

I Krajowa Konferencja Naukowa
Szybkie prototypowanie
 Modelowanie - Wytwarzanie - Pomiar
 Rzeszów - Pstrągowa, 16 - 18 września 2015



POLITECHNIKA
 RZESZOWSKA
 im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA

Organizatorzy:



WYDZIAŁ
 BUDOWY MASZYN
 I LOTNICTWA
 POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ



CENTRUM NAUKOWO TECHNICZNE

KLASTER SZYBKIEGO PROTOTYPOWANIA
 RAPIDROM

Zastosowanie systemów CAD/CAE /RP w procesie modelowania i wytwarzania funkcjonalnego modelu turbosprężarki

Application of CAD/CAE/RP in the modeling process and manufacture of a functional model of a turbocharger

TOMASZ DZIUBEK
 MATEUSZ PELC*

DOI:10.17814/mechanik.2015.12.558

W opracowaniu przedstawiono proces tworzenia funkcjonalnego modelu turbosprężarki silnika spalinowego, w środowisku oprogramowania CATIA, wspomaganego przez aplikację dedykowaną do obliczeń inżynierskich w zakresie maszyn przepływowych. Efektem pracy jest model rzeczywisty, powstały przy zastosowaniu urządzenia do kształtowania przyrostowego metodą MEM.

SŁOWA KLUCZOWE: turbosprężarka, CAD/CAE/RP, modelowanie powierzchniowe, modelowanie bryłowe

The paper presents the process of creating a functional model of turbochargers engine, the CATIA environment, supported by a dedicated application engineering calculations in the field of fluid machines. The result of study is to the real model and developed in using the apparatus for forming an incremental method MEM.

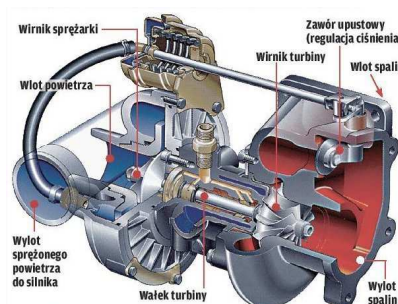
KEYWORDS: turbocharger, CAD/CAE/ RP, surface modeling, solid modeling

Coraz szybszy rozwój systemów CAD i programów wspomagających obliczenia inżynierskie w powiązaniu z pojawiającymi się na rynku coraz dokładniejszymi technikami druku przestrzennego umożliwia aplikację tych narzędzi do szerokiego spektrum dziedzin nauki i przemysłu. Umożliwia to wytwarzanie przedmiotów o wysokim skomplikowaniu geometrii, bez konieczności projektowania złożonego procesu wytwarzania oraz specjalnych narzędzi.

Proces projektowania turbosprężarki jest rozległym zagadnieniem obejmującym problematykę przepływu

* Dr inż. Tomasz Dziubek (tdziubek@prz.edu.pl),
 mgr inż. Mateusz Pelc (majster_99@o2.pl)

płynów, termodynamikę, wytrzymałość materiałów i wiele innych. Oznacza to, że zespół projektujący układ doładowujący musi składać się z wielu specjalistów różnych dziedzin. Szybko postępująca komputeryzacja spowodowała dostępność do programów komputerowych znacznie wspomagającą pracę inżyniera. Przede wszystkim są to programy CAD, oraz specjalistyczne aplikacje korzystające ze skomplikowanych algorytmów obliczeniowych w celu wyznaczenia optymalnego rozwiązania zadanego problemu. Nie bez znaczenia są również techniki szybkiego prototypowania, dzięki którym konstruktor jest w stanie zobaczyć rzeczywisty model zaprojektowanego układu w czasie nieporównywalnie krótszym, niż z wykorzystaniem konwencjonalnych metod ubytkowych. Dodatkową zaletą takiego systemu projektowania jest możliwość wprowadzania korekt geometrii już na etapie prototypu, co znacznie obniża koszty wyrobu finalnego. Wartością dodaną przyrostowych technik wytwarzania jest możliwość tworzenia modeli z uwzględnieniem kolorystyki wytwarzanych fragmentów danego zespołu. Pozwala to na zastosowanie wytwarzanych w ten sposób elementów czy zespołów w procesie dydaktycznym, czy szkoleniowym dla przyszłych inżynierów, wykonywanych jako funkcjonalne przekroje zespołów (rys. 1). Stąd też niniejsze opracowanie przedstawia takie możliwości.



Rys. 1. Przekrój przykładowej turbosprężarki [12]

Tematyka poniższej pracy obejmuje proces modelowania turbosprężarki, oraz stworzenie jej prototypu w procesie kształtowania przyrostowego. Dzięki wzrostowi znaczenia programów komputerowych do obliczeń inżynierskich czas procesu projektowania może ulec skróceniu. Efektem tego jest zmniejszenie kosztów, co przekłada się z kolei na poprawę konkurencyjności producenta na rynkach zbytu.

Warto wyjaśnić celowość tworzenia prototypów turbosprężarki. Z pewnością, na obecnym etapie zaawansowania technologicznego rzadko możliwe jest wykonanie w technice przyrostowej wyrobu finalnego, gotowego do użytkowania. Jednak dzięki istniejącemu modelowi fizycznemu możliwe jest bardziej precyzyjne zbadanie parametrów turbosprężarki, oraz zweryfikowanie ich z założeniami. Należy zauważyć, iż obecnie wykorzystuje się techniki szybkiego prototypowania w celu tworzenia form odlewniczych wirników. Kolejnym aspektem zastosowania metod RP jest wykorzystanie modelu fizycznego do kontroli, czy dana turbosprężarka będzie mogła być zamontowana w istniejącym już silniku, czy wymiary jej zapewnią, że nie będzie to możliwe ze względów konstrukcyjnych.

