

Przedmiot:

Imię i Nazwisko:

Nr indeksu:

Kierunek: IBM, semestr 4

Data: 2020-05-07

Temat:

Opracowania przesłać drogą elektroniczną.

Nazwa pliku: IBM4-L-Nazwisko_studenta-CzescX (X=1,2 lub 3).

(PRZYKŁADOWE OPRACOWANIE W WERSJI ROZBUDOWANEJ TREŚCIOWO)

TEMAT: ANALIZA MES NAPRĘŻEŃ CHŁODNICZY POWIETRZA DOŁADOWEGO

1. Wprowadzenie

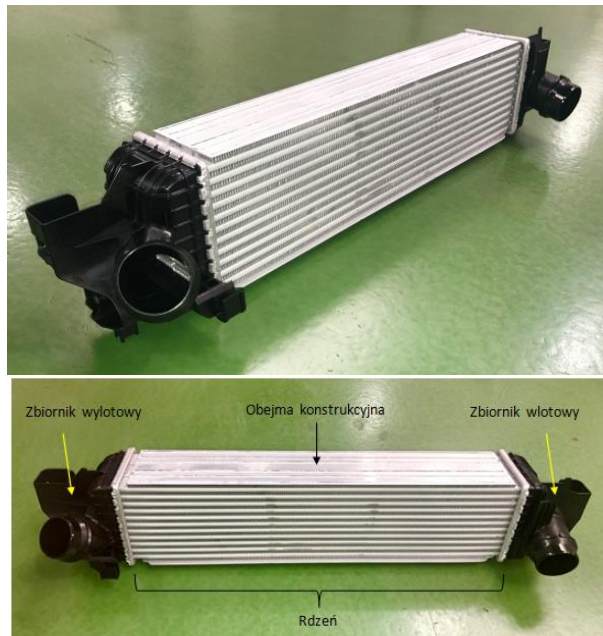
Konstrukcje inżynierskie podczas codziennego użytkowania podlegają różnego rodzaju obciążeniom, dlatego przed zatwierdzeniem konstrukcji danego produktu do produkcji seryjnej należy dokonać jej walidacji. Walidacja taka z reguły polega na przeprowadzeniu szeregu testów fizycznych odzwierciedlających zjawiska jakie mogą zachodzić podczas użytkowania w danej konstrukcji. Zanim jednak powstanie fizycznie konstrukcja takiego prototypu należy w pierwszej kolejności sprawdzić jeszcze samą jej koncepcję. Można tego dokonać badaniami doświadczalnymi, które już w tej fazie wymagają budowy kosztownego prototypu lub dokonać obliczeń danej koncepcji metodami teoretycznymi: analitycznymi lub numerycznymi. Analiza doświadczalna w której buduje się prototyp jest czasochłonna i bardzo kosztowna. Jest to szczególnie odczuwalne kiedy podczas badań doświadczalnych testuje się różne warianty danej koncepcji konstrukcji. Badania teoretyczne natomiast polegają na sformułowaniu odpowiedniego opisu matematycznego a następnie rozwiązanie tak postawionego zadania. W przypadku metody analitycznej dla większości przypadków trudno wówczas o rozwiązanie ścisłe. Tego typu ograniczenia wymusiły rozwój różnych metod numerycznych. Obecnie większość obliczeń dla zagadnień z zakresu wytrzymałości konstrukcji wykonywanych jest za pomocą algorytmów komputerowych bazujących na metodach przybliżonych.

1.1 Opisanie analizowanego problemu.

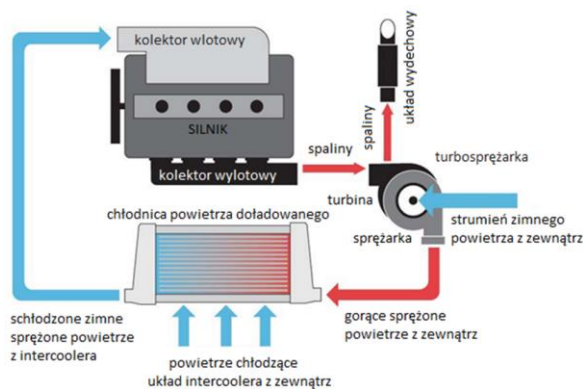
Zadaniem chłodnicy powietrza doładowanego która jest przedmiotem tego artykułu jest obniżenie temperatury sprężonego powietrza wpływającego do jej układu. W wyniku tego zwiększa się jego gęstość i większa ilość powietrza trafia do komory spalania w rezultacie czego otrzymuje się większą moc i sprawność z danej pojemności silnika. Doładowanie stosuje się głównie w silnikach Diesla, ale obecny trend pokazuje, że coraz więcej aut z silnikami benzynowymi jest wyposażanych w system turbo doładowania. Jednym z kluczowych testów walidacyjnych weryfikujących wytrzymałość konstrukcji chłodnic powietrza doładowanego na drgania mechaniczne jest test wibracji. Opracowanie przedstawia zastosowanie programu komputerowego Abaqus FEA do symulacji właściwości mechanicznych zbiornika z tworzywa sztucznego chłodnicy powietrza doładowanego, który pękł podczas fizycznego testu.

