

Optimization of the shape of the heat shield in terms of natural frequency

Optymalizacja kształtu osłony termicznej pod kątem częstotliwości drgań własnych

DAWID MROCKOWSKI
MAREK WYLEŻOŁ *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2022.8-9.15>

The goal of the article is to present the optimization of the shape of the heat shield of the exhaust system in terms of counteracting the phenomenon of resonance caused by the operation of the internal combustion engine.

KEYWORDS: optimization, heat shield, natural frequency of vibrations

Celem artykułu jest prezentacja optymalizacji kształtu osłony termicznej układu wydechowego w celu przeciwdziałania zjawisku rezonansu wywołanego pracą silnika spalinowego.

SŁOWA KLUCZOWE: optymalizacja, osłona termiczna, częstotliwości drgań własnych

Wprowadzenie

Silnik spalinowy jest głównym źródłem drgań wymuszonych dla układu wydechowego w całym zakresie jego pracy. Drgania te są częściowo przenoszone przez elementy układu zawieszenia silnika na haki (tu są nieco tłumione przez poduszki silnika), następnie na ramę samochodu i do kabiny kierowcy, wywołując tym samym niekorzystne zjawiska (np. zjawisko rezonansu) na elementach przymocowanych do ramy.

W artykule opisano proces optymalizacji kształtu osłony termicznej działającej w określonym przedziale temperatur (temperatura wpływa na częstotliwość drgań własnych) pod kątem izolacji drganiowej od tzw. pierwszej częstotliwości drgań własnych, aby pierwsza częstotliwość drgań własnych osłony termicznej spełniała kryteria podane w BoR (*Book of Requirements*), przy jednoczesnej redukcji masy tej osłony. Pokrycie się częstotliwości działania silnika (wspomniane drgania wymuszone) z częstotliwością drgań własnych osłony termicznej prowadzi – w wyniku powstania zjawiska rezonansu – do wzrostu amplitudy drgań nawet w przypadku małej okresowej siły wymuszającej. Należy również wziąć pod uwagę temperaturę osłony termicznej. Jej wzrost spowoduje bowiem obniżenie sztywności tego elementu, a dokładniej: wraz z temperaturą spada wartość współczynnika Younga E . Obniżenie wartości tego współczynnika powoduje zmniejszenie wartości częstotliwości własnej osłony, tzn. zjawisko rezonansu występuje przy niższej częstotliwości działania silnika – czyli przy niższych jego obrotach.

Postać geometryczna

Obiektem badań była osłona termiczna do samochodu Volkswagen Amarok z sześciocylindrowym silnikiem V6 o mocy 163 KM. Osłona izoluje termicznie katalizator układu wydechowego od powierzchni, która mogłaby ulec zapłonowi w wyniku oddziaływania wysokiej temperatury. Inną funkcją osłony jest ochrona katalizatora przed uszkodzeniami mechanicznymi ze strony nawierzchni, po której porusza się pojazd (np. od uderzenia kamieniem). Osłona w układzie wydechowym jest zamocowana bezpośrednio do ramy samochodu w trzech punktach i znajduje się dokładnie pod katalizatorem. Otwory znajdujące się w osłonie mają umożliwiać odprowadzanie wody z wklęsłej powierzchni osłony termicznej (rys. 1).

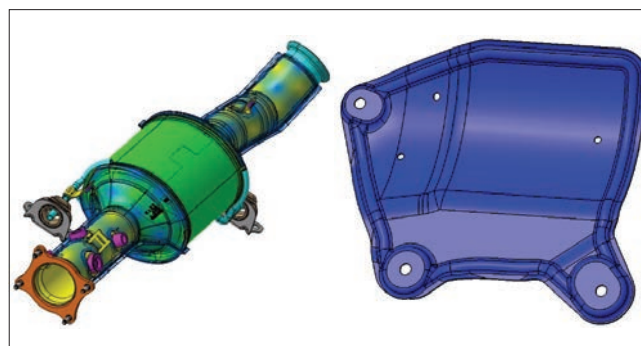


Fig. 1. A fragment of the exhaust system virtual model with a catalytic converter and the standard model of a heat shield

Rys. 1. Fragment modelu wirtualnego układu wydechowego z katalizatorem oraz standardowy model osłony termicznej

Tworzywo osłony

Do wytworzenia osłony termicznej zastosowano stal austenityczną 1.4301. Ma ona szerokie zastosowanie w budowie układów wydechowych ze względu na wysoką odporność na korozję, w tym termiczną. Przy niższej zawartości węgla jest jednocześnie dobrze spawalna, co stanowi ogromną zaletę, gdyż układy oczyszczania spalin są produkowane w procesie spawania. Własności mechaniczne stali przedstawiono w tablicy I.