Założenia oraz proces obliczeń projektowych

Modelowanie zespołu turbosprężarkowego zostało oparte na obliczeniu wybranych cech opisujących urządzenie doładowujące. Turbosprężarka została dobrana do silnika wyprodukowanego przez koncern Nissan. Jest to jednostka napędowa SR18DE, czyli czterocylindrowy, rzędowy, szesnasto- zaworowy zasilany benzyną bezołowiową. Tabela 1 ukazuje częściową specyfikację techniczną silnika.

Tabela 1. Wybrane parametry silnika SR18DE [19]

Parametr	Wartość
pojemność skokowa [cm ³]	1838
moc maksymalna [KM]	125/6000 [obr/min]
maksymalny moment obrotowy [Nm]	156/4800 [obr/min]
średnica tłoka x skok tłoka [mm]	82,5 x 86
stopień sprężania	10
współczynnik napełniania	0,85

Próba doładowania silnika fabrycznie wolnossącego nie ogranicza się tylko do zamontowania turbosprężarki. Szereg dodatkowych czynności, które trzeba wykonać powoduje, że doładowanie silnika jest wyzwaniem obejmującym szeroki zakres jego modyfikacji. Należą do nich, m.in. zmniejszenie stopnia sprężania silnika, doprowadzenie układu olejenia oraz chłodzenia, zastosowania wydajniejszego układu zasilania, czy dostosowanie dawki paliwa do ciśnienia doładowania [7]. Zgodnie z obecnie produkowanymi turbosprężarkami, projekt obejmuje układ doładowujący ze sprężarką odśrodkową oraz turbiną promieniową dośrodkową.

W celu uproszczenia obliczeń wałka, przyjęto, iż głównym momentem obciążającym wałek jest moment skręcający. Odczytując z programu CFturbo moc turbiny, która wynosi $P=6,9$ [kW] można obliczyć moment obciążający wałek. Założona maksymalna prędkość obrotowa równa się $n=150000$ [obr-1].

Łożyskowanie projektowanego zespołu turbosprężarkowego odbywało się przy pomocy łożysk kulkowych. Są

one coraz chętniej stosowane przez producentów, szczególnie w przypadku doładowania silników o zapłonie iskrowym. Do zalet łożyskowania wałka turbosprężarki przy pomocy łożysk kulkowych należą:

- możliwość uzyskiwania znacznych prędkości obrotowych,
- wymagane mniejsze ciśnienie oleju,
- minimalizacja ryzyka wycieków oleju,
- poprawa nadążności poprzez zmniejszanie oporów.

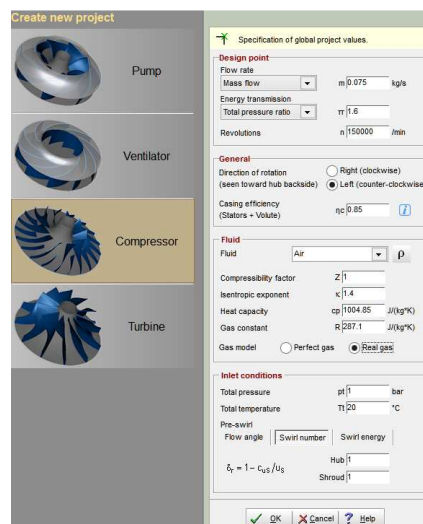
Ekstremalne warunki pracy tych łożysk powodują, iż muszą być one łożyskami o specjalnych właściwościach. W związku z tym firmy produkujące takie łożyska dbają o to, aby kluczowe cechy oraz właściwości produkowanych łożysk nie przenikały do konkurencji. Niemniej jednak uzasadnionym jest zastosowanie w tym przypadku łożyska hybrydowego. Jest to łożysko z klasycznym pierścieniem wykonanym ze stali łożyskowej, i elementami tocznymi wykonanymi z azotku krzemu klasy łożyskowej (Si3N4).

Warto wspomnieć dodatkowo o łożyskach całoceramicznych. Są to łożyska, w których wszystkie elementy (zarówno pierścienie jak i kulki) wykonane są z materiału ceramicznego. Cechą charakterystyczną tych łożysk jest samosmarowność. Umożliwia ona pracę łożyska w warunkach braku smarowania lub przy ubogim smarowaniu [12]. Analizując jednak dostępne źródła, nie ustalono obecnie faktu stosowania łożysk całoceramicznych w układach turbosprężarkowych.

Obliczenia geometrii turbosprężarki w środowisku oprogramowania CAE

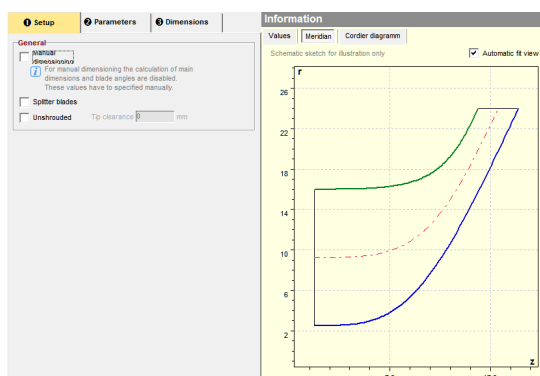
W celu określenia wybranych parametrów pracy sprężarki wykonane zostały w pierwszym etapie obliczenia teoretycznego strumienia masy powietrza przepływającego przez sprężarkę. Generowanie geometrii wirnika przeprowadzone zostało z zastosowaniem aplikacji CFturbo. Wykorzystując wcześniej obliczone parametry można przy uwzględnionych założeniach otrzymać geometrię wirnika sprężarki, czy turbiny, która może być eksportowana do programu typu CAD, lub aplikacji służącej, np. do badania warunków przepływu.

W celu wygenerowania geometrii wirnika sprężarki podano obliczony wydatek powietrza oraz oczekiwany spręż przy założonej prędkości obrotowej wirnika. Przyjęto określoną sprawność spirali na poziomie 85%. Jako czynnik roboczy wybrano powietrze (rys. 2).