2. Model geometryczny (opis, rysunki, wymiary).

Chłodnice powietrza doładowanego będącą przedmiotem tej rozprawy doktorskiej i jej budowę przedstawiono na rysunku 1.3. Zadaniem chłodnicy powietrza doładowanego jest obniżenie temperatury sprężonego powietrza wpływającego do jej układu. W wyniku tego zwiększa się jego gęstość i większa ilość powietrza trafia do komory spalania w rezultacie czego otrzymuje się większą moc i sprawność z danej pojemności silnika. Sprężenie powietrza odbywa się w układzie turbosprężarki składającej się z turbiny i sprężarki, których to wirniki osadzone są na wspólnym wale. Dzięki temu spaliny pochodzące z komory spalania silnika napędzając turbinę wprawiają również w ruch sprężarkę, która spręża powietrza z zewnątrz trafiające następnie do układu chłodnicy. W efekcie sprężenia jak i kontaktu z rozgrzaną turbosprężarką temperatura powietrza wzrasta powodując spadek jego gęstość, stąd też konieczność chłodzenia go w układzie chłodnicy. Doładowanie stosuje się głównie w silnikach Diesla, ale obecny trend (ang.) „downsizngu” pokazuje, że coraz więcej aut z silnikami benzynowymi jest wyposażanych w system turbo doładowania. Aplikację chłodnicy w układzie turbo doładowania silnika samochodu przedstawia rysunek 1.4.

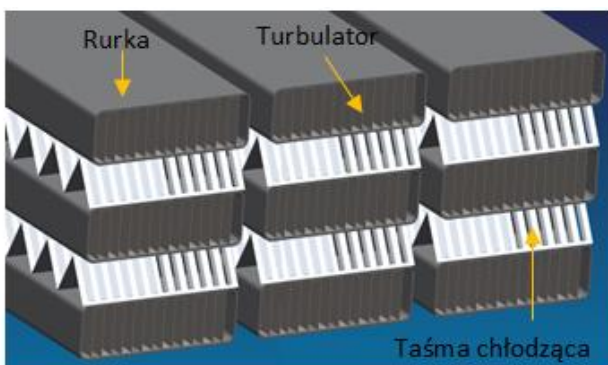


Rys. 1.3 Chłodnica powietrza doładowanego



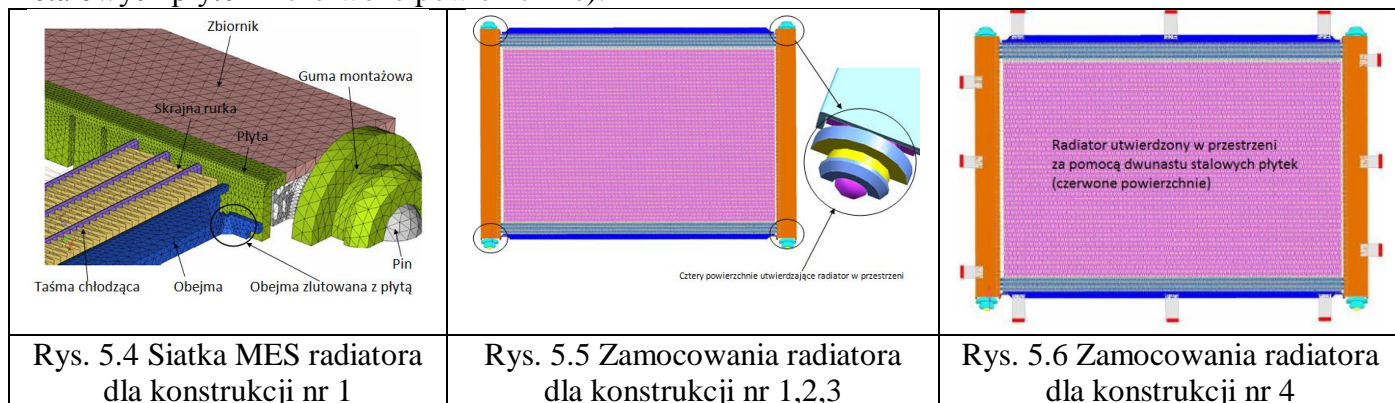
Rys. 1.4 Układ chłodzenia powietrza doładowanego

Chłodnica powietrza doładowanego składa się ze zbiornika wlotowego i wylotowego z tworzywa sztucznego, które są montowane na aluminiowym rdzeniu. Rdzeń natomiast jest to układ składający się z rurek, turbulatorów, taśm chłodzących oraz dwóch obejm i płyt sitowych. Rurki z umieszczonym w nich turbulatorem podczas montażu rdzenia są nabijane obustronnie w otwory (tzw. sloty) płyt. Obejmy umożliwiają skompresowanie całego układu rdzenia chłodnicy podczas jego montażu oraz zapobiegają również niszczeniu skrajnych taśm podczas dalszych manipulacji rdzeniem. Szczelność całego układu rdzenia jest uzyskiwana przez proces lutowania w piecu za pomocą specjalnych ramek lutowniczych bazowanych na obejmach. W rowku płyty sitowej podczas zaciskania zbiorników montowana jest uszczelka zapewniającą szczelność układu rdzeń-zbiornik (Rys. 1.5 – 1.6).