* Mgr inż. Dawid Mroczkowski – dawid96.12mroczkowski@gmail.com, Polska
Dr hab. inż. Marek Wyleżoł, prof. PŚ – marek.wylezol@polsl.pl, <https://orcid.org/0000-0001-6324-510X> – Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice, Polska

TABLE I. Mechanical properties of material 1.4301
TABLICA I. Własności mechaniczne materiału 1.4301

Właściwości	Wartość
Twardość w stanie zmiękczonej [HB]	215
Wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]	500÷700
Granica plastyczności R_e [MPa]	190
Gęstość [kg/m^3]	7900
Moduł Younga [MPa]	200 000
Liczba Poissona	0,3

Modelowanie wariantów osłony termicznej

W ramach badań zamodelowano łącznie dziewięć wariantów osłony termicznej. Każdy kolejny powstał na podstawie wniosków wyciągniętych z analizy modalnej poprzedniego wariantu. Wszystkie warianty osłony modelowano z użyciem oprogramowania CATIA v5.

Wraz z kolejnymi iteracjami, w celu zwiększenia częstotliwości drgań własnych, w początkowo gładkiej osłonie dodawano kolejne uźebrowania ukształtowane w postaci przetłoczeń. Na rys. 2 i 3 przedstawiono sposoby zamodelowania poszczególnych elementów modelu wpływających na wartości częstotliwości drgań własnych osłony termicznej.

Do zamodelowania przetłoczeń na powierzchni osłony użyto również narzędzia do sprawdzania jakości styczności profilu do powierzchni osłony (rys. 4). Na późniejszym etapie działań modelowych wpłynęło to korzystnie na wygenerowanie lepszej jakości siatki do analizy MES poprzez lepszą topologię modelu.

Pierwotny model osłony zawierał tylko przetłoczenie wzdłuż obwodu (rys. 5). Wykonano go z blachy o grubości 3 mm. Jego częstotliwość drgań własnych wynosiła 60,77 Hz – model nie spełniał więc wyma-

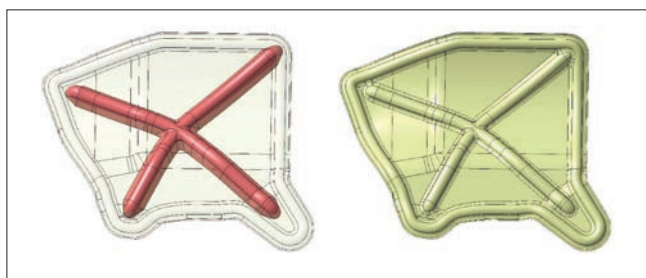


Fig. 2. The method of modeling the ribbing of the heat shield in CATIA v5 software
 Rys. 2. Sposób zamodelowania uźebrowania osłony termicznej w systemie CATIA v5

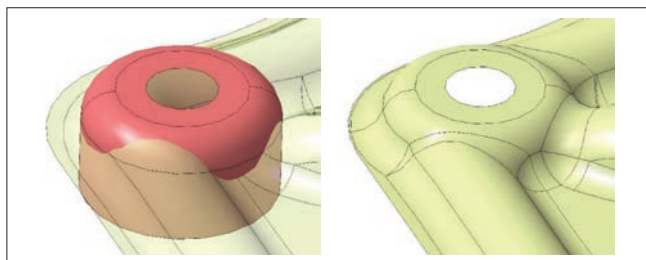


Fig. 3. The method of modeling the mounting of the heat shield in CATIA v5 software
 Rys. 3. Sposób zamodelowania mocowania osłony termicznej w systemie CATIA v5

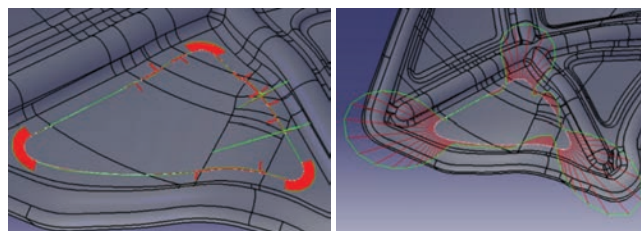


Fig. 4. Check sketch tangency in the modeling process
 Rys. 4. Sprawdzenie styczności profilu w procesie modelowania

