

Wojciech Moćko

Instytut Transportu Samochodowego

ANALIZA WYŁĘŻENIA ZAWORU SILNIKOWEGO WYKONANEGO ZE STOPU TYTANU Ti6Al4V OBCIĄŻONEGO MECHANICZNIE I CIEPLNIE

Celem badań przedstawionych w niniejszej publikacji była analiza rozkładu temperatury oraz naprężeń zastępczych Hubera-Misesa wewnątrz zaworu wydechowego w czasie zimnego rozruchu silnika. Ponadto wyznaczono wartość odkształceń dla wybranych punktów powierzchni zaworu. Obliczenia zostały przeprowadzone w środowisku ABAQUS Standard. Warunki brzegowe wykorzystane w symulacji MES obejmowały temperaturę gazu w komorze spalania oraz w kanale wylotowym, a także temperaturę gniazda zaworowego oraz prowadnicy. Ponadto przeprowadzono obliczenia naprężenia występującego w zaworze na skutek działania siły sprężyny zaworowej, która dociska zawór do gniazda zaworowego. Największą wartość temperatury dochodzącą do 900°C stwierdzono w talerzyku zaworu wykonanego ze stopu tytanu Ti6Al4V. Natomiast dla stali zaworowej oraz tytanu temperatura maksymalna wynosiła ok. 700°C. Zawór wykonany ze stopu tytanu nagrzewał się do najwyższej temperatury, powodując jednocześnie powstawanie największych naprężeń wewnętrznych.

ANALYSIS OF STRENGTH OF THE ENGINE OUTLET VALVE MADE OF TITANIUM ALLOY Ti6Al4V UNDER MECHANICAL AND THERMAL LOADS

The goal of the investigation presented in this paper was Analysis of temperature and equivalent Huber-Mises stress distribution inside outlet valve during cold start of engine. Moreover the displacement values at selected surface areas were determined. The computations were carried out using ABAQUS Standard environment. Boundary conditions applied in the FEM simulation took into account gas temperature in the combustion chamber and outlet channel and temperature of valve seat and valve guide. Moreover a stress distribution in the valve due to load of valve spring were estimated. The highest temperature, equal to 900°C was found in the valve made of titanium alloy Ti6Al4V, whereas the temperature for valve steel and titanium was equal to 700°C. The valve made of titanium alloy reaches highest temperature, as a consequence highest internal stress were found in this material.

1. Wprowadzenie

Zadaniem zaworów silnikowych jest zamykanie i otwieranie w ściśle określonym czasie kanałów dolotowych i wylotowych do komory spalania. Zawory składają się z trzonka, części środkowej oraz grzybka zwanego talerzykiem. Zadaniem trzonka jest prowadzenie zaworu w prowadnicy oraz odprowadzanie ciepła z talerzyka. Element ten musi spełniać wiele przeciwstawnych wymagań: posiadać niską masę i dostateczną wytrzymałość, skutecznie odprowadzać ciepło ale jednocześnie mieć małą średnicę aby stawiać jak najmniejszy opór przepływającym gazom. Typowa średnica trzonka zaworu wynosi od 15% do 30% czynnej średnicy zaworu [2]. Środkowa część zaworu stanowi przejście od przylgni grzybka do trzonka. Ma ona kształt stożka ściętego, którego powierzchnia boczna, łukiem o dużym promieniu, przechodzi w walcową powierzchnię trzonka, a wierzchołek łagodnie, bez uskoków średnicy, łączy się z walcowym trzonkiem. Podstawę stożka części środkowej stanowi grzybek, który uszczelnia wnętrze cylindra oraz kieruje przepływem gazów gdy zawór jest otwarty. Na obwodzie grzybka znajduje się przylgnia, o kształcie stożka, którego powierzchnia boczna nachylona jest do osi zaworu najczęściej pod kątem 45° . W czasie, gdy zawór jest zamknięty jest ona dociskana do gniazda zaworowego, powodując uszczelnienie komory spalania. Dodatkowo poprzez kontakt przylgnia – gniazdo zaworowe następuje także wymiana ciepła pomiędzy zaworem, a głowicą silnika. Silnie obciążone cieplnie zawory wylotowe muszą spełniać następujące wymagania:

- posiadać duży współczynnik przewodnictwa cieplnego,
- posiadać odporność na wysokie temperatury,
- charakteryzować się dużą wytrzymałością na obciążenia udarowe,
- mieć mały współczynnik rozszerzalności cieplnej,
- posiadać dużą odporność na ścieranie
- posiadać dużą odporność na korozję nisko- i wysoko- temperaturową.

Największe obciążenia cieplne zaworów silnikowych występują w czasie zimnego rozruchu silnika. W przypadku, kiedy bezpośrednio po uruchomieniu pojazdu silnik jest mocno obciążony, w jego elementach występują bardzo duże gradienty temperatur, które prowadzą do powstawania silnych naprężeń wewnętrznych. Po pewnym czasie warunki pracy stabilizują się, jednak różnica pomiędzy temperaturą w komorze spalania, a więc i temperaturą powierzchni talerzyka zaworu a jego trzonkiem, chłodzonego przez prowadnicę jest ciągle wysoka. Z tego powodu pożądane jest, aby materiał, z którego wykonany jest zawór charakteryzował się dobrym przewodnictwem cieplnym, gdyż ułatwia to transport strumienia energii cieplnej od talerzyka do trzonka, redukując tym samym temperaturę powierzchni zaworu, która styka się z rozgrzаныmi gazami wylotowymi. Stygnięcie elementów silnika jest procesem dużo wolniejszym niż jego rozgrzewanie, w związku z tym nie powstają tak silne gradienty temperatur. Zawory silnikowe narażone są na dwa rodzaje obciążeń mechanicznych: pierwsze z nich związane jest z omawianymi cyklami rozgrzewania i studzenia silnika, natomiast drugie powstają w wyniku docisku przylgni do gniazda zaworowego przez sprężynę. Częstotliwość tego typu obciążeń jest bardzo duża, gdyż zawór otwiera się w każdym cyklu spalania. W efekcie zawór jest narażony na kilkaset do kilku tysięcy cykli obciążenie-odciążenie w ciągu minuty pracy silnika. Zarówno obciążenia związane z rozgrzewaniem silnika, jak i zamykaniem i otwieraniem zaworu mają charakter cykliczny i mogą prowadzić do rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego [11,10].