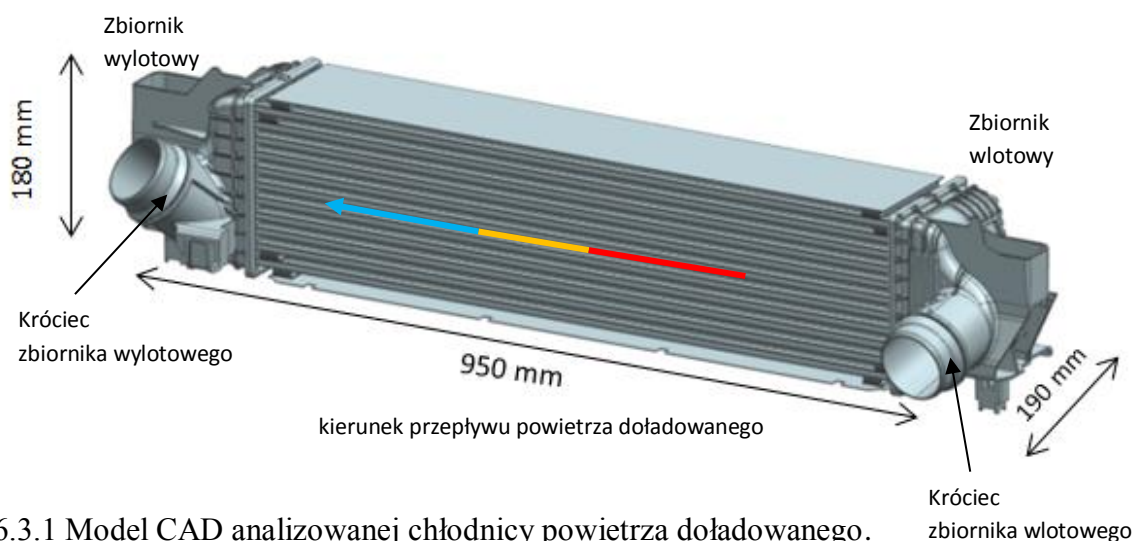


Rys. 1.5 Układ rdzenia rurka-taśma

Rysunek 5.4 przedstawia siatkę MES wykonaną dla konstrukcji radiatora numer 1 pozwalającą zrozumieć różnice pomiędzy czterema rodzajami analizowanych w symulacji konstrukcji. Rysunki 5.5 i 5.6 pokazują odpowiednio różnice w zamocowaniu pomiędzy konstrukcjami 1, 2 i 3 (utwierdzenie konstrukcji w przestrzeni na czterech gumach montażowych – żółte powierzchnie) a konstrukcją radiatora numer 4 (12 metalowych płytek – czerwone powierzchnie).



Na rysunku 6.3.1 został przestrzenny model przestrzenny CAD analizowanej chłodnicy powietrza doładowanego wykonany w oprogramowaniu NX firmy Siemens PLM Software. Natomiast rysunek 6.3.2 przedstawia odpowiadający mu model MES chłodnicy. Uproszczenie modelu chłodnicy powietrza doładowanego w pierwszej fazie polegały na zastąpieniu elementów bryłowych rdzenia elementami powłokowymi. Rurka, turbulator, obejma i taśma chłodząca w analizie została założona jako elementy powłokowe. Kolejna faza uproszczenia modelu polegała na zlikwidowaniu wszelkich elementów nie mające wpływu na wartości otrzymanych wyników, ale mogące jednocześnie zakłócić otrzymany obraz symulacji. W związku z tym usunięte wszelkie ostre krawędzie, nieciągłości modelu, fazowania oraz zbędne promienie. Z taśmy chłodzącej usunięto także żaluzje znajdujące się na każdej stronie fali taśmy.



Rys. 6.3.1 Model CAD analizowanej chłodnicy powietrza doładowanego.

3. Model matematyczny problemu (w tym równania i warunki brzegowe lub początkowe i brzegowe).

3.1. Model liniowej teorii sprężystości materiału - związek konstytutywny

Some of the theory is developed using tensor notation. In most cases, explicit index notation is avoided. This means that the order of a tensor usually must be understood from the context. As an example, Hooke's law for linear elasticity is usually written like

$$\mathbf{S} = \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon}.$$

Here, the stress tensor \mathbf{S} and the strain tensor $\boldsymbol{\varepsilon}$ are second order tensors, while the constitutive tensor \mathbf{C} is a fourth order tensor.