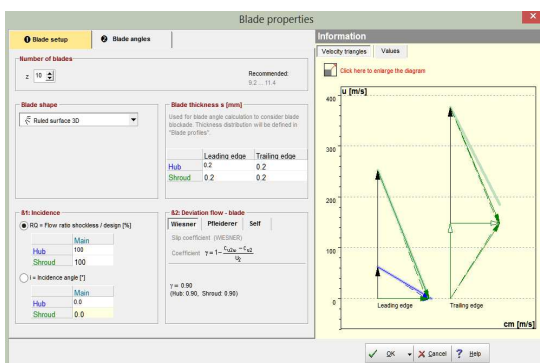


Rys. 2. Wartości wejściowe wpisane do programu CFturbo

Na tej podstawie otrzymano wstępny zarys łopatki wirnika (rys. 3). W kolejnym etapie określono ilości oraz kształtu łopatek (rys. 4).

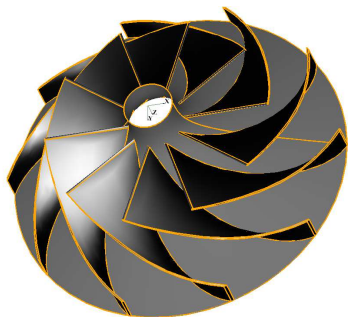


Rys. 3. Zarys łopatki wirnika wygenerowanej przez program CFTurbo



Rys. 4. Wybór ilości łopatek

Uwzględniając wszystkie wprowadzone dane wejściowe program generuje trójwymiarowy model wirnika (rys. 5).

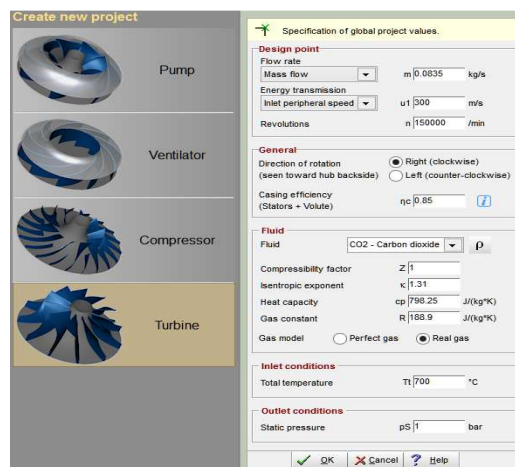


Rys. 5. Trójwymiarowy widok utworzonego wirnika

Obliczenia dotyczące wirnika turbiny przebiegały w sposób analogiczny do wirnika sprężarki. Wprowadzono obliczone parametry (rys. 6), jakimi są masowy wydatek spalin wynoszący 0,0835 [kg/s], obwodową prędkość wlotową, która wynosi 300 [m/s] oraz założoną prędkość obrotową. Przyjęto odwrotny kierunek, zgodny ze wskazówkami zegara. Jako czynnik roboczy wybrano dwutlenek węgla, którego znaczne ilości znajdują się w spalinach i jest on najlepszym przybliżeniem właściwości ogółu spalin. Temperaturę spalin określono na poziomie 700 [°C] [3].

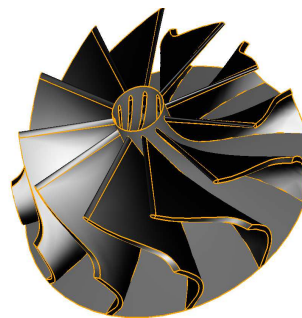
Aplikacja umożliwia eksport geometrii wirników do jednego z wybranych rozszerzeń plików w formacie obsługiwanym przez podstawowe programy CAD. W tym

konkretnym przypadku eksportowano plik w formacie STEP.



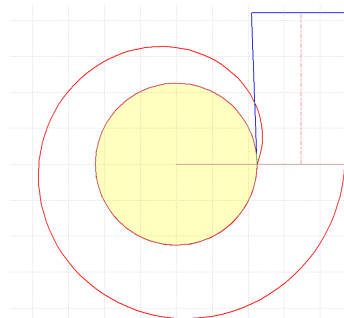
Rys. 6. Parametry wejściowe określające turbinę wpisane do programu CFTurbo

Ostateczny model 3D wirnika (rys 7) wyeksportowano plik do formatu STEP, analogicznie jak w przypadku wirnika sprężarki.



Rys. 7. Trójwymiarowy widok wygenerowanego wirnika turbiny

Zastosowany w realizacji pracy program umożliwia również wygenerowanie geometrii spirali sprężarki wraz z dyfuzorem geometrii spirali turbiny z konfuzorem (rys. 8).



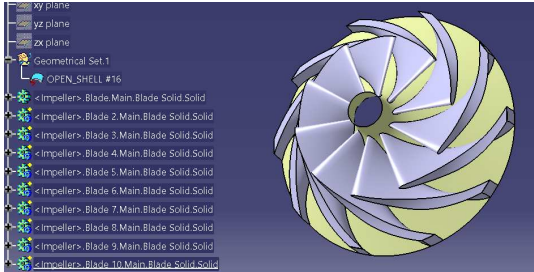
Rys. 8. Widok spirali turbiny wraz z konfuzorem.

Proces modelowania turbosprężarki w programie CATIA

Proces modelowania przeprowadzono w programie CATIA. Jest to rozbudowany program służący do wspomaganie inżynierskich prac projektowych. Umożliwia on, m.in. projektowanie 3D, tworzenie dokumentacji płaskiej, analizy MES oraz wiele innych modułów, służących chociażby do projektowania form wtryskowych.

