

Dr inż. Waldemar DUDDA
Wydział Nauk Technicznych
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie
Mgr inż. Daniel CHMIEL

DOI: 10.17814/mechanik.2015.7.230

MODELOWANIE I ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA ŁOPATEK TURBINY

Streszczenie: W pracy przedstawiono budowę i zasadę działania turbosprężarek. W dalszej części artykułu opisano budowę modelu numerycznego turbiny z wykorzystaniem narzędzi CAD. Zasadniczą część pracy dotyczy analizy wytrzymałościowej łopatek wirnika. Analiza numeryczna obejmowała trzy etapy. Pierwszy etap polegał na wyznaczeniu naprężeń wyłącznie na skutek sił masowych przy zadanej prędkości obrotowej wirnika. Drugim etapem była analiza przepływu spalin przez turbinę. Trzeci etap to analiza numeryczna uwzględniająca zarówno siły masowe, jak i siły wynikające z oddziaływania strumienia spalin na łopatki.

MODELING AND STRENGTH ANALYSIS OF TURBINE BLADES

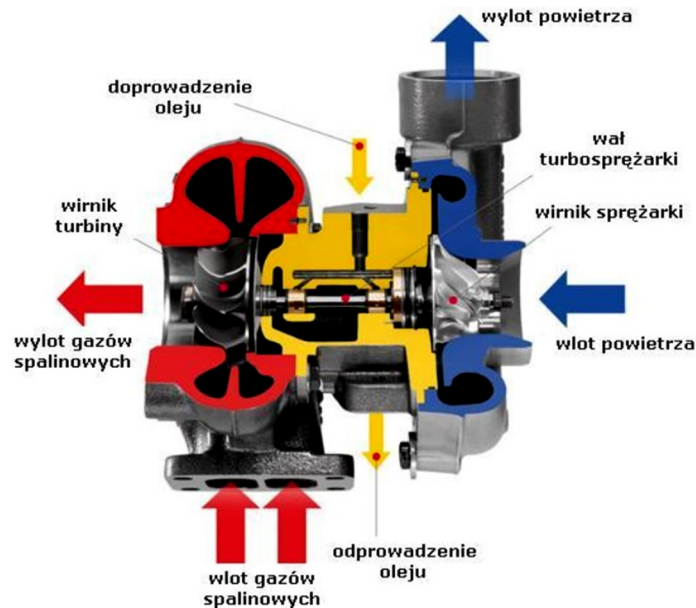
Abstract: Construction and operation principle of turbo-charger was presented in the paper. Further, the structure of turbo-charger numerical model using CAD tools was described. The essential part of this work concerns the strength analysis of turbine blades. Numerical analysis includes three stages. First one was based on the stress determination as the result of mass forces at the given rotational speed of rotor only. Second stage is the flow analysis of the exhaust gases through the turbo-charger. Third stage concerns numerical analysis considering both mass forces and forces resulting from the impact of the exhaust stream at the turbo-charger blades.

Słowa kluczowe: turbosprężarka, łopaska turbiny, naprężenia
Keywords: turbo-charger, turbine blade, stress

1. WPROWADZENIE

Pojęcie „turbosprężarka” powstało z połączenia nazw dwóch podstawowych podzespołów: turbiny i sprężarki. Zadaniem tego urządzenia jest dostarczenie do komory spalania silnika powietrza o ciśnieniu znacznie większym od ciśnienia otoczenia. Pozwala to po pierwsze zniwelować skutki oporów przepływu zasysanego powietrza przez system kanałów dolotowych, a po drugie – i istotniejsze – pozwala napełnić cylindry powietrzem o większej gęstości, czyli dostarczyć więcej powietrza do komory spalania. Dodatkowa ilość tak pozyskanego powietrza pozwala na podanie większej dawki paliwa, co skutkuje większą energią spalania w danym cyklu i tym samym większą mocą silnika. Z takiego samego silnika, lecz wyposażonego w turbosprężarkę, można uzyskać moc nawet o 100% większą niż z silnika wolnoobrotowego.

