NR 7

# MESSENGER

## Drodzy Czytelnicy,

witam w kolejnym wydaniu naszego biuletynu!

W imieniu całego zespołu mam zaszczyt poinformować, że firma MESco uzyskała status **Elite Channel Partnera** firmy ANSYS. Jest dla nas to spore wyróżnienie. Ten tytuł traktujemy jako uznanie dla naszego rozwoju w ciągu 25 lat współpracy z tym światowym liderem w dziedzinie symulacji. Jedynie 22 ze 117 Partnerów na całym świecie może się pochwalić statusem Elite, ponieważ wiąże się on ze spełnieniem wielu warunków, takich jak: odpowiednia liczba certyfikowanego personelu technicznego, zadowolenie klientów czy wzrost poziomu sprzedaży.

Ten rok jest dla nas szczególny również ze względu na to, że obchodzimy 25-lecie naszego istnienia. Jest to powód do dumy i odrobiny nostalgii. Trochę wspomnień z tamtych lat znajdą Państwo w tym numerze *MESsengera*.

W naszej ofercie pojawiła się nowość, którą nie zawaham się nazwać przełomową: **ANSYS Cloud**. Od teraz będą możliwe obliczenia w chmurze bezpośrednio ze środowiska Workbench. Wszystko przebiegnie niesamowicie prosto – prawie tak, jak na własnej stacji roboczej. Więcej na ten temat napisał nasz kolega Adam Łokieć – jego artykuł znajdą Państwo na s. 23.

Kolejna nowość to **ANSYS Motion** – narzędzie do obliczeń typu Multibody Dynamics, o którym będą mogli Państwo przeczytać w jednym z kolejnych numerów *MESsengera*. Jest to poważny konkurent dla znanego pakietu ADAMS.

Tymczasem zapraszam do zapoznania się interesującymi artykułami naszych współpracowników i klientów.

Miłej lektury!

***Mariusz Gorol***

## W TYM NUMERZE:


2 25 lat minęło...

3 Ulga podatkowa na działalność badawczo-rozwojową a zakup oprogramowania ANSYS

3 MESco wspiera polskie uczelnie techniczne

4 Program ANSYS i firma MESco na Politechnice Rzeszowskiej

5 Nowości w analizach mechanicznych ANSYS 2019 R1

7 Proces symulacji produkcji addytywnej metali

10 Analiza wytrzymałościowa kompozytowego pylonu łodzi AGH Solar Boat

12 Wykorzystanie modeli CAD/CAM/CAE do lokalnych analiz MES

13 Nowości w interfejsie Fluenta

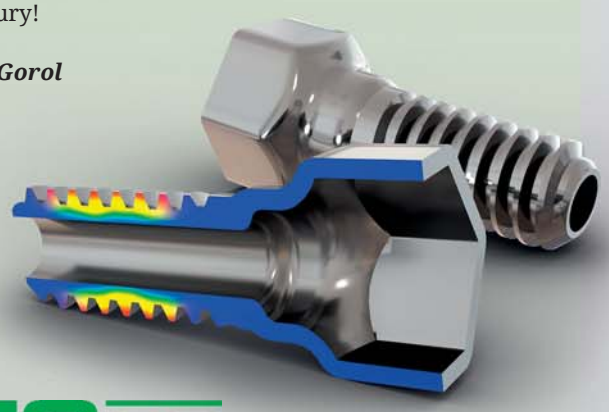
15 Modelowanie obróbki termicznej produktów spożywczych w przemysłowych piecach konwekcyjno-parowych

17 Analiza modeli turbulencji na przykładzie benchmarku komory testowej Annex 20

19 Projekt pakietu aerodynamicznego bolidu Formuła Student

21 Symulacje elektromagnetyczne: rzeczywistość czy science-fiction?

23 ANSYS Cloud 2019 R1

MESco

# 25 lat minęło...

**Mariusz Gorol** • MESco

**W 2019 r. mija 25 lat od założenia firmy MESco. Pora więc na krótką refleksję... Aby jednak zrozumieć, jak wyglądały nasze początki, warto wrócić do sytuacji w Polsce w latach 90. Wtedy największym marzeniem przeciętnego Polaka był produkowany od niedawna Fiat Cinquecento – w tamtym czasie kosztował ponad 50 mln zł. Z dzisiejszego punktu widzenia ceny wszystkich artykułów były śmiesznie wysokie (za jajko trzeba było zapłacić ponad 2 tys. zł, a za butelkę wódki – 70 tys. zł!). Średnie miesięczne wynagrodzenie w 1995 r. wynosiło ok. 6 mln zł. Internet istniał jedynie w teorii. Pliki licencyjne dla klientów przychodziły faksem, więc trzeba je było ręcznie przepisywać na komputerze i wielokrotnie sprawdzać. Plików tych nie było jednak wiele. Cena licencji, osiągająca kilkanaście tysięcy dolarów, dla większości polskich przedsiębiorstw była zaporą nie do przejścia.**

Pierwszy komputer w firmie MESco miał 8 MB RAM i twardy dysk o pojemności 200 MB (dzisiejsze telefony mają 10 razy więcej pamięci operacyjnej). Pomimo tak skromnej – jak na obecne warunki – konfiguracji mieliśmy możliwość wykonywania analiz 3D na niezbyt dużych modelach.

Do 1997 r. MESco było firmą jednoosobową. Właśnie wtedy dołączył do mnie Grzegorz Porembski, a w kolejnym roku firma wyprowadziła się z mojego mieszkania do wynajętego w po-bliżu lokalu.

W 2000 r. zorganizowaliśmy pierwszą konferencję z cyklu „Symulacja". Wtedy nasz zespół liczył już pięć osób. Do 2010 r. konferencja „Symulacja" odbywała się z różną częstotliwością, aby w końcu stać się corocznym spotkaniem użytkowników ANSYS. W tym roku będzie miała swoją 16. edycję.

Przystąpienie naszego kraju do Unii Europejskiej w 2004 r. diametralnie zmieniło sytuację firmy MESco. Zagraniczne koncerny zaczęły otwierać w Polsce swoje siedziby i wprowadzały w nich swoje metody pracy, w wielu przypadkach oparte na symulacjach numerycznych. Również w polskich firmach zwiększyło się zainteresowanie symulacją numeryczną i tym samym naszą firmą.

W marcu br. przeprowadziliśmy się do nowej, znacznie większej siedziby w Bytomiu. Jest to już szósta lokalizacja w historii biura. Zmiana okazała się konieczna w obliczu wzrostu liczby osób zatrudnionych w ostatnich latach. Serdecznie zapraszamy Państwa do obejrzenia naszej nowej siedziby podczas szkoleń oraz seminariów.

Mam nadzieję, że kolejne 25 lat będzie równie owocne, i już teraz obiecuję kolejny artykuł ze wspomnieniami w 2044 r. 😊

*Tak wyglądał skład MESco w roku 2001...*

*a tak wygląda dziś*

# Ulga podatkowa na działalność badawczo-rozwojową a zakup oprogramowania ANSYS

**Urszula Horzela** • MESco • uhorzela@mesco.com.pl

**Ulga podatkowa na działalność badawczo-rozwojową to niezwykle ważne rozwiązanie, które pozytywnie wpływa na konkurencyjność polskich firm oraz realizowane w Polsce projekty biznesowe. Zgodnie z ustawową definicją działalność badawczo-rozwojowa oznacza działalność twórczą obejmującą badania naukowe lub prace rozwojowe. Jest to działalność podejmowana w sposób systematyczny w celu zwiększenia zasobów wiedzy oraz ich wykorzystania do tworzenia nowych zastosowań.**

Zarówno w przypadku prac badawczych, jak i prac rozwojowych, wykonywanych w jednostkach naukowych i komercyjnych, trudno o prawidłowe zebranie wyników i wykonanie analiz bez użycia odpowiedniego oprogramowania oraz przeprowadzenia zaawansowanych obliczeń.

Wśród sześciu głównych kategorii kosztów kwalifikowanych znalazły się **odpisy amortyzacyjne od środków trwałych oraz wartości niematerialnych i prawnych**. To oznacza, że wydatki przeznaczone na zakup i utrzymanie licencji oraz różnego rodzaju oprogramowania i produktów audiowizualnych stanowią koszty kwalifikowane, o których mowa w art. 18d ust. 3 ustawy o podatku dochodowym od osób prawnych.

Należy jednak podkreślić, że każda sytuacja zakupu programów komputerowych powinna zostać oceniona indywidualnie.

### Przykład liczbowy

W przypadku oprogramowania o wartości 100 tys. zł podatnik ma prawo amortyzować je według stawki 50% rocznie. Jeżeli w danym roku podatnik dokona odpisu amortyzacyjnego w kwocie 50 tys. zł, to od podstawy opodatkowania odliczy raz kwotę amortyzacji, a drugi raz – kwotę ulgi w tej samej wysokości:

przychód 150 000 minus amortyzacja 50 000 →
podstawa opodatkowania 100 000 minus ulga 50 000 →
podstawa opodatkowania 50 000.

Korzyść finansowa z dokonanego odliczenia w jednym roku to 19 tys. zł. Ogólnie zakup oprogramowania za 100 tys. zł wiąże się z możliwością odliczenia od podatku 200 tys. zł, zatem oszczędzamy 38 tys. zł, w tym 19 tys. zł z tytułu ulgi.

# MESco wspiera polskie uczelnie techniczne

**Marcelina Jureczek** • MESco • mjureczek@mesco.com.pl

**Od początku swojej działalności firma MESco z zaangażowaniem wspiera naukę i rozwój, obejmując swoim patronatem coraz więcej prestiżowych uczelni technicznych i kreatywnych zespołów studenckich. Dzięki temu uniwersytety zyskały nieodpłatny dostęp do najlepszego na rynku oprogramowania. Wsparcie zespołów studenckich na tych uczelniach pozwala wielu młodym ludziom rozwijać swoje pasje i poszerzać kwalifikacje, a pracodawcom – liczyć na kompetentnych, zdolnych i chętnych do podejmowania nowych wyzwań pracowników.**

Na mocy podpisanych z firmą MESco umów o współpracy uczelnie techniczne otrzymały bogate pakiety licencji ANSYS, umożliwiające wykonywanie analiz mechanicznych, przepływowych oraz elektromagnetycznych. Dostarczone oprogramowanie może zostać wykorzystane zarówno do prowadzenia badań naukowych, jak i dydaktyki. Poza dostępem do licencji firma ANSYS zapewnia specjalistyczne szkolenia dla pracowników i studentów na preferencyjnych warunkach, a także materiały dydaktyczne dla prowadzących zajęcia oraz wsparcie w ramach prowadzonych badań rozwojowych.

Dotychczas firma MESco podpisała umowy o współpracy z następującymi uczelniami:

- Politechniką Gdańską,
- Politechniką Białostocką,
- Politechniką Krakowską,
- Akademią Górniczo-Hutniczą w Krakowie,
- Politechniką Lubelską,
- Politechniką Warszawską,
- Politechniką Śląską,
- Politechniką Wrocławską (z Wydziałem Mechaniczno-Energetycznym),
- Politechniką Poznańską,
- Politechniką Rzeszowską (więcej na ten temat na s. 4),
- Zachodniopomorskim Uniwersytetem Technologicznym w Szczecinie,
- Politechniką Opolską,
- Politechniką Łódzką,
- Politechniką Świętokrzyską,
- Szkołą Główną Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie,
- Państwową Wyższą Szkołą Zawodową w Tarnowie.

# Program ANSYS i firma MESco na Politechnice Rzeszowskiej

**Stanisław Noga** • Politechnika Rzeszowska • noga@prz.edu.pl

**Współpraca Politechniki Rzeszowskiej (PRz) z firmą MESco w zakresie oprogramowania ANSYS rozpoczęła się w pierwszej dekadzie lat 2000, kiedy w ramach realizacji projektów dydaktycznych, badawczych i badawczo-rozwojowych uczelnia zdecydowała się na dzierżawę pakietu 25 licencji tego oprogramowania do celów dydaktycznych oraz pakietu pięciu licencji naukowo-badawczych.**

Pierwszą używaną na uczelni wersją programu była wersja ANSYS 5.6. W tamtym czasie bazowano na środowisku ANSYS APDL z jego wszystkimi dobrodziejstwami i problemami. Drugi ważny etap rozpoczął się z chwilą zakupu przez Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa oraz Wydział Matematyki i Fizyki Stosowanej PRz pełnego pakietu licencji do prowadzenia zajęć dydaktycznych, a przez Wydział Elektrotechniki i Informatyki – modułu ANSYS Electronics do obliczeń naukowo-badawczych. To oprogramowanie wykorzystano do zajęć laboratoryjnych na nowo powstałym kierunku inżynieria medyczna na Wydziale Matematyki i Fizyki Stosowanej oraz na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki.

Kolejnym etapem było pozyskanie stałej licencji ANSYS Academic Campus. Korzystna zmiana polityki biznesowej firmy ANSYS Inc. oraz jej krajowego przedstawiciela (firmy MESco) zaowocowała podpisaniem w 2018 r. umowy o współpracy pomiędzy Politechniką Rzeszowską a MESco sp. z o.o. W ramach tej umowy uczelnia uzyskała dostęp – na bardzo korzystnych warunkach – do pakietu dodatkowych licencji naukowo-dydaktycznych oprogramowania ANSYS. Pozwoliło to na swobodne rozwijanie działalności naukowo-dydaktycznej i dostosowanie oferty badawczo-dydaktycznej uczelni do szybko zmieniającego się rynku.

Inną formą wsparcia dla uczelni były warsztaty szkoleniowe, przeprowadzone na Wydziale Mechaniczno-Technologicznym PRz w Stalowej Woli w listopadzie 2018 r., oraz spotkania promocyjne nt. oprogramowania (kolejne zaplanowano w marcu 2019 r.).

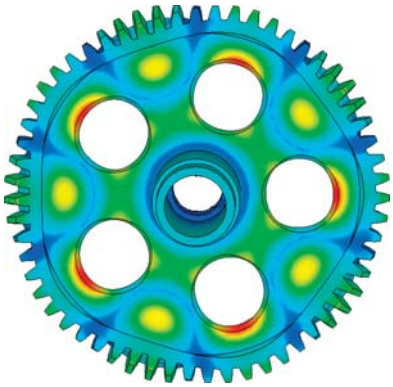
W ramach działalności Politechniki Rzeszowskiej pakiet ANSYS jest wykorzystywany do różnorakich obliczeń i symulacji numerycznych. W zakresie obliczeń statycznych i dynamicznych można wyróżnić zagadnienia odnoszące się do analiz: wytrzymałościowych, zmęczeniowych oraz drgań struktur mechanicznych i elektromechanicznych (układów kołowo-symetrycznych, elementów konstrukcyjnych płatowców, silników elektrycznych, kół zębatych, łopatek turbin silników lotniczych itp.). Te badania są prowadzone w głównej mierze na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa oraz na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki. Prace badawcze z zakresu szeroko pojętej wymiany ciepła oraz analiz przepływu płynu (w silnikach strumieniowych, elementach pneumatycznych, mikrokanałach, elementach śmigieł) są prowadzone na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa.

Z kolei na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki są realizowane prace badawcze w zakresie analizy i projektowania przetworników elektromechanicznych oraz sterowania nimi – w tych pracach wykorzystuje się moduł ANSYS Electronics. Równolegle z prowadzonymi badaniami zainteresowani studenci poszczególnych wydziałów PRz wykonują prace dyplomowe inżynierskie i magisterskie, w których korzystają ze wspomnianego oprogramowania. Tematyka prac dyplomowych jest zwykle powiązana z dyscypliną naukową reprezentowaną przez promotorów.

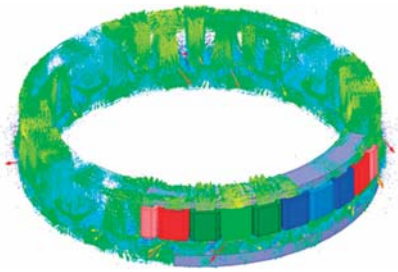
Ważnym polem zastosowania środowiska obliczeniowego ANSYS jest działalność dydaktyczna. Uzyskane od firmy MESco wsparcie pozwala na rozwijanie tego obszaru działalności uczelni. W ostatnim roku na poszczególnych wydziałach przybyło zajęć laboratoryjnych, na których wykorzystywany jest pakiet programu ANSYS. Można tu wymienić np. zajęcia z obliczeń wytrzymałościowych struktur lotniczych oraz modelowania wymiany ciepła. W przyszłości planowane jest dalsze rozwijanie tego rodzaju działalności dydaktycznej.

Warto też wspomnieć o wsparciu, jakie od firmy MESco otrzymuje koło naukowe EUROAVIA Rzeszów, skupiające studentów lotnictwa PRz. Sponsoring obejmuje pakiet licencji programu, wykorzystywany m.in. do obliczeń aerodynamicznych struktur lotniczych, projektowanych w ramach działalności koła. Ze wsparcia na podobnych warunkach korzysta także koło naukowe PRz Racing.

*Postać drgań własnych poprzecznych koła zębatego*



*Rozkład gęstości strumienia magnetycznego bezszczotkowej maszyny z magnesami trwałymi ze strumieniem podłużnym (AFM)*



**Firmom ANSYS Inc. oraz MESco sp. z o.o. życzymy kolejnych pomysłów, które zapewnią uczelniom technicznym oraz ich pracownikom i studentom jeszcze większą dostępność do oferowanego oprogramowania, przyczyniając się do jego popularyzacji.**

# Nowości w analizach mechanicznych ANSYS 2019 R1

**Marek Zaremba** • MESco
mzaremba@mesco.com.pl

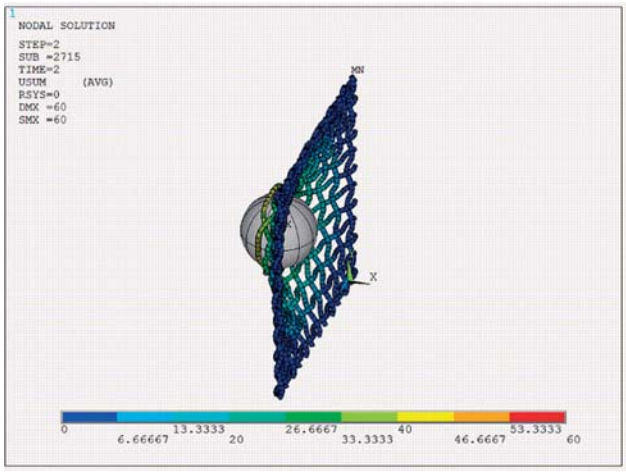
**Na styczeń tego roku przypadła premiera najnowszej wersji oprogramowania ANSYS, a wraz z nią pojawiły się nowe narzędzia i usprawnienia dotychczasowych funkcji.**

Wersja 2019 R1 wprowadza nową metodę obliczeń **Semi-Implicit**, bardzo wydajną w przypadku trudnych problemów wymagających solvera Explicit. W metodzie Semi-Implicit analiza rozpoczyna się od niejawnej metody rozwiązania (Implicit) i w przypadku kłopotów z uzyskaniem zbieżności przechodzi do jawnej metody rozwiązania (Explicit). W krótkim okresie ekstremalnie nieliniowego zachowania solver wykorzystuje metodę jawną. Analiza może (choć nie musi) wrócić do niejawnej metody w zależności od określonego przez użytkownika kryterium czasu spędzonego w fazie jawnej. Metoda Semi-Implicit jest zalecana do zadań (np. problemów z zatrzaskiwaniem, modeli z wyboczeniem lokalnym), które ze względu na chwilowe skrajne nieliniowości nie uzyskują zbieżności w rozwiązaniu Implicit (rys. 1).