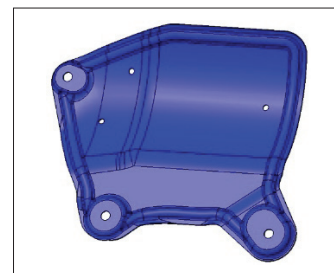


Fig. 5. The first variant of the heat shield
 Rys. 5. Pierwszy wariant osłony termicznej

ganego progu częstotliwości drgań własnych wynoszącego 75 Hz. Z powodu zastosowanej blachy osłona ważyła 2,278 kg.

Po przeprowadzeniu analizy modalnej pierwszego wariantu modelu osłony termicznej wykonano również jej następne warianty konstrukcyjne. Drugi i trzeci wariant (rys. 6) wzbogacono kolejno o pojedyncze i podwójne uźebrowanie. W przypadku drugiego modelu spowodowało to zmniejszenie częstotliwości drgań własnych do wartości 59,90 Hz, a w przypadku trzeciego – zwiększenie częstotliwości drgań własnych do 69,43 Hz.

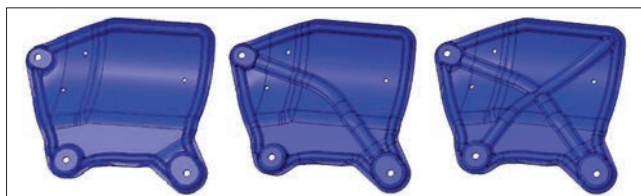


Fig. 6. The first, second and third variants
 Rys. 6. Pierwszy, drugi oraz trzeci wariant

W kolejnych wersjach modelowych (rys. 7) zwiększono głębokość tłoczenia, co podniosło wartości częstotliwości drgań własnych. Postać geometryczna czwartego wariantu różniła się wyłącznie głębokością tłoczenia, a wartość drgań własnych wyniosła 95,55 Hz. Czwarty wariant spełniał wymagany próg 75 Hz, a dalsze próby modyfikacji kształtu miały na celu redukcję grubości osłony, przy założeniu że wartość drgań własnych nie spadnie poniżej 75 Hz. W kolejnych modelach zastosowano przetłoczenia o różnych postaciach

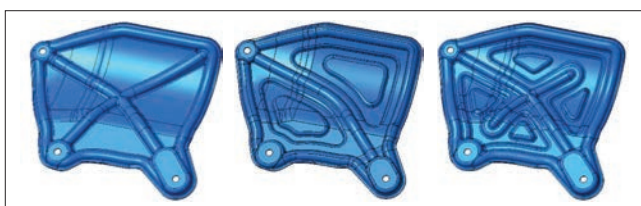


Fig. 7. The fourth, fifth and sixth variants
 Rys. 7. Czwarty, piąty oraz szósty wariant

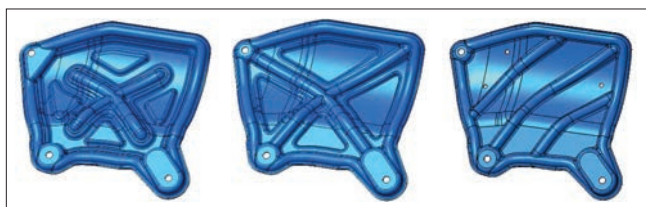


Fig. 8. The seventh, eighth and ninth variants
Rys. 8. Siódmy, ósmy oraz dziewiąty wariant

w celu uzyskania większych wartości drgań własnych z jednoczesnym zmniejszeniem grubości blachy, z której wykonano osłonę (wartość drgań własnych spada wraz ze zmniejszeniem grubości osłony). Okazało się, że zamodelowane przetłoczenia nie mają jednak dużego wpływu na zwiększenie wartości drgań własnych.