W systemach turbodoładowania silników samochodowych wykorzystuje się osiowo-promieniowe koła wirnikowe zarówno turbin, jak i sprężarek. Para takich kół osadzana jest na wspólnym wale, jednakże wirnik turbiny, wykonany najczęściej z wysoko stopowej stali żarowytrzymałej, połączony jest z wałem na stałe. Wirnik sprężarki jest najczęściej wykonany ze stopu aluminium. Wloty i wyloty obu wirników ograniczone są spiralnymi korpusami, najczęściej żeliwnym po stronie turbiny i aluminiowym po stronie sprężarki. Obudowy te połączone są po przeciwnych stronach trzeciego korpusu, w którym znajduje się system łożyskowania wspólnego wału. Korpus ten posiada również szereg kanałów stanowiących olejowy system smarowania i chłodzenia układu łożyskowania. W niektórych rozwiązaniach konstrukcyjnych posiada on również oddzielny system chłodzenia cieczą.



Rys. 1. Zasada działania turbosprężarki [9]

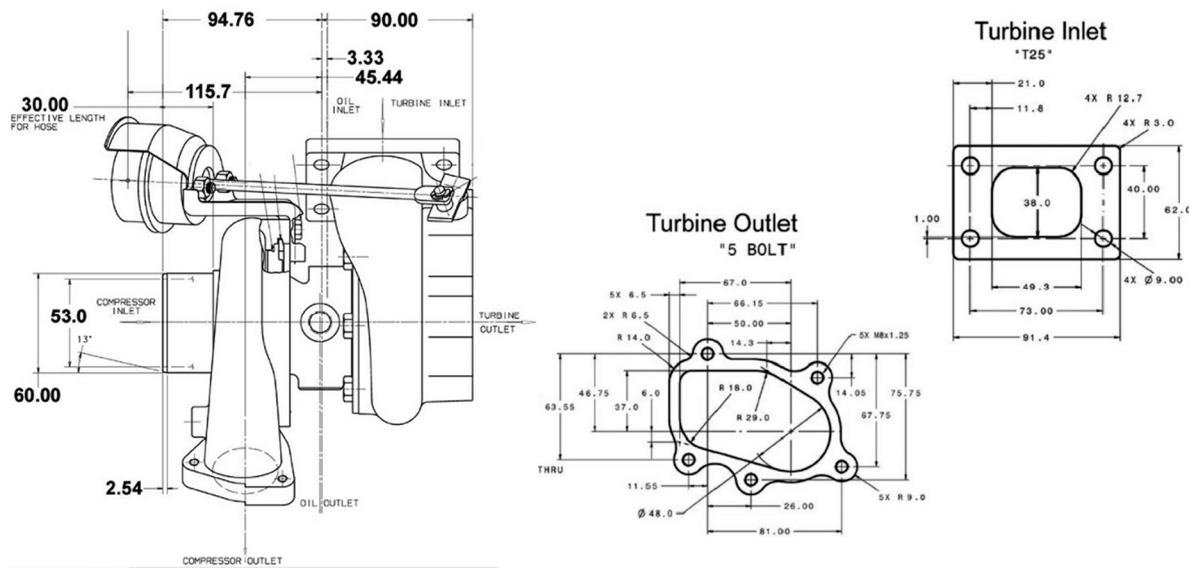
Spaliny z kolektora wylotowego doprowadzane są do wlotu korpusu turbiny (rys. 1), wprawiając w ruch jej wirnik (zwany stroną gorącą), który poprzez wspólny wał wprawia jednocześnie w ruch wirnik sprężarki, zwany stroną zimną. Ruch obrotowy wirnika sprężarki powoduje kompresję powietrza, które trafia do układu dolotowego i następnie jest wtłoczone bezpośrednio do komory spalania lub trafia do chłodnicy powietrza (*intercooler*), dodatkowo zwiększając jego gęstość tuż przed wtłoczeniem do komory spalania.

Jednymi z najbardziej obciążonych elementów turbosprężarki są łopatki wirnika turbiny, które wirują z prędkością obrotową przekraczającą nawet 100 tys. obr./min, a jednocześnie napierają na nie gazy spalinowe o wysokiej temperaturze. Celem pracy jest określenie, jak dalece możliwa jest analiza wytrzymałościowa łopatek turbiny przykładowej turbosprężarki z wykorzystaniem typowych programów CAD/CAE. W analizie podjęta będzie próba uwzględnienia zarówno naporu gazów, jak i sił odśrodkowych działających na łopatki.