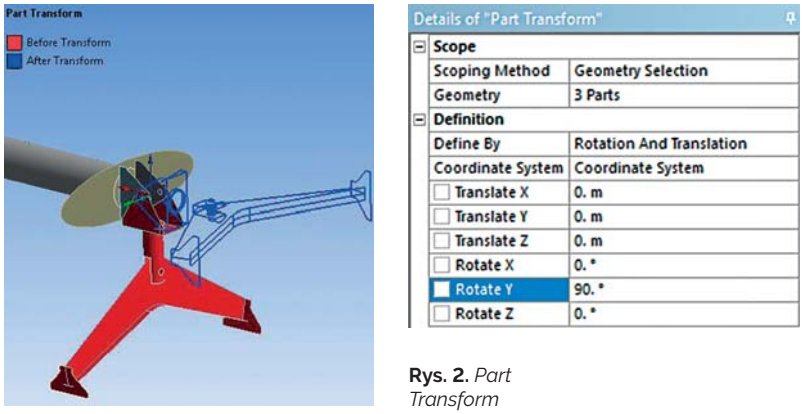
Ponadto pojawiło się nowe narzędzie do transformacji obiektów w aplikacji Mechanical. **Part Transform** umożliwia określenie transformacji modelu w celu modyfikacji położenia i orientacji części w modelu. Jest to przydatne, gdy chcemy mieć większą kontrolę nad położeniem modelu i gdy ważne jest symulowanie różnych orientacji części. Na podglądzie graficznym można zobaczyć lokalizację części przed transformacją i po niej (rys. 2).

Kolejną ciekawą funkcją jest tworzenie własnych szablonów symulacyjnych opartych na Named Selection. Funkcja **Simulation Templates** pozwala na ponowne użycie zdefiniowanego szablonu dla różnych geometrii. ANSYS Workbench umożliwia uruchomienie aplikacji Mechanical bez dołączania geometrii, a następnie zdefiniowanie Named Selection i przypisanie do różnych obiektów analizy (np. warunków brzegowych, kontaktów). Po określeniu warunków analizy można zapisać projekt i użyć konfiguracji dla dowolnego pożądanego modelu. Projekt staje się szablonem do analizy (rys. 3). W związku z tym, że aplikację Mechanical da się otworzyć bez uwzględnienia geometrii, pojawiła się nowa opcja **Attach/Replace Geometry**, dostępna z paska narzędzi obiektu Geometry, umożliwiająca import geometrii z poziomu aplikacji Mechanical lub – po dołączeniu geometrii – zastąpienie geometrii istniejącej.

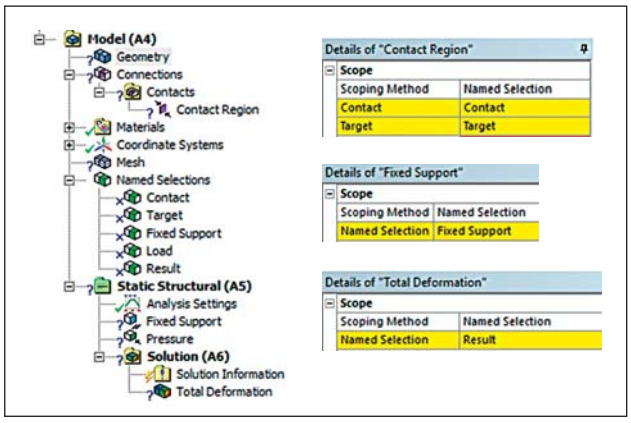
W ANSYS 2019 R1 funkcja **Solution Combination** obsługuje kombinację następujących typów analizy: Harmonic Response, Static Structural, Transient Structural (wcześniej można było łączyć tylko analizy Static Structural). Obecnie oprogramowanie pozwala na określenie wielu kombinacji w zakresie jednego obiektu Solution Combination. Wprowadzono ponadto opcję importu i eksportu ustawień jako pliku *.csv*. Wyeksportowany plik można otworzyć w dowolnym




**Rys. 1.** *Przykład modelu dla metody Semi-Implicit*




**Rys. 2.** *Part Transform*




**Rys. 3.** *Simulation Templates*

edytorze, np. Microsoft Excel, a następnie zmodyfikować dane *.csv* i zaimportować z powrotem do analizy Mechanical za pomocą opcji Importuj (rys. 4).

Dodatkowo Mechanical oferuje funkcję **Keyframe Animation**, która umożliwia zestawienie różnych migawek modelu w oknie Geometry lub Results w celu utworzenia animacji wizualizacji geometrii lub wyników w przestrzeni czasu. Klatki są tworzone przez umieszczenie modelu w pożądanej orientacji i kliknięcie „Create Keyframe". Aplikacja interpoluje przejście z klatki początkowej, poprzez klatki pośrednie, do klatki końcowej, aby utworzyć płynną animację. Można np. utworzyć animację obracającego się modelu i wyeksportować plik jako GIF, MP4, WMV lub AVI.

ANSYS Workbench 2019 R1 oferuje nowy typ symetrii w statycznych analizach strukturalnych 3D: **General Axisymmetric**. Funkcja służy do tworzenia siatki w kierunku obwodowym na podstawie geometrii typu Surface. Obciążenia węzłowe definiuje się poprzez Named Selection – mogą one być nieosiowosymetrycznymi obciążeniami, ponieważ węzły są pobierane z dowolnej płaszczyzny węzłowej. Natomiast funkcje Pressure, Remote Force czy Moment and Displacement można zastosować do krawędzi lub wierzchołka – wtedy obciążenie zostanie zastosowane do wszystkich płaszczyzn węzłowych (rys. 5)

W Additive Suite najważniejszą nowością jest metoda tworzenia siatki czworościennej: **Layered Tetrahedrons**. Pozwala ona na tworzenie siatki podzielonej na równe warstwy – tak jak w przypadku dotychczasowej siatki kartezjańskiej. Istotną przewagą nowej metody jest lepsze odwzorowanie krzywizn geometrii bez potrzeby przesadnego zagęszczania siatki. Jej inne możliwości to: uwzględnianie wpływu obróbki cieplnej, bezpośrednie zamodelowanie proszku otaczającego budowaną część, wykorzystanie symetrii oraz wykorzystanie narzędzia do wykrywania zderzeń budowanej części i ramienia nanoszącego proszek (*blade crash*) (rys. 6).

W przypadku Topology Optimization od wersji 2019 R1 wspierana jest optymalizacja modelu ze względu na symulację przypływu ciepła. Nowością jest także możliwość optymalizacji regionu geometrii powłokowej. Niestety, optymalizacja grubości nadal jest ograniczeniem dla tego typu analizy. Pojawiła się również funkcja służąca do wygładzania wyniku. Narzędzie **Smoothing Result** tworzy wygładzony STL, który może być następnie użyty do badania walidacji projektu (rys. 7).

Wśród nowości w analizach mechanicznych można wymienić ponadto: Convection Fluid Flow, superelementy w analizie harmonicznej, możliwość obliczeń bezpośrednio w chmurze oraz wiele innych, opisanych w ANSYS Help.

Solution Combination

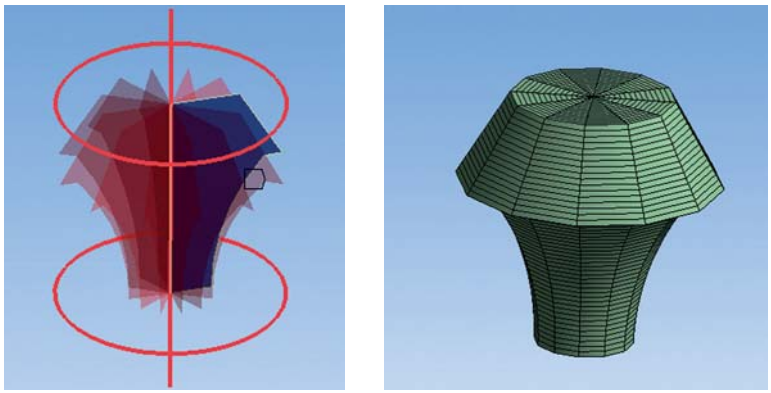
*Right click on the grid to add/delete a row or a column.

Import... Export...

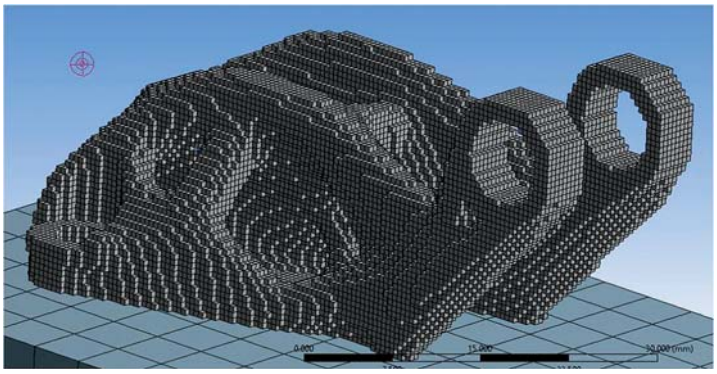
| | A | B | C | D | E | F |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | Environment | Static Structural | Static Structural | Harmonic Response | Transient |
| 2 | | Time/Frequency | 1 | End Time | 85 | 2 |
| 3 | | Phase Angle | | | 270 | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | Combination ... | Type | | | | |
| 6 | Combination 1 | Linear | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 7 | Combination 2 | SRSS | 0 | 0.5 | 0.5 | 0 |
| 8 | Combination 3 | Linear | -1 | 2 | 0 | 0.5 |

Add Combination  Add Base Case

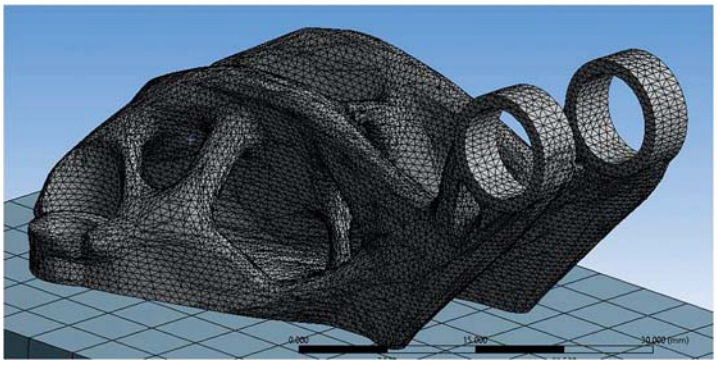
**Rys. 4.** *Solution Combination*



**Rys. 5.** *General Axisymmetric*

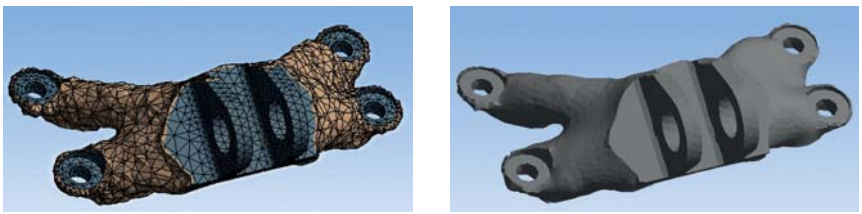


a)



b)

**Rys. 6.** *Additive Suite: a) siatka kartezjańska, b) siatka czworościenna*



**Rys. 7.** *Smoothing Result*

# Proces symulacji produkcji addytywnej metali

**Jakub Poraj** • MESco • jporaj@mesco.com.pl

**Produkcja addytywna metali (*metal additive manufacturing*), znana również jako druk 3D metali, jest jedną z najprężniej rozwijających się gałęzi techniki. Technologie druku 3D są istotną częścią koncepcji internetu rzeczy (Internet of Things – IoT), dzięki czemu współtworzą tzw. czwartą rewolucję przemysłową.**

Według raportu Wohlers Report z 2018 r. liczba sprzedanych na całym świecie drukarek 3D do metalu w 2016 r. wyniosła 983, a w 2017 r. – 1768. To oznacza mniej więcej 80-procentowy wzrost sprzedaży (rys. 1).

Gama produktów wytwarzanych techniką druku 3D obejmuje już części samochodowe, mosty, a nawet komponenty rakiet. A to zapewne dopiero początek. Obecnie na rynku dostępnych jest kilka technologii druku 3D metali, różniących się pod względem rodzaju źródła energii czy formy, w jakiej podawany jest metal. Wiodącymi technologiami są PBF (*powder bed fusion*) oraz DED (*direct energy deposition*).

Technologia PBF (rys. 2) polega na budowaniu obiektu poprzez spajanie kolejnych warstw proszku metalu (rys. 3). Proces odbywa się w następujący sposób: pierwsza warstwa proszku jest umieszczana w złożu (*bed*) na specjalnej podstawie (*base plate*), która ma możliwość poruszania się w górę i w dół. W drugim kroku proszek jest spajany w odpowiednich miejscach, aby utworzyć pierwszą spojoną warstwę. Spajanie odbywa się z wykorzystaniem lasera bądź wiązki elektronowej. W trzeciej fazie złoże jest obniżane i kolejna porcja proszku jest nanoszona za pomocą specjalnego mechanizmu na poprzednio zespojoną warstwę – cały proces odbywa się od nowa. Po zakończeniu druku należy odciąć podpory (*supports*) od wydrukowanej części. Podpory w procesie PBF tworzy zespojony materiał, który nie stanowi części końcowego wyrobu, lecz jest niezbędny do utworzenia np. wystających części drukowanego obiektu (rys. 4). Mniej więcej 80% wszystkich drukarek 3D metali bazuje na technologii PBF.

W przeciwieństwie do techniki PBF technologia DED (rys. 5) nie wykorzystuje złoża proszku metalu. W tym przypadku materiał w postaci proszku (lub drutu) jest podawany za pomocą dyszy (lub podajnika) i spajany. Ta technologia charakteryzuje się wysoką dokładnością wykonania i doskonale nadaje się do naprawy uszkodzonych elementów.

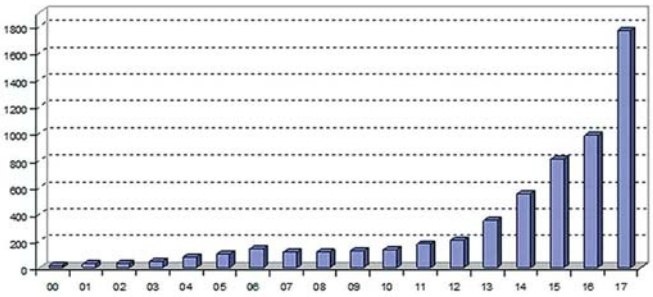
Produkcja addytywna metali ma kilka zalet, które okazują się bardzo przydatne w dzisiejszym przemyśle.

## Maksymalne wykorzystanie materiału

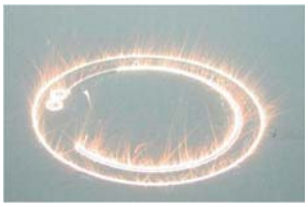
Tradycyjne technologie, takie jak skrawanie, powodują znaczne marnotrawstwo materiału. Odpady w postaci skrawków blach czy wiórów, które są nieodłącznym elementem większości typowych metod obróbki metali, wymagają ponownego przetopienia, o to oznacza stratę czasu i energii. W przypadku druku 3D możemy ponownie wykorzystać niezużyty materiał – niezależnie od tego, czy jest on w formie proszku, czy drutu. Dzięki technologii druku DED dostarczamy określoną porcję materiału i energii dokładnie tam, gdzie jest to potrzebne. W przypadku technologii PBF niewykorzystany proszek metalu możemy po prostu zachować do następnego druku. W sytuacji gdy chcemy wytwarzać łopatki turbin, które są wykonywane z wysokiej jakości, drogich stopów metali, oszczędność surowców jest na wagę złota. Dzięki zminimalizowaniu zasobów energii i surowców technologia druku 3D jest również stosunkowo przyjazna środowisku naturalnemu.

## Większe możliwości projektowania

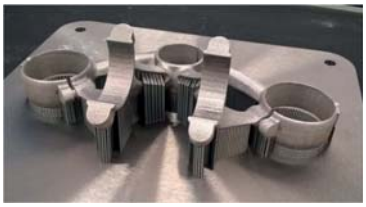
Druk 3D jest pozbawiony wielu ograniczeń związanych z kształtem wytwarzanych części. Kształty odlewów są ograniczone m.in. przez kształt formy



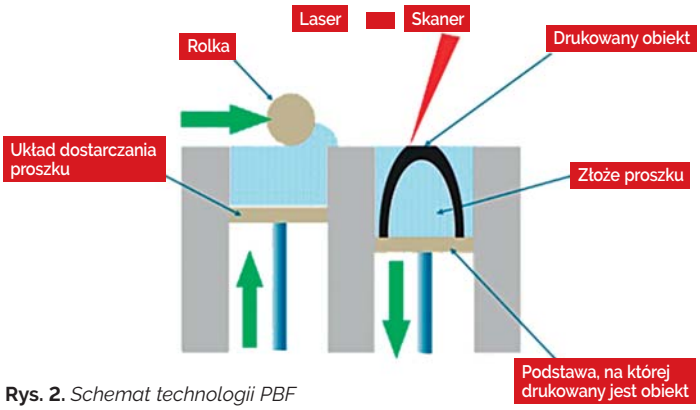

**Rys. 1.** *Wykres przedstawiający liczbę sprzedanych od początku XXI w. drukarek 3D do produkcji części z metalu*



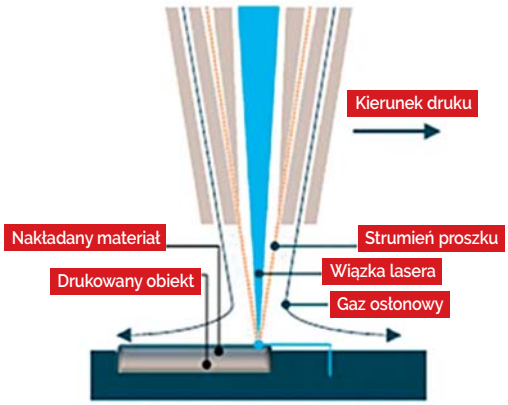
**Rys. 3.** *Proces spajania – PBF*



**Rys. 4.** *Wydrukowana część na podstawie – przed odcięciem podpór*




**Rys. 2.** *Schemat technologii PBF*




**Rys. 5.** *Schemat technologii DED*

odlewniczej. Kształt przedmiotu obrabianego na frezarce jest ograniczony przez sposób, w jaki może się poruszać nóż, oraz przez konstrukcję samej frezarki. Gdy wytwarzanie odbywa się warstwa po warstwie, praktycznie nic nie stoi na przeszkodzie, aby otrzymać pożądaną geometrię. Dzięki tej swobodzie projektowania inżynierowie mogą wykorzystać potencjał optymalizacji topologicznej. Obiekty udoskonalane na drodze optymalizacji topologicznej często przybierają kształty wytworzone przez naturę dzięki doborowi naturalnemu. Wysoce skomplikowane struktury, niejednokrotnie przypominające wewnętrzną budowę kości czy gałęzi drzew, pozwalają m.in. na znaczną redukcję masy budowanych części. W przypadku produkcji addytywnej również liczba potrzebnych połączeń jest znacznie ograniczona. Kilka prostych części połączonych śrubami można zastąpić jedną o bardziej skomplikowanym kształcie. Dzięki połączeniu optymalizacji topologicznej z technologią druku 3D tego rodzaju obiekty są nie tylko w dużej mierze projektowane przez algorytmy komputerowe, lecz także po raz pierwszy w historii stały się możliwe do wytworzenia.