Wirnik sprężarki i turbiny

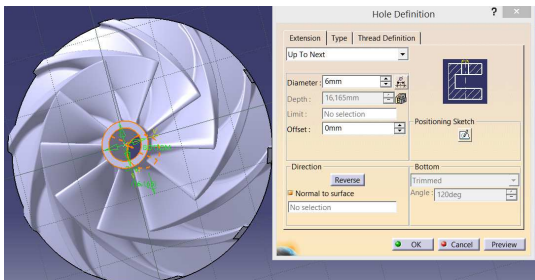
W programie CATIA otworzono wcześniej utworzone pliki modeli wirnika sprężarki oraz turbiny z rozszerzeniem .stp. Są to modele obejmujące zarówno geometrię powierzchniową oraz kilka brył. Jak widać na rysunku 9 model składa się kilku brył odpowiadających każdej z łopatek.



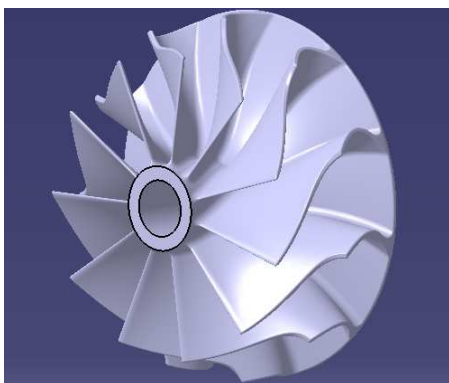
Rys. 9. Widok zaimportowanego wirnika

W celu utworzenia modeli jednobryłowych wykorzystano operacje Boolowskie, uprzednio zamieniając istniejące powierzchnie na obiekty bryłowe. Następnie przeprowadzono szereg operacji związanych z zaokrągleniami stosownych krawędzi, wykonując w ten sposób wygładzanie ostrych krawędzi geometrii wirników oraz wykonania operacji mających na celu zdefiniowanie końcowej geometrii.

Ostatni etap modelowania w obu przypadkach obejmował utworzenie w wirnikach otworów osadzenia na wałku. Określono średnicę otworów, jego środek oraz głębokość jako otwory przelotowe (rys. 10, 11).



Rys. 10. Wirnik sprężarki

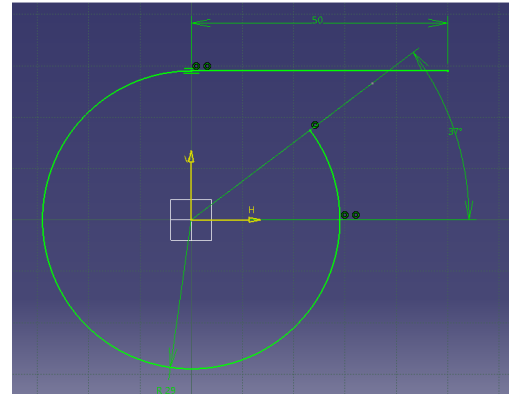


Rys. 11. Wirnik turbiny

Obudowa sprężarki i turbiny

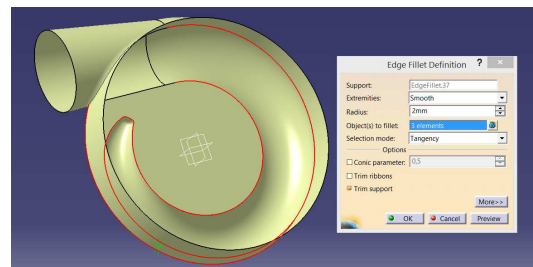
Modelowanie obudowy nosi cechy modelowania hybrydowego, łączącego pracę zarówno w module powierzchniowym jak i w bryłowym. Proces ten rozpoczęto od naszkicowania ścieżki (rys. 12), która została wyko-

rzystana do utworzenia spirali przez polecenia bryły wieloprzekrojowej. Na podstawie szkicy, wygenerowanych przez program CFturbo (rys. 8) określono wymiary spirali, długość dyfuzora i konfuzora oraz kąty ograniczające długości spirali sprężarki oraz turbiny.



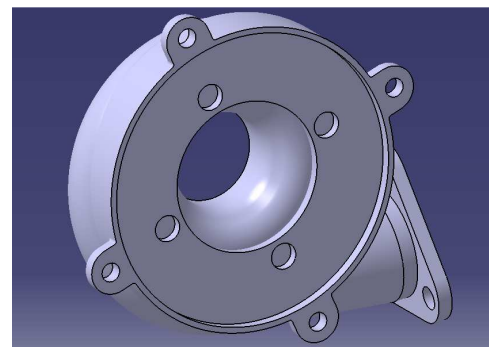
Rys. 12. Szkic określający geometrię spirali sprężarki

Następnie wykonując odpowiednie procedury modelowania powierzchniowego przeprowadzono proces modelowania geometrii otrzymując tym samym wstępne powierzchniowe obudowy obu korpusów (rys. 13). Istotne znaczenie miało w tym przypadku zachowanie ciągłości powierzchni, które zostało uzyskane przez zastosowanie szerokiej możliwości jakie posiada system Catia w zakresie modelowania powierzchniowego.



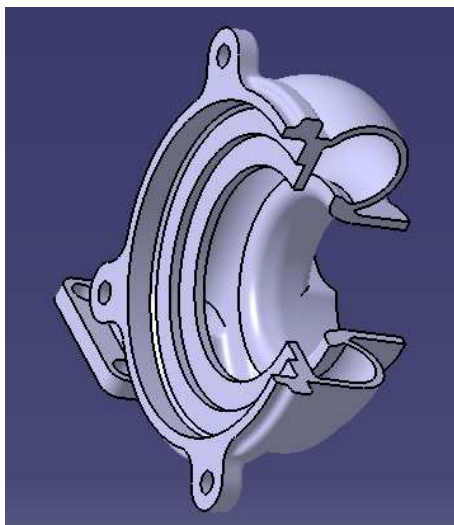
Rys. 13. Przykładowa powierzchniowa geometria obudowy sprężarki

Następny, bardzo ważny etap modelowania to przejście z modelowania powierzchniowego do modelowania bryłowego. Oba korpusom nadano grubość istniejącym powierzchniom i przekształcono je w ten sposób w modele bryłowe, które finalnie w wyniku modelowani bryłowego uzupełniono o brakującą geometrię. Ostatecznym etapem było modelowanie uchwytów, służących do zmontowania obudowy sprężarki z korpusem. Widoczne są również pogłębienia przygotowane pod łby śrub tarczy umieszczonej pomiędzy obudową kompresora oraz kadłubem łożyskowym (rys. 14).