2. MODEL NUMERYCZNY SPRĘŻARKI

Konstrukcją, na podstawie której został wykonany wirtualny model, jest turbosprężarka do samochodów osobowych firmy Garrett – model 54R serii GT28 [8]. Wirnik tej turbosprężarki osadzony jest na łożyskach kulkowych chłodzonych olejem oraz płaszczem wodnym. Średnica wirnika 53,90 mm [12].

Model numeryczny jest znacznie uproszczony i został ograniczony do elementów niezbędnych do wykonania analizy wytrzymałościowej łopatek, czyli do zamodelowania wirnika i korpusu turbiny. Należy nadmienić, że utworzony model korpusu na tyle odzwierciedla model bazowy, na ile pozwoliły udostępnione na stronie producenta podstawowe wymiary turbosprężarki GT2854R (rys. 2). O ile dostępne były ogólne wymiary zewnętrzne tej turbiny, o tyle wymiary wirnika, a zwłaszcza te opisujące kształt jego łopatek, okazują się pilnie strzeżoną tajemnicą producentów turbin. Model łopatek jest zatem opracowany na podstawie dostępnych zdjęć (np. rys. 3). Należy nadmienić, że ogólny kształt łopatek wirników turbin jest powtarzalny dla ogromnej ilości różnych rodzajów turbosprężarek.

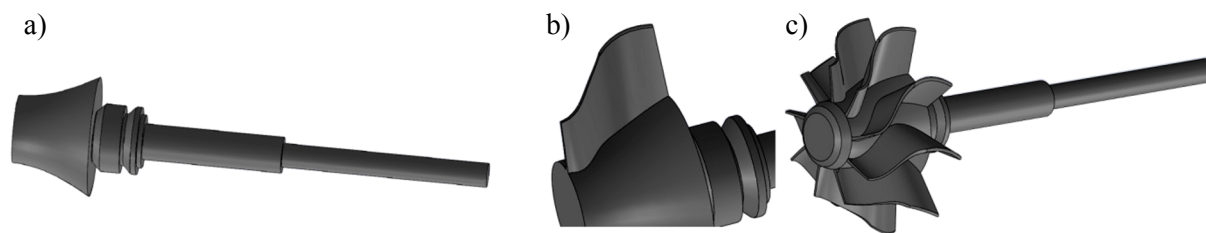


Rys. 2. Bazowe dostępne wymiary turbiny GT2854R [11]



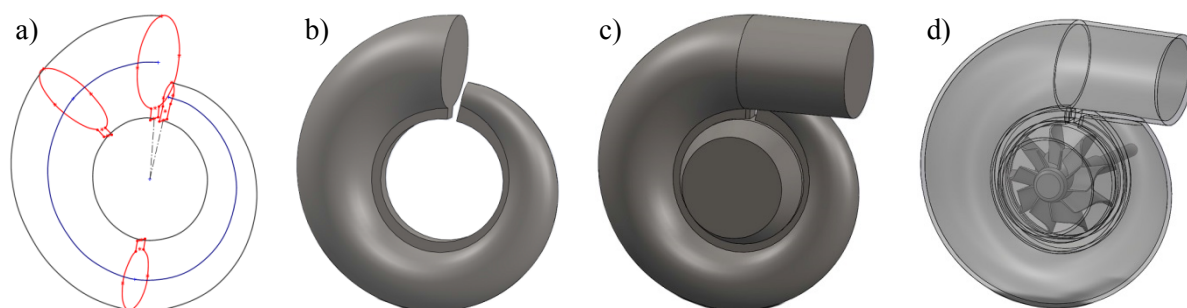
Rys. 3. Typowy zarys łopatek wirnika turbiny [10]

Do opracowania modelu 3D wykorzystano program SolidWorks [4], posiadający pełną gamę narzędzi do modelowania powierzchniowego i bryłowego. Ogromna ilość modułów wspomagających i narzędzi sprawia, że program ten znacznie ułatwia pracę konstruktora. Dużą zaletą programu jest możliwość wymiany plików z wieloma aplikacjami CAD/CAM/CAE, co umożliwia współpracę w ramach większych grup projektowych. Budowę modelu rozpoczęto od opracowania wału sprężarki wraz z bębnum (rys. 4a), na którym zostaną osadzone łopatki wirnika. Następnie zamodelowano pojedynczą łopatkę (rys. 4b), którą powielono za pomocą operacji „szyk kołowy” wokół bębna (rys. 4c).