## Szybkość wytwarzania

Wytwarzanie technologią druku 3D charakteryzuje się krótszym – w porównaniu z tradycyjnymi technologiami – czasem potrzebnym do otrzymania gotowego produktu, liczonym od momentu rozpoczęcia produkcji (*lead time*). Jest to głównie zasługą małej liczby koniecznych do wykonania procesów. Przeważnie wytwarzanie za pomocą druku 3D polega na wydrukowaniu części, usunięciu podpór oraz ewentualnej obróbce powierzchni. Wiele operacji – takich jak wykonywanie otworów, fazowanie krawędzi czy skręcanie komponentów – można wyeliminować lub wykonać już na etapie druku. Mimo że sam proces druku jest stosunkowo wolny, to jednak dzięki wyeliminowaniu innych operacji gotowe części otrzymuje się w znacząco krótszym czasie.

## Efektywność produkcji na małą skalę

Większość dotychczasowych technologii wytwarzania części z metalu wymaga wielkoskalowej produkcji. Produkcja takich elementów, jak śruby, sworznie czy sprężyny, jest na małą skalę wysoce nieopłacalna. Wielkoskalowa produkcja wiąże się z kolei z ogromnymi zakładami, wyspecjalizowanymi liniami produkcyjnymi i małą elastycznością pod względem rodzaju wytwarzanych produktów. W przypadku druku 3D potrzebujemy jedynie drukarki oraz ewentualnych środków pozwalających na obróbkę wykończeniową, np. szlifowanie bądź wygrzewanie. Pionierzy techniki widzą w tej nowej branży potencjał do skolonizowania Marsa. W końcu nie trzeba przecież decydować na Ziemi, co się może przydać na Czerwonej Planecie. Można zabrać drukarkę oraz proszek metalu i… zdecydować na miejscu.

Należy mieć na uwadze, że technologia druku 3D metali nadal jest nowym trendem w przemyśle. Największymi ograniczeniami do przezwyciężenia są w tej dziedzinie:

- mała opłacalność w przypadku produkcji na dużą skalę,
- niewielkie gabaryty produkowanych części,
- problemy związane z mieszaniem materiałów,
- niska jakość proszków metali,
- gorsze właściwości mechaniczne części drukowanych w porównaniu z wykonanymi tradycyjnie.

Wyzwaniami, które dotyczą ściśle samego procesu druku, są:

- pękanie drukowanych części,
- odrywanie się drukowanych części od podpór,
- znaczne odkształcenia termiczne.

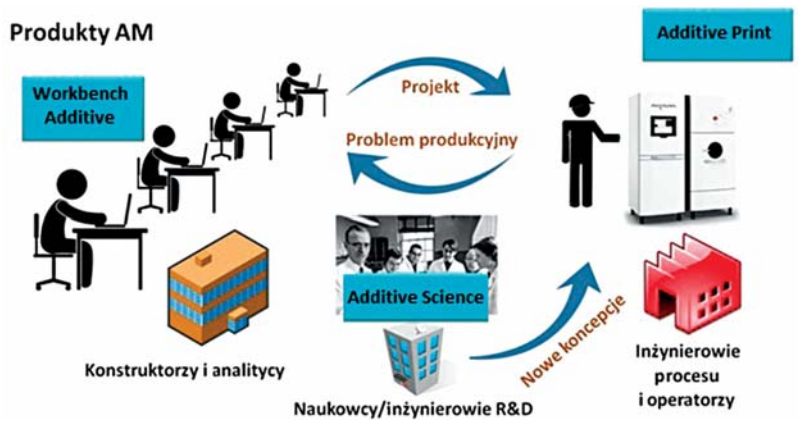
Na szczęście ustalanie odpowiednich parametrów procesu można usprawnić z wykorzystaniem komputerowego modelu, który w tani i szybki sposób pozwoli na przestudiowanie możliwych scenariuszy. Przeciwieństwem tego podejścia jest stosowanie metody prób i błędów z wykorzystaniem rzeczywistych prototypów, co wiąże się z poświęceniem czasu maszyny i cennego materiału. Dzięki obliczeniom numerycznym prognozowanie odkształceń termicznych czy niebezpiecznie wysokich wartości naprężeń jest coraz łatwiejsze. Prowadzi to do skrócenia bądź wyeliminowania procedury prób i błędów oraz daje wytwórcom pojęcie na temat stanu otrzymanego obiektu (np. przez przewidywanie naprężeń resztkowych).

W ubiegłym roku firma ANSYS dokonała zakupu 3DSIM, światowego lidera w dziedzinie symulacji procesu produkcji addytywnej metali, o czym wspominaliśmy na naszym blogu. Obecnie ANSYS oferuje trzy zaawansowane narzędzia do symulacji procesu druku: Workbench Additive, Additive Print oraz Additive Science (rys. 6).

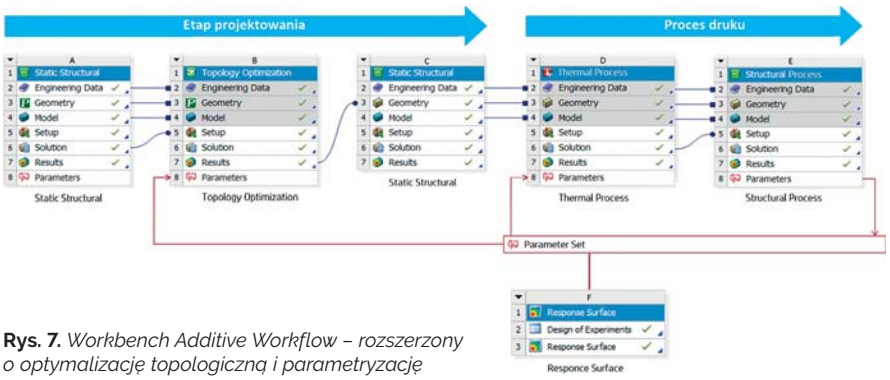
## Workbench Additive

Workbench Additive jest narzędziem przeznaczonym dla konstruktorów i analityków, którzy do tej pory projektowali produkty wytwarzane metodą obróbki skrawaniem, odlewania, kucia, spawania itd. Nowa technologia wytwarzania stwarza nieznane dotychczas przeszkody i możliwości. Symulacja całego procesu druku 3D może w znaczący sposób poprawić efektywność produkcji. Oprogramowanie Workbench Additive jest dostępne jako aplikacja ACT (Additive Manufacturing System), którą bezpłatnie można pobrać z ANSYS App Store.

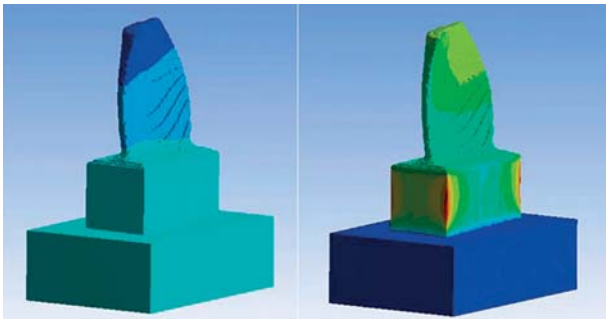
Workbench Additive opiera się na rozwiązaniu jednostronnie sprzężonego zagadnienia termosprężystości w środowisku ANSYS Workbench.



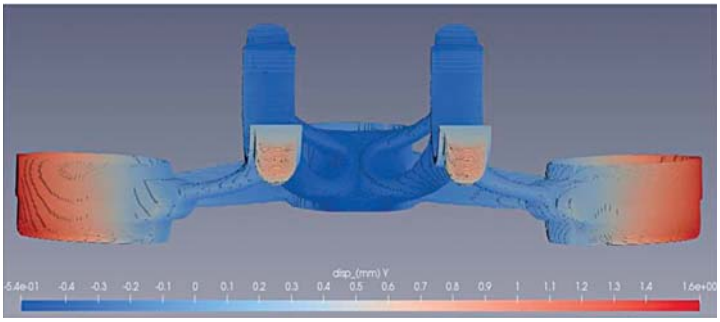

**Rys. 6.** *Branża produkcji addytywnej (AM) oraz odpowiednie narzędzia do symulacji*



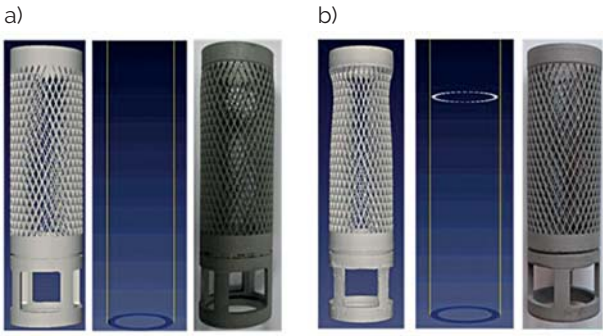

**Rys. 7.** *Workbench Additive Workflow – rozszerzony o optymalizację topologiczną i parametryzację*



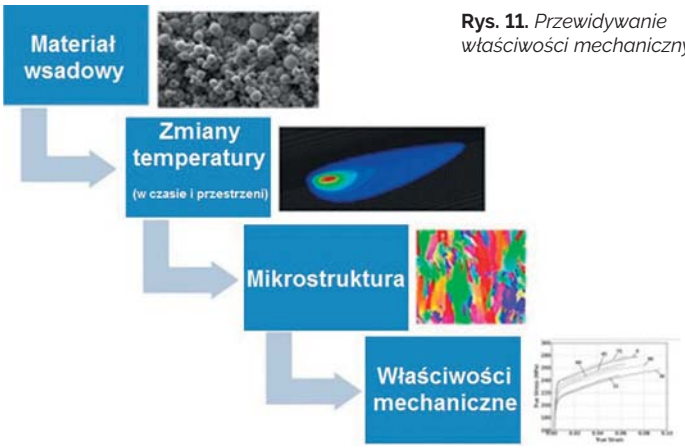
**Rys. 8.** *Łopatka „wydrukowana" w Workbench Additive – pole temperatury (po lewej) i pole naprężeń (po prawej)*



**Rys. 10.** *Przykładowe pole przemieszczeń*




**Rys. 9.** *Automatyczna kompensacja – geometria oryginalna (a) i skompensowana (b)*




**Rys. 11.** *Przewidywanie właściwości mechanicznych*

Pierwszy etap obejmuje projektowanie obiektu, który ma zostać wydrukowany. Można ominąć etap projektowania i zacząć od analizy termicznej, np. wczytując bezpośrednio model CAD (w tym przypadku do komponentu D). Jednakże, jak wspominałem we wcześniejszej części tego artykułu, technologia druku 3D pozwala nam na znacznie lepsze dostosowanie konkretnego obiektu pod kątem jego przeznaczenia dzięki optymalizacji topologicznej (rys. 7). Warto więc mieć na uwadze, jak wielką przewagę daje nam technologia produkcji addytywnej nad konwencjonalnymi metodami wytwarzania. Kolejnym krokiem jest przeprowadzenie nieustalonej analizy termicznej. Otrzymane pola temperatury są następnie wykorzystywane w analizie mechanicznej (rys. 8).

Należy pamiętać o założeniach, na których oparta jest analiza Workbench Additive, takich jak:

- jednostronne sprzężenie zagadnienia termosprężystości,
- budowanie obiektu za pomocą techniki *element birth*,
- tworzenie całej warstwy elementów skończonych w jednym momencie,
- jedna warstwa elementów skończonych odpowiada pewnej liczbie warstw proszku metalu.

Dzięki obszernej dokumentacji nie jest potrzebna dogłębna wiedza z zakresu samej technologii czy obliczeń numerycznych. Użytkownik jest instruowany, krok po kroku, na każdym etapie analizy. Wymagane jest podanie kluczowych informacji, takich jak: właściwości używanego proszku metalu, grubość drukowanej warstwy czy temperatura schładzania produktu. Aplikacja pozwala na symulację procesów PBF oraz DED.

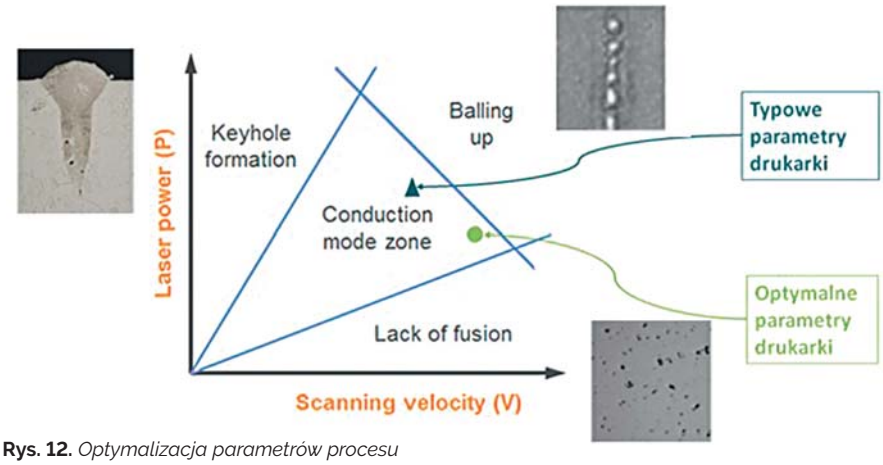
## Additive Print

Additive Print jest narzędziem przeznaczonym dla inżynierów produkcji oraz operatorów maszyn, a więc osób, których zadaniem nie jest projektowanie, przeprowadzanie optymalizacji topologicznych czy innych tego typu operacji. Przydatna w środowisku produkcyjnym jest natomiast możliwość określenia optymalnej orientacji drukowanych obiektów czy modyfikacji pliku CAD w celu skompensowania odkształceń termicznych (rys. 9). Additive Print jest łatwą w użytkowaniu i niezależną aplikacją, która pozwala na rozwiązywanie prostych problemów produkcyjnych bez konieczności odsyłania projektu do działu konstrukcyjnego.

Additive Print daje nam możliwość wykorzystania geometrii w formacie STL oraz tzw. Scan Pattern, czyli zbioru wektorów, które sterują ruchem lasera (bądź innego źródła energii) podczas druku 3D. Trudno o dokładniejszy warunek brzegowy niż ten zaczerpnięty wprost z drukarki 3D. W rezultacie otrzymujemy bardzo precyzyjny przebieg temperatury w czasie i przestrzeni.

Ze względu na sposób wyznaczania odkształceń możemy przeprowadzić trzy rodzaje symulacji:

- przy założeniu odkształcenia izotropowego – najprostszą i najszybszą analizę bez wykorzystania Scan Pattern,
- przy założeniu odkształcenia anizotropowego – analizę z wykorzystaniem Scan Pattern,




**Rys. 12.** *Optymalizacja parametrów procesu*

- przy założeniu odkształcenia anizotropowego oraz dodatkowej akumulacji odkształcenia wynikającego z wielokrotnie powtarzanego cyklu topnienia/krzepnięcia – analizę z wykorzystaniem Scan Pattern.

### Additive Science

W przypadku gdy wiedza na temat odkształcenia drukowanej części lub naprężeń w niej powstających nie jest wystarczająca, Additive Science jest właściwą odpowiedzią.

Podobnie jak Additive Print również Additive Science wykorzystuje Scan Pattern przy definiowaniu warunku brzegowego ruchomego źródła ciepła. Pozwala to na dogłębną analizę zjawisk fizycznych, z którymi mamy do czynienia w trakcie druku 3D. Jak to działa? Znając właściwości proszku metalu oraz przebieg zmian temperatury obiektu w czasie i przestrzeni, możemy przewidzieć, jaka będzie mikrostruktura otrzymanego produktu (rys. 11). Wiedza o mikrostrukturze daje nam informacje na temat właściwości mechanicznych.

Jak możemy wykorzystać tę wiedzę? Optymalizując proces (rys. 12), dążymy do tego, aby drukować szybko, z wykorzystaniem minimum energii i eliminacją wad produktu. Zbyt duża moc lasera powoduje topnienie nie tylko świeżej warstwy proszku, lecz także poprzednio zespojonych warstw. Przesadna prędkość skanera skutkuje zaś brakiem fuzji materiału wsadowego. Skutkiem zastosowania nadmiernych parametrów procesu są wady w postaci porów. Wykorzystując wirtualny model, możemy sprawdzić wiele konfiguracji procesu bez dotykania drukarki.

Połączenie potencjału niekwestionowanego lidera symulacji druku metali, czyli 3DSIM, oraz środowiska ANSYS daje potężne możliwości rozwoju nowej branży, jaką jest produkcja addytywna części z metalu. W miarę rozwoju tej technologii będzie też rosnąć potrzeba wykonywania coraz bardziej precyzyjnych analiz procesu druku. W przyszłości możemy się spodziewać wyraźnego rozwoju narzędzi do symulacji procesu druku, a zwłaszcza zwiększenia ich precyzji oraz sprzężenia ze środowiskiem ANSYS.