W ostatnim wariantcie (rys. 8) zastosowano tylko potrójne przetłoczenie, co spowodowało wzrost wartości drgań własnych do 105 Hz. Następnie przy redukcji grubości osłony do 1,5 mm wartość ta wyniosła 79,58 Hz. Na podstawie wykonanych symulacji można stwierdzić, że największy wpływ na zwiększenie wartości drgań własnych osłony ma zwiększenie głębokości tłoczenia oraz uźebrowanie poprowadzone od środkowego miejsca zamontowania do wolnego narożnika osłony. Natomiast uźebrowanie poprowadzone w kierunku prostopadłym powoduje obniżenie wartości drgań własnych. Wszystkie zamodelowane warianty przedstawiono na rys. 6–8.

Analiza modalna modelu osłony termicznej

Pierwszym etapem analizy modalnej w środowisku systemu ANSYS jest zdefiniowanie tworzywa. Na potrzeby niniejszych badań dodano tworzywo 1.4301 dla każdego wariantu modelu. Natomiast w celu informacyjnym dla oryginalnego modelu oraz modelu o kształcie optymalnym zdefiniowano dziesięć wariantów tworzywowych, które różniły się wartością modułu Younga w zależności od temperatury (tablica II, rys. 9). W ten sposób zasymulowano wpływ temperatury na wartości drgań własnych osłony.

Po zaimportowaniu postaci geometrycznej do systemu ANSYS uzyskano informacje dotyczące masy oraz objętości modelu (tablica III).

TABLE II. Influence of temperature on the value of Young's modulus for material 1.4301 [4]
TABLICA II. Wpływ temperatury na wartość modułu Younga dla tworzywa 1.4301 [4]

Temperatura [°C]	Wartość modułu Younga [MPa]
20	200 000
100	194 000
150	190 000
200	186 000
250	182 000
300	179 000
350	175 000
400	172 000
450	168 000
500	165 000

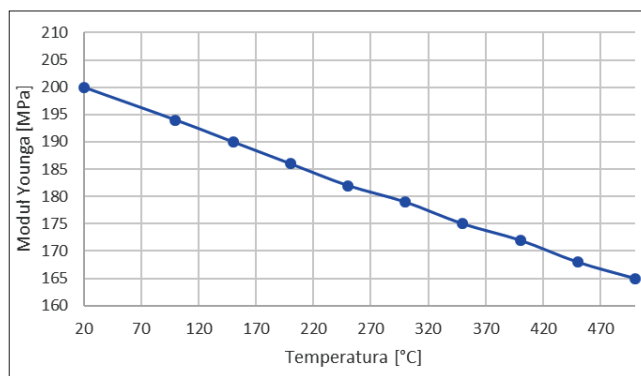


Fig. 9. Graph of Young's modulus as a function of temperature
Rys. 9. Wykres zależności modułu Younga w funkcji temperatury

TABLE III. Weight and volume of the heat shield
TABLICA III. Masa i objętość osłony termicznej

Masa [kg]	2,278
Objętość [mm ³]	288 350

Początkowo zaimportowany model powierzchniowy miał topologię niesprzyjającą generowaniu się kwadratowych elementów skończonych, tzn. wygenerowana siatka i elementy były zdeformowane, co w znaczny sposób mogłoby zakłócić wynik symulacji. W celu poprawy jakości generowanej siatki nieregularny geometryczny model osłony podzielono na fragmenty w postaci prostokątów, które sprzyjają generowaniu się elementów kwadratowych. Długość boku elementu ustawiono na 2 mm, co zwiększyło liczbę poprawnie generujących się elementów na różnego rodzaju zaokrągleniach. Ponadto narzucono ograniczenia na dyskretyzację modelu w postaci minimalnej długości boku do 2 mm, co zapobiegło miejscowym zagęszczeniom siatki.

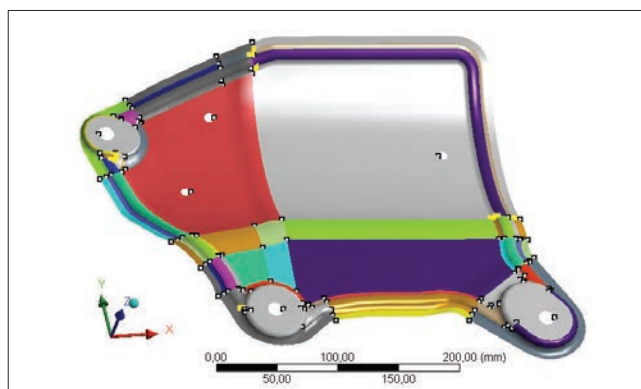


Fig. 10. Preparation of the topology of the geometry of the heat shield
Rys. 10. Przygotowanie topologii modelu osłony termicznej