Rys. 14. Widok utworzonego zespołu uchwytów mocujących

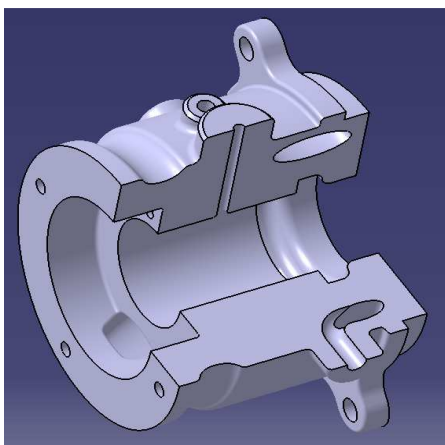
W celu lepszej wizualizacji wycięto fragmenty obudowy aby ukazać przekroje zamodelowanych elementów (rys. 15). Elementy zamodelowane w ten sposób powodują, iż po złożeniu wszystkich części turbosprężarki będą widoczne komponenty, których nie byłoby widać po utworzeniu pełnego modelu, co podnosi wartość edukacyjną zespołu.



Rys. 15. Obudowa turbiny widoczna w przekroju

Korpus centralny i pozostałe elementy zespołu turbosprężarki

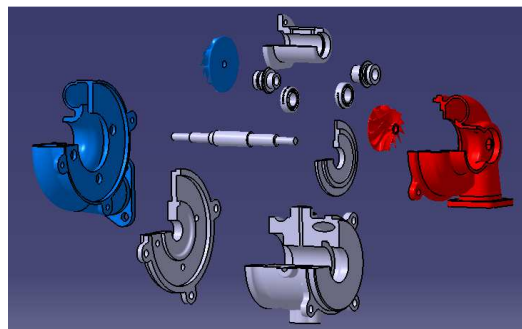
Korpus centralny i pozostałe elementy zespołu turbosprężarki modelowane zostały w module bryłowym Part Design. W kadłubie uwzględniono kanały chłodzące oraz kanały doprowadzające olej w celu smarowania łożysk kulkowych. Model zawiera również elementy służące do zmontowania całego zespołu turbosprężarkowego. Rysunek 16 ukazuje utworzony kadłub wraz z wyciętym fragmentem w celu wizualizacji geometrii wewnętrznej modelowanego elementu.



Rys. 16. Widok korpusu turbosprężarki z wyciętym fragmentem materiału

Oprócz wymienionych powyżej elementów składowych turbosprężarki, zamodelowano również tulejkę w której umieszczone są łożyska kulkowe, tulejki dystansowe odrzutnikami oleju. Dodatkowo utworzono tarczę sprężarki oraz tarczę turbiny, które są elementem pośredniczącym pomiędzy tymi elementami, a kadłubem turbosprężarki. Elementem łączącym wirniki jest łożyskowany wałek z tulejkami dystansowymi. Wszystkie

składowe części zespołu turbosprężarki obrazuje rysunek 17.

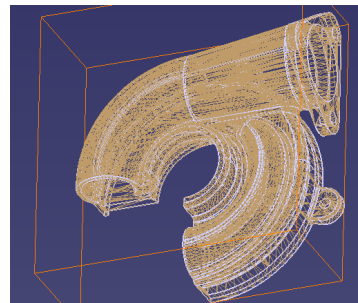


Rys. 17. Widok rozstrzelony turbosprężarki wraz z zaznaczoną stroną zimną oraz gorącą

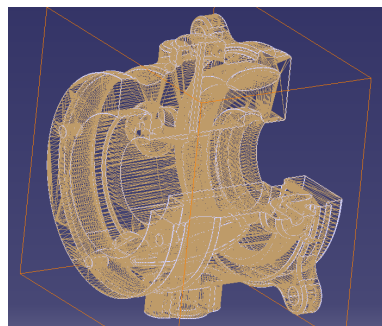
Eksport komponentów do formatu .stl

W celu umożliwienia procesu wydruku zamodelowanych elementów konieczna była konwersja plików do formatu, który obsługiwany jest przez urządzenia RP. W większości przypadków modele należy zapisać w formacie .stl.

W oprogramowaniu CATIA proces ten realizowany jest zastosowaniem modułu STL Rapid Prototyping, który umożliwia konwersję modeli bryłowych do formatu .stl. Należy w tym celu przeprowadzić proces triangulacji polegający na opisanie geometrii bryłowej za pomocą siatki trójkątów o odpowiednio dokładnym stopniu zagęszczenia. Rysunki 18, 19 i 20 ukazują przykładowe elementy zespołu zamienione na format .stl.

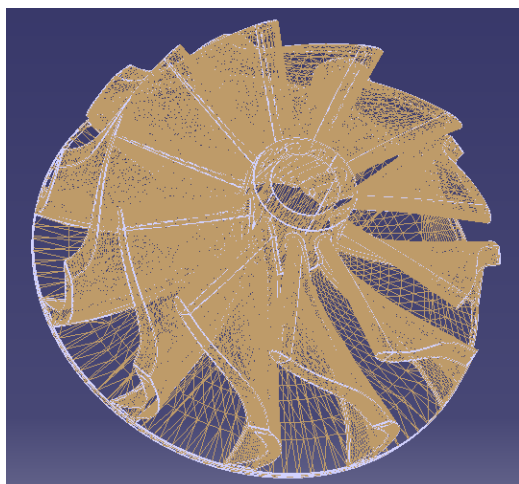


Rys. 18. Widok obudowy sprężarki, opisanej przy pomocy siatki trójkątów



Rys. 19. Eksport korpusu turbosprężarki do formatu .stl

Generator siatki trójkątów zagęszcza ją automatycznie w miejscach o najbardziej skomplikowanej geometrii. Dzięki temu odwzorowanie powierzchni krzywoliniowych jest dokładniejsze. W celu precyzyjnego opisu powierzchni łopatek wirnika turbiny siatka została lokalnie zagęszczona (rys. 20).