# Analiza wytrzymałościowa kompozytowego pylonu łodzi AGH Solar Boat

**Michał Szewczyk** • AGH Solar Boat Team • szewczyk.michal96@gmail.com

**W artykule opisano wykorzystanie oprogramowania ANSYS Mechanical oraz ANSYS Composite PrepPost w procesie doboru materiału do budowy pylonu głównego łodzi solarnej. Porównano efekty zastosowania dwóch różnych technologii wykonania tego elementu. Przeprowadzone symulacje zwróciły uwagę na problemy wytrzymałościowe, które mogą się pojawić przy zmianie materiału wypełnienia na piankę polimerową, oraz pozwoliły zaprojektować system wzmocnień i wprowadzić lokalne modyfikacje geometrii pylonu.**

Fot. Paweł Szupiluk • KSAF

### Łódź solarna

W 2017 r. krakowscy studenci zrzeszeni w projekcie AGH Solar Boat zbudowali solarną łódź wyścigową, z którą regularnie startują w międzynarodowych zawodach. Łódź „Baśka" jest stale ulepszana, m.in. pod względem użytych materiałów. Większość jej elementów konstrukcyjnych jest wytwarzana z lekkich materiałów kompozytowych, w tym CFRP.

### Pylon główny

Analizie poddano pylon napędowy łodzi. Układ sił działających na ten element podczas jego pracy przedstawiono na rys. 1. Są to:

- $F_T$ – siła ciągu śruby napędowej – ok. 1000 N,
- $F_D$ – opór hydrodynamiczny – o maksymalnej wartości 120 N,
- $F_G$ – ciężar łodzi wywierany na pylon tylny – 960 N,
- $F_L$ – siła nośna generowana przez hydroskrzydła – 960 N.

Krytyczny przypadek występuje w momencie, gdy łódź jest przechylona pod maksymalnym kątem względem pionu (ok. 10°). Siła nośna jest wtedy rozbita na składową pionową i poziomą, dodatkowo zginającą element.

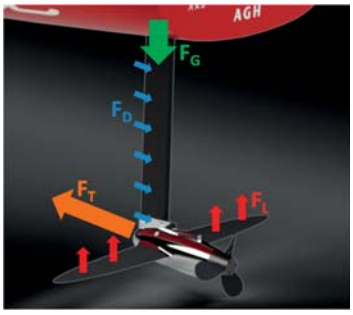
W dotychczasowym projekcie budowa pylonu przypomina strukturę kompozytu typu *sandwich* (rys. 2) – we wnętrzu, pomiędzy okładkami laminatu z prepregu węglowego, znajdują się kompozytowy dźwigar oraz rurki i profile węglowe, które pełnią funkcję prowadnic dla okablowania. Pozostała przestrzeń jest wypełniona żywicą epoksydową z napełniaczami.

Dzięki takiemu rozwiązaniu wytworzone w poprzednich sezonach pylony nie uległy żadnym uszkodzeniom, jednak były stosunkowo ciężkie.

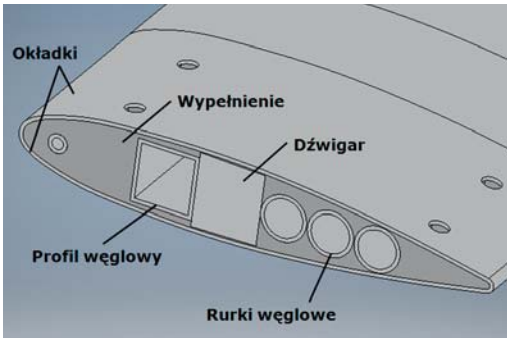
Obecnie trwają prace nad wykorzystaniem pianki polimerowej zamiast żywicy jako materiału wypełnienia. Poza oczywistymi korzyściami z zastosowania lżejszej pianki zmienia się również technologia wykonania, co pozwala na uzyskanie częściowej ciągłości włókien laminatu na krawędziach pylonu.

### Model pylonu i analiza statyczna

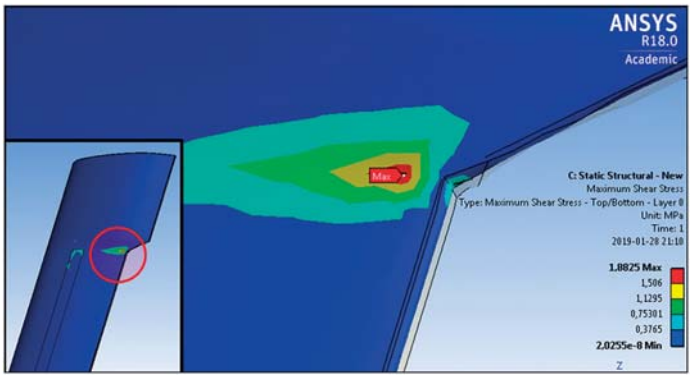
W programie ANSYS utworzono model pylonu wykonanego w dotychczasowej technologii – geometrię podzielono na elementy modelowane jako monolity (wypełnienie oraz dźwigar) i elementy kompozytowe projektowane w ACP-Pre (okładki i rurki węglowe). Przeprowadzono kontrolną symulację, która potwierdziła brak problemów wytrzymałościowych przy zadanych obciążeniach. Całkowita masa pylonu wyniosła ok. 2 kg.



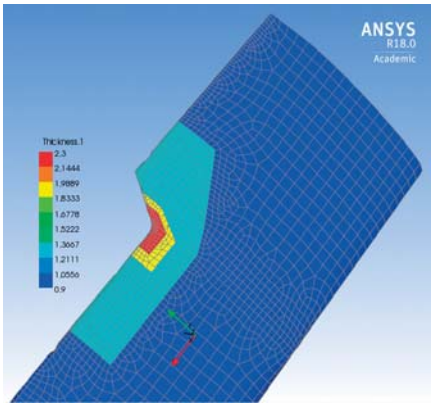

**Rys. 1.** *Układ sił działających na pylon główny*



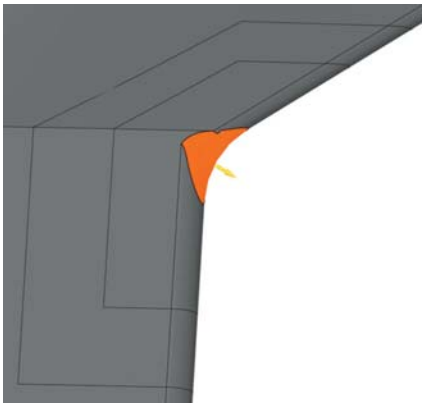

**Rys. 2.** *Budowa pylonu*




**Rys. 3.** *Zniszczenie pianki polimerowej. Maksymalne naprężenia ścinające 1,88 MPa znacznie przekraczają wytrzymałość na ścinanie materiału (1,3 MPa)*




**Rys. 4.** *Regiony wzmacniane dodatkowymi warstwami kompozytu*



**Rys. 5.** *Utworzone zaokrąglenie*

Kryteriami porównawczymi dla różnych symulacji były:

- rozkład naprężeń w laminacie,
- współczynniki wytężenia w laminacie,
- naprężenia normalne i ścinające w materiale wypełnienia.

Analogicznie zamodelowano pylon wykonany w nowej technologii – ze złożenia usunięto rurki węglowe oraz zmieniono materiał wypełnienia na piankę.

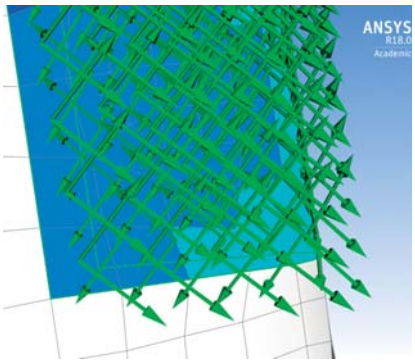
Symulacja potwierdziła, że konsekwencją tej zmiany może być zniszczenie zarówno okładek, jak i pianki w rejonie przedstawionym na rys. 3. Wyciągnięto wniosek, że w celu zabezpieczenia takiej konstrukcji należy w miejscu największej koncentracji naprężeń zastosować wzmocnienia (rys. 4) oraz zaokrąglić geometrię (rys. 5). Wykorzystano program SpaceClaim, w którym na powierzchnię okładek naniesiono obszary wymagające wzmocnienia dodatkowymi warstwami kompozytu. Ponadto rozszerzono dźwigar – tak, aby na obu powierzchniach bocznych pylonu miał kontakt z okładkami, bez pośredniej warstwy pianki, która ze względu na małą grubość (0,2 mm) może łatwo ulegać w tym miejscu uszkodzeniom.

Na przygotowanych powierzchniach zaprojektowano różne systemy lokalnych wzmocnień, z których najbardziej efektywne okazało się umieszczenie naprzemiennie warstw dwukierunkowej tkaniny węglowej (rys. 6) o orientacji 0°/90° oraz 45°/–45° względem osi pionowej pylonu. Zauważono, że ułożone w ten sposób włókna we wzmocnieniach pełnią funkcję „szwów" spajających obie boczne powierzchnie i zabezpieczających krawędzie. W dalszych warstwach laminatu potwierdzono natomiast zalety tkaniny jednokierunkowej (rys. 7), która najefektywniej przenosi naprężenia rozciągające powstające przy zginaniu pylonu. Udowodniono ponadto możliwość usunięcia z konstrukcji rurek węglowych i zastąpienia ich otworami o odpowiednio mniejszej średnicy, frezowanymi w materiale piankowym.

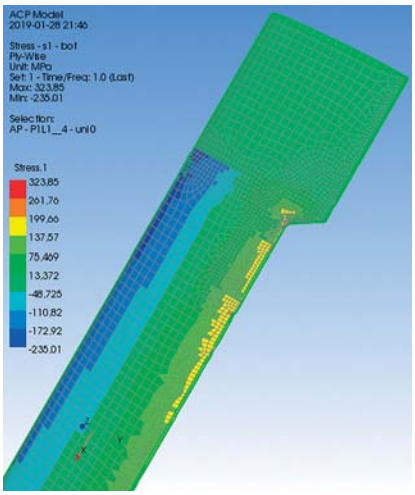
W zmodyfikowanym pylonie współczynniki wytężenia laminatu na okładkach nie przekraczają 0,86, a zbadane naprężenia powstające w piance są odpowiednio niższe od jej wytrzymałości na rozciąganie, ściskanie i ścinanie. Całkowita masa elementu wynosi ok. 0,9 kg.

## Podsumowanie

Symulacje przeprowadzone w programie ANSYS uzasadniły wybór technologii wytwarzania pylonu oraz wskazały na sposoby jej ulepszenia w nadchodzącym sezonie. Planowana zmiana koncepcji budowy pylonu okazała się korzystna ze względu na ponad dwukrotną redukcję masy elementu, jednak wiązała się z koniecznością: przeprowadzenia bardziej wnikliwej analizy skutków obciążeń, przeprojektowania geometrii oraz utworzenia odpowiednich wzmocnień. Nowa technika będzie też wymagała większej precyzji w procesie produkcji.




**Rys. 6.** *Wzmocnienie krawędzi pylonu dwukierunkową tkaniną*




**Rys. 7.** *Rozkład naprężeń w jednokierunkowej tkaninie, będącej czwartą z pięciu warstw laminatu*

# Wykorzystanie modeli CAD/CAM/CAE do lokalnych analiz MES

**Bartosz Płochocki** • Partner MESco • bplochocki@mesco.com.pl

**Analizy MES, bazujące na modelach typu *fine mesh* i *very fine mesh*, wymagają przygotowania geometrii dla dużych i skomplikowanych konstrukcji. Tworzenie modelu jest żmudnym, czasochłonnym i trudnym do oskryptowania procesem. Dobrym pomysłem wydawało się wykorzystanie modeli projektowo-produkcyjnych, tworzonych na etapie przygotowywania dokumentacji technicznej i wykonawczej. Niestety, ze względu na dużą ilość problemów występujących podczas konwersji takich modeli zrezygnowano z takiego podejścia. Dopiero z pojawieniem się w rodzinie ANSYS oprogramowania Space Claim Desing Modeler (SCDM) możliwe stało się opracowanie wydajnej ścieżki konwersji.**

Podstawowym problemem w przypadku konwersji jest typ geometrii. Podczas gdy modele CAD/CAM/CAE z oprogramowania branżowego to modele bryłowe, analizy MES są wykonywane na bazie modeli powłokowych i jest to ściśle powiązane z normami. Opcja tworzenia powierzchni pośrednich istniała już w Design Modeler, lecz jej używanie w odniesieniu do modeli składających się z dużej liczby elementów było – delikatnie mówiąc – nieekonomiczne. Samo wygenerowanie powierzchni pośrednich to tylko połowa sukcesu. Wygenerowane geometrie należy wyrównać i dociągnąć/uciąć (rys. 1) oraz zdefiniować grubość.

Kolejnym problemem jest liczba detali istotnych z punktu widzenia produkcji, ale pomijalnych (czy wręcz problematycznych przy generowaniu siatki) z punktu widzenia analizy wytrzymałościowej. Bardzo często mamy do czynienia z modelami produkcyjnymi, w których każda część jest osobną bryłą i do uzyskania ciągłej siatki konieczna jest kontrola współdzielonej topologii.

ANSYS SCDM ma funkcje, które umożliwiają użytkownikowi automatyczne zaadresowanie opisanych problemów oraz wydajną kontrolę jakości uzyskanych efektów. Jeśli dodamy do tego zaawansowane opcje skryptowania oraz dobrą praktykę, otrzymamy wydajną ścieżkę prowadzącą do bardzo dobrych rezultatów przy minimalnym nakładzie czasu i pracy.

Pierwszym krokiem jest import geometrii do SCDM. Do tej pory najlepszym rozwiązaniem było wykorzystanie formatu STP. Jest on obsługiwany przez większość oprogramowania branżowego oraz przez SCDM. Tak zaimportowane bryły są dostępne w drzewku jako osobne obiekty. Kolejnym krokiem jest ograniczenie modelu. W pliku STP mamy zazwyczaj całą sekcję, co niekoniecznie musi się pokrywać z interesującym nas obszarem. W SCDM wystarczy utworzyć odpowiednie płaszczyzny, przyciąć model z użyciem opcji **Podziel bryłę** (Split Body) i usunąć niepotrzebną geometrię. Gdy interesująca nas geometria znajduje się w kilku sekcjach, wystarczy odpowiednio przyciąć i skopiować elementy z drzewka do wspólnego projektu.

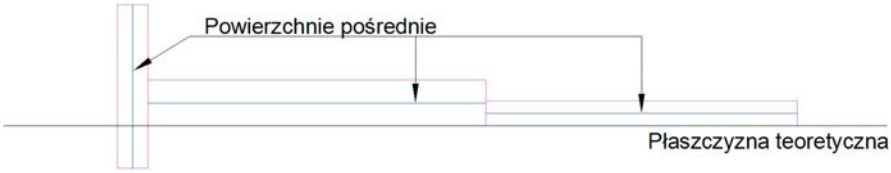
Największą zaletą SCDM w kontekście usuwania detali jest możliwość szybkiego zaznaczania podobnych elementów geometrii. Używając opcji **Zaznaczenie** (Selection), możemy bardzo szybko wybrać identyczne lub podobne detale na podstawie kryterium pola powierzchni, objętości, promienia czy długości. W przypadku nieregularnych geometrii istnieje możliwość napisania własnych skryptów w języku Python. W rozwiązaniu omawianych problemów bardzo pomocny okazał się skrypt do zaznaczania elementów geometrii w oparciu o tzw. pudełko brzegowe, czyli najmniejszy prostopadłościan kompletnie otaczający dany obiekt. Zaznaczone elementy można usunąć bądź uprościć za pomocą opcji **Wypełnienie** (Fill) (rys. 2).

Warto się również zapoznać z narzędziami w zakładkach **Napraw** (Repair) i **Przygotuj** (Prepare). Opcje te mogą być użyte zarówno przed usuwaniem, jak i po usuwaniu detali.

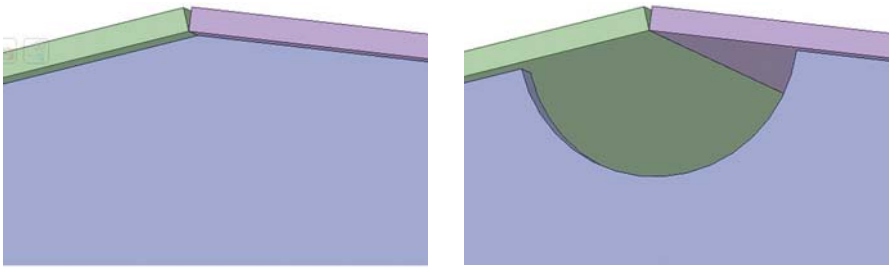
Generowanie powierzchni pośrednich wymaga od użytkownika minimalnego nakładu pracy. SCDM automatycznie wykrywa odpowiednie powierzchnie, wylicza parametr grubości i przypisuje go do nowych elementów. Dodatkowe opcje umożliwiają automatyczne wydłużenie bądź przycięcie powierzchni na etapie konwersji. Wyrównanie powierzchni, aby znajdowały się na tej samej płaszczyźnie teoretycznej, również nie zajmuje dużo czasu. Można to zrobić ręcznie – służy do tego opcja **Przenieś, aż do** (Move, Up To) – lub wykorzystać skrypty Python. Za pomocą kilku linijek kodu możemy zaznaczyć elementy znajdujące się w pewnej odległości od płaszczyzny teoretycznej i umieścić je bezpośrednio na niej.

Ostatnim etapem przed wygenerowaniem siatki jest kontrola modelu i współdzielenie topologii. Używając opcji **Przedłuż** (Extend) w zakładce **Przygotuj** (Prepare), możemy sprawdzić, czy wszystkie połączenia są prawidłowe. SCDM automatycznie wykryje nieciągłości i umożliwi korektę jednym kliknięciem. Jeśli na tym etapie zauważymy, że przeoczyliśmy kilka detali, nie oznacza to wcale, że musimy cofnąć się do początku. Pracując na powierzchniach, możemy korzystać z zaawansowanych opcji zaznaczania oraz opcji **Wypełnienie** (Fill). Współdzielenie topologii to kwestia jednej opcji w drzewku projektu, a prezentacja połączeń bazująca na kolorach umożliwia skuteczną kontrolę.