Fig. 11. Edge division operation and finite element mesh in the place of mounting the heat shield
Rys. 11. Operacja podziału krawędzi i siatki elementów skończonych w miejscu montowania osłony termicznej

Aby poprawić jakość otrzymanych wyników, krawędzie otworów mocujących podzielono na 36 elementów za pomocą specjalnej funkcji „Edge Sizing”, co zapobiegło nadmiernemu zniekształcaniu się elementów. Następnie zastosowano funkcję „Inflate” do wygenerowania pięciu rzędów elementów skończonych. Jakość pozostałych elementów została poprawiona za pomocą funkcji pozwalającej modyfikować położenie węzłów.

Do oceny jakości siatki zastosowano funkcję „Element Quality”, która sprawdza jakość wygenerowanych elementów skończonych, przypisując im bezwymiarowy wskaźnik o wartości od 0 do 1, wyznaczony na podstawie poniższego równania (1). W wyniku opisanych operacji jakość elementów wygenerowanych w pobliżu miejsca montowania osłony zwiększyła się z 0,1 do powyżej 0,5 – wynik symulacji w tym miejscu nie powinien być zakłócony przez słabej jakości elementy skończone. Dane operacje zastosowano następnie do całego modelu osłony.

$$Jakość\ elementu = C \left(\frac{pole\ powierzchni\ elementu}{\sum (długość\ krawędzi\ elementu)} \right) \quad (1)$$

gdzie: stała dla elementu kwadratowego $C = 4$.

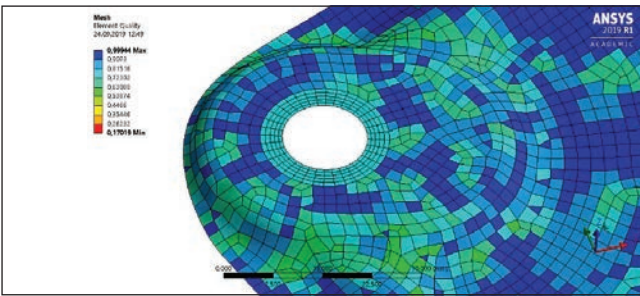


Fig. 12. The quality of the finite element mesh in the place where the shield is mounted after applying the above operations
Rys. 12. Jakość siatki elementów skończonych w miejscu montowania osłony po zastosowaniu wymienionych operacji

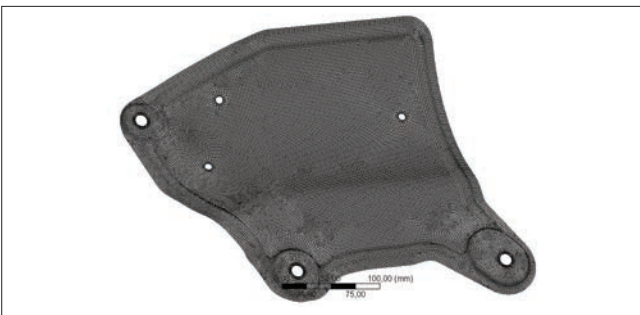


Fig. 13. Final version of the thermal shield geometry discretization
Rys. 13. Ostateczna wersja dyskretyzacji modelu osłony termicznej

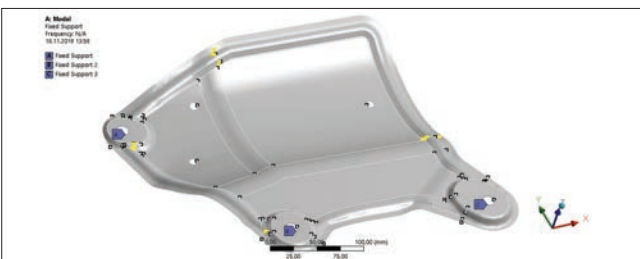


Fig. 14. Boundary conditions applied in the shield model
Rys. 14. Warunki brzegowe zastosowane w modelu osłony

Aby odzwierciedlić przykręcenie osłony do ramy w symulacji MES, zastosowano warunki brzegowe odbierające wszystkie stopnie swobody. W tym celu na każdej krawędzi otworu mocującego zastosowano funkcję „Fixed Support”.