Rys. 4. Kolejne etapy modelowania wirnika turbiny

Dysponując modelem wirnika oraz udostępnionymi podstawowymi wymiarami turbosprężarki, ukształtowano wlot i wylot turbiny. Wszystkie operacje zostały utworzone w złożeniu wraz z wirnikiem, aby dopasować wzajemne kształty i uniknąć kolizji elementów. Korpus turbiny, potocznie zwany cyklonem, został oparty na spirali Archimedeusza (rys. 5a). Utworzenie kilku profili opartych na tych spiralach pozwoliło na utworzenie bryły, która kształtem odzwierciedla obudowę turbiny (rys. 5b). Następnie dodano komorę wirnika i króciec dolotowy (rys. 5c).



Rys. 5. Kolejne etapy modelowania korpusu turbiny (a, b, c) i jego złożenie z wirnikiem (d)

Kolejne operacje, także jak „skorupa”, „wyciągnięcie” itp. pozwoliły na utworzenie całej obudowy, którą w złożeniu z wirnikiem przedstawiono na rysunku 5d. Modele wirnika i obudowy zostały połączone więzami odległości oraz koncentryczności tak, aby podczas symulacji obracający się wirnik nie dotykał skorupy korpusu. Odległość tylnej ściany wirnika od wewnętrznej ściany obudowy wynosi 0,5 mm, a odległość końca łopatek do wewnętrznej części komory 1,0 mm.

3. ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA ŁOPATEK WIRNIKA TURBINY

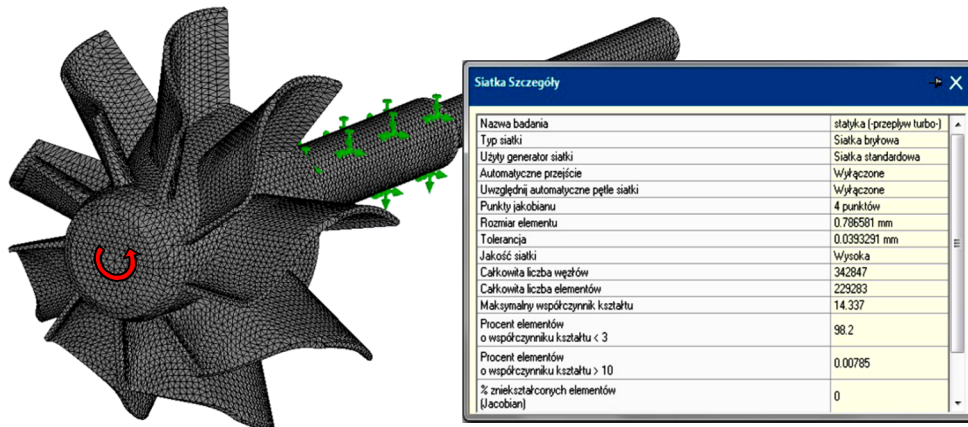
Analizę numeryczną podzielono na trzy etapy. Pierwszy etap polegał na wyznaczeniu naprężeń wyłącznie na skutek sił masowych wynikających z prędkości obrotowej wirnika. Został tu wykorzystany dodatek SolidWorks Simulation umożliwiający analizę wytrzymałościową metodą elementów skończonych (MES).

Drugim etapem była analiza przepływu przez turbinę z wykorzystaniem dodatku SolidWorks Flow Simulation. Pozwoliła ona określić siły i ciśnienia oddziałujące na powierzchnie łopatek. Ponieważ program SolidWorks umożliwia wymianę wyników między dwoma wspomnianymi wyżej dodatkami, stąd dane odnośnie do obciążenia łopatek, wynikające z analizy przepływu, zostały wyeksportowane do dodatku SolidWorks Simulation. Ten eksport danych umożliwił wyznaczenie naprężeń w wirniku turbiny za pomocą MES, wywołanych jedynie przepływem spalin. Korpus turbiny został wyłączony z analizy naprężeń.