Obecnie do konstrukcji zaworów silnikowych stosuje się trzy typy stali: ferrytyczno-perlityczne, austenityczne oraz silichromy [5-7]. Pierwszy typ charakteryzuje się dobrym przewodnictwem cieplnym, małą ścieralnością, niską wartością współczynnika rozszerzalności cieplnej, dobrą obrabialnością plastyczną i skrawalnością, słabą odpornością na korozję wysokotemperaturową i znacznym osłabieniem granicy plastyczności pod wpływem wysokiej temperatury. W związku z ograniczoną odpornością na korozję i spadkiem wytrzymałości w podwyższonych temperaturach (pow. 700°C) stale ferrytyczno-perlityczne stosuje się głównie na zawory dolotowe oraz trzonki w złożonych zaworach wylotowych.

Druga grupa stali chromoniklowych posiada strukturę austenityczną. Z punktu widzenia konstrukcji zaworów, najważniejsze właściwości tego gatunku stali to: duża twardość, wytrzymałość, odporność na utlenianie i korozję w wysokich temperaturach, małe przewodnictwo cieplne oraz duży współczynnik rozszerzalności cieplnej.

Na zawory wylotowe stosuje się najczęściej stale chromowo-krzemowe o zawartości chromu od 8% do 12 % i krzemu od 2% do 4%. Charakteryzują się one dużą wytrzymałością i odpornością na wysoką temperaturę, odpornością na nisko- i wysokotemperaturową korozję, dużą twardością w wysokich temperaturach, małym współczynnikiem rozszerzalności cieplnej oraz współczynnikiem przewodnictwa cieplnego, który klasyfikuje silichromy pomiędzy stalami ferrytyczno-perlitycznymi a austenitycznymi.

Obecnie rozwój przemysłu samochodowego jest stymulowany głównie poprzez coraz bardziej restrykcyjne normy, które ograniczają emisję szkodliwych substancji oraz dwutlenku węgla w transporcie [12,8]. Efekt ten można osiągnąć zarówno poprzez modyfikację konstrukcji pojazdu, która prowadzi do zmniejszenia jego masy, zastosowanie hybrydowego lub elektrycznego napędu jak też modyfikację istniejących rozwiązań w silnikach spalinowych. Ostatnie z wymienionych rozwiązań jest realizowane głównie poprzez zwiększanie temperatury spalania. Prowadzi to do wzrostu maksymalnej temperatury gazów spalinowych z 600°C do 1050 °C [1] dla silników z zapłonem iskrowym oraz do 850 °C [4] dla silników z zapłonem samoczynnym. Dodatkowo wprowadzenie do paliw pochodzenia mineralnego biokomponentów powoduje, że gazy wydechowe powodują szybszą korozję elementów silnika, z którymi się stykają, w tym także zaworów. W związku z tym prowadzone są prace, których celem jest zwiększenie odporności obecnie stosowanych stali na wysoką temperaturę i korozję wysokotemperaturową. Można tego dokonać poprzez modyfikację powierzchni elementów narażanych lub też nałożenie na nie dodatkowych warstw odpornych na korozję. Ponadto trwają badania nad zastosowaniem w konstrukcji zaworów silnikowych nowych grup materiałów. W Instytucie Transportu Samochodowego prowadzone są prace dotyczące możliwości zastosowanie stopu tytanu Ti6Al4V do budowy zaworu wylotowego. Dodatkowo powierzchnia zaworu będzie pokryta warstwą grafenu, co zwiększy odporność korozyjną materiału. Stop TiAl6V4, określane też jako Grade 5, jest najczęściej stosowany spośród całej gamy stopów tytanu w przemyśle lotniczym, medycznym, chemicznym, motoryzacyjnym oraz okrętowym. Do jego produkcji wykorzystuje się ponad 50% tytanu przetwarzanego w przemyśle. Materiał ten charakteryzuje się wysoką wytrzymałością, przy zachowaniu wysokiego współczynnika wytrzymałości do masy elementu. Typowa granica plastyczności dla stopu TiAl6V4 wynosi 830 MPa [9], wytrzymałość na rozciąganie 900MPa, ciężar właściwy 4420 kg/m³, przewodność cieplna 6,6 W/(mK) a współczynnik rozszerzalności cieplnej 9x10⁻⁶/K. Ponieważ na powierzchni stopu szybko powstaje szczelna warstwa tlenków tytanu, elementy wykonane z tego materiału są

odporne na korozję. W przypadku powstawania mikrouszkodzeń są one szybko wypełniane przez kolejną warstwę tlenków zabezpieczając powierzchnię przed dalszą korozją. Pomimo wysokiej ceny stop TiAl6V4 jest stosunkowo łatwo dostępny w postaci prętów i blach. Ze stopu typu TiAl6V4 wytwarza się turbiny silników odrzutowych, części silników, elementy konstrukcyjne samolotów, szczególnie wymagające elementy automatyki, implanty medyczne czy podzespoły na potrzeby sportu wyczynowego.

W artykule przeanalizowano także możliwość zastosowania komercyjnie czystego tytanu typu Grade 2 do konstrukcji zaworów wylotowych. Komercyjnie czysty tytan jest wytwarzany w czterech odmianach określanych jako Grade 1 do Grade 4. Wraz ze wzrostem indeksu rośnie wytrzymałość materiału, natomiast maleje jego podatność na obróbkę i formowanie. Stopy klasy Grade 2 posiadają następujące właściwości fizykochemiczne: granica plastyczności 275MPa - 410MPa, wytrzymałość na rozciąganie 344MPa, ciężar właściwy 4510 kg/m^3 , przewodność cieplna $16,4 \text{ W/(mK)}$ a współczynnik rozszerzalności cieplnej $8,6 \times 10^{-6}/\text{K}$. W porównaniu do stopu TiAl6V4 materiały różnią się przede wszystkim wytrzymałością oraz przewodnością cieplną, co może mieć istotne znaczenie dla konstrukcji zaworów silnikowych. Szczególnie drugi parametr może być istotny, gdyż jak wspomniano wcześniej duża wartość współczynnika przewodności cieplnej jest bardzo pożądana w konstrukcji zaworów silnikowych. Pomimo mniejszej wytrzymałości w porównaniu do stopu TiAl6V4, tytan w postaci komercyjnie czystej jest również często wykorzystywany, szczególnie w aplikacjach wymagających dużej odporności chemicznej, korozyjnej oraz biokompatybilności. Przykłady takich zastosowań to implanty i protezy ortopedyczne, elementy silników lotniczych, rurociągi, wymienniki ciepła, elementy aparatury chemii procesowej.

Metoda elementów skończonych MES jest często stosowanym narzędziem pozwalającym na analizę zachowania zaworów silnikowych w trakcie pracy. Dzieje się tak, ponieważ nawet w warunkach laboratoryjnych przeprowadzenie pomiarów gradientów temperatury występujących w zaworach w trakcie rozruchu silnika jest praktycznie niemożliwe z przyczyn technicznych. Wykorzystując obliczenia numeryczne [3] przeprowadzono badania wpływu nagaru osiadającego na zaworze wydechowym na rozkład temperatury oraz wymianę ciepła zaworu wydechowego z głowicą silnika. Przeprowadzone symulacje wykazały znaczny wzrost gradientów temperatury oraz naprężeń wewnętrznych w zaworze pokrytym nagarem w stosunku do zaworu w stanie dostawy. Stosując trójwymiarowy model symulacyjny przepływu ciepła w zaworach silnika spalinowego można przeprowadzić wielowariantowe, porównawcze badania stanu cieplnego różnych zaworów poddanych działaniu niezależnie kształtowanych cykli roboczych silnika [13]. Opracowany model pozwala badać zawory w stanach niestabilnych i ustalonych, przy różnych zmiennych w czasie warunkach brzegowych wymiany ciepła. Przeprowadzone przez autorów pracy badania wykazały, że wpływ parametrów termicznych cyklu roboczego jest istotny, natomiast wpływ prędkości obrotowej na gradienty temperatury w zaworach pomijalny. Kompleksowa analiza obciążeń cieplnych gniazdo-zawór doładowanego silnika z zapłonem samoczynnym przedstawiona w pracy doktorskiej [2] uwzględnia wpływ parametrów technicznych silnika takich jak jego wymiary, kąt położenia wału czy ilość dostarczanego paliwa na ilość energii cieplnej wytwarzanej w procesie spalania mieszanki. Następnie na podstawie uzyskanych obliczeń przeprowadzono analizę procesu nagrzewania pary zawór wydechowy – gniazdo. Badania zostały przeprowadzone z wykorzystaniem MES umożliwiły wyznaczenie temperatury maksymalnej zaworu dolotowego i wylotowego oraz ich gniazd w czasie nagrzewania silnika. Ponadto wyznaczono rozkłady temperatury

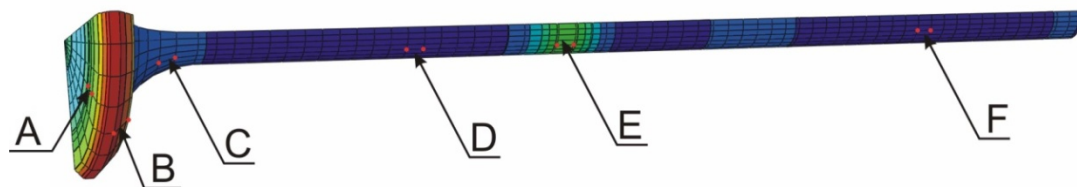
w zaworach jak i gniazdach. Jak wykazuje przegląd literatury kluczowe znaczenie dla procesu rozgrzewania się zaworu silnikowego, obok właściwości fizycznych materiału, z którego jest on wykonany, ma współczynnik wnikania ciepła α . Określa on zdolność danego ciała do przyjmowania energii cieplnej z otoczenia. Wartość tego współczynnika zależy od właściwości powierzchni ciała tj. barwy, chropowatości, rodzaju materiału oraz ośrodka, który przekazuje ciepło, jego stanu (stały, ciekły, gazowy), różnicy temperatur oraz prędkości przepływu.

Celem badań przedstawionych w niniejszej publikacji była analiza rozkładu temperatury oraz naprężeń zastępczych Hubera-Misesa wewnątrz zaworu wydechowego w czasie zimnego rozruchu silnika. Ponadto wyznaczono wartość odkształceń dla wybranych punktów powierzchni zaworu. Przyczyną powstawania odkształceń są obciążenia mechaniczne występujące w czasie dociskania przylgni zaworu do gniazda przez sprężynę oraz wywołane rozszerzalnością cieplną zmiany wymiarów zaworu w czasie jego nagrzewania. Dzięki opracowaniu przedstawionego w niniejszej publikacji modelu MES umożliwiającego analizę temperatury, naprężeń oraz odkształceń zaworów silnikowych, w dalszym toku badań możliwe będzie badanie symulacyjne działania zaworu wydechowego wykonanego ze stopu TiAl6V4 pokrytego grafenem.

2. Metodyka badawcza

Przedmiotem prowadzonych analiz było wyznaczenie rozkładu temperatury oraz naprężenia zastępczego Hubera-Misesa w zaworze wylotowym w trakcie nagrzewania silnika. Przyjęto prędkość obrotową silnika równą 3000 obr/min. Warunki brzegowe wykorzystane w symulacji MES obejmowały temperaturę gazu w komorze spalania oraz w kanale wylotowym, a także temperaturę gniazda zaworowego oraz prowadnicy. Ponadto przeprowadzono obliczenia naprężenia występującego w zaworze w wyniku działania siły sprężyny zaworowej, która dociska zawór do gniazda zaworowego. W symulacji wykorzystano dane przedstawione we wcześniejszych pracach [2,13].

Widok modelu zaworu w układzie ćwierć symetrycznym przedstawiono na rys. 1. Zawiera on także oznaczenie elementów siatki, dla których przeprowadzono analizę odkształcenia zaprezentowaną w dalszej części pracy. Obliczenia zostały przeprowadzone w środowisku ABAQUS Standard. Przyjęto wielkość elementu siatki równą 2 mm. Do badań zastosowano analizę stanów przejściowych ze sprzężonym termo-mechanicznym modelem (transient coupled thermal-displacement analysis). Model zaworu był utwierdzony na końcu trzonka w kierunku wzdłużnym. Dodatkowo zastosowano utwierdzenie krawędzi siatki leżących na osi zaworu w kierunkach prostopadłych do osi. W trakcie analizy wpływu sprężyny zaworowej na naprężenia wewnętrzne zawór był utwierdzony jak poprzednio, natomiast siła była przykładana do przylgni zaworowej w kierunku równoległym do osi zaworu.



Rys. 1. Widok modelu zaworu silnikowego z zaznaczonymi punktami pomiaru odkształcenia powierzchni.

Fig. 1. View of the engine valve model with the marked surface deformation measurement points.

Badania zostały przeprowadzone dla trzech typów materiałów: stopu tytanu TiAl6V4, komercyjnie czystego tytanu gatunku Grade 2 oraz jednej z obecnie stosowanych chromowo-krzemowych stali zaworowej gatunku H9S2. Właściwości fizyczne badanych materiałów wykorzystane w symulacji przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Właściwości fizyczne materiałów przewidzianych do konstrukcji zaworu.

Table 1

Physical properties of the materials envisaged for construction of the valve.