In a notation where the indices are shown, the same equation would read

$$S_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl},$$

where the Einstein summation convention has been used as a shorthand for

$$S_{ij} = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 C_{ijkl} \varepsilon_{kl}.$$

Due to the symmetry, the elasticity tensor can be completely represented by a symmetric 6-by-6 matrix as:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} & D_{15} & D_{16} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} & D_{25} & D_{26} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} & D_{35} & D_{36} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} & D_{45} & D_{46} \\ D_{51} & D_{52} & D_{53} & D_{54} & D_{55} & D_{56} \\ D_{61} & D_{62} & D_{63} & D_{64} & D_{65} & D_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C^{1111} & C^{1122} & C^{1133} & C^{1112} & C^{1123} & C^{1113} \\ C^{1122} & C^{2222} & C^{2233} & C^{2212} & C^{2223} & C^{2213} \\ C^{1133} & C^{2233} & C^{3333} & C^{3312} & C^{3323} & C^{3313} \\ C^{1112} & C^{2212} & C^{3312} & C^{1212} & C^{1223} & C^{1213} \\ C^{1123} & C^{2223} & C^{3323} & C^{1223} & C^{2323} & C^{2313} \\ C^{1113} & C^{2213} & C^{3313} & C^{1213} & C^{2313} & C^{1313} \end{bmatrix}$$

which \mathbf{D} is the elasticity matrix.

In the case of the isotropic material and elastic moduli the elasticity matrix becomes

$$\mathbf{D} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}.$$

The elasticity matrix for isotropic materials can be written in terms of Lamé parameters λ and μ , as follows:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix}.$$

3.2. Równanie Naviera

The Navier's equation of motion with the linear constitutive relation between stresses and deformations is:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} - \nabla \cdot \mathbf{S} = \mathbf{F} \quad ()$$

where: ρ is the density, \mathbf{u} is the vector of displacements, \mathbf{S} is the stress tensor, \mathbf{F} is the volume force vector. The Navier's equation of motion with the linear constitutive relation between stresses and deformations is:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} - (\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u}) - (3\lambda + 2\mu) \alpha \nabla \cdot T = \mathbf{F} . \quad ()$$

4. Materiały.

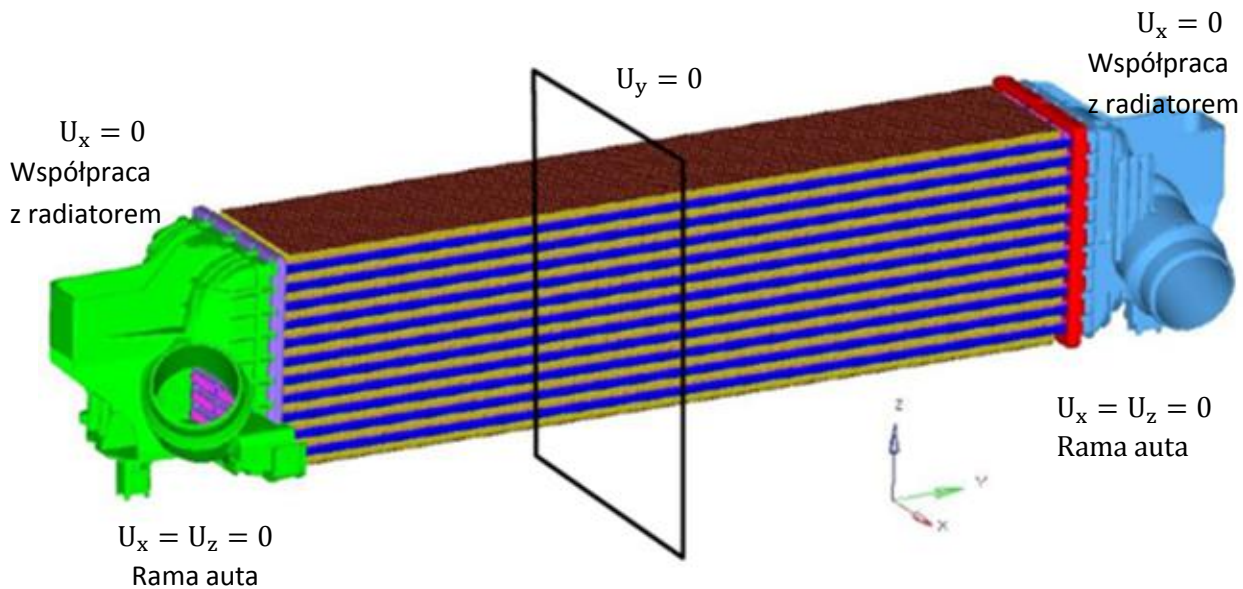
W przeprowadzonej symulacji komputerowej dla wszystkich komponentów wchodzących w skład chłodnicy powietrza doładowanego przyjęto właściwości materiałowe na podstawie empirycznie uzyskanych i interpolowanych danych, zarówno tych pozyskanych od dostawców danego materiału jak i danych z własnych opracowań. W tabeli 6.4.1 znajduje się lista komponentów, które tworzą opracowany model komputerowy chłodnicy wraz z rodzajem użytego do ich budowy materiału oraz wartościami danej własności fizycznej danego materiału, odpowiadającej założonej w analizie temperaturze pracy. W przeprowadzonej symulacji komputerowej testu cykli termicznych jako uproszczenie przyjęto stałą wartość dla właściwości termicznych komponentów chłodnicy powietrza doładowanego. Dostęp do szczegółowych danych materiałowych danego podzespołu chłodnicy jak i odpowiednia interpolacja wartości tych danych na podstawie przeprowadzonych obliczeń i testów pozwala na uzyskanie bardziej precyzyjnych wyników analizy.