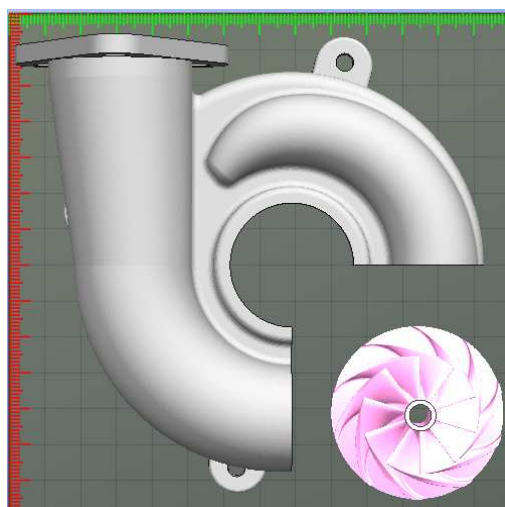
Rys. 20. Wirnik turbiny opisany siatką trójkątów

Również pozostałe elementy zespołu zostały eksportowane do formatu .stl w celu odczytania ich w oprogramowaniu urządzenia drukującego.

Tworzenie modelu rzeczywistego, z zastosowaniem przyrostowej metody wytwarzania MEM

W celu wykonania modelu rzeczywistego zamodelowanej turbosprężarki zastosowano technikę kształtowania przyrostowego, a dokładnie metodę MEM. Urządzeniem, które zostało zastosowane w tym celu była drukarka 3D UP! PLUS 2. Przestrzeń robocza wynosząca 140 x 140 x 135 [mm] pozwoliła na wydruk elementów w skali 1:1. Materiałem zastosowanym w procesie był ABS. W zależności od elementu, zastosowano kolory czerwony, niebieski oraz szary. Umożliwiło to kolorystyczną wizualizację strony zimnej oraz gorącej turbosprężarki.

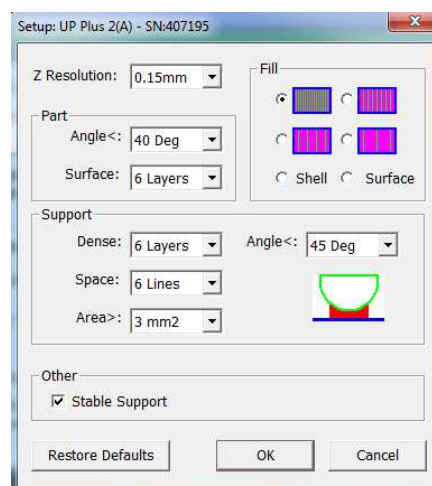
Pierwszym krokiem rozpoczynającym proces druku było otwarcie wcześniej przygotowanego pliku .stl w oprogramowaniu drukarki i rozstawiono wybrane elementy na powierzchni platformy roboczej. Rysunek 21 ukazuje rozmieszczenie elementów.



Rys. 21. Rozmieszczenie wirnika sprężarki oraz jej obudowy na polu roboczym drukarki UP!

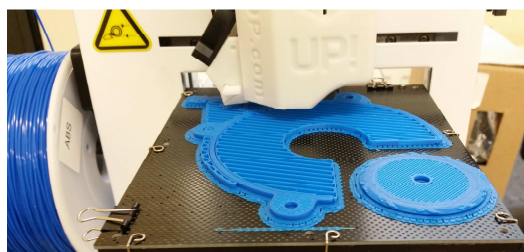
Następnie zdefiniowano parametry procesu. Ze względu na zaawansowaną geometrię drukowanych elementów wybrano rozdzielczość z osi Z równą 0,15 [mm]. Pozwala to na uzyskanie możliwie najdokładniejszego

odzworowania powierzchni. Wybrano również maksymalny poziom wypełnienia. Rysunek 22 przedstawia okno dialogowe służące do określania parametrów procesu.



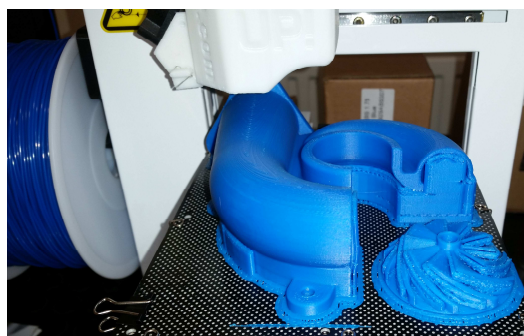
Rys. 22. Parametry procesu zastosowane podczas wydruku elementów sprężarki

Oprócz parametrów warstwy zasadniczej modelu, należy zdefiniować również parametry warstw podporowych. W zależności od kształtu modelu, oraz jego ustawienia na platformie roboczej, ilość materiału podporowego zużytego do budowy całego elementu jest różna. Skomplikowane geometrie często wymuszają zastosowanie znacznych ilości warstw podporowych. Jest to czynnik utrudniający obróbkę otrzymanego elementu. W przypadku cienkich ścianek modelu istnieje ryzyko jego uszkodzenia, podczas usuwania materiału podporowego. Rysunek 23 przedstawia odpowiednio proces nakładania warstw podporowych, dla drukowanych modeli, oraz nakładanie warstw materiału zasadniczego.



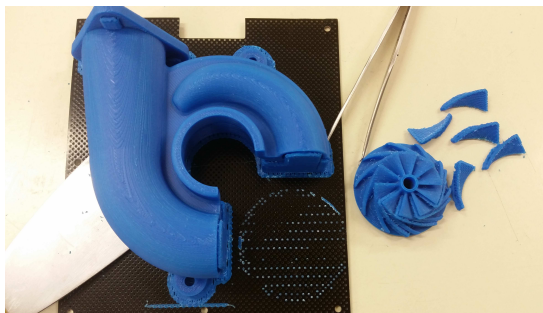
Rys. 23. Proces nakładania kolejnych warstw materiału zasadniczego, jak i podporowego

Na rysunku 24 przedstawiono efekt ukończonego procesu kształtowania przyrostowego. Widoczne są znaczne ilości materiału podporowego.



Rys. 24. Widok elementów strony zimnej po ukończeniu procesu drukowania

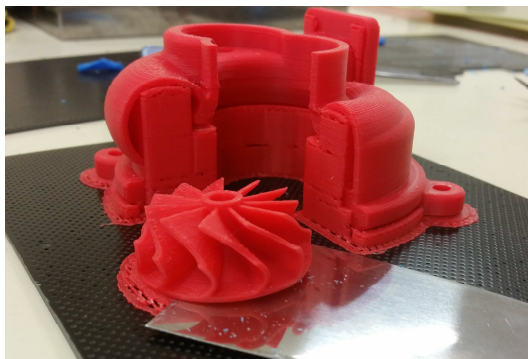
Po ukończeniu procesu wydruku i zdemontowaniu platformy roboczej należy usunąć z niej otrzymane modele. Następnie przy pomocy narzędzi warsztatowych usunięto materiał podporowy z wirnika oraz obudowy sprężarki (rys. 25).



Rys. 25. Oddzielanie otrzymanych elementów od platformy roboczej. Widoczne usunięte podpory z wirnika

Na elementy turbiny odpowiadające stronie gorącej w celu symbolicznej wizualizacji wysokich temperatur, na jakie narażona jest turbina turbosprężarki, wybrano czerwony filament.

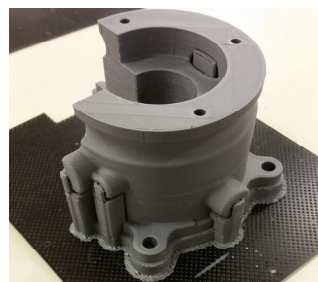
Po zakończeniu procesu usunięto wydrukowane komponenty z platformy roboczej. Jak widać na rysunku 26 geometria wirnika turbiny nie wymagała wprowadzenia materiału podporowego. Z kolei kształt obudowy turbiny oraz sposób jej umieszczenia na platformie roboczej wymusiły zastosowanie znacznej ilości warstw podporowych. Grubość ścianki wynosząca 2 [mm] była czynnikiem wymuszającym znaczną ostrożność przy usuwaniu materiału podporowego.



Rys. 26. Oddzielanie otrzymanych elementów strony gorącej z platformy roboczej drukarki

Podczas wydruku korpusu turbosprężarki w celu mniejszego zużycia materiału, zastosowano mniejszy stopień wypełnienia niż w przypadku obudowy sprężarki oraz turbiny. Korpus nie wymagał zastosowania maksymalnego stopnia wypełnienia również dlatego, iż ma wytrzymałą konstrukcję ze względu na znacznych wymiarów, oraz kształtu zbliżonego do walca. Na rysunku 27 przedstawiono finalny efekt procesu kształtowania przyrostowego korpusu turbosprężarki. Widoczna jest niewielka ilość warstw podporowych.

Walek drukowany został w osi Z urządzenia, ze względu na możliwość do uzyskania większą dokładność kształtu (rys. 28). Wydrukowanie wałka w osi Z było możliwe dzięki jego długości mniejszej od maksymalnych wymiarów przestrzeni roboczej.

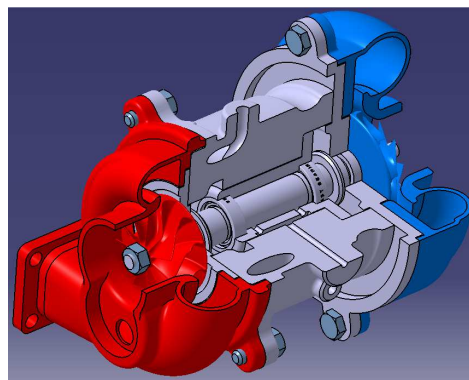


Rys. 27. Widok otrzymanego korpusu po zakończeniu procesu kształtowania przyrostowego

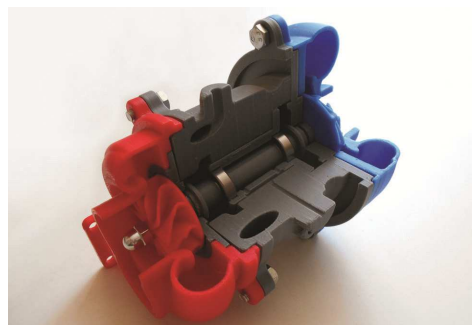


Rys. 28. Widok utworzonego wałka oraz tarczy sprężarki

Otrzymane komponenty w wyniku metody szybkiego prototypowania pozwoliły na utworzenie modelu rzeczywistego turbosprężarki. Gwintowanie otworów oraz wałka pozwoliło na ustalenie wszystkich elementów względem siebie. Widoczne jest wysokie podobieństwo pomiędzy projektowanym wirtualnie zespołem (rys. 29), a modelem rzeczywistym (rys. 30). Rysunki te bardzo dobrze przedstawiają możliwość stosowania nowoczesnych technik projektowania oraz wytwarzania. Połączenie systemów CAD/CAE oraz metod szybkiego prototypowania sprawia, iż czas mijający od utworzenia projektu urządzenia, do wykonania jego fizycznego prototypu uległ skróceniu.