Materiał	Przewodność cieplna [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	Ciężar właściwy [kg/m ³]	Moduł Younga [GPa]	Wsp. Poissona	Współczynnik rozszerzalności cieplnej 10 ⁻⁶ /K			Ciepło właściwe [Jkg ⁻¹ oC ⁻¹]
					20°C	250°C	500°C	
Tytan Grade 2	16,4	4510	105	0,37	8,6	9,2	9,7	523
Stop tytanu TiAl6V4	6,7	4430	114	0,33	8,6	9,2	9,7	526
Stal zaworowa H9S2	25	7800	200	0,33	10	10	10	460

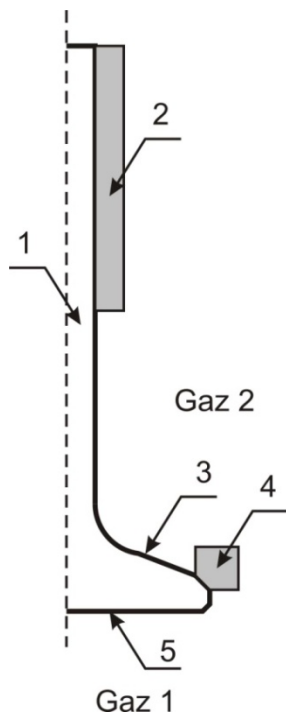
Schemat zaworu wraz z warunkami brzegowymi przedstawiono na rys. 2. Górna część trzonka zaworu jest umieszczona w przewodnicy, której temperatura w czasie nagrzewania silnika rośnie zgodnie z zależnością:

$$T_p = 175[1 - \exp(0,05t)] \quad (1)$$

Dolna część trzonka, oraz górna część talerzyka są umieszczone w kanale wylotowym, w którym znajdują się spaliny oznaczone jako Gaz 2. Zmiany wartości współczynnika przejmowania ciepła dla trzonka – „alfa 2” oraz temperatury gazów spalinowych „Gaz 2” są przedstawione na rys. 3. W symulacji uwzględniono zmiany współczynnika przejmowania ciepła oraz temperatury w kolejnych czterech suwach składających się na jeden cykl pracy silnika, który trwa 0,08 s. Kiedy zawór jest zamknięty, temperatura gazu w kanale wylotowym jest stała. Po otwarciu zaworu w czasie wydechu temperatura gazu zrównuje się z temperaturą gazu znajdującego się w komorze spalania. Przyłgnia zaworu styka się z gniazdem zaworowym, którego temperatura w czasie nagrzewania rośnie zgodnie z zależnością:

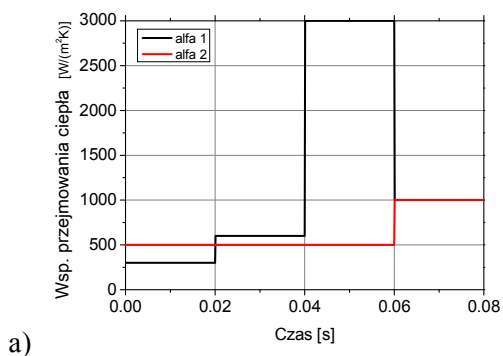
$$T_G = 350[1 - \exp(0,05t)] \quad (2)$$

W trakcie suwu wydechu zawór otwiera się i warunki brzegowe dla przyłgni zmieniają się. Przestaje ona stykać się z gniazdem, a zaczyna stykać się z gazami wylotowymi z komory spalania, w związku z czym warunki brzegowe można opisać przebiegami „alfa 1” i „Gaz 1” z rys. 3 dla czasu od 0,06s do 0,08s. Dolna część talerzyka znajduje się w komorze spalania, w związku z czym przyjęto dla niej parametry opisane zmiennymi „Gaz 1” i „alfa 1”. Warto zwrócić uwagę, że na początku cyklu spalania występuje gwałtowny wzrost temperatury do 2700°C oraz współczynnika przejmowania ciepła, co jest związane ze spalaniem mieszanki w silniku.

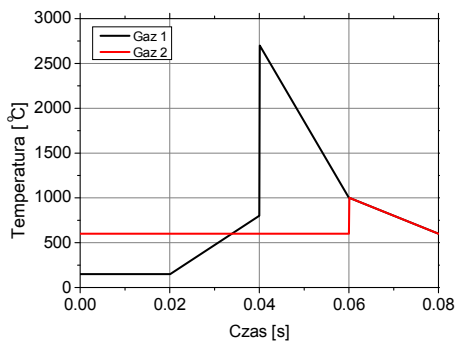


Rys. 2. Widok zaworu z warunkami brzegowymi. 1 – trzonek zaworu, 2 – prowadnica, 3 – część górna talerzyka w kanale wylotowym, 4 – gniazdo zaworowe, 5 – część dolna talerzyka w komorze spalania.

Fig. 2. View of the valve with the boundary conditions. 1 - valve stem, 2 - guide 3 - the upper part of the plate in the exhaust channel, 4 - valve seat, 5 - lower part of the plate in the combustion chamber.



a)



b)

Rys. 3. Warunki brzegowe wymiany ciepła na powierzchni zaworu: a) współczynnik przyjmowania ciepła, b) temperatura.

Fig. 3. The heat transfer boundary conditions on the surface of the valve: a) the heat transfer coefficient, b) the temperature.

Nacisk sprężyny zaworowej wynosi w zależności od konstrukcji silnika od 300N do 400N. Na potrzeby symulacji przyjęto, że w czasie suwów napelniania, sprężania i pracy zawór jest dociskany do gniazda z siłą 350 N, przyłożoną równoległe do osi podłużnej. Wpływ ciśnienia w komorze spalania, którego wartość w trakcie spalania mieszanki dochodzi do kilku MPa [X], na naprężenia wewnętrzne obserwowane w zaworze jest niewielki. Ponadto celem przeprowadzonej symulacji było przede wszystkim określenie wpływu temperatury oraz działania sprężyny zaworowej na rozkład naprężeń wewnętrznych. W związku z tym w obliczeniach nie uwzględniono ciśnienia występującego w komorze spalania.

3. Wyniki

3.1. Rozkład naprężeń zastępczych Hubera-Misesa wywołany działaniem sprężyny zaworowej

Pierwszym etapem analizy było wyznaczenie naprężenia wywołanego działaniem sprężyny dociskającej zawór do gniazda. Wyniki symulacji wykonanej dla zaworu znajdującego się w temperaturze otoczenia (zimny silnik) przedstawiono na rys. 4 – 6. Największa wartość naprężenia równa ok. 10 MPa występuje w trzonku zaworu, ponieważ ma on najmniejsze pole przekroju w kierunku prostopadłym do działającej siły. Ponieważ naprężenie zależy jedynie od siły i pola przekroju, zastosowany materiał nie wpływa na jego rozkład. Obszar bardzo silnego naprężenia w pobliżu końca trzonka jest związany z zastosowaną metodą przyłożenia siły symulującej działanie sprężyny zaworowej i nie należy go brać pod uwagę.