Trzeci etap to analiza numeryczna MES uwzględniająca jednocześnie siły masowe wirującego wirnika, jak również zaimportowane obciążenie wynikające z oddziaływania strumienia spalin na łopatki tegoż wirnika.

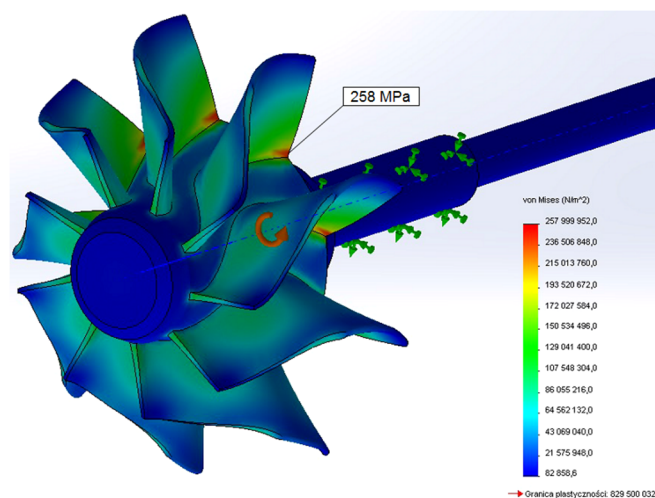
- Etap 1

Wykorzystując generator siatki bryłowej, podzielono model wirnika na 229 283 elementy skończone rozpięte na 342 847 węzłach. Dyskretyzację modelu, jak również jej pozostałe parametry, przedstawiono na rysunku 6. Na wał wirnika nałożono więzy pozwalające mu jedynie na obrót wokół jego osi podłużnej i nadano kierunek rotacji (rys. 6), przyjmując do analizy prędkość 80 tys. obr./min. Założono, że wirnik jest wykonany ze stopu Inconel 713C o właściwościach [6]: moduł Younga $E = 2,05 \cdot 10^5$ MPa, moduł Kirchhoffa $G = 2,05 \cdot 10^5$ MPa, liczba Poissona $\nu = 0,33$, gęstość $\rho = 8220$ kg/m³, wytrzymałość na rozciąganie $R_m = 1275$ MPa, granica plastyczności $R_{0,2} = 829,5$ MPa, współczynnik rozszerzalności cieplnej $9,48 \cdot 10^{-6}$ K⁻¹, współczynnik przewodzenia ciepła $\lambda = 35,4$ W/(m·K), ciepło właściwe $c_v = 500$ J/(kg·K).



Rys. 6. Dyskretyzacja modelu wirnika – parametry siatki, więzy i kierunek rotacji

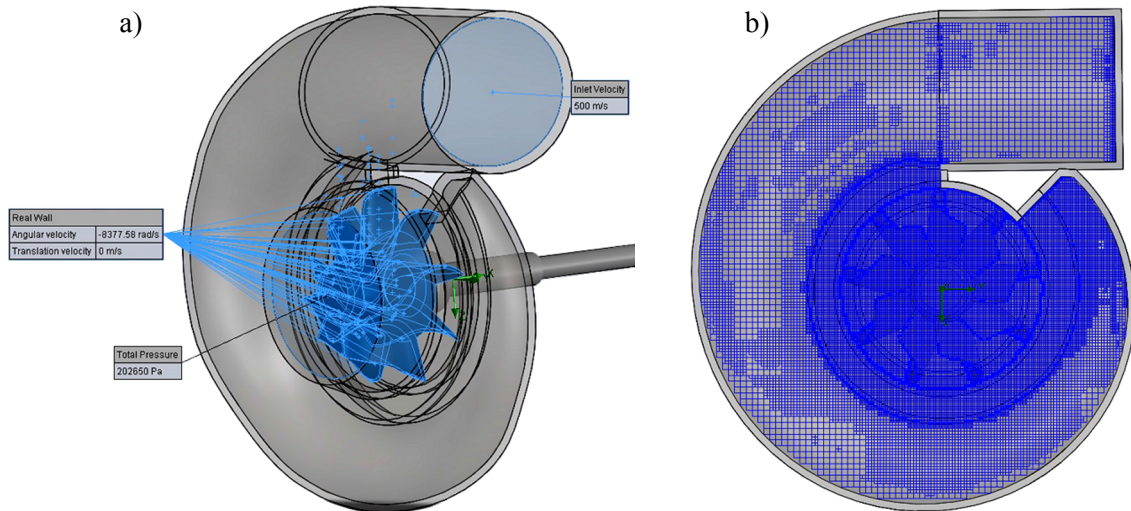
Wyniki analizy MES w postaci rozkładu naprężeń zredukowanych wg hipotezy Hubera–Misesa dla wirnika turbiny przedstawiono na rysunku 9. Maksymalna wartość tych naprężeń to w zaokrągleniu 258 MPa (rys. 7).