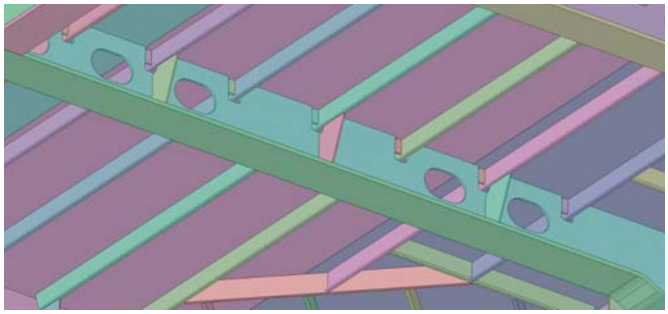
W zależności od jakości modelu wyjściowego może się zdarzyć, że uzyskana geometria będzie błędna lub niedokładna. SCDM oferuje szereg opcji do ręcznej



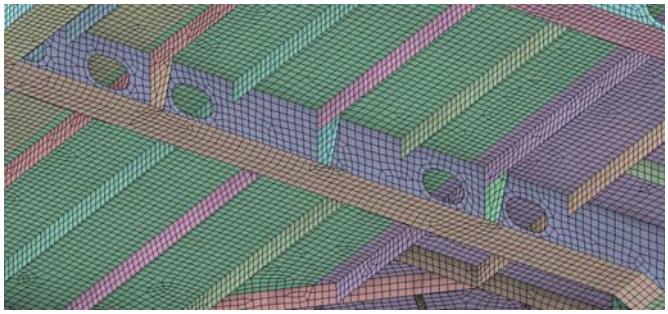

**Rys. 1.** *Problem powierzchni pośrednich odsuniętych od płaszczyzny teoretycznej*



**Rys. 2.** *Działanie funkcji Wypełnienie (Fill)*



**Rys. 3.** *Bryły z branżowego oprogramowania CAD/CAM/CAE*



**Rys. 4.** *Siatka MES w oparciu o model powierzchni pośrednich*

naprawy. Czasem najlepszym rozwiązaniem będzie usunięcie elementu i stworzenie go na nowo na podstawie przylegających elementów – opcje **Ciągnięcie** (Pull) czy **Gładkie połączenie** (Blend).

Dzięki wykorzystaniu ANSYS SCDM możliwe jest istotne skrócenie czasu modelowania oraz uzyskanie dokładnej geometrii, pozwalającej na wygenerowanie wysokiej jakości siatki MES.

Więcej informacji oraz przykłady konkretnych zastosowań znajdą Państwo na naszym blogu.

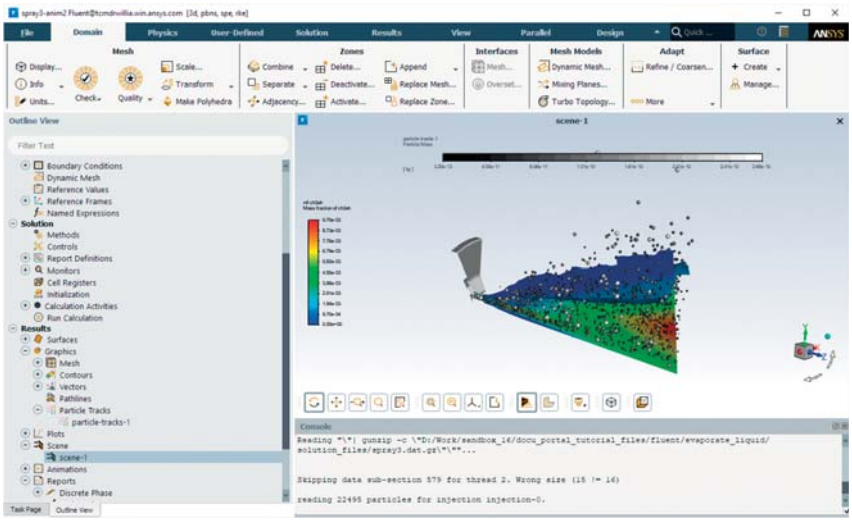
ANSYS w CFD

# Nowości w interfejsie Fluenta

**Maciej Kryś** • MESCO • mkrys@mesco.com.pl

**Każdy, kto kiedykolwiek miał okazję pracować we Fluencie, wie, że jego interfejs graficzny nie należy do najprostszych. Zwłaszcza bardziej doświadczeni użytkownicy, znający starsze wersje tego oprogramowania, mogą się pochwalić wieloma trudnymi doświadczeniami w dziedzinie przygotowania analiz oraz obróbki wyników. Czasy jednak się zmieniają – kiedyś Fluent był dostępny tylko dla najbardziej wyspecjalizowanych naukowców i inżynierów, a obecnie jest narzędziem bardziej powszechnym.**

Aby zmniejszyć ten tzw. wysoki próg wejścia, konieczne jest, aby narzędzie, którego używamy, było przyjazne, przejrzyste i maksymalnie funkcjonalne. Od kilku lat można zauważyć duże starania firmy ANSYS, aby interfejs Fluenta uczynić właśnie takim środowiskiem. Obecna wersja 2019 R1 przynosi wiele usprawnień solverowych, a jednocześnie duży nacisk kładzie właśnie na warstwę wizualną oraz funkcjonalną interfejsu.



**Rys. 1.** *Nowy interfejs graficzny*

## Nowe szaty króla

Nowa wersja Fluenta oznacza również nowy design graficzny (rys. 1). Oprócz przerysowania wszystkich obecnych elementów interfejsu, jak ikony czy okna dialogowe, dodano możliwość wyboru jednego z trzech predefiniowanych tematów kolorystycznych: domyślnego, SpaceClaim oraz klasycznego – Fluent 19.2.

W kontekście zmian stricte wizualnych klasyczne okienko dialogowe do zatrzymywania obliczeń zostało usunięte, a w jego miejsce pojawił się pasek postępu (rys. 2) wraz z odpowiednimi przyciskami znanymi z poprzedniego rozwiązania. Pozwoli to dużo łatwiej ocenić, jaka część zadania obliczeniowego została wykonana.

**Rys. 2.** *Pasek postępu*

Osoby, które pracują na dużych modelach, wiedzą, że wyświetlenie zbyt wielu obiektów (np. linii prądu) uniemożliwia swobodne obracanie czy przesuwanie kamery. Od teraz możliwe będzie ustalenie minimalnej wymaganej liczby klatek, wyświetlanych na sekundę podczas manipulacji obiektami graficznymi. Spowoduje to oczywiście spadek jakości grafiki wyświetlanej podczas manipulowania kamerą, jednak nie wpłynie ostatecznie na generowany obraz.

## Wyraź się!

Niewątpliwie jednymi z najciekawszych funkcji dodanych do 2019 R1 są wyrażenia użytkownika (Expressions). Niezliczoną ilość razy przeklinałem w duchu konieczność pisania UDF-ów do najprostszych, wydawałoby się, rzeczy. Zadanie profilu prędkości na wlocie (rys. 3), ciśnienia hydrostatycznego na wylocie czy zmiennej w czasie prędkości obrotowej wirnika zwykle wiązało się z otwarciem notatnika i napisaniem funkcji użytkownika w języku C albo skomponowaniem pliku profilowego.

Obecnie funkcjonalność Expressions, znana użytkownikom CFX-a czy AIM-a, została zaimplementowana również we Fluencie. Dzięki niej można zastosować funkcje ciągłe wszędzie tam, gdzie da się wprowadzić pliki profilowe czy parametry. Mogą to być zatem warunki brzegowe, właściwości materiałowe, ustawienia solvera czy punkty monitoringu użytkownika.

Do dyspozycji użytkownika zostały oddane podstawowe funkcje i operatory matematyczne, warunki logiczne czy funkcje redukcyjne (min, max, średnia, suma itp.).

Podobnie jak w ANSYS CFX wyrażenia muszą mieć określone jednostki, zgodne z zastosowaniem. Jednostki można mieszać, o ile opisują tę samą wielkość fizyczną (np. 1 atm + 200 Pa).

## Gdy zapomnisz tekstu

Jedną z rzeczy, które odstraszają początkujących użytkowników od korzystania z interfejsu tekstowego (konsoli), jest obawa przed nieznajomością komend. Właściwie już wcześniej ten problem dało się obejść, gdyż wszystkie komendy dostępne we Fluencie są pogrupowane w odpowiednich katalogach. Użytkownik mógł swobodnie wyświetlać wszystkie dostępne procedury w danym podkatalogu, zanim ostatecznie którejkolwiek użył.

Obecnie jednak dodatkowo możliwe są przeglądanie oraz wybór komend z menu rozwijanego, wywoływanego klawiszem Tab. Po wybraniu komendy program automatycznie wpisze komendę lub uzupełni brakujące znaki. Autouzupełnianie (rys. 4) działa nie tylko z komendami, lecz także nazwami warunków brzegowych czy ścieżek dostępu.

## Drobne zmiany robią różnicę

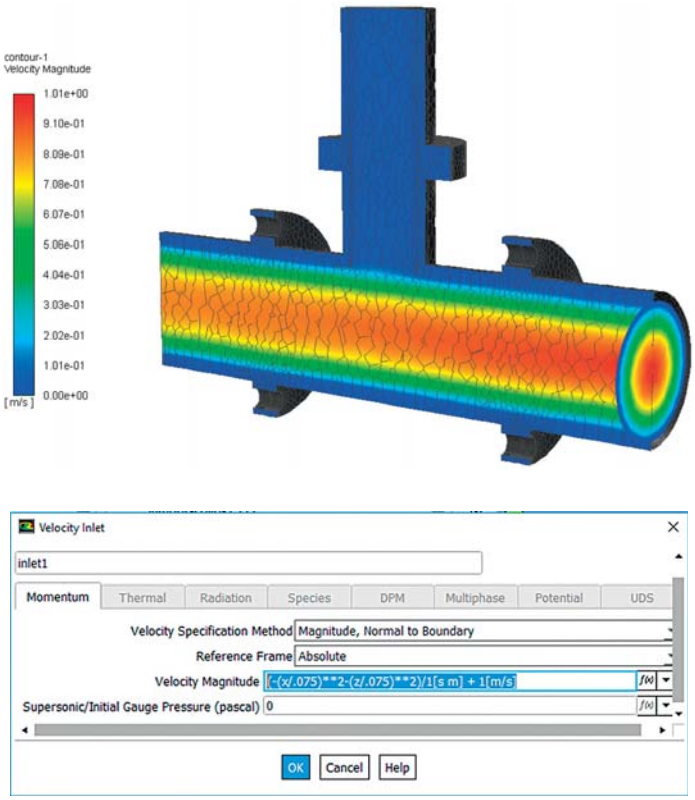
Usprawnienia pojawiły się również w mniej wyraźnych aspektach interfejsu, choć dla niektórych użytkowników te zmiany okażą się bardzo cenne.

Przede wszystkim wprowadzona została możliwość edytowania lokalizacji użytkownika (rys. 5). Wcześniej raz dodany obiekt nie mógł ulec modyfikacji – aby np. przesunąć przekrój w post-procesorze, użytkownik musiał wykonać drugi przekrój o poprawionej lokalizacji.

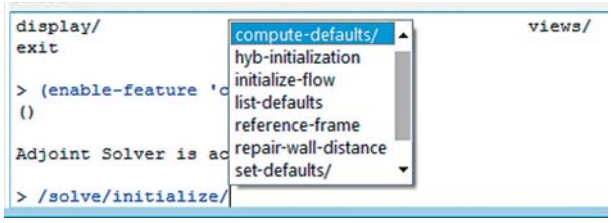
Na uwagę zasługują ponadto nowa funkcjonalność zapisywania warunków brzegowych czy ustawień do pliku z poziomu drzewa analizy, a także przebudowany interfejs do adaptacyjnego zagęszczania siatki.

## Doświadcz nowego Fluenta!

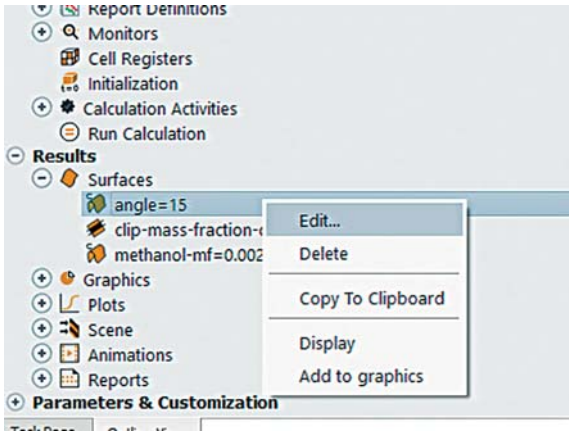
Interfejs Fluenta przechodzi ostatnimi czasy istną rewolucję. Porównując wygląd kilku poprzednich wersji programu z obecną, można odnieść wrażenie, że mamy do czynienia z zupełnie innym narzędziem. To stwierdzenie jest prawdziwe, gdy popatrzy się na Fluenta przez pryzmat wygody pracy, efektywności budowania analizy lub obróbki wyników. Interfejs wielokrotnie przebudowywano oraz wzbogacano o kolejne funkcje. Okazuje się jednak, że pod odświeżoną maską pracuje dalej ten sam, niezawodny silnik, który od ponad 30 lat dostarcza inżynierom i naukowcom najwyższej jakości wyniki CFD.




**Rys. 3.** *Przykładowe wyrażenie opisujące profil prędkości na wlocie*




**Rys. 4.** *Autouzupełnianie*




**Rys. 5.** *Edycja powierzchni użytkownika*

# Modelowanie obróbki termicznej produktów spożywczych w przemysłowych piecach konwekcyjno-parowych

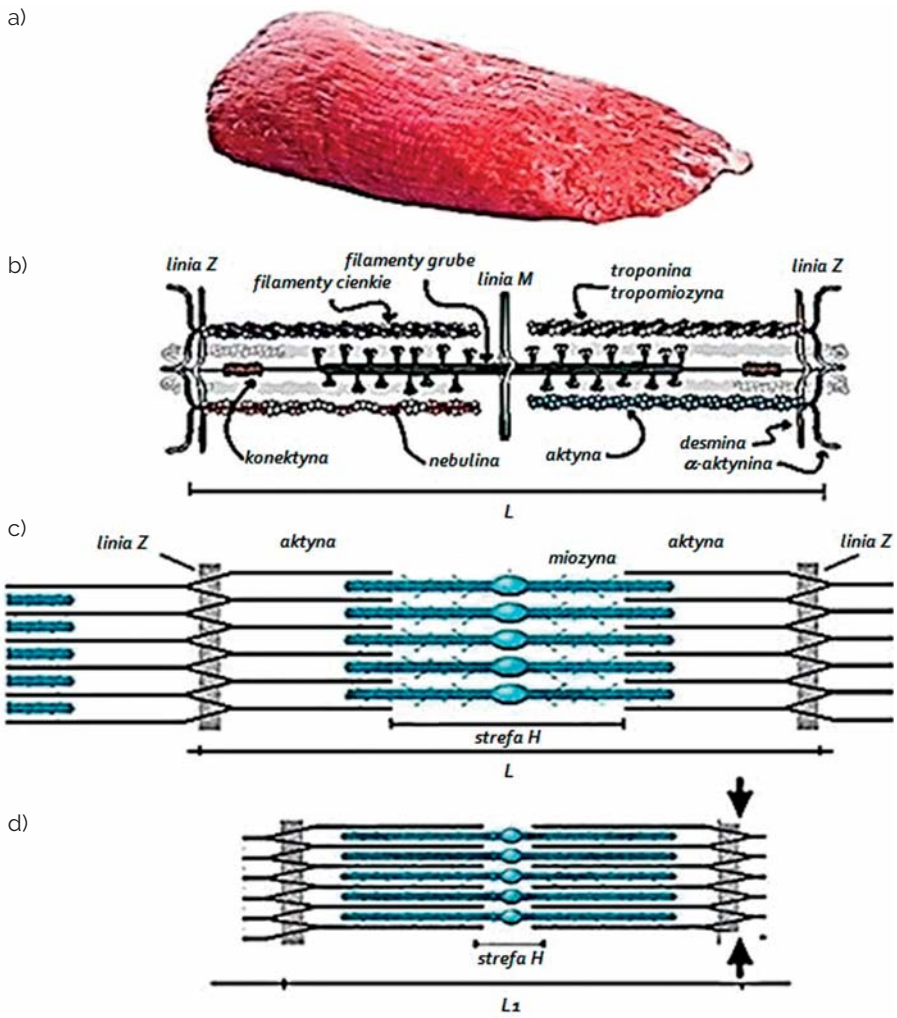
**Arkadiusz Szpicer** • Katedra Techniki i Projektowania Żywności, SGGW w Warszawie
**Andrzej Półtorak** • Katedra Techniki i Projektowania Żywności, SGGW w Warszawie • andrzej_poltorak@sggw.pl
**Agnieszka Wierzbicka** • Katedra Techniki i Projektowania Żywności, SGGW w Warszawie

**Znajomość właściwości termicznych żywności jest niezbędna do przeprowadzenia kalkulacji związanych z wymianą ciepła. Parametry te są nieodzowne w projektowaniu urządzeń gastronomicznych służących do obróbki cieplnej oraz w prognozowaniu czasu i jakości finalnego produktu. Właściwości termiczne żywności są silnie uzależnione od składu podstawowego. Trudno jest opracować eksperymentalnie ich bazę danych dla wszystkich możliwych produktów, warunków procesu obróbki i składu podstawowego żywności. Najlepszym rozwiązaniem jest symulowanie właściwości termicznych żywności z wykorzystaniem modeli matematycznych, które uwzględniają skład podstawowy (zawartość wody, białka i tłuszczu) oraz temperaturę.**

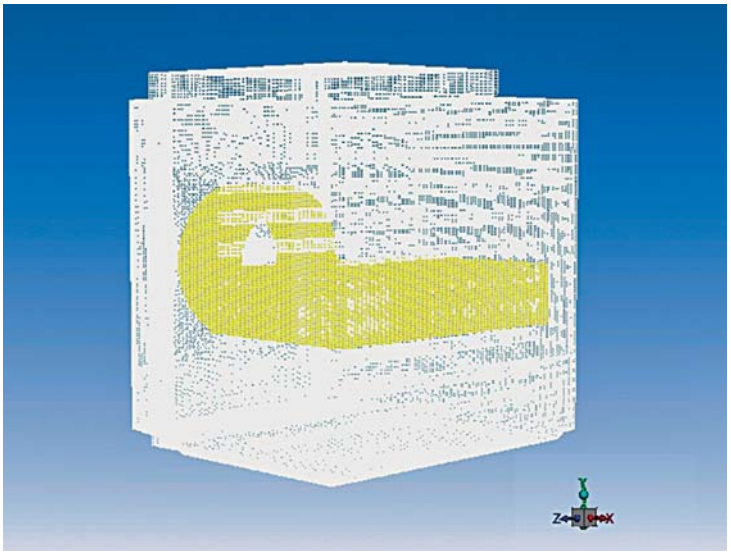
Parametry produktów spożywczych – takie jak: entalpia, ciepło właściwe i zawartość lodu w zależności od temperatury – zostały określone na podstawie znanych zależności Riedla: entalpia – zawartość wody – temperatura. Właściwości termofizyczne żywności, które są niezbędne do obliczeń strumienia ciepła, obejmują: frakcję lodu, pojemność właściwą, entalpię właściwą i przewodność cieplną. Analiza oraz optymalizacja procesów termicznych koncentrują się zasadniczo na symulacjach wnikania ciepła i dyfuzji masy w produktach spożywczych, z uwzględnieniem różnych warunków termicznych. Do zaprojektowania procesów obróbki cieplnej z uwzględnieniem jakości finalnych produktów konieczne jest opracowanie modeli CFD.