Tabela 6.4.1 Właściwości fizyczne komponentów chłodnicy powietrza doładowanego

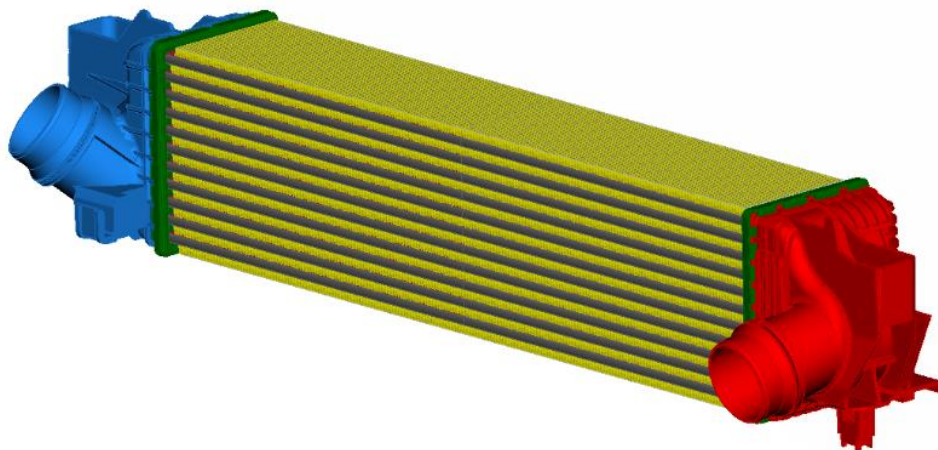
Komponent			Właściwości fizyczne [jednostka]				
Nr	Nazwa	Materiał	Gęstość ρ [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]	Moduł Younga E [MPa]	Współczynnik Poissona ν [-]	Przewodność cieplna λ [$\frac{\text{W}}{\text{mK}}$]	Rozszerzalność cieplna α [$\frac{10^{-6}}{\text{K}}$]
1	Zbiornik wlotowy	PA46-GF40	1510	6 700	0.35	0.35	50.0
2	Zbiornik wylotowy	PA66 GF35	1410	3 500	0.35	0.35	65.0
3	Płyta sitowa	0370-O	2700	57 000	0.33	237	23.4
4	Taśma chłodząca	HF311-H16	2700	70 000	0.33	237	24.4
5	Obejma	AA3003-O	2730	70 000	0.33	237	23.2
6	Rurka	FA7805-H24	2730	70 000	0.33	237	23.2
7	Turbulator	AA3003-H18	2670	70 000	0.33	237	24.4

5. Metody

Układ współrzędnych i stopni swobody modelu chłodnicy powietrza doładowanego przyjęty w analizie komputerowej został przedstawiony na rysunku 7.1.1, odpowiada on układowi stanowiska walidacyjnego odzwierciedlając rzeczywiste przemieszczenia występujące podczas testu cykli termicznych. Kontakt pomiędzy zbiornikiem a płytą sitową przeprowadzonej symulacji komputerowej został zdefiniowany pomiędzy powierzchnią wewnętrzną łapek płyty sitowej i górną powierzchnią stopy zbiornika. Kontakt ten rozchodzi się po całym obwodzie na każdej ze stron chłodnicy. Ze względu na przyjęte uproszczenia w symulacji, uszczelka oznaczona kolorem niebieskim na rysunku 7.1.2 została pominięta w przeprowadzonej analizie, dlatego nie uległa dyskretyzacji. Siatka zbiorników oraz płyt sitowych została wygenerowana z elementów bryłowych czworościennych (ang. tetrahedral, tetra). Na rysunku 7.1.3 został przedstawiony model zbiornika wlotowego chłodnicy powietrza doładowanego a na rysunku 7.1.4 wygenerowana dla niego siatka MES (1 017 545 elementów). Z kolei rysunek 7.1.5 przedstawia model zbiornika wylotowego a rysunek 7.1.6 utworzoną dla niego siatkę MES 1 180 230 elementów). W obu przypadkach w związku zbyt dużą liczbą elementów przedstawiono jedynie fragment siatki dla danego zbiornika.