Rys. 7. Rozkład naprężeń w wirniku w wyniku jego rotacji

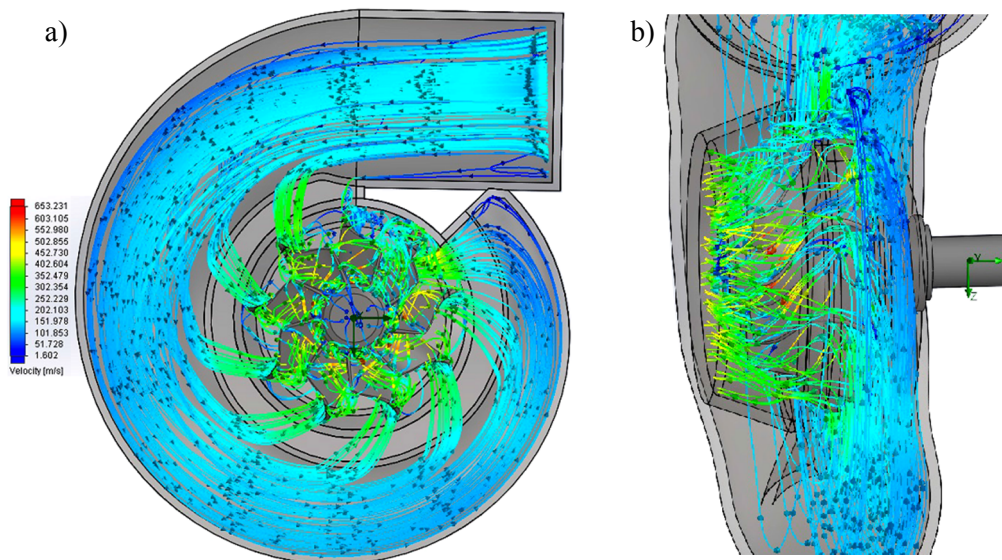
- Etap 2

Z powodu braku dokładnych danych odnośnie do prędkości spalin na wlocie oraz ciśnienia na wylocie turbiny założono [1]: prędkość 500 m/s i temperaturę 400°C na wlocie, ciśnienie na wylocie równe dwukrotności ciśnienia atmosferycznego, prędkość obrotową wirnika 80 tys. obr./min (rys. 8a). Przestrzeń wewnętrzną turbiny zdyskretyzowano siatką przestrzenną zagęszczając ją w obszarze wirnika (rys. 8b).



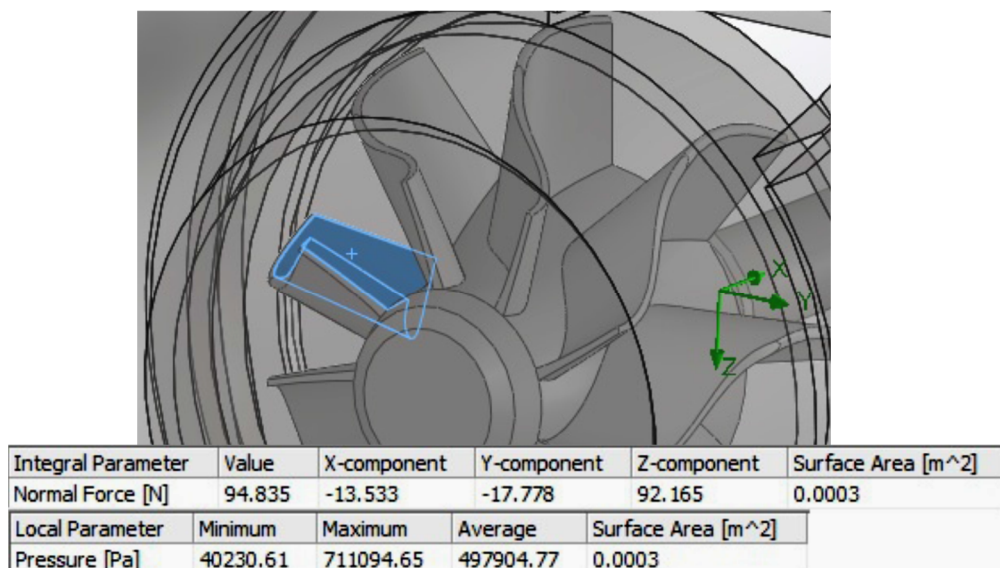
Rys. 8. Warunki brzegowe do analizy przepływu (a) oraz siatka dyskretyzacji (b)

Wyniki numerycznej analizy przepływu przez turbinę przedstawiono w postaci linii prądu i prędkości dla obszarów dolotowego i wylotowego odpowiednio na rysunkach 9a i 9b.



Rys. 9. Trajektorie przepływu w części dolotowej (a) oraz wylotowej (b)

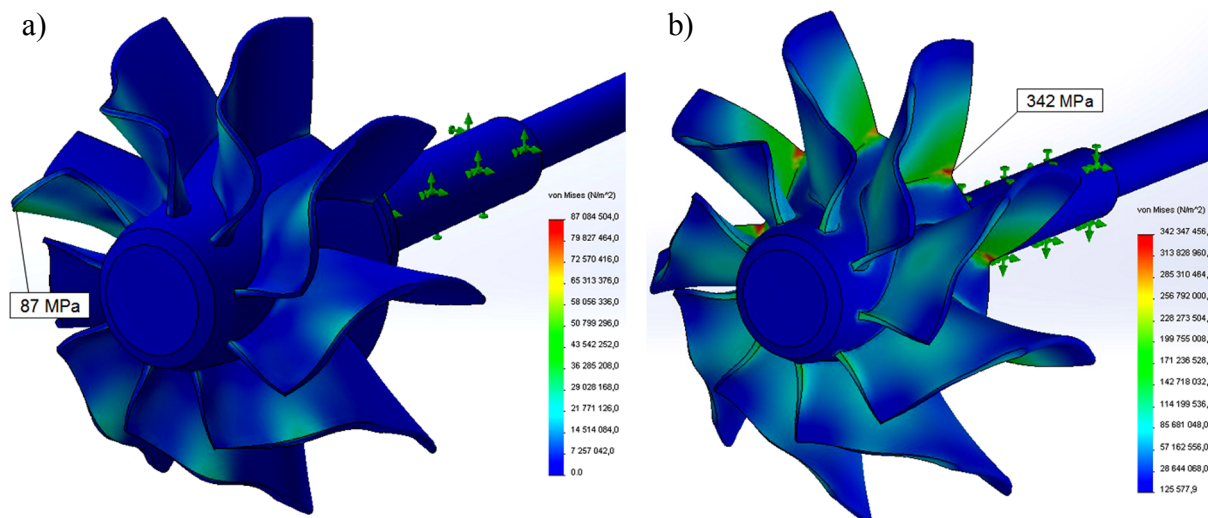
Ponadto poleceniem „surface parameters” (parametry powierzchni) można otrzymać wartości sił i ciśnień działających na powierzchnię łopatek (rys. 10) wynikających z analizy przepływu. Import tych parametrów do dodatku SolidWorks Simulation umożliwił analizę wytrzymałościową łopatek wirnika metodą elementów skończonych (MES), której rezultaty w postaci rozkładu naprężeń zredukowanych wg hipotezy Hubera–Misesa przedstawiono na rysunku 11. Największa wartość tych naprężeń to 87 MPa.