## Procesy wymiany ciepła i masy w żywności

Podczas procesu pieczenia mięsa ciepło z powierzchni produktu jest przenoszone do jego geometrycznego środka na drodze przewodzenia. Natomiast transport wody z wnętrza produktu na jego powierzchnię odbywa się za pomocą procesu konwekcji i dyfuzji masy. Wraz ze wzrostem temperatury wewnątrz produktu białka mięsa ulegają denaturacji. Prowadzi to do obniżenia zdolności wiązania wody oraz skurczu sieci białkowej, co w konsekwencji powoduje wzrost ciśnienia wewnątrz produktu, a nadmiar wody usuwany jest na powierzchnię w procesie konwekcji. Jednocześnie woda znajdująca się na powierzchni produktu w postaci cieczy paruje oraz dyfunduje do otaczającego płynu (gorącego powietrza). W miarę skurczu




**Rys. 1.** *Schemat skurczu matrycy białkowej mięsa pod wpływem dawki energii cieplnej podczas obróbki cieplnej: a) m. semitendinosus, b) schemat sarkomeru, c) sarkomer w stanie „spoczynku", d) sarkomer w stanie „skurczu".*



**Rys. 2.** *Schemat pieca konwekcyjno-parowego*

Table of Design Points

| | A | B | C | D | E |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Name | P1 - RPM | P2 - temp | P3 - beaf_temp | P12 - RH |
| 2 | Units | rev min^-1 | C | C | |
| 3 | DP 20 (Current) | 700 | 100 | 100 | 5 |
| 4 | DP 21 | 700 | 150 | 100 | 5 |
| 5 | DP 22 | 700 | 180 | 100 | 5 |
| 6 | DP 23 | 1400 | 100 | 100 | 5 |
| 7 | DP 24 | 1400 | 150 | 100 | 5 |
| 8 | DP 25 | 1400 | 180 | 100 | 5 |
| 9 | DP 26 | 700 | 100 | 100 | 10 |
| 10 | DP 27 | 700 | 150 | 100 | 10 |
| 11 | DP 28 | 700 | 180 | 100 | 10 |
| 12 | DP 29 | 1400 | 100 | 100 | 10 |
| 13 | DP 30 | 1400 | 150 | 100 | 10 |
| 14 | DP 31 | 1400 | 180 | 100 | 10 |
| 15 | DP 32 | 700 | 100 | 100 | 15 |
| 16 | DP 33 | 700 | 150 | 100 | 15 |
| 17 | DP 34 | 700 | 180 | 100 | 15 |
| 18 | DP 35 | 1400 | 100 | 100 | 15 |
| 19 | DP 36 | 1400 | 150 | 100 | 15 |
| 20 | DP 37 | 1400 | 180 | 100 | 15 |
| * | | | | | |

**Rys. 3.** *Zadane parametry symulowanej obróbki termicznej*

cieplnego mięsa powierzchnia, z której odparowuje woda, zmienia się w czasie (maleje). Skurcz matrycy białkowej powoduje niezrównoważone ciśnienie wewnątrz produktu, co generuje wyższe straty masy (wyciek) ze struktury mięsa.

Proces wymiany masy w mięsie poddawanym obróbce cieplnej może dotyczyć przenoszenia masy na poziomie molekularnym lub konwekcji masy. W przypadku pierwszego rodzaju bardzo często stosowane jest pojęcie dyfuzji, natomiast wymiana na drodze konwekcji dotyczy przenoszenia materii z powierzchni do przepływającego strumienia cieczy lub gazu, równocześnie z przypadkowym przenoszeniem cząstek materii wraz z medium grzewczym.

Podczas ogrzewania żywności jej składniki migrują, a ponadto następują przemiany fizykochemiczne, które znajdują odzwierciedlenie w zmianach mikrostruktury produktu. Ciała stałe mają zazwyczaj zróżnicowaną (heterogenną) strukturę, dlatego proces dyfuzji jest niestabilny. Gradient stężeń, będący siłą napędową dyfuzji, jest spowodowany przez skurcz cieplny i deformację surowca. Ponadto w niektórych przypadkach silne interakcje pomiędzy substancją dyfundującą a matrycą wywołują zjawiska adsorpcji lub chemisorpcji.

Dyfuzyjność wody i innych małych cząsteczek spada znacząco przy wyższej wilgotności otoczenia. Ten spadek zależy od rodzaju dyfundujących cząsteczek. Ponadto wykazano, że współczynnik dyfuzji wody zmniejsza się wraz ze wzrostem zawartości stałych substancji w niej rozpuszczonych w porównaniu ze współczynnikiem dyfuzji innych substancji.

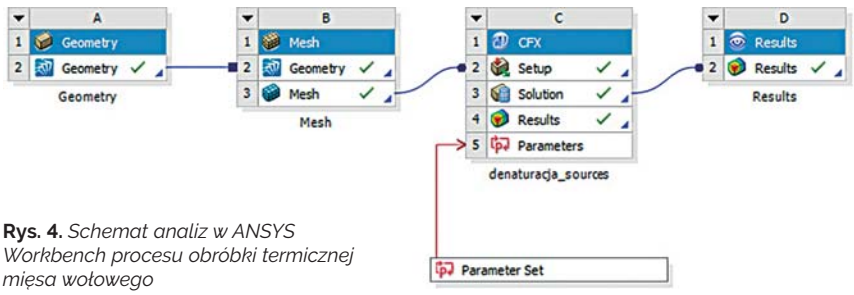
## Cel i zakres badań

Celem pracy było oszacowanie stopnia denaturacji białek mięsa wołowego oraz ubytku masy, wywołanego wyciekiem termicznym, na podstawie symulacji CFD procesu obróbki termicznej w piecu konwekcyjno-parowym. Zakres pracy obejmował określenie współczynnika wnikania ciepła do mięsa wołowego.

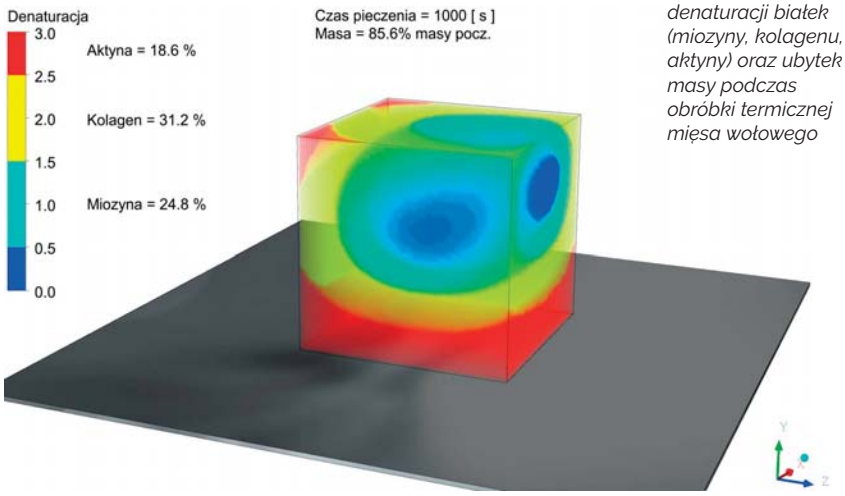
Symulację prowadzono w modelowym piecu konwekcyjno-parowym (rys. 2) w zróżnicowanych warunkach temperatury, wilgotności i prędkości obrotów wentylatora (rys. 3). Na podstawie uzyskanych wyników możliwe było wykonanie symulacji obróbki termicznej dla surowców o zróżnicowanym składzie podstawowym, tj. o różnej zawartości wody, białka, tłuszczu i tkanki łącznej (rys. 4). Otrzymane wyniki pozwoliły na oszacowanie optymalnych warunków prowadzenia procesu obróbki cieplnej, zapewniających uzyskanie produktów o najwyższej jakości.

## Wyniki i podsumowanie

Zastosowanie modeli CFD ułatwia określenie skomplikowanych zależności pomiędzy parametrami procesu obróbki termicznej, z uwzględnieniem wymiany ciepła i masy. Wdrożenie symulacji CFD obróbki termicznej do przemysłu spożywczego może się przyczynić do optymalizacji procesów, a w konsekwencji – do poprawy jakości końcowych produktów oraz redukcji kosztów związanych ze stratami masy.




**Rys. 4.** *Schemat analiz w ANSYS Workbench procesu obróbki termicznej mięsa wołowego*




**Rys. 5.** *Stopień denaturacji białek (miozyny, kolagenu, aktyny) oraz ubytek masy podczas obróbki termicznej mięsa wołowego*

# ANALIZA MODELI TURBULENCJI

## na przykładzie benchmarku komory testowej Annex 20

**Piotr Kamil Korman** • Politechnika Wrocławska, Wydział Chemiczny, Zakład Inżynierii Chemicznej
**Sławomir Pietrowicz** • Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Katedra Termodynamiki, Teorii Maszyn i Urządzeń Cieplnych

**Wykonano symulacje przepływu powietrza przez komorę, aby zbadać wpływ modelu turbulencji na wyniki obliczeń numerycznych. Analizowano zwłaszcza rozkład linii prądu w komorze i profile składowej poziomej wektorów prędkości wzdłuż wybranych prostych przechodzących przez komorę. Wyniki numeryczne poddano walidacji z danymi pomiarowymi.**

### Geometria układu

Dwuwymiarową geometrię analizowanego układu, zaproponowaną przez Nielsena [4, 5], obecnie wykorzystuje się do testowania modeli/procedur numerycznych, m.in. modeli turbulencji zaimplementowanych w programach CFD. Geometrię stanowi przekrój przez pomieszczenie (zwane dalej komorą), z wlotem powietrza w lewym górnym rogu i wylotem w prawym dolnym rogu. Model geometryczny, dla którego wygenerowano siatkę i przeprowadzono symulacje, zawierał dodatkowo kanał wlotowy o długości 1 m i kanał wylotowy o długości 3 m. Schemat geometrii pokazano na rys. 1. Linią przerywaną zaznaczono odcinki, dla których zostały wykreślone profile składowej poziomej i składowej pionowej prędkości. Komora symulacyjna ma proporcje geometryczne opisane w raporcie [4]: $L/H$ = 3,0; $h/H$ = 0,056; $t/H$ = 0,16. Analizy numeryczne wykonano dla komory o długości $L$ = 9 m, dlatego pozostałe wymiary były następujące: $H$ = 3 m, $h$ = 0,168 m, $t$ = 0,48 m. Grubość przestrzeni symulacyjnej (różnica współrzędnych $z$ obu ścian o warunku brzegowym typu symetria) była równa 0,1 m.

### Siatka numeryczna

Zastosowano siatkę strukturalną. Długość i/lub wysokość komórek ma rozkład sinusoidalny. Przy ścianach komory oraz w obszarze wlotu i wylotu komórki mają najmniejsze rozmiary, a wraz ze wzrostem odległości od ścian przestrzeni symulacyjnej ich długość (obszar głównej komory) oraz wysokość (obszar głównej komory, wlotu i wylotu) rosną sinusoidalnie. Taki rozkład wielkości komórek wynika ze spodziewanych dużych gradientów analizowanych wielkości. W takich obszarach wymagana jest szczególnie duża dokładność obliczeń. Widok siatki w kierunku osi $z$ przedstawiono na rys. 2.

W programie ANSYS ICEM zdefiniowano nazwy powierzchni ograniczających rozpatrywany obszar. Te nazwy zastosowano także w programie ANSYS CFX. Ogólna liczba węzłów numerycznych wynosiła 22 190, a liczba komórek – 10 820.

### Obliczenia numeryczne

Obliczenia numeryczne dotyczyły izotermicznego przepływu ustalonego powietrza o temperaturze 25°C, traktowanego jako gaz doskonały, o współczynniku lepkości dynamicznej $1{,}831 \cdot 10^{-5}$ Pa·s. Działanie siły grawitacji pominięto (moduł wyporności był wyłączony). Ciśnienie referencyjne w komorze wynosiło 1 atm. Warunki brzegowe na poszczególnych powierzchniach symulowanej domeny zestawiono w tabeli.

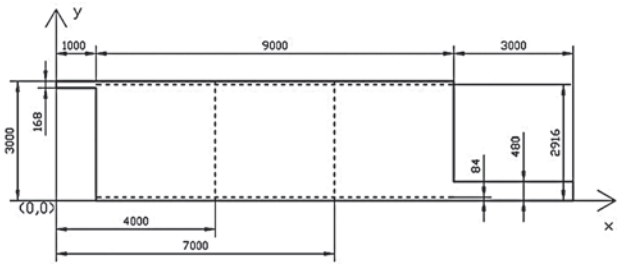
Jako kryterium zakończenia obliczeń iteracyjnych przyjęto średniokwadratową wartość znormalizownych residuów równań bilansu masy i pędu na poziomie $1 \cdot 10^{-6}$. Warunek ten został spełniony przy najmniejszej liczbie iteracji (600) w symulacji z użyciem modelu turbulencji k–ε. W przypadku pozostałych modeli wymagana była większa liczba iteracji: dla modelu SST – 1112, dla modelu k–ω – 1661, a dla modelu SSG Reynolds Stress – 1909.

### Wyniki obliczeń

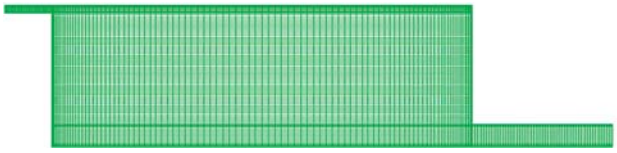
Na rys. 3–6 pokazano linie prądu, a na rys. 7–10 – pola modułu prędkości dla czterech badanych modeli turbulencji.

### Charakterystyka wirów

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że wybór modelu turbulencji ma istotny wpływ na przewidywanie zjawisk zachodzących podczas przepływu gazu przez komorę testową. Dowiedziono [5, 6], że w komorze wytworzą się trzy wiry: jeden duży o zwrocie wektorów prędkości zgodnym z ruchem wskazówek zegara (dalej określany mianem prawoskrętnego) oraz dwa znacznie mniejsze, mające zwrot wektorów prędkości



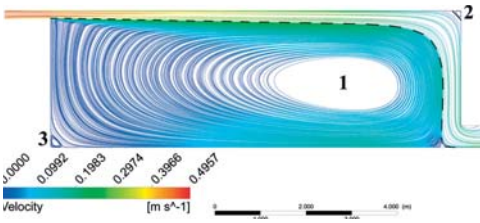

**Rys. 1.** *Widok geometrii (z uwzględnieniem kanału wlotowego i wylotowego) wykorzystanej w symulacjach*



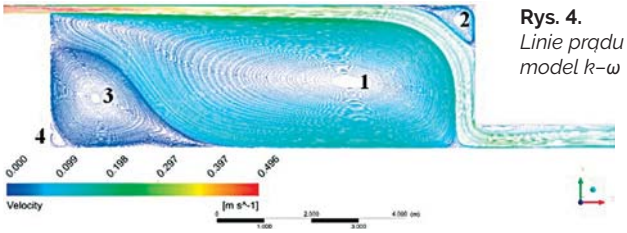
**Rys. 2.** *Widok geometrii (z boku) z zaznaczonymi liniami siatki numerycznej*

**Tabela.** *Warunki brzegowe*

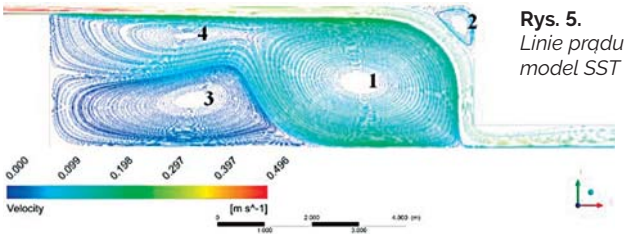
| Nazwa powierzchni w CFX | Typ warunku brzegowego | Wartość | Jednostka |
|---|---|---|---|
| Inlet | Inlet, Normal Speed (u) | 0,455 | m/s |
| | Inlet, Turbulence intensity | 5 | % |
| Outlet | Outlet, Average Static Pressure | 0 | Pa |
| Wall_up | Wall, No Slip Wall, Smooth Wall | – | – |
| Wall_down | Wall, No Slip Wall, Smooth Wall | – | – |
| Symmetry_1 | Symmetry | – | – |
| Symmetry_2 | Symmetry | – | – |



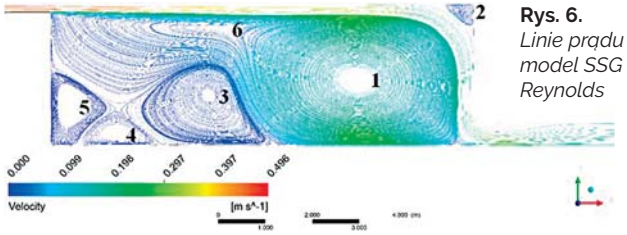

**Rys. 3.** *Linie prądu – model k–ε*



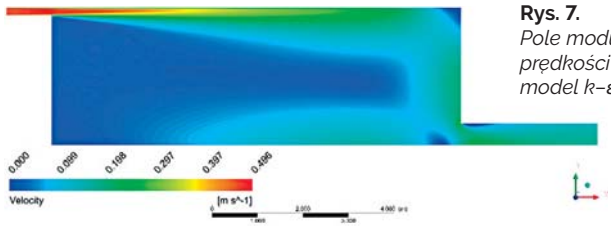

**Rys. 4.** *Linie prądu – model k–ω*



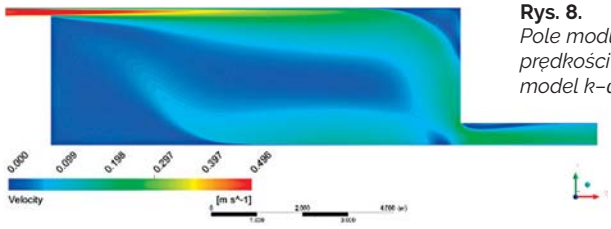

**Rys. 5.** *Linie prądu – model SST*



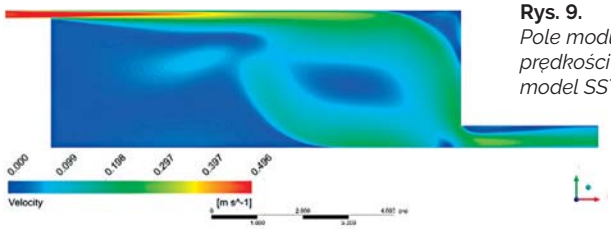

**Rys. 6.** *Linie prądu – model SSG Reynolds*



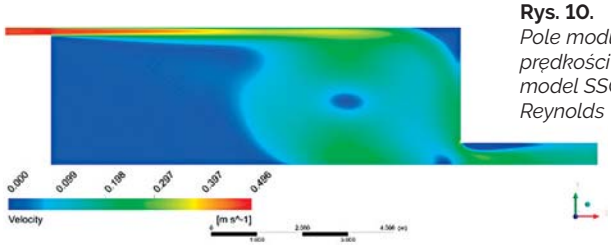

**Rys. 7.** *Pole modułu prędkości – model k–ε*




**Rys. 8.** *Pole modułu prędkości – model k–ω*




**Rys. 9.** *Pole modułu prędkości – model SST*




**Rys. 10.** *Pole modułu prędkości – model SSG Reynolds*

przeciwny do ruchu wskazówek zegara (dalej nazywane lewoskrętnymi). Dwa mniejsze wiry to tzw. strefy recyrkulacji, zlokalizowane w lewym dolnym i w prawym górnym rogu komory. Wyniki dla standardowego modelu k–ε (rys. 3) odzwierciedlają istnienie wszystkich wirów stwierdzonych empirycznie (nr 1, 2 i 3, rys. 3), w tym wiru głównego z centrum o przybliżonych współrzędnych $(x, y) \approx (2/3L + 1, 1/2H)$ [m]. Obliczenia z wykorzystaniem pozostałych modeli turbulencji sugerują, że w komorze powstają dodatkowe wiry.

Wszystkie zastosowane modele wykazują zgodność co do położenia centrum największego wiru – w przybliżeniu na wysokości 1,5 m i w odległości ok. 6,5 m od lewej ściany głównej komory. W przypadku modelu k–ε linie prądu głównego wiru (nr 1, rys. 3) wypełniają prawie całą komorę główną, z wyjątkiem obszaru o wysokości w zakresie $h \div 3h$ przy górnej ściance, obszaru o szerokości równej ok. $t$ przy prawej ściance komory oraz trójkątnego obszaru w lewej dolnej części komory (wir nr 3, rys. 3). Na rys. 3 obszar bezwirowy oddzielono od obszarów wirowych za pomocą czarnych kreskowanych krzywych. Defektem modelu k–ε jest niedoszacowanie wielkości wirów nr 2 i 3.

W przypadku modelu k–ω (rys. 4) wyniki symulacji sugerują występowanie dodatkowego prawoskrętnego wiru (nr 4, rys. 4) w lewym dolnym rogu komory. Zajmuje on obszar o szerokości ok. 40 cm. Rozmiar wiru lewoskrętnego (nr 3, rys. 4), będącego odpowiednikiem strefy recyrkulacji nr 3 przewidzianej przez model k–ε, jest przeszacowany, ponieważ na linii $y$ = 0,084 m rozciąga się on na przedział 0,4÷4,2 m. Podobnie przeszacowany jest rozmiar wiru nr 2. Można stwierdzić, że model k–ω źle oddaje charakter przepływu powietrza przez lewą dolną część komory testowej.

Model SST (rys. 5) daje w wyniku cztery wiry; lewoskrętna strefa recyrkulacji nr 3 zajmuje całą lewą dolną część komory, a jej rozmiar jest przeszacowany – podobnie jak w przypadku użycia modelu k–ω. Wir nr 4 jest zlokalizowany nad wirem nr 3, a jego orientacja jest taka jak wiru głównego nr 1. Wielkość i kształt obszaru zajmowanego przez wir nr 2 są zbliżone do parametrów odpowiadającego mu wiru przewidzianego przez model k–ω.

Model SSG Reynolds daje wyniki sugerujące występowanie największej liczby wirów. Na rys. 6 widać ich pięć lub sześć. Linie prądu wiru nr 1 z dala od centrum nie mają kształtu eliptycznego, ponieważ opływają obszar zajęty przez wiry 3, 4 i 5. Wielkość obszaru zajmowanego przez wir nr 2 w prawym górnym rogu komory jest nieco mniejsza niż w przypadku modeli SST i k–ω, ale większa niż wynikająca z modelu k–ε.

Na rys. 10 widać, że obszar występowania dość szybkiego przepływu (wartość prędkości powyżej 0,1 m/s) jest ograniczony do prawej połowy komory, a prędkość w obszarze wirów 3, 4 i 5 jest bardzo mała. Ponadto można stwierdzić, że model SSG Reynolds przewiduje szybszy ruch wirowy cieczy wokół głównego wiru (nr 1) niż pozostałe modele turbulencji (rys. 7–9).

## Składowe wektora prędkości

Uzyskane profile składowej poziomej $u$ prędkości płynu podzielonej przez wartość prędkości wlotowej $u_0$, pochodzące z symulacji wykorzystujących różne modele turbulencji, porównano z danymi eksperymentalnymi. Okazało się, że standardowy model turbulencji k–ε najlepiej opisuje przepływ gazu przez analizowaną komorę – profile prędkości wzdłuż wybranych linii są najbardziej zbliżone do punktów eksperymentalnych. Wyjątkami są tu dwie strefy: w prawym górnym ($x$ od 9,4 do 10,0 m) oraz w lewym dolnym rogu komory ($x$ od 1,15 do 2,1 m). W pierwszej z nich wraz ze wzrostem współrzędnej $x$ składowa pozioma prędkości $u$ maleje po wartościach dodatnich aż do zera, co jest niezgodne z danymi doświadczalnymi, które wskazują na ujemną wartość składowej $u$ w przedziale 9,4÷10,0 m. W drugiej ze stref model k–ε sugeruje, że składowa $u$ jest ujemna, czyli że jest to obszar głównego prawoskrętnego wiru, z doświadczenia wynika zaś, że występuje tam strefa lewoskrętnej

recyrkulacji. Przyczyną tych niezgodności jest błąd modelu k–ε, polegający na niedoszacowaniu wielkości wirów nr 2 i 3. W prawym górnym rogu komory testowej najlepsze wyniki daje model SSG Reynolds, gdyż szerokość wiru $\Delta x$ jest bardzo bliska wartości eksperymentalnej. Wadą rozwiązania numerycznego jest niedoszacowanie wartości prędkości w obszarze małego wiru. Stosunek $u/u_0$ nie spada tam poniżej –0,04, natomiast z eksperymentu wynika, że minimum wynosi –0,20 dla $x$ = 9,59 m.

Centrum głównego prawoskrętnego wiru jest zlokalizowane na prawo od linii wyznaczającej 2/3 długości komory. Wynika to z tego, że dla $x$ = 7 m składowa $v$ jest dodatnia dla $y$ = 1,5 m, czyli płyn przemieszcza się w górę komory, opływając od lewej strony centrum wiru. Wartość bezwzględna składowej pionowej prękości nie przekracza ok. 0,093 m/s (model SSG Reynolds, linia $x$ = 7 m, $y$ = 1,3 m), podczas gdy wartości bezwzględne składowej poziomej osiągają ok. 0,50 m/s (modele SST i k–ω, linia $y$ = 2,916 m, $x$ = 1,0 m). Wynika to z połączenia dwóch faktów: z prawa zachowania masy oraz z tego, że pole przekroju komory w płaszczyźnie poziomej jest trzykrotnie większe od pola przekroju w płaszczyźnie pionowej.

## Wnioski

Wybór modelu turbulencji stosowanego przez solvery w programach CFD ma wpływ na wyniki symulacji. Nieodpowiedni dobór tego modelu może prowadzić do błędnych wyników, wyraźnie odbiegających od rzeczywistego charakteru przepływu, który można poznać tylko na drodze eksperymentu. Prawdopodobną przyczyną występowania największej liczby wirów w symulacji z użyciem modelu SSG Reynolds jest to, że korzysta ona bezpośrednio z tensora naprężeń Reynoldsa bez uproszczeń. Umożliwia on opis wirów o małej intensywności, np. zanikających, a jednocześnie jest podatny na lokalne, chwilowe zmiany wartości jego składowych. To może prowadzić do obliczenia cyrkulujących pól prędkości tam, gdzie w rzeczywistości one nie występują. W przypadku symulowanej geometrii (prostopadłościennej komory) zastosowanie modelu SSG Reynolds powoduje nadprodukcję wirowości.

Najlepszą zgodność wyników symulacji z danymi eksperymentalnymi daje standardowy model k–ε.

Pełna wersja artykułu jest dostępna na blogu MESco.

## LITERATURA


1. www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_modeling (dostęp: 07.01.2019 r.).
2. Jaworski Z. *„Numeryczna mechanika płynów w inżynierii chemicznej i procesowej”*. Warszawa: AOW EXIT, 2005.
3. Wilcox D.C. *“Turbulence modeling for CFD”*. Wyd. 2. Anaheim, Kalifornia: DCW Industries, Inc., 1998.
4. Lemaire A.D. (red.). *“Room Air and Contaminant Flow, Evaluation of Computational Methods. Subtask-1 Summary Report”*. Wyd. 2. Delft (Holandia), grudzień 1993.
5. Nielsen P.V. *“Specification of a two-dimensional test case”*. Listopad 1990, ISSN 0902–7513 R9040.
6. http://homes.civil.aau.dk/pvn/cfd-benchmarks/two_d_benchmark_test (dostęp: 07.02.2019 r.).


# Projekt pakietu aerodynamicznego bolidu Formuły Student

**Marcin Kołodziejczak** • PUT Motorsport • marcin.j.kolodziejczak@student.put.poznan.pl

**Na początku warto sobie zadać pytanie, w jakim celu stosować pakiet aerodynamiczny w samochodzie Formuły Student? Te bolidy poruszają się z relatywnie niskimi prędkościami, przez co siły aerodynamiczne generowane przez skrzydła są nieporównywalne z tymi występującymi w bolidach F1 – tu siła docisku generowana przez pakiet wyraża się w tonach. Docisk to jednak nie wszystko. Pakiet musi wspomóc dynamikę samochodu podczas wszelkich manewrów na torze, takich jak hamowanie czy szybka zmiana kierunku jazdy. Odpowiednia aerodynamika bolidu Formuły Student pomaga również w chłodzeniu jednostki napędowej – tu możemy mówić o aucie zarówno z napędem spalinowym, jak i elektrycznym. W tym drugim przypadku takie elementy, jak silnik elektryczny, są chłodzone cieczą, której temperatura musi zostać zredukowana w toku przepływu przez chłodnicę.**

Podczas projektowania pakietu aerodynamicznego należy wziąć pod uwagę balans aerodynamiczny samochodu. Jak wiadomo, siły wytworzone przez skrzydła są przenoszone na opony, czyli układ zawieszenia samochodu. Zbyt duży procentowy udział nacisku np. na tylne opony spowoduje, że kierowca podczas jazdy będzie się zmagał z podsterownym zachowaniem samochodu. Proces projektowania pakietu to również praca z kierowcą bolidu, gdyż – wbrew logice – auto wyposażone w skrzydła będzie w stanie pokonać zakręty według pożądanej linii przejazdu tylko z prędkością wyższą w porównaniu z prędkością auta bez pakietu.

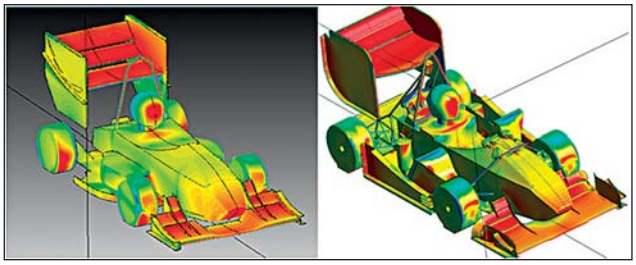
## Proces projektowania pakietu

Proces projektowania ma swój początek w wyborze oprogramowania do symulacji CFD. Dzięki wsparciu firmy MESco zespół wyścigowy Politechniki Poznańskiej – PUT Motorsport – otrzymał dostęp do wiodącego na rynku oprogramowania komercyjnego, jakim jest ANSYS z dodatkiem Fluent.

Kolejnym krokiem jest przyjęcie założeń dotyczących pakietu aerodynamicznego, które należy spełnić w toku projektowym. Dla najnowszego bolidu były one następujące:

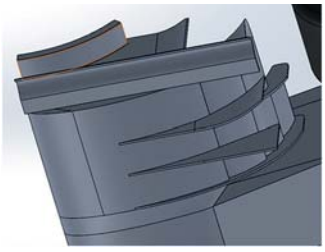
- osiągnięcie docisku rzędu 550 N przy 15 m/s,
- możliwie niski opór powietrza, nie wyższy niż 250 N przy 15 m/s,
- odseparowanie turbulencji, zwłaszcza z kół przednich,
- odpowiedni przepływ na chłodnicę,
- balans aerodynamiczny 45:55 (F:R).

Najpierw należało dobrać profile lotnicze, które zostaną użyte w skrzydłach. Podobnie jak w poprzednich latach na tylne skrzydło wybrano profil Seilig S1223, który charakteryzuje się stosunkowo dobrymi współczynnikami $C_L$ dla niewielkich kątów natarcia skrzydła. Na przednie skrzydło zastosowano profil MH 115, który jednak zmodyfikowano w celu uzyskania wymaganych sił oraz

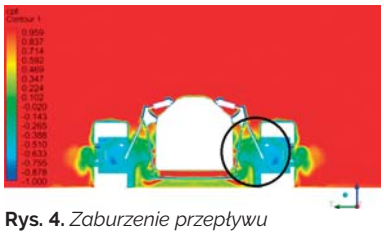


**Rys. 1.** *Uproszczone modele bolidu z lat 2017 (po lewej) i 2018 r. (po prawej)*

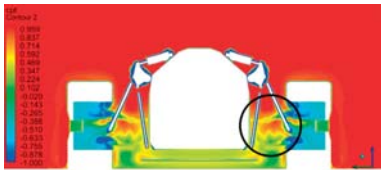
**Rys. 2.** *Profile o zmiennej geometrii, zastosowane na przednim skrzydle w celu zminimalizowania turbulencji*



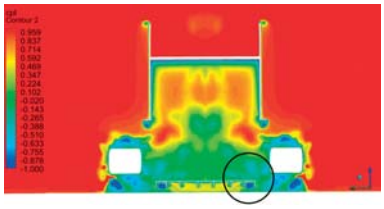
**Rys. 3.** *Kierownice powietrza przedniego skrzydła, zastosowane w celu ustabilizowania przepływu i wygenerowania wiru separującego koło*



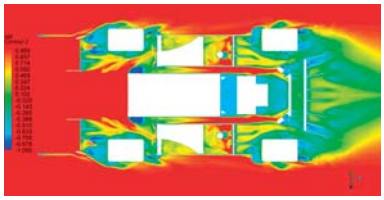
**Rys. 4.** *Zaburzenie przepływu między monokokiem a kołem*



**Rys. 5.** *Przepływ uzyskany po zastosowaniu pokrywek na koła*



**Rys. 6.** *Wpływ obracającego się koła na działanie dyfuzora bolidu*



**Rys. 7.** *Widoczne obniżenie wydajności dyfuzora w jego dwóch zewnętrznych kanałach wylotowych*

wykreowania nowego kształtu całego elementu. Aby zaprojektować samo skrzydło, na wstępie wykonuje się symulacje dwuwymiarowe, dzięki którym w relatywnie krótkim czasie można przebadać różne ustawienia profili oraz zauważyć różne zjawiska, np. oderwania przepływu. Parametryzację można rozbudować o wiele zmiennych, takich jak odległości między profilami, kąty natarcia poszczególnych profili czy odległości od ziemi. Sumarycznie dla przedniego oraz tylnego skrzydła wykonano ok. 3500 iteracji, co pozwoliło na wytypowanie kilku wariantów do przeprowadzenia symulacji trójwymiarowych.

Najważniejszym etapem symulacji CFD jest stworzenie uproszczonego modelu samochodu. W opracowanym modelu pominięto elementy złączne, tj. nakrętki czy śruby, które nie mają istotnego wpływu na wyniki, za to skomplikowałyby siatkę elementów skończonych oraz wydłużyłyby czas obliczeń. Model bolidu do obliczeń obejmował następujące elementy: przednie skrzydło, tylne skrzydło, podłogę samochodu, sekcje boczne, kanał chłodnicy, chłodnicę cieczy, monokok, kierowcę, nos, zawieszenie – wahacze, dampery i zwrotnice, ramę, silnik, zewnętrzny zbiornik oleju, pełne rotory, koła i uproszczony kokpit.

Uwzględnienie tych wszystkich elementów wpłynęło na wyraźne podwyższenie jakości obliczeń i zbliżenie warunków symulacji CFD do rzeczywistości.

Na rys. 1 porównano modele uproszczone z 2017 r. i 2018 r.

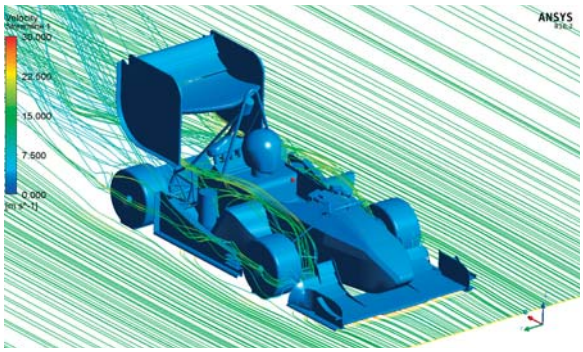
## Symulacje CFD

W przypadku symulacji CFD kluczowym etapem – pozwalającym zrozumieć, co się dzieje z badanym obiektem – jest opracowanie wyników. Podczas projektowania pakietu aerodynamicznego skoncentrowano się nie tylko na oczywistych kwestiach, takich jak rozkłady ciśnienia czy prędkości, lecz także na energii przepływu – chodziło bowiem o maksymalne podniesienie skuteczności działania elementów aerodynamicznych. Dzięki temu wprowadzono kilka nowych rozwiązań.

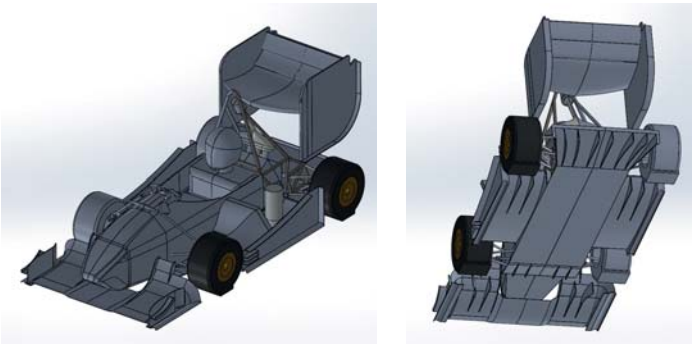
Aby zminimalizować turbulencje przedniego koła, na przednim skrzydle zastosowano profile (rys. 2) o zmiennej geometrii. Tak uzyskano strukturę zwaną *outwash* oraz wiry oddzielające i zamykające niejako turbulentne powietrze wytworzone przez obracające się koło. Płyta krańcowa (*endplate*) znacznie się skomplikowała w porównaniu z poprzednim bolidem „Maria". Skupiono się na wywołaniu wirów oddzielających niskie ciśnienie, które na krańcach skrzydła tworzą swego rodzaju bariery dla wyższego ciśnienia otoczenia oraz regulują przepływ pod skrzydłem.

Kolejną kwestią są kierownice powietrza przedniego skrzydła, mające pozytywny wpływ na stabilizację przepływu (zwłaszcza gdy samochód znajduje się w zakręcie) oraz na powstanie wiru separującego koło (rys. 3).

Problemem, jaki zaobserwowano podczas wykonywania symulacji w programie ANSYS Fluent, było zaburzenie przepływu między monokokiem a kołem.




**Rys. 8.** *Linie prądu wokół bolidu, wygenerowane 20 mm nad nawierzchnią*



**Rys. 9.** *Opracowany pakiet aerodynamiczny*

Niestety, koło otwarte z dwóch stron ma tendencję do zasysania powietrza, które staje się bardzo turbulentne i wpływa na obniżenie energii przepływu we wspomnianym obszarze (rys. 4). Jest to zjawisko niekorzystne ze względu na znajdującą się blisko chłodnicę, która jest bardzo wrażliwa na wszelkie zaburzenia przepływu – nawet mimo zastosowania kanału. Rozwiązaniem problemu okazały się pokrywki na koła (rys. 5), które zamykają dopływ powietrza z zewnątrz i redukują straty, a jednocześnie pozytywnie wpływają na przepływ do chłodnicy.

Jednym z najważniejszych elementów pakietu aerodynamicznego jest podłoga samochodu. Podczas jej projektowania należy zwrócić uwagę zarówno na rozkłady ciśnienia oraz uzyskiwane siły docisku, jak i na sprawność dyfuzora, ponieważ to właśnie od tej części podłogi zależy jej działanie. W tym wypadku problematyczne jest tylne koło. Kanał wylotowy dyfuzora nie może się znajdować bardzo blisko obracającego się koła, ponieważ wtedy powstają wiry, które obniżają sprawność tego elementu. Z tego powodu w najnowszym samochodzie PUT Motorsport dyfuzor zwiększa swój przekrój krótko za tylną osią i nie jest szeroki od koła do koła (rys. 6). Aby wspomóc działanie dyfuzora wprowadzono również kilka kierownic powietrza, zagiętych podobnie jak cały przekrój elementu. To pomaga w uzyskaniu wzrostu ciśnienia na wylocie i tym samym w obniżeniu ciśnienia pod podłogą (rys. 7).

Aby utrzymać wymagany balans aerodynamiczny samochodu, tylne skrzydło ma największy profil o zmiennej cięciwie. Cięciwa profilu Seilig S1223 zmienia się w zakresie od 400 mm do 550 mm, co skutkuje przesunięciem balansu aerodynamicznego do tyłu pojazdu względem konfiguracji ze stałą cięciwą (rys. 8).

Przedstawione rozważania pozwoliły na opracowanie najbardziej wydajnego pakietu aerodynamicznego (rys. 9) w historii zespołu PUT Motorsport (uzyskano współczynnik siły nośnej $C_L$ na poziomie –4,3 i współczynnik siły oporu $C_D$ na poziomie 1,6), pozwalającego na teoretyczną jazdę (z kierowcą o masie 80 kg) po suficie przy 122,4 km/h. W tabeli zestawiono siły działające na auto w osiach *X* i *Z*.

**Tabela.** *Siły działające na bolid przy 15 m/s*

| Element | Siły w osi *X* [N] | Siły w osi *Z* [N] |
|---|---|---|
| Przednie skrzydło | 34 | –168 |
| Tylne skrzydło | 70 | –212 |
| Podłoga z monokokiem | 54 | –211 |
| Koła przednie | 1,6 | 12,5 |
| Koła tylne | 8 | 12 |
| Przednie zawieszenie | 2,6 | 3 |
| Tylne zawieszenie | 2,3 | 0,5 |
| Chłodnica | 12,5 | 10 |
| Rama | 4 | 0 |
| Głowa kierowcy | 3 | 2 |
| Zbiornik oleju | 2,6 | –0,5 |
| Jednostka napędowa | 8,8 | 7,5 |
| **SUMA** | **203,4** | **–544** |

ANSYS w elektromagnetyzmie

# Symulacje elektromagnetyczne: rzeczywistość czy science-fiction?

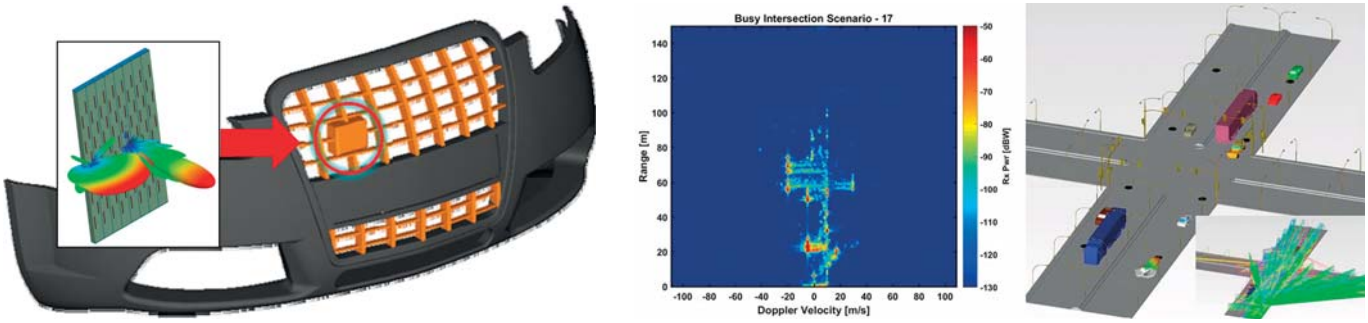
**Tomasz Kądziołka** • MESco • tkadziolka@mesco.com.pl

**Od kilku lat obserwujemy stały wzrost zainteresowania symulacjami zagadnień pól elektromagnetycznych. Mam tu na myśli zarówno symulacje komputerowe związane z analizami pól niskich (LF – *low frequency*), jak i wysokich częstotliwości (HF – *high frequency*). W niniejszym artykule chciałbym się skupić na tych drugich. Tu zapewne padnie pytanie, co uznaję za wysokie częstotliwości. Słowo „wysokie" może bowiem oznaczać co innego dla konstruktora maszyn elektrycznych (który za wysokie częstotliwości uważa już 500 Hz), a co innego dla projektanta układów energoelektroniki, elektroniki czy anten. Otóż w tym przypadku pojęcie wysokich częstotliwości odnoszę do urządzeń, w których mamy do czynienia z zagadnieniem propagacji fali.**

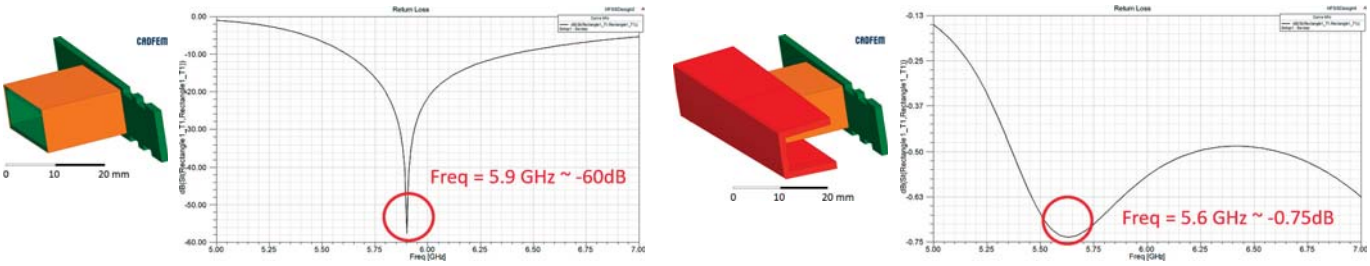
Jeszcze kilkanaście lat temu inżynierowie zajmujący się szeroko pojętą elektroniką nie mieli zbyt szerokich możliwości w zakresie symulacji pełnych struktur i modeli 3D. W dzisiejszych czasach dzięki postępowi technologicznemu i zasobom sprzętowym nie ma najmniejszego problemu, aby przenieść na ekran komputera layout płytki PCB wraz z komponentami, a następnie wykonać analizę integralności sygnałowej (SI) i mocowej (PI), a także zbadać sprzężenia pomiędzy poszczególnymi ścieżkami oraz sprawdzić, czy obudowa na skutek sprzężenia nie będzie działała jak antena zakłócająca inne urządzenia w pobliżu. To tylko kilka wybranych problemów, z jakimi na co dzień zmagają się inżynierowie. W tych przypadkach symulacja komputerowa pozwala nie tylko na lepsze poznanie natury problemu, lecz także na jego wyeliminowanie we wczesnej fazie projektu.

Firma ANSYS w swoim bogatym portfolio produktów ma kilka unikatowych narzędzi umożliwiających symulację pól elektromagnetycznych HF – jednym z nich jest ANSYS HFSS (High Frequency Structural Simulator). HFSS to narzędzie do symulacji pól elektromagnetycznych w 3D, które zostało stworzone do projektowania i symulacji m.in. anten, szyków antenowych, komponentów RF i mikrofalowych, konektorów, filtrów, falowodów, płytek PCB, układów systemów radarowych i ADAS.

Kluczową technologią wyróżniającą HFSS na tle konkurencji jest w pełni zautomatyzowany i adaptacyjny proces tworzenia siatki elementów skończonych, dzięki czemu użytkownik skupia się na konkretnym problemie i nie musi mieć doktoratu




**Rys. 1.** *Przykład scenariusza analizy pokazujący wykrywanie pojazdów w ruchu ulicznym przez radar umieszczony w przednim zderzaku samochodu*




**Rys. 2.** *Wpływ źle dobranego materiału obudowy na działanie anteny systemu V2V (źródło: CADFEM)*

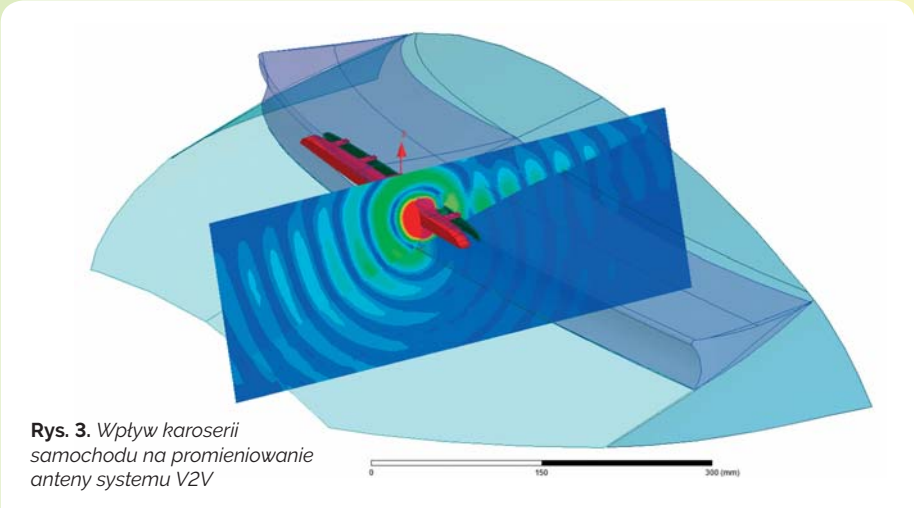
z metody elementów skończonych, aby przygotować odpowiednią siatkę MES dla analizowanego zagadnienia. Wyróżnikiem programu jest również atrakcyjny i intuicyjny interfejs AEDT (ANSYS Electronics Desktop), który umożliwia rozszerzenie analizy o termikę i mechanikę z wykorzystaniem flagowych rozwiązań ANSYS, takich jak programy Icepak, Fluent czy Mechanical. HFSS to również liczne solvery w domenie częstotliwości i czasu, solvery hybrydowe oraz możliwość łączenia modelu polowego z obwodowym.

Chciałbym w tym miejscu przedstawić kilka rzeczywistych problemów, które pojawiają się dopiero wtedy, gdy przystępujemy do integracji naszego urządzenia, np. w samochodzie. Pierwszym z brzegu przykładem są nowoczesne systemy komunikacji pomiędzy samochodami – V2V (*vehicle to vehicle*) – pracujące na częstotliwości 5,9 GHz. W przypadku komunikacji V2V jej zasięg wynosi do 300 m, a sam system opiera się na sieci połączonych samochodów, umożliwiającej wysyłanie, odbieranie i przekazywanie informacji dotyczących natężenia ruchu oraz zagrożeń pomiędzy uczestnikami ruchu drogowego. Anteny V2V są na ogół montowane w trzecim świetle „stop" lub na dachu pojazdu. Problem, z którym możemy się spotkać, to interakcja anteny z nadwoziem samochodu, a także niewłaściwie dobrane tworzywo pełniące rolę obudowy anteny – jego własności materiałowe mogą spowodować, że nasza antena będzie miała ograniczony zasięg, a w skrajnym przypadku w ogóle nie będzie działała.

Nowoczesne samochody coraz częściej są wyposażone w systemy radarowe, które mają zapobiegać kolizjom oraz monitorować przestrzeń pojazdu i obiekty znajdujące się przed pojazdem. Zasięg radarów wynosi ok. 50 m i pozwala na określenie odległości obiektów z dokładnością do 0,1 m, a prędkości – z dokładnością do 0,2 m/s. Radary pracują na 24 oraz 77 GHz i są montowane w przednim zderzaku pojazdu. W przypadku radarów pracujących na 77 GHz długość fali wynosi raptem 4 mm, co przy szerokości zderzaka ok. 2 m oznacza, że mamy do czynienia z rozległym elektrycznie zagadnieniem. Przy tak małej długości fali każdy najdrobniejszy szczegół ma ogromne znaczenie i może decydować o dokładności detekcji obiektów – kształt zderzaka, grill, warunki pogodowe, a także rodzaj materiału czy grubość powłoki lakierniczej mają wpływ na pojawianie się poważnych problemów w działaniu systemów bezpieczeństwa. W tym przypadku tylko symulacja komputerowa pozwala uwzględnić wszystkie możliwe scenariusze pracy radaru, tolerancje materiałowe czy warunki środowiskowe.

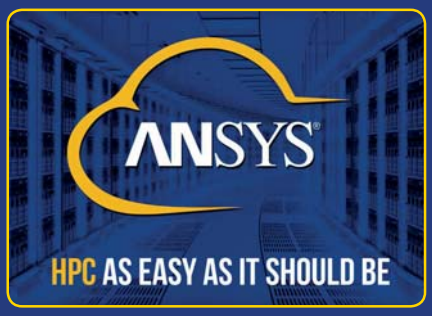
Innym przykładem zastosowania oprogramowania może być sprawdzenie odporności obudowy z wrażliwą elektroniką na zakłócenia z zewnątrz. W tym przypadku możemy zamodelować w programie obudowę wraz z otworami, a następnie w jej wnętrzu umieścić elektronikę i sprawdzić, czy zakłócenia z zewnątrz nie spowodują wzbudzenia się ścieżek wewnątrz. Analogiczne podejście polega na sprawdzeniu, jak dużo sygnałów z wnętrza obudowy wydostaje się na zewnątrz – zależy nam, aby obudowa pełniła rolę ekranu i ograniczała problemy związane z emitowaniem zakłóceń na zewnątrz. Jak łatwo zauważyć, ten przykład jest związany z zagadnieniami interferencji i kompatybilności elektromagnetycznej (EMI/EMC).

Symulacja komputerowa idealnie się wpisuje w trwającą czwartą rewolucję przemysłową – staje się nieodłączną częścią procesu projektowego, pozwala na znaczące obniżenie kosztów związanych z pracami badawczo-rozwojowymi oraz skraca czas wdrożenia produktu na rynek.



**Rys. 3.** *Wpływ karoserii samochodu na promieniowanie anteny systemu V2V*

# ANSYS Cloud 2019 R1




**Adam Łokieć** • MESco • alokiec@mesco.com.pl

O zasadach działania i rodzajach rozwiązań chmurowych, w tym również o Microsoft Azure dla obliczeń numerycznych HPC, pisałem już na łamach *MESsengera*, jednak tym razem chciałbym przedstawić zupełnie nową funkcjonalność, jaka pojawiła się wraz z ANSYS 2019 R1. Jest to całkowicie zintegrowana usługa obliczeń HPC w chmurze ANSYS.

Chmura ANSYS Cloud powstała na bazie chmury Microsoft Azure i stanowi efekt współpracy obu firm. Istotą działania ANSYS Cloud jest zapewnienie łatwego i natychmiastowego dostępu do obliczeń HPC na żądanie dla użytkowników oprogramowania ANSYS, bezpośrednio z poziomu środowiska ANSYS. Użytkownik nie musi konfigurować samodzielnie swojej chmury (klastra obliczeniowego), ustawiać dostępu do własnego serwera licencji ANSYS (a nawet posiadać własnych licencji typu solver czy HPC). Cała infrastruktura – zarówno sprzęt, jak i licencje – jest predefiniowana bezpośrednio w chmurze ANSYS.

## Obecne ograniczenia ANSYS Cloud

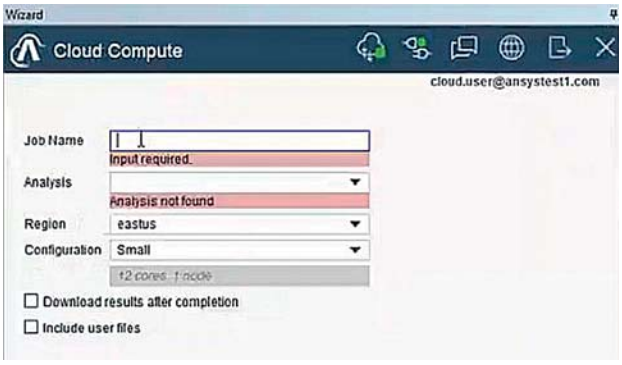
Obecnie użytkownik nie ma możliwości używania własnych licencji podczas korzystania z usługi ANSYS Cloud.

Kolejnym ograniczeniem jest dostępność jedynie licencji mechