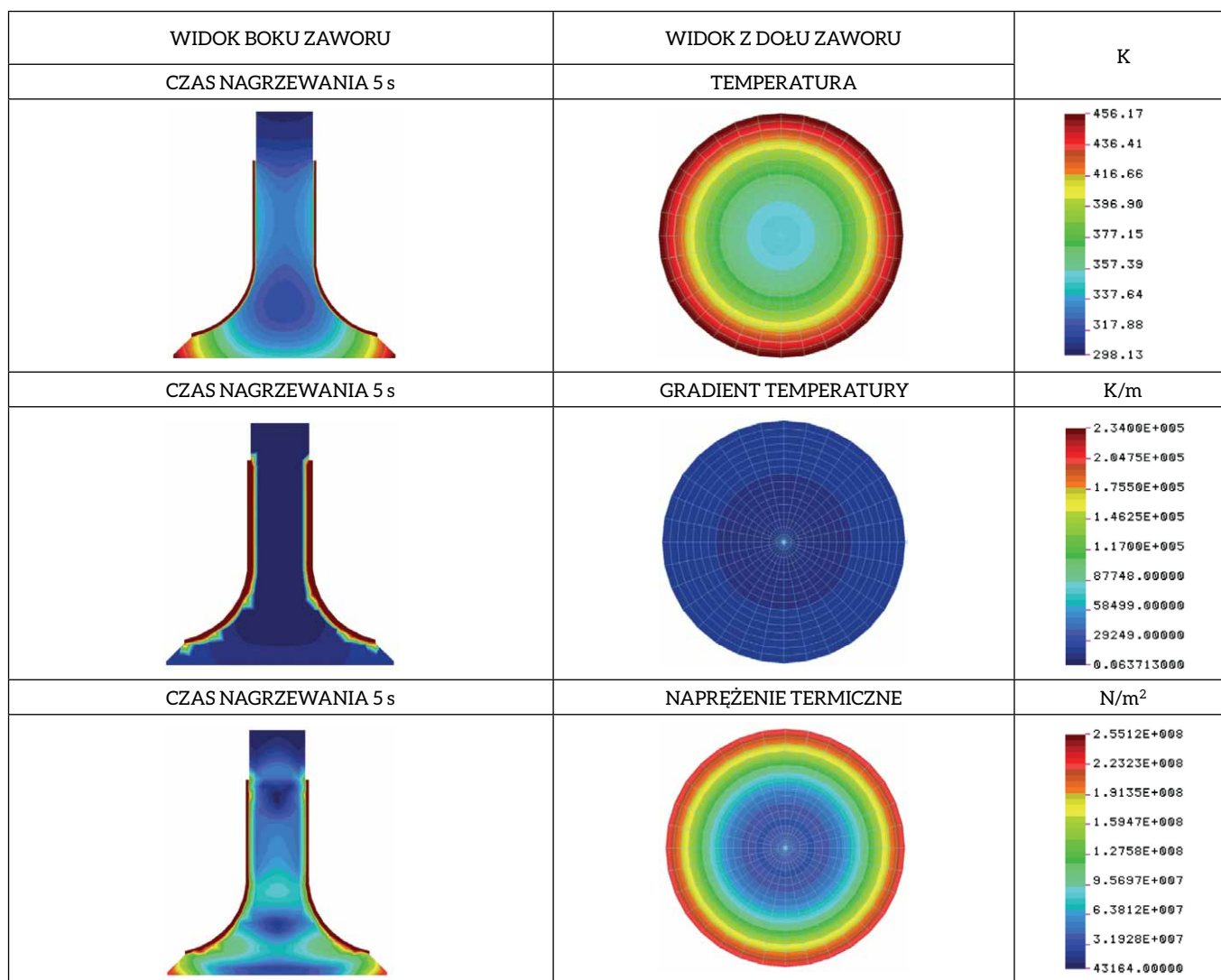
### 7. Podsumowanie

Z przeprowadzonej analizy wynika, że zjawisko odkładania się nagaru na powierzchniach zaworu jest bardzo istotnym zagadnieniem związanym z procesem eksploatacji silnika spalinowego, ponieważ podczas nagrzewania zaworu zwiększają się gradienty temperatury i naprężenia termiczne pod warstwą nagaru. Wzrost lokalnych naprężeń termicznych prowadzi do powstawania mikropęknięć na powierzchniach zaworu. Mikropęknięcia przyczyniają się do powstawania wad materiałowych. Najbardziej prawdopodobnym miejscem powstawania mikropęknięć jest grzybek zaworu (rys. 8). Spowodowane jest to tym, że na końcach czoła zaworu występuje najmniej materiału, dlatego w tym miejscu powstają największe naprężenia (rys. 7). Nagar może występować na różnych powierzchniach zaworu, a także innych elementach komory spalania silnika (np. tłok, cylinder, gniazdo zaworowe). Stąd zasadne są dalsze analizy w ramach prac badawczych w celu lepszego poznania wpływu

zjawiska nagaru na przebieg obciążeń cieplnych w elementach komory spalania. Takie badania przyczynią się niewątpliwie do optymalizacji elementów silnika pod względem samej konstrukcji i zastosowanych materiałów, a tym samym poprawy jego parametrów eksploatacyjnych.

### Literatura

- [1] GUSTOF P.: Wyznaczanie przebiegu temperatur ładunku dla pełnego cyklu roboczego w cylindrze doładowanego silnika o zapłonie samoczynnym. „Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport”, 2001, vol. 43.
- [2] ZWIERZYCKI W.: Paliwa silnikowe i oleje opałowe. Wydawnictwo Rafineria Nafty Glimar SA, Warszawa 2007.
- [3] GUSTOF P., HORNIK A.: Modelling of the heat loads of the valves in turbo Diesel engine and the accuracy of calculations. „Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering”, 2007, vol. 23, iss. 2.
- [4] HORNIK A.: The influence of the engine speed on the temperature distribution in the piston of the turbocharged diesel engine. „Transport Problems”, 2011, vol. 6, iss. 3.



Rys. 7. Kolejne fazy nagrzewania się zaworu wylotowego



Rys. 8. Przykłady uszkodzenia zaworu wynikającego z obecności nagaru

- [5] JĘDRUSIK D., GUSTOF P.: *Using of model of two-zone for determines of temperatures the exhaust valve of turbo Diesel engine in unsteady state*. „Technical Journal of Cracow Technical University. Series Mechanics”, 2004, no. 6-M/2004.
- [6] KWAŚNIEWSKI S., SROKA Z., ZABŁOCKI W.: *Modelowanie obciążeń cieplnych w elementach silników spalinowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
- [7] WIŚNIEWSKI S.: *Wymiana ciepła*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1987.

- [8] SHOJAEFARDA M.H., NOORPOORA A.R., BOZCHALOEFA D.A., GHAFFARPOUR M.: *Transient Thermal Analysis of Engine Exhaust Valve*. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications. 2005, vol. 48(7), Taylor & Francis.
- [9] KALGHATGI G.T.: *Combustion chamber deposits in spark ignition engines*. SAE Paper No: 952443 2005.
- [10] RUSIŃSKI E.: *Metoda elementów skończonych. System Cosmos/M*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1994.

dr inż. Aleksander Hornik

do 2018 r. adiunkt, Katedra Eksploatacji Pojazdów Samochodowych, Wydział Transportu, Politechnika Śląska;  
od 2018 r. dalsza współpraca naukowa z Wydziałem Transportu i Inżynierii Lotniczej Politechniki Śląskiej;  
od 2020 r. Zespół Szkół Technicznych i Zawodowych w Świętochłowicach.

artykuł recenzowany