Wpływ na wartości drgań własnych ma również grubość osłony i mniej znacząco temperatura, w której działa osłona. Zestawiono więc wyniki symulacji dla różnej grubości i temperatury osłony (tablica IV i rys. 15), a dodatkowo (w tablicy V) dla porównania zestawiono początkowy i ostatni wariant (o największej wartości drgań własnych), dla których uzupełniająco przeprowadzono analizę modalną przy grubości osłony równej 1,5 mm.

Aby w uproszczeniu odnieść działanie silnika do częstotliwości drgań własnych osłon termicznych, przeliczono prędkości obrotowe silnika na odpowiadające

TABLE IV. The values of natural vibrations depending on the thickness of the casing

TABLICA IV. Wartości drgań własnych w zależności od grubości osłony

Wariant	Grubość osłony 2 mm [Hz]	Grubość osłony 2,5 mm [Hz]	Grubość osłony 3 mm [Hz]
Pierwszy	47,53	54,28	60,77
Drugi	46,53	53,33	59,90
Trzeci	55,51	62,63	69,43
Czwarty	80,73	88,54	95,55
Piąty	78,16	86,45	93,82
Szósty	80,22	88,40	95,75
Siódmy	79,80	88,72	96,80
Ósmy	84,51	92,86	100,41
Dziewiąty	89,78	98,25	105,59

TABLE V. The values of natural vibrations depending on the thickness of the casing – the first and the ninth version

TABLICA V. Wartości drgań własnych w zależności od grubości osłony – pierwszy i dziewiąty wariant

Wariant	Grubość osłony 1,5 mm [Hz]	Grubość osłony 2 mm [Hz]	Grubość osłony 2,5 mm [Hz]	Grubość osłony 3 mm [Hz]
Pierwszy	40,28	47,53	54,28	60,77
Dziewiąty	79,58	89,78	98,25	105,59

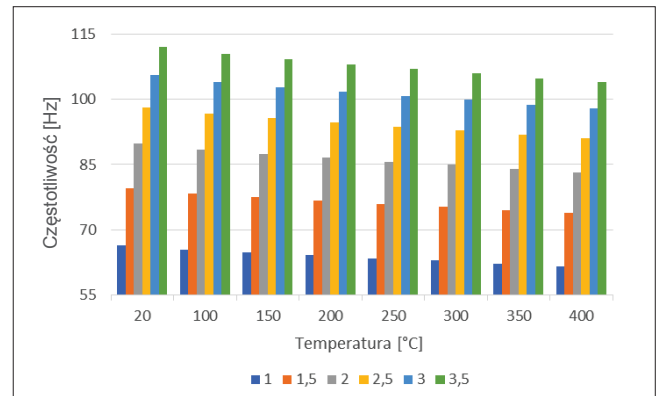


Fig. 15. The value of free vibrations of the last cover model depending on the thickness and temperature
Rys. 15. Wartość drgań własnych ostatniego modelu osłony w zależności od grubości i temperatury

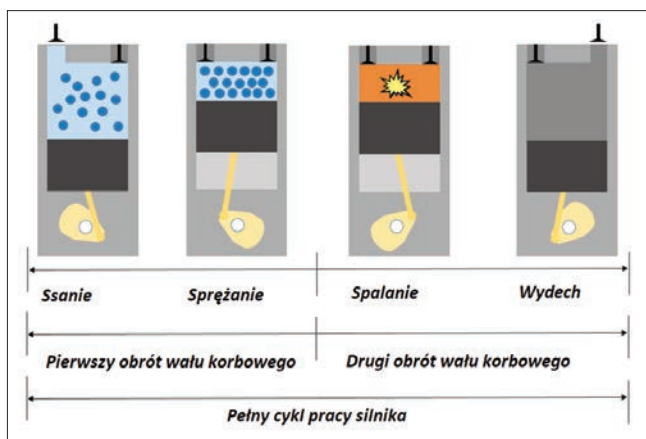


Fig. 16. Diagram of a four-stroke engine operation
Rys. 16. Schemat działania silnika czterosuwowego

im – generowane przez silnik – częstotliwości drgań. Zastosowano następującą zależność (2):

$$\text{częstotliwość pracy silnika [Hz]} = \frac{\text{obroty [RPM]} \cdot \text{liczba zdarzeń na obrót wału korbowego}}{60} \quad (2)$$

Pełny cykl pracy silnika składa się z suwów ssania, sprężania, spalania i wydechu. Podczas realizacji całego cyklu dla jednego cylindra (jednego zdarzenia) wykonywane są dwa obroty wału korbowego. Tak więc jeden obrót wału korbowego to połowa cyklu (1/2 zdarzenia) dla jednego cylindra. Silnik 3.0 V6 163 KM (120 KW) jest czterosuwowy, składa się z sześciu cylindrów. Połowa zdarzenia zachodzi w sześciu cylindrach (sześć cylindrów razy 1/2 zdarzenia), a więc liczba zdarzeń na obrót wału korbowego wynosi trzy.