Rys. 4. Rozkład naprężeń zastępczych Hubera-Misesa wywołanych działaniem sprężyny zaworowej wewnątrz zaworu wylotowego wykonanego ze stali H9S2, dla zimnego silnika.

Fig. 4. Huber-Mises substitute stress distribution induced by the valve spring inside the exhaust valve made of H9S2 steel, for a cold engine.



Rys. 5. Rozkład naprężeń zastępczych Hubera-Misesa wywołanych działaniem sprężyny zaworowej wewnątrz zaworu wylotowego wykonanego z tytanu Grade 2, dla zimnego silnika.

Fig. 5. Huber-Mises substitute stress distribution induced by the valve spring inside the exhaust valve made of Grade 2 titanium, for a cold engine



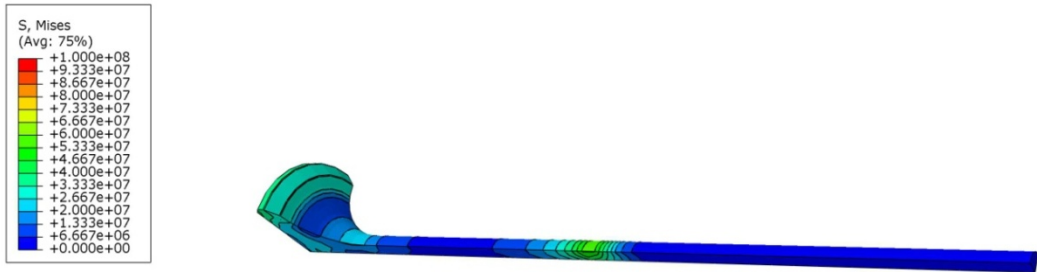
Rys. 6. Rozkład naprężeń zastępczych Hubera-Misesa wywołanych działaniem sprężyny zaworowej wewnątrz zaworu wylotowego wykonanego ze stopu tytanu TiAl6V4, dla zimnego silnika.

Fig. 6. Huber-Mises substitute stress distribution induced by the valve spring inside the exhaust valve made of TiAl6V4 titanium alloy, for a cold engine.

3.2. Rozkład naprężeń zastępczych Hubera-Misesa wywołany sprzężeniami termomechanicznymi

Rozkład naprężeń zastępczych Hubera-Misesa występujących w zaworach wykonanych z różnych materiałów przedstawiono na rys. 7 – 9. Naprężenia wewnętrzne obserwowane w zaworach silnikowych są powodowane rozszerzalnością cieplną materiału, z którego są wykonane. Jak pokazano w dalszej części pracy, z powodu różnych warunków brzegowych poszczególne części zaworu nagrzewają się do różnych temperatur, co jest przyczyną powstawania dużych naprężeń wewnętrznych w miejscach, gdzie gradienty temperatury mają wysoką wartość. Mimo, że współczynnik rozszerzalności cieplnej dla wszystkich analizowanych materiałów, tj. stali zaworowej, tytanu Grade 5 oraz stopu tytanu TiAl6V4 jest zbliżony (wynosi od $8,4 \cdot 10^{-6}/K$ do $10 \cdot 10^{-6}/K$) to można stwierdzić wyraźne różnice w rozkładzie naprężeń wewnętrznych dla poszczególnych zaworów. Duże naprężenia występują w talerzyku zaworu wydechowego. Jego spód jest narażony na działanie gorących gazów w komorze spalania, których średnia temperatura wynosi ok. $1000^{\circ}C$, część górna jest umieszczona w kanale wylotowym, gdzie panuje temperatura ok. $600^{\circ}C$, natomiast część środkowa w pobliżu osi jest chłodzona poprzez odprowadzanie strumienia ciepłego do chłodniejszego trzonka, a przyłgnia styka się z gniazdem zaworowym o temperaturze $350^{\circ}C$. Wartościami, które determinują wartość i rozkład naprężeń wewnętrznych w zaworze wylotowym są, oprócz temperatury będącej z góry narzuconym warunkiem brzegowym, współczynnik rozszerzalności cieplnej, przewodność cieplna, ciepło właściwe oraz moduł Younga. Najmniejsze naprężenia wewnętrzne w talerzyku, wynoszące ok. 20 MPa, występują w zaworze wykonanym z czystego tytanu Grade 2 (rys. 8). Dla zaworu wykonanego ze stali H9S2 naprężenia są nieco większe i wynoszą ok. 40 MPa. Natomiast dla zaworu wykonanego ze stopu tytanu TiAl6V4 wartość naprężeń dochodzi do 70 MPa. Podstawową różnicą pomiędzy tytanem a stopem TiAl6V4 jest 2,5 razy większe przewodnictwo cieplne dla czystego tytanu Grade 5. Pozostałe właściwości fizyczne są zbliżone. W związku z tym można wnioskować, że to właśnie ten parametr ma kluczowe znaczenie dla obniżenia naprężeń wewnętrznych. Różnice temperatury w poszczególnych obszarach zaworu są szybko niwelowane dzięki dobremu przewodnictwu cieplnemu, co obniża gradienty temperatury i równocześnie redukuje naprężenia wewnętrzne. Pomimo, że stal zaworowa posiada jeszcze większą wartość współczynnika przewodnictwa cieplnego, to jednak naprężenia wewnętrzne powstające po nagraniu zaworu są większe niż dla czystego tytanu. Dzieje się tak, ponieważ stal posiada większy współczynnik rozszerzalności cieplnej.

Cechą charakterystyczną dla analizowanych zaworów, niezależnie od materiału, jest powstawanie spiętrzenia naprężeń w trzonku, w miejscu gdzie kończy się prowadnica zaworowa. Jest to spowodowane faktem, że gazy spalinowe stykające się z dolną częścią trzonka mają temperaturę ok. 600°C, natomiast prowadnica, a więc i górna część trzonka ma temperaturę ok. 175°C. Powstaje zatem duża różnica temperatur, na krótkim odcinku, która powoduje powstawanie naprężeń rzędu 50 MPa.



Rys. 7. Rozkład naprężeń zastępczych Hubera-Misesa wywołanych obciążeniem termo-mechanicznym wewnątrz zaworu wylotowego wykonanego ze stali H9S2, po rozgrzaniu silnika.
Fig. 7. Huber-Mises substitute stress distribution induced by the thermo-mechanical load inside the exhaust valve made of H9S2 steel, after the engine warm up.