Rys. 10. Przykładowa łopatka i parametry jej powierzchni z analizy przepływu

- Etap 3

Wykonano analizę numeryczną MES, importując parametry obciążenia łopatek z analizy przepływu i uwzględniając siły masowe na skutek rotacji wirnika z prędkością 80 tys. obr./min. Wyniki w postaci rozkładu naprężeń zredukowanych wg hipotezy Hubera–Misesa przedstawiono na rysunku 11a.



Rys. 11. Naprężenia w łopatkach wirnika jedynie na skutek przepływu spalin

4. PODSUMOWANIE

Celowe wykonanie dwóch analiz wytrzymałościowych: pierwszej uwzględniającej siły odśrodkowe i drugiej uwzględniającej napór gazów na łopatki pozwoliło oszacować, który z tych czynników ma decydujący wpływ na wytrzymałość łopatek.

Z analizy wyników okazuje się, że w przyjętych warunkach siły odśrodkowe wywołują znacznie większe naprężenia rzędu 258 MPa (rys. 7) niż siły naporu gazów na powierzchnię łopatki – 87 MPa (rys. 11a). Łączne oddziaływanie tych obciążeń wywołuje największe naprężenia o wartości 342 MPa, które zlokalizowane są w obszarze połączenia łopatki

z bębniem w miejscu jego największej średnicy (rys. 11b). Ich tak znaczna wartość wynika po części z faktu, że są wyznaczone dla uproszczonego modelu łopatki, która łączy się z bębniem bez łagodnego przejścia. Pomimo to poziom naprężeń w tym obszarze jest mniejszy od granicy plastyczności przyjętego materiału wirnika i równej 829,5 MPa. Jednakże dla ścisłości należałoby tu również uwzględnić obniżenie wartości granicy plastyczności ze wzrostem temperatury, której wartość obniża się do 720 MPa przy 650°C [6, 7]. Należy zwrócić uwagę, że dla stali do pracy w podwyższonych temperaturach granica plastyczności może zmniejszyć swoją wartość nawet o 40% ze wzrostem temperatury od 20 do 500°C [2, 5]. Wartość tak wysokich naprężeń w najbardziej wyężonym miejscu łopatki nie powinna specjalnie dziwić. W literaturze [3] można natknąć się na wartości naprężeń wirników turbin gazowych rzędu 390 MPa, zlokalizowanych w analogicznych miejscach, jakie wskazano w niniejszej pracy.

Przedstawiony w pracy przykład wskazuje, że obecne typowe narzędzia CAD/CAE pozwalają na coraz bardziej zaawansowane numeryczne analizy wytrzymałościowe.

LITERATURA

- [1] Bell C.: *Maximum Boost: Designing, Testing and Installing Turbocharger Systems*, Bentley Publisher, 1997.
- [2] Dudda W.: *Numeryczna analiza konstrukcji ulegającej degradacji korozyjnej*, Zeszyty Naukowe IMP-PAN w Gdańsku, nr 537/1496/2005, Gdańsk, 2005, s. 1-145.
- [3] Grzesiczek E., Murzynowski W., Stanek R.: *Wybrane problemy obliczeniowej analizy trwałości łopatek części niskoprężnych turbin*, Pro Novum, (12) 2010, Katowice.
- [4] Lombard Matt: *SolidWorks 2010 Bible*, WILEY Publisher (4), 2010.
- [5] Mikulowski B.: *Stopy żaroodporne i żarowytrzymałe – nadstopy*, Wydawnictwa AGH, Kraków 1997.
- [6] Nickel Institute: *Engineering Properties of alloy 713C*.
- [7] Salk Natalie: *Metal injection moulding of Inconel 713C for turbocharger applications*, Powder Injection Moulding International, Vol. 5, No. 3, 2011.
- [8] www.full-race.com/store/turbos/garrett-gt-series/garrett-gt2854r-turbo.html
- [9] www.mahle-aftermarket.com
- [10] www.treadstoneperformance.com/product.phtml
- [11] www.turbochargerspecs.blogspot.com/search/label/GT28
- [12] www.turbosource.com/Garrett-GT2854R-p/ts1-01-28540.htm