Na podstawie zależności (2) obliczono częstotliwości działania silnika odpowiadające określonym prędkościom obrotowym wału korbowego (tablica VI). Następnie wyznaczono obroty silnika odpowiadające częstotliwościom drgań własnych, które umieszczono na wykresie Campbella. Na wykresie przedstawiono pierwsze częstotliwości drgań własnych obu wariantów (rys. 17). W przypadku podanych prędkości obrotowych teoretycznie zajdzie zjawisko rezonansu w obu wariantach osłony termicznej.

Aby zilustrować wpływ optymalizacji kształtu osłony termicznej na jej izolację drganiową, zestawiono wykresy przedstawiające zjawisko rezonansu dla

Table VI. Converting the natural frequency into engine revolutions

Tablica VI. Przeliczenie częstotliwości drgań własnych na obroty silnika

Wariant osłony termicznej	Zdarzenia	
	1,5 zdarzenia [obr/min]	3,0 zdarzenia [obr/min]
Pierwszy	2430,8	1215,4
Dziewiąty	3183,2	1591,6

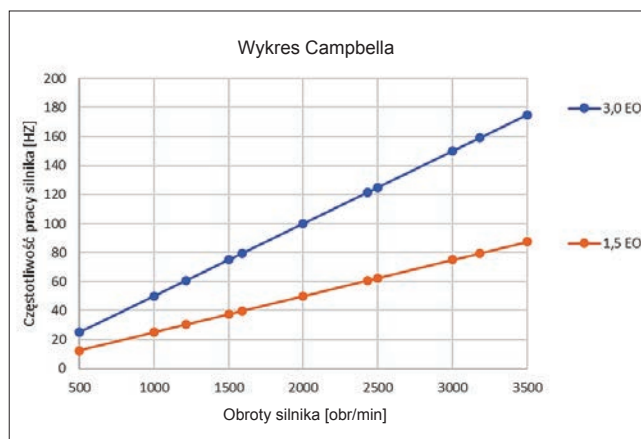


Fig. 17. Graph of the dependence of the frequency of operation of the internal combustion engine as a function of RPM

Rys. 17. Wykres zależności częstotliwości pracy silnika spalinowego w funkcji obrotów

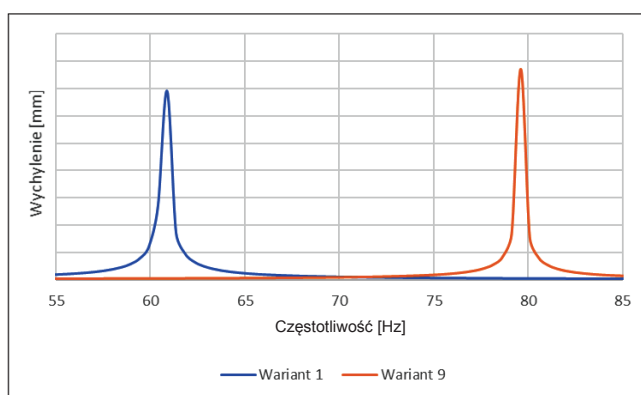


Fig. 18. Comparison of the resonant frequencies of the first and the last variant

Rys. 18. Porównanie częstotliwości rezonansowych pierwszego i ostatniego wariantu osłony

częstotliwości rezonansowej pierwszej i ostatniej osłony (rys. 18). Wartości amplitudy drgań przedstawiono jedynie poglądowo i nie odnoszą się one do rzeczywistych warunków, gdyż wymuszenie pochodzące od silnika jest znacznie bardziej zawiłym zjawiskiem i nie zostało zasymulowane w badaniach.

Dalej przedstawiono graficznie sześć pierwszych postaci drgań własnych osłon (tablica VI, rys. 19–21). Pierwsza postać drgań własnych ma największe znaczenie, gdyż występuje w zakresie typowej pracy silnika, tzn. od 0 do 3500 obr/min. Pozostałe częstotliwości postaci drgań własnych odpowiadają wartościom obrotów silnika, które nie występują podczas typowej jazdy samochodu.

TABLE VI. Vibration frequency of the six natural modes of the ninth model

TABLICA VI. Częstotliwość drgań sześciu postaci drgań własnych dziewiątego modelu

Postać drgań własnych	Częstotliwość drgań własnych [Hz]
Pierwsza	79,59
Druga	300,62
Trzecia	370,99
Czwarta	474,58
Piąta	643,39
Szósta	659,88

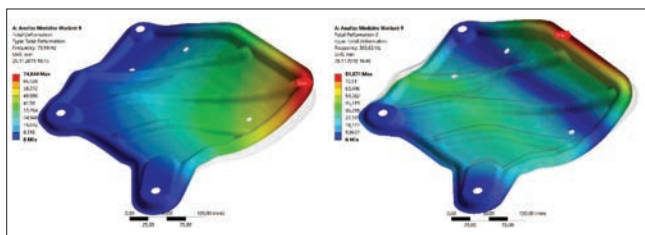


Fig. 19. The first and the second form of natural vibrations

Rys. 19. Pierwsza i druga postać drgań własnych

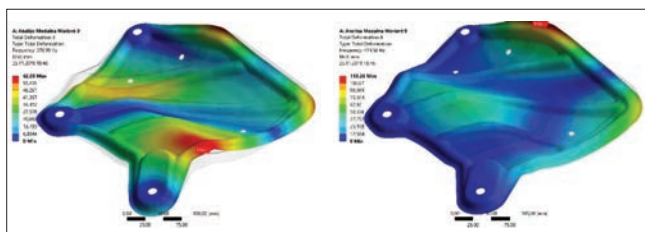


Fig. 20. The third and the fourth form of natural vibrations

Rys. 20. Trzecia i czwarta postać drgań własnych

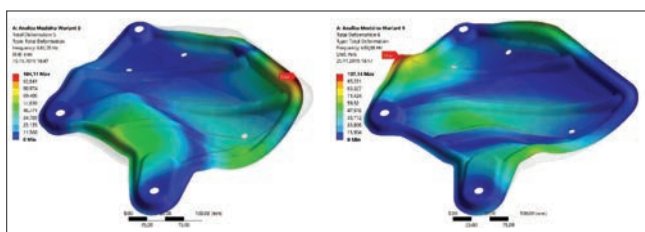


Fig. 21. The fifth and the sixth form of natural vibrations

Rys. 21. Piąta i szósta postać drgań własnych

Podsumowanie i wnioski

W wyniku przeprowadzonych analiz modalnych zoptymalizowano kształt osłony termicznej, podwyższając wartości pierwszej częstotliwości rezonansowej o 30,95% w stosunku do wartości przy pierwotnym kształcie osłony. Ostatecznie wartość częstotliwości rezonansowej wyniosła 79,56 Hz i spełniła wymagany próg o wartości – minimum 75 Hz. W rezultacie ryzyko wystąpienia zjawiska rezonansu, które mogłoby się przyczynić do zwiększenia emisji hałasu, zostało znacznie zmniejszone. Grubość osłony została zredukowana z 3 mm do 1,5 mm, co przyczyniło się do zmniejszenia masy osłony z 2,278 kg do 1,139 kg, czyli o 50%.

LITERATURA

- [1] Wyleżoł M. „CATIA: Podstawy modelowania powierzchniowego i hybrydowego”. Gliwice: Grupa Wydawnicza Helion, 2021.
- [2] Skarka W., Mazurek A. „CATIA. Podstawy modelowania i zapisu konstrukcji”. Gliwice: Wydawnictwo Helion, 2005.
- [3] Halliday D., Resnick R., Walker J. „Podstawy fizyki”, t. 1. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2006.
- [4] DIN EN 10088-1:2014 Stainless steels – Part 1: List of stainless steels.
- [5] Straczewski Z. „Drgania mechaniczne”, t. 1. Warszawa: Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 2010.
- [6] Kąkol Z. „Fizyka”, t. 1. Kraków: Wydawnictwo Akademii Górniczo-Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie, 2018.
- [7] Żółtowski M. „Operacyjna analiza modalna w badaniu konstrukcji budowlanych”, t. 1. Bydgoszcz: Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, 2012. ■