Rys. 8. Rozkład naprężeń zastępczych Hubera-Misesa wywołanych obciążeniem termo-mechanicznym wewnątrz zaworu wylotowego wykonanego z tytanu Grade 2, po rozgrzaniu silnika.
Fig. 8. Huber-Mises substitute stress distribution induced by the thermo-mechanical load inside the exhaust valve made of Grade 2 titanium, after the engine warm up.



Rys. 9. Rozkład naprężeń zastępczych Hubera-Misesa wywołanych obciążeniem termo-mechanicznym wewnątrz zaworu wylotowego wykonanego ze stopu tytanu TiAl6V4, po rozgrzaniu silnika.
Fig. 9. Huber-Mises substitute stress distribution induced by the thermo-mechanical load inside the exhaust valve made of TiAl6V4 titanium alloy, after the engine warm up.

3.2. Rozkład temperatury dla rozgrzanego zaworu

Rozkład temperatury dla zaworów wykonanych z badanych materiałów przedstawiono na rys. 10-12. Dla wszystkich badanych przedstawione wartości wyznaczone po 180 sekundach nagrzewania silnika. Temperatura górnej części trzonka jest równa temperaturze przewodnicy zaworowej. Najwyższa temperatura występuje w pobliżu spodu talerzyka. Dla zaworu wykonanego ze stopu TiAl6V4 wynosi ona ok. 900°C, natomiast dla pozostałych materiałów ok. 700 °C. Przyczyny powstawanie dużych gradientów temperatury w stopie TiAl6V4 były omówione wcześniej. Analizując przedstawione na rys. 10-12 wyniki można zauważyć, że przylgnia zaworowa ma niższą temperaturę w stosunku do pozostałej części talerzyka. Dzieje się tak, ponieważ ciepło, które jest przejmowane przez spód talerzyka, a następnie przewodzone do partii zaworu o niższej temperaturze, jest odprowadzane przez kontakt pomiędzy przylgnią a gniazdem zaworowym. Mimo to temperatura przylgni wynosi ok. 500°C, a więc jest wyższa od temperatury gniazda równej 350 °C. Pozostała część energii cieplnej jest odprowadzana do przewodnicy zaworowej poprzez trzonek.



Rys. 10. Rozkład temperatury [K] wewnątrz zaworu wylotowego wykonanego ze stali H9S2, po rozgrzaniu silnika.

Fig. 10. Distribution of temperature [K] inside the exhaust valve made of H9S2 steel, after the engine warm up.



Rys. 11. Rozkład temperatury [K] wewnątrz zaworu wylotowego z tytanu Grade 2, po rozgrzaniu silnika.

Fig. 11. Distribution of temperature [K] inside the exhaust valve made of Grade 2 titanium, after the engine warm up.

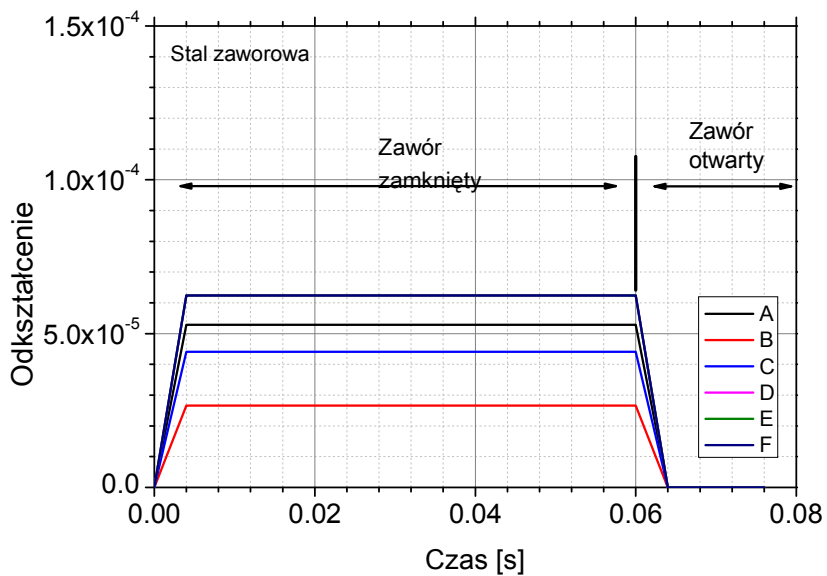


Rys. 12. Rozkład temperatury [K] wewnątrz zaworu wylotowego wykonanego ze stopu tytanu TiAl6V4, po rozgrzaniu silnika.

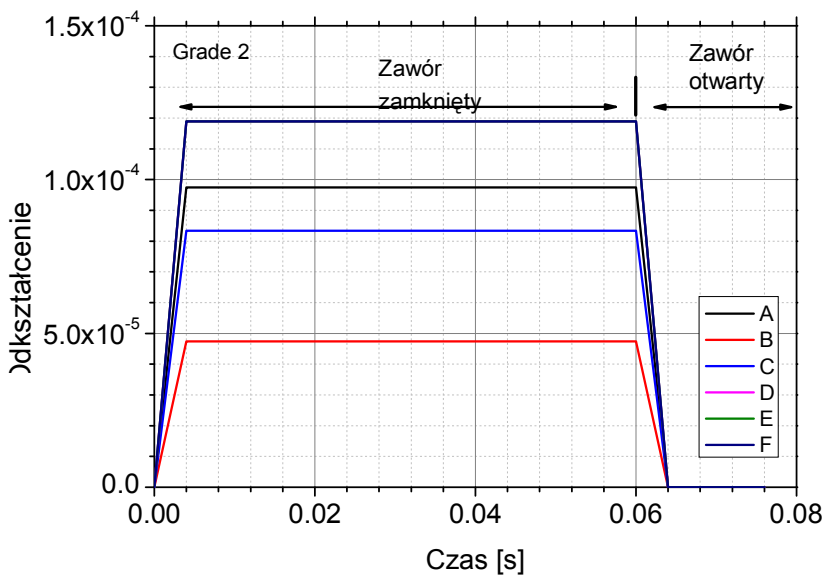
Fig. 12. Distribution of temperature [K] inside the exhaust valve made of titanium TiAl6V4 alloy, after the engine warm up.

3.3. Odształcenia wywołane działaniem sprężyny zaworowej

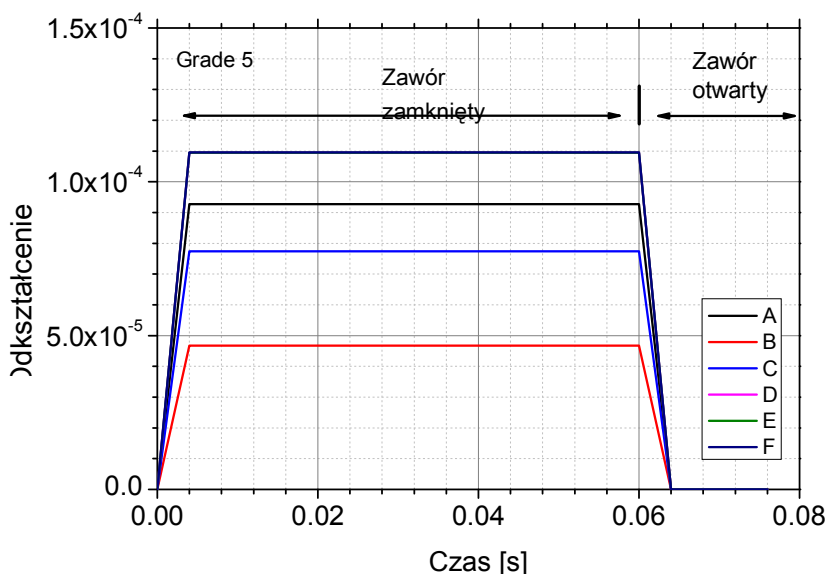
Celem zaprezentowanej poniżej analizy było wyznaczenie odkształceń sprężystych powodowanych przez nacisk sprężyny zaworowej. Pozwoli to na określenie amplitudy odkształceń cyklicznych, którym poddawane są zawory silnikowe w czasie eksploatacji. Wykorzystując uzyskane informacje będzie można zaplanować eksperymenty, umożliwiające określenie adhezji powłok grafenowych naniesionych na zawory tytanowe w warunkach obciążeń o charakterze zmęczeniowym. Analizę przeprowadzono w punktach powierzchni zaworu zaprezentowanych na rys. 1. Obliczone z wykorzystaniem metody elementów skończonych odkształcenia sprężyste dla badanych typów materiałów, tj. stali zaworowej H9S2, tytanu Grade 2 oraz stopu tytanu TiAl6V4 przedstawiono na rys. 13 – 15. We wszystkich przypadkach krzywe oznaczone D, E, F zmierzone na trzonku zaworu mają ten sam przebieg. Ponieważ tytan Grade 2 oraz stop tytanu TiAl6V4 mają podobne właściwości mechaniczne przebiegi odkształcenia sprężystego mają podobny kształt, niezależnie od położenia punktu pomiarowego. Natomiast wyraźne różnice można stwierdzić analizując wykresy dla tytanu oraz stali zaworowej, co wynika z dwukrotnej różnicy wartości modułu Younga. Dla stali zaworowej maksymalne odkształcenie sprężyste, wynoszące 6×10^{-5} występuje na powierzchni trzonka (punkty D, E, F), gdzie przekrój w kierunku prostopadłym do działającej siły jest najmniejszy. Podobnie w przypadku tytanu i jego stopu największe odkształcenie wyznaczono dla trzonka, jednak jego wartość wynosi 12×10^{-5} . Najmniejsze odkształcenia występują na przylgni zaworu, co jest związane z faktem, że jej powierzchnia styka się z gniazdem zaworowym co wydatnie obniża wartość odkształcenia sprężystego. Na dolnej powierzchni talerzyka, która jest umieszczona w komorze spalania i narażona na najwyższe temperatury stwierdzono odkształcenia, których wartość jest niewiele niższa od tych występujących na trzonku. Odkształcenie sprężyste na dolnej powierzchni talerzyka wynosiło 5×10^{-5} , 10×10^{-5} oraz 11×10^{-5} , odpowiednio dla stali zaworowej H9S2, tytanu oraz jego stopu.



Rys. 13. Odkształcenia wywołane działaniem sprężyny zaworowej wyznaczone dla stali H9S2.
 Fig. 13. Deformations caused by the action of the valve spring, determined for H9S2 steel.



Rys. 14. Odkształcenia wywołane działaniem sprężyny zaworowej wyznaczone dla tytanu Grade 2.
 Fig. 14. Deformations caused by the action of the valve spring, determined for Grade 2 titanium



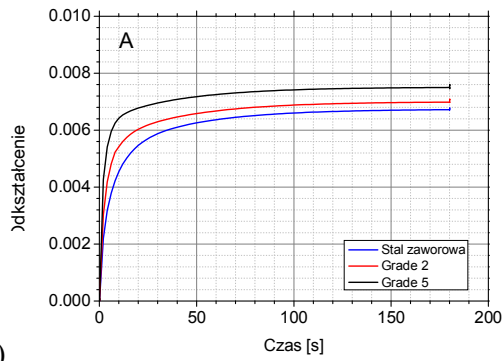
Rys. 15. Odkształcenia wywołane działaniem sprężyny zaworowej wyznaczone dla stopu tytanu TiAl6V4.

Fig. 15. Deformation caused by the action of the valve spring, determined for TiAl6V4 titanium alloy.

3.4. Odkształcenia wywołane sprężeniem termomechanicznym

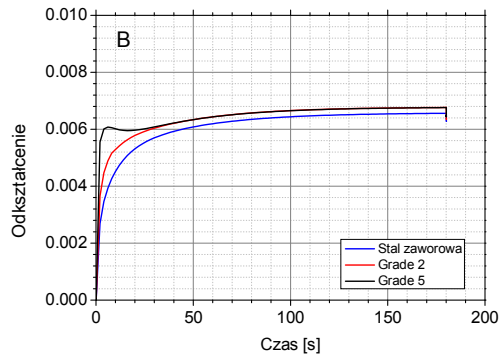
Na rys. 16 a) – f) porównano zmianę odkształcenia wywołanego nagrzewaniem się zaworu silnikowego dla różnych materiałów. Ponieważ różne części zaworu silnikowego nagrzewają się do różnych temperatur, wartość odkształceń termicznych jest uzależniona od położenia danego punktu pomiarowego na powierzchni zaworu. Nawet w przypadku punktów D, E, F położonych na trzonku można stwierdzić znaczne różnice, co wynika z faktu, że jego temperatura maleje ze wzrostem odległości od talerzyka. Wartość odkształceń termicznych jest zbliżona dla wszystkich materiałów.

W najbardziej obciążonym cieplnie obszarze zaworu, tj. dolnej części talerzyka odkształcenie wywołane rozszerzalnością cieplną wynosi od 0,0068 dla stali zaworowej do 0,076 dla stopu tytanu TiAl6V4. Najmniejsze odkształcenia o wartości równej 0,0016 niezależnie od materiału występują w górnej części trzonka, która jest chłodzona przez prowadnicę zaworową.



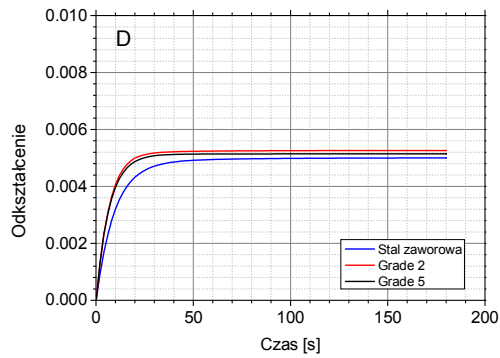
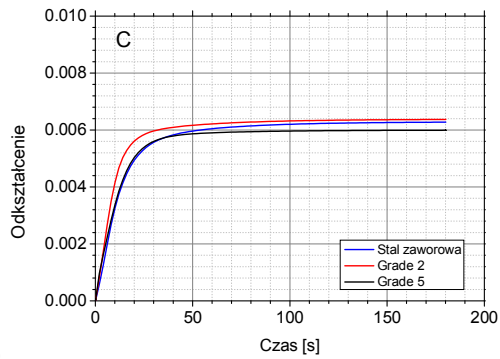
a)

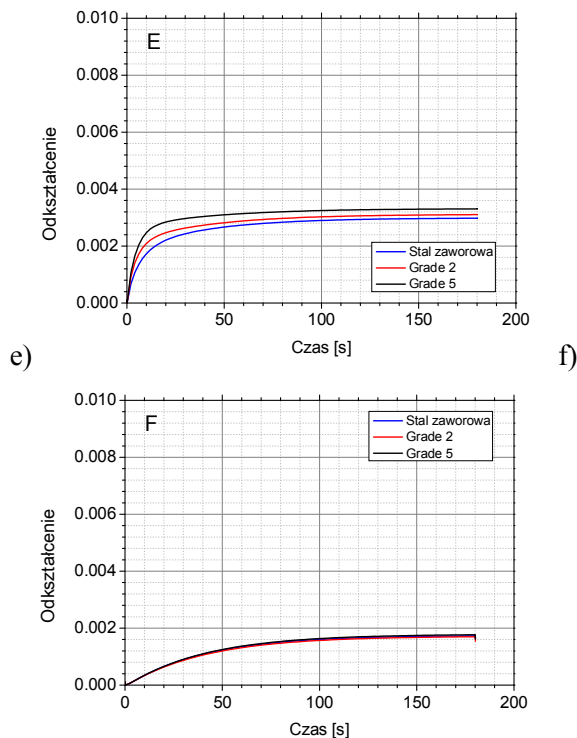
b)



c)

d)





Rys. 16. Odkształcenia w poszczególnych obszarach powierzchni zaworu wywołane sprzężeniem termo-mechanicznym.

Fig. 16. Deformation in different areas of the surface of the valve caused by thermo-mechanical coupling.

4. Podsumowanie

Wartość naprężeń zastępczych Hubera-Misesa w trzonku zaworu, wywołanych dociskiem sprężyny zaworowej nie zależy od zastosowanego materiału. Natomiast z powodu istotnej różnicy w wartości modułu Younga pomiędzy stalą zaworową H9N2, a tytanem Grade 2 i jego stopem TiAl6V4 odkształcenia wyznaczone na powierzchni zaworu mają różną wartość. Wartość odkształceń spowodowanych sprzężeniami termomechanicznymi jest o ok. 2 rzędy wielkości większa niż wartość odkształceń wywołanych naciskiem sprężyny zaworowej. Różnica właściwości fizycznych, szczególnie przewodności cieplnej, pomiędzy badanymi materiałami powoduje, że pomimo identycznych warunków brzegowych, rozkład temperatury w zaworze po rozgrzaniu silnika może znacznie się różnić. Największą wartość temperatury dochodzącą do 900°C stwierdzono w talerzyku zaworu wykonanego ze stopu tytanu TiAl6V4. Natomiast dla stali zaworowej oraz tytanu temperatura maksymalna wynosiła ok. 700°C. Zawór wykonany ze stopu tytanu nagrzewał się do najwyższej temperatury, powodując jednocześnie powstawanie największych naprężeń wewnętrznych.

LITERATURA:

- [1] A. Choudhury, M. Blum, Economical production of titanium-aluminide automotive valves using cold wall induction melting and centrifugal casting in a permanent mold, *Vacuum* 47, 1996, 829-831.
- [2] A. Hornik , Praca doktorska, *Modelowanie obciążeń cieplnych złozenia gniazdo-zawór doladowanego silnika ZS*, Politechnika Śląska, Wydział Transportu, Katedra Eksploatacji Pojazdów Samochodowych, Katowice 2010.
- [3] A. Hornik, D. Jędrusik , K. Wilk, *Unsteady state heat flow in the exhaust valve in turbocharged Diesel engine covered by the layer of the carbon deposit*, *Archives of Materials Science and Engineering* 54, 2012, 68-77.
- [4] C. Leyens, M. Peters, *Titanium and titanium alloys, Fundamentals and Applications*, Wiley-Vch GmbH & Co. 2003.
- [5] H. Woźnica, *Podstawy materiałoznawstwa*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.
- [6] L. A. Dobrzański, *Metaloznawstwo z podstawami nauki o materiałach*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1998.
- [7] P. Adamiec, J. Dziubiński, *Wybrane zagadnienia materiałów konstrukcyjnych technologii wytwarzania pojazdów*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.
- [8] P. Staniak, W. Moćko, A. Wojciechowski, *Well-To-Wheel CO2 Emmision of electric Vehicle in Poland*, *Journal of KONES Powertrain and Transport* 19, 2012, 139-148.
- [9] W. Moćko, *Wpływ szybkości oraz temperatury odkształcania na lepko-plastyczne właściwości tytanu oraz stopu TiAl6V4*, *Transport Samochodowy* 2014/3, 2014, 65-75.
- [10] W. Moćko, *The influence of stress-controlled tensile fatigue loading on the stress-strain characteristics of AISI 1045 steel*, *Materials and Design* 58, 2014, 145–153.
- [11] W. Moćko, Z.L. Kowalewski, *Evolution of the tensile properties of the TiAl6V4 alloy due to the prior cyclic loading history*, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 52, 2014, 847-851.
- [12] W. Moćko, A. Wojciechowski, M. Ornowski, *Perspektywy rozwoju rynku samochodów elektrycznych w najbliższych latach*, *Transport Samochodowy* 2011/1, 2011, 63-71.
- [13] Z. Nagórski, *Temperature gradients in the exhaust valves during “cold” start simulation of combustion engine*, *Journal of KONES Powertrain and Transport* 13, 2006, 233-244.
- [14] A. Sochan, Praca doktorska, *Dobór parametrów pracy silnika spalinowego o zapłonie iskrowym z obiegiem atkinsona w hybrydowym układzie napędowym*, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Kraków 2008.