Rys. 29. Model wirtualny turbosprężarki utworzony w programie CATIA



Rys. 30. Model rzeczywisty turbosprężarki otrzymanej przy pomocy techniki szybkiego prototypowania

Podsumowanie

Zastosowanie zintegrowanych systemów projektowania, aplikacji do obliczeń inżynierskich oraz technik druku 3D umożliwia konstruktorom szybkie i poprawne tworzenie nowego produktu. W stosunkowo krótkim czasie istnieje możliwość realizacji zaprojektowanej koncepcji do rzeczywistego modelu fizycznego. W kwestii tworzenia prototypów, porównując z obróbką ubytkową, kształtowanie przyrostowe w wielu przypadkach przynosi znaczne korzyści ekonomiczne.

Niniejsze opracowanie jest przykładem połączenia oprogramowania CAD, programu wykorzystywanego do obliczania parametrów maszyn przepływowych, wraz z technologią szybkiego prototypowania.

Problematyka modelowania zespołu turbosprężarkowego sprowadzała się do próby faktycznego odwzorowania dwóch ważnych elementów, jakimi są obudowa sprężarki oraz turbiny. Ich geometria jest głównym aspektem warunkującym prawidłowy przebieg procesów termodynamicznych, zachodzących podczas sprężania oraz rozprężania. Kolejnymi kluczowymi komponentami są wirniki, których skomplikowane powierzchnie są niezbędne w celu uzyskania poprawności oczekiwanych procesów. Precyzja wymagana przy modelowaniu krzywizny łopatek sprawia, że proces ten bywa czynnikiem wymuszającym stosowanie wielu zaawansowanych operacji w oprogramowaniu CAD.

Technika druku 3D, zastosowana w celu wytworzenia modelu turbosprężarki polegała na warstwowym nakładaniu uplastycznionego materiału. Jest to dość rozpowszechniona metoda, która dodatkowo cechuje się stosunkowo niskim kosztem urządzeń. Niestety technika MEM posiada wady, które widoczne są w wykonanym modelu. Zaczynając od powstałych rozwarstwień materiału, poprzez przeciętną jakość powierzchni, kończąc na odkształceniach termicznych powodujących znaczną zmianę kształtu niektórych elementów. Warto zaznaczyć jednak, iż znane są przyczyny tych zjawisk. Z pewnością są to gabaryty drukowanych modeli, zajmujących znaczną część pola roboczego drukarki. Kolejnym czynnikiem jest geometria tworzonych modeli, która niejednokrotnie wymuszała stosowanie podpór. Usuwanie ich często prowadziło do pogorszenia jakości powierzchni. Zastosowanie urządzenia drukującego z otwartą przestrzenią roboczą ułatwiło podgląd poprawności procesu, lecz przez występowanie różnic temperatur mogło przyczynić się do powstałych odkształceń.

W wyniku przeprowadzonych prac uzyskano model rzeczywisty turbosprężarki, który wcześniej został zamodelowany w środowisku oprogramowania Catia na podstawie założonych parametrów, a jego geometria wyjściowa pozyskana została z zastosowaniem aplikacji służącej do obliczeń dla maszyn przepływowych. Wykonany prototyp jest modelem poglądowym, wizualizującym budowę oraz zasadę działania turbosprężarki silnika spalinowego. Opracowana geometria umożliwia przedstawienie geometrii wnętrza turbosprężarki w celach edukacyjnych na modelu fizycznym.

Stosowanie przedstawionych w niniejszym artykule narzędzi wspomagających prace projektowe umożliwia kontrolę oraz możliwości prowadzenia modyfikacji geometrii na etapie projektowania. Pozwala na ocenę np. grubości ścianek korpusu, wizualizacji wpływu zmian tej wartości na stabilność kształtową oraz temperaturą konstrukcji.

LITERATURA

1. Bell C. "Maximum Boost – Desiging, Testing and Installing Turbocharged Systems". Massachusetts, 1997.
2. Budzik G. "Synteza i analiza metod projektowania i wytwarzania prototypów elementów o skomplikowanych kształtach na przykładzie wirników turbosprężarek". Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2007.
3. Budzik Grzegorz, Turek Paweł, Dziubek Tomasz, Markowska Olimpia. "Wpływ zmiany grubości warstwy na dokładność odwzorowania geometrii żuchwy wykonanej metodą FDM" PAK (2014), nr 12, s. 1174-1177.
4. Brzeżański M., Rybarz M.: "Zagadnienia tworzenia się kondensatu w układzie wylotowym silnika spalinowego". Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2008.
5. Jain Pranja, Kuthe A. M. "Feasibility Study of Manufacturing Using Rapid Prototyping: FDM Approach" *Procedia Engineering* (2013), 63, s. 4-11.
6. Kajihara K., Tanimoto K., Yanai K. "Performance of Hybrid Ceramic Ball Bearing for Turbochargers". *KOYO Engineering Journal English Edition* (2000), Nr 157E.
7. Kowalewicz A. "Doładowanie samochodowych silników spalinowych". Wydawnictwo Politechnika Radomska, Radom 1998.
8. Kuszewski H., Ustrzycki A. "Laboratorium spalinowych napędów środków transportu". Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2011.
9. Mysłowski J. "Pojazdy samochodowe – doładowanie silników". Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006.
10. Rokicki P., Budzik G., Kubiak K., Bernaczek J., Dziubek T., Magniszewski M., Nowotnik A., Sieniawski J. "Rapid prototyping in manufacturing of core models of aircraft engine blades". *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal* 86/4 (2014) 323–327 © Emerald Group Publishing Limited [ISSN 1748-8842] [DOI 10.1108/AEAT-10-2012-0192]
11. Wajand J. A. "Doładowanie tłokowych silników spalinowych". Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 1962.
12. www.ceromit.pl
13. www.magazynauto.pl