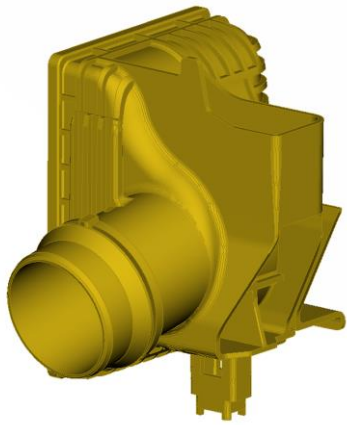


Rys. 7.1.1 Układ stopni swobody i spórzędnych modelu chłodnicy

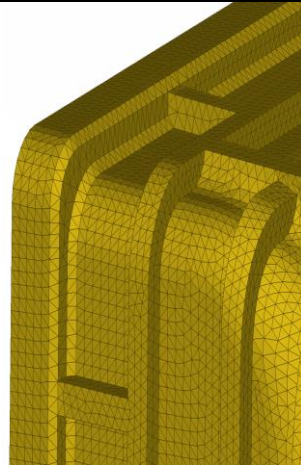


Rys. 7.1.2 Model MES analizowanej chłodnicy powietrza doładowanego

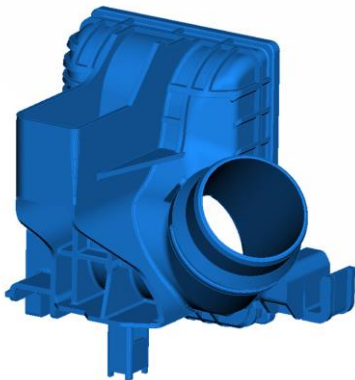
W chłodnicy powietrza doładowanego taka sama płyta sitowa jest stosowana na stronie wlotowej i wylotowej chłodnicy. Model płyty został przedstawiony na rysunku 7.1.7. Płyta taka składa się z trzech rzędów po jedenaście otworów (ang. Slot) w każdym, w które umieszczane są w procesie montażu rdzenia rurki z nabitym w środku turbulatore. Ze względu na ogromną liczbę elementów skończonych płyty sitowej wynoszącą 1 843 224 został pokazany jedynie jej fragment siatki MES wraz siatką tworzącą zbiornik wlotowy oraz elementami powłokowymi tworzącymi rdzeń chłodnicy (Rys. 7.1.8).



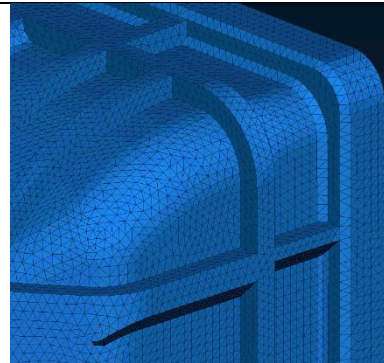
Rys. 7.1.3 Model zbiornika wlotowego chłodnicy powietrza doładowanego



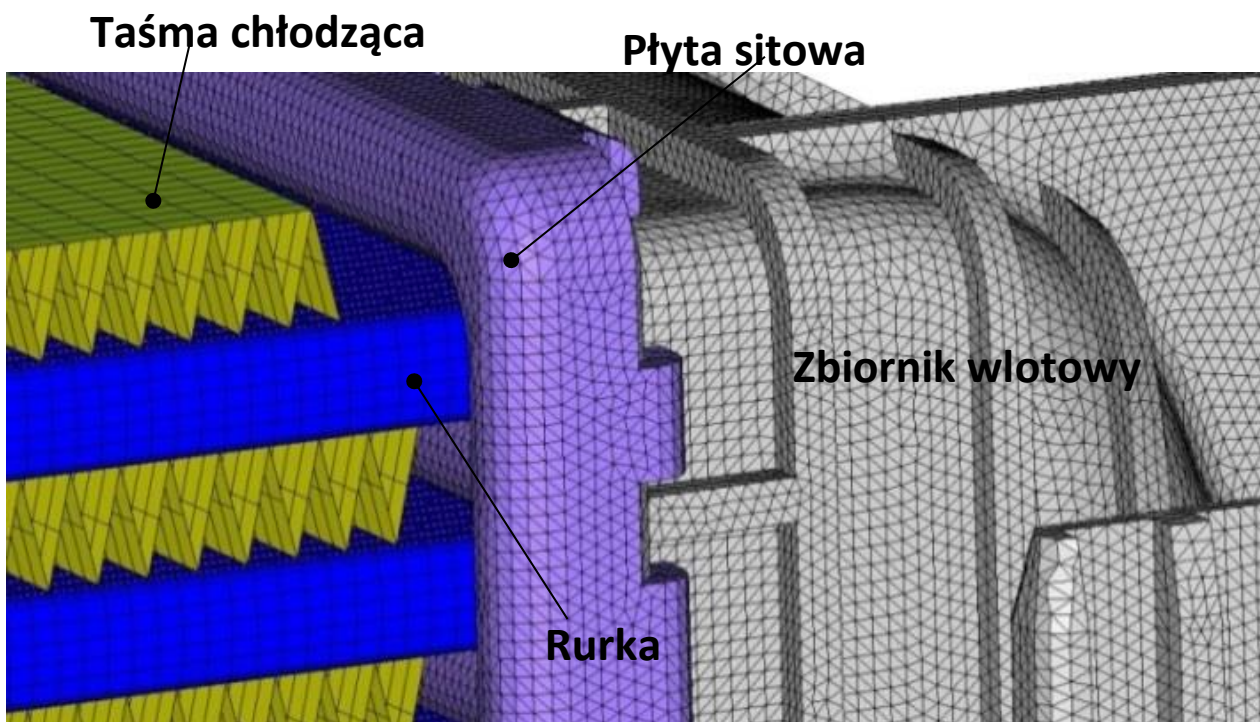
Rys. 7.1.4 Siatka mes modelu zbiornika wlotowego



Rys. 7.1.5 Model zbiornika wylotowego chłodnicy powietrza doładowanego



Rys. 7.1.6 Siatka mes modelu zbiornika wylotowego



Rys. 7.1.8 Siatka elementów 2D i 3D chłodnicy

W tabeli 7.1.1 przedstawiono rodzaje elementów skończonych użytych do dyskretyzacji komponentów chłodnicy powietrza doładowanego w celu obliczenia rozkładu temperatury oraz pól odkształceń i naprężeń występujących w chłodnicy podczas testu cykli termicznych. Natomiast w tabeli 7.1.2 przedstawiono zestawienie liczby elementów skończonych tworzących model MES poszczególnych komponentów chłodnicy powietrza doładowanego.

Tabela 7.1.1 Rodzaje elementów skończonych użyte w symulacji

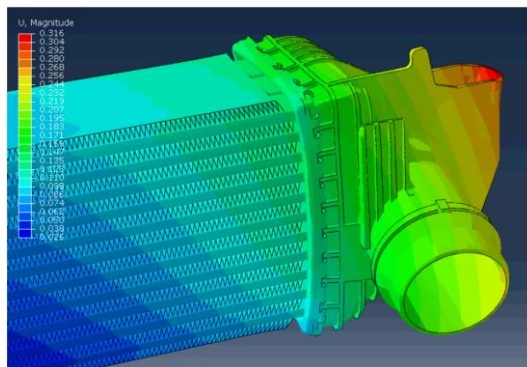
Modele elementów skończonych dla symulacji testu cykli termicznych		
	Etap 1	Etap 2
Komponent	Heat transfer: rozkład temperatury	3D Stress: Odkształcenia i naprężenia
Zbiornik	Element bryłowy czworościenny (ang. tetrahedron, tetra): DC3D10 zawierający 10 węzłów.	Element bryłowy czworościenny (ang. tetrahedron, tetra): C3D10 zawierający 10 węzłów.
Płyta sitowa	Każdy węzeł posiada jeden stopień swobody, którym jest temperatura	Każdy węzeł posiada trzy stopnie swobody, którymi są przemieszczenia w osi x, y, z
Rurka		
Turbulator	Element powłokowy czworoboczny (ang. quadrilateral, quad) DS4 zawierający 4 węzły. Każdy węzeł posiada jeden stopień swobody, którym jest temperatura	Element powłokowy czworoboczny (ang. quadrilateral, quad) S4 zawierający 4 węzły. Każdy węzeł posiada sześć stopni swobody, którymi są trzy przemieszczenia w osi x, y, z i trzy obroty wokół tych osi: rotx, roty, rotz
Taśma chłodząca		
Obejma		

Tabela 7.1.2 Liczba elementów skończonych w symulacji

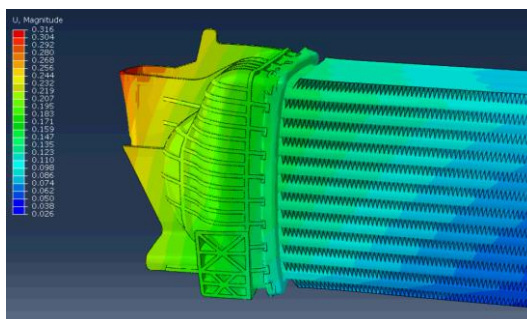
Nr	Nazwa komponentu	Liczba komponentów wchodzących w skład budowy chłodnicy powietrza doładowanego	Liczba elementów skończonych dyskretyzujących pojedynczy komponent	Liczba elementów skończonych dyskretyzujących cały układ komponentów	Całkowita liczba elementów skończonych dyskretyzująca chłodnicę powietrza doładowanego
1	Zbiornik wlotowy	1	1 017 545	1 017 545	8 273 003
2	Zbiornik wylotowy	1	1 180 230	1 180 230	
3	Płyta sitowa	2	1 843 224	3 686 448	
4	Rurka	33	21 924	723 492	
5	Turbulator	33	33 936	1 119 888	
6	Taśma chłodząca	12	42 012	504 144	
7	Obejma	2	20 628	41 256	

6. Obliczenia i wyniki

Na rysunkach 7.1.18 i 7.1.19 przedstawiono obliczone odkształcenia jakim ulega chłodnica podczas symulowanego testu cykli termicznych. Przeprowadzono symulacja wskazała największe odkształcenia na stronie wlotowej chłodnicy.

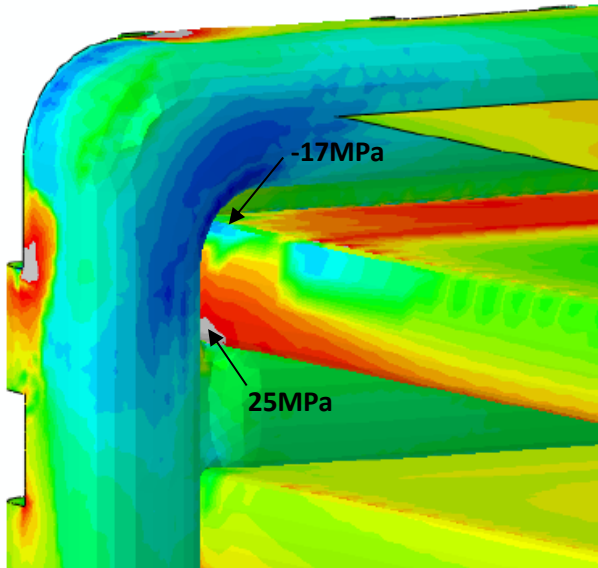


Rys. 7.1.18 Odkształcenia chłodnicy: wlot strona silnika, powiększenie x 200

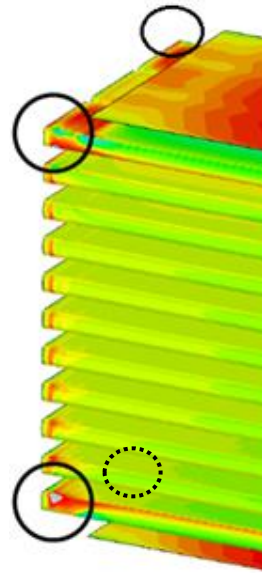


Rys. 7.1.19 Odkształcenia chłodnicy: wlot strona powietrza zewnętrznego, powiększenie x 200

Najbardziej obciążonymi miejscami okazały się promienie cztery skrajne rurki strony wlotowej chłodnicy w miejscu ich połączenia z płytą sitową (Rys. 7.1.20 a – d). Maksymalne naprężenia główne na promieniach wewnętrznych rurek wyniosły 25 MPa co dowodzi działaniu sił rozciągających w tym obszarze oraz -18 MPa na promieniach zewnętrznych rurek co świadczy o działaniu także sił ściskających. Na rysunku 7.1.19a przedstawiono wynik uzyskanego rozkładu maksymalnych naprężeń głównych w chłodnicy dla rurki numer 31 znajdującej się po stronie silnika.

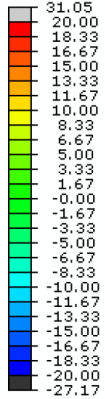


a. widok bez taśm chłodzących

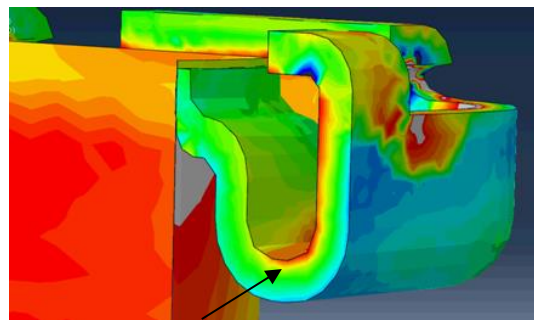


b. widok bez taśm chłodzących i płyty sitowej

Rozkład maksymalnych naprężeń głównych [MPa]



c. skala



Miejsce pęknięć:
wewnętrzny
promień rurki

d. przekrój płyta – rurka

Rys. 7.1.20 Rozkład maksymalnych naprężeń głównych skrajnych rurek strony wlotowej [MPa]

7. Wnioski i podsumowanie.

Zwiększenie promienia ścianki do 3 mm spowodowało zredukowanie maksymalnych naprężeń głównych w tym obszarze o 30 %, natomiast zwiększenie grubości materiału ścianki w obszarze łba śruby o 0.5 mm pozwoliło zmniejszyć naprężenia o 12 %. Wyniki symulacji pokryły się wynikiem testu wibracji, wskazując miejsce wystąpienia największych naprężeń w obszarze pęknięcia zbiornika. Po zmodyfikowaniu formy wtryskowej według przyjętych w analizie założeń problem pękającego zbiornika został wyeliminowany, co zostało potwierdzone poprzez kolejny przeprowadzony test wibracji.

Literatura

- Toure, S. Buyun S. 2017, Radiator Vibration Fatigue Analysis. Journal of Electronics Cooling and Thermal Control, 7: 8-21.
- A.F. Bower 2010, Applied Mechanics of Solids, CRC Press, Boca Raton, FL ([http:// www.solidmechanics.org](http://www.solidmechanics.org)).
-
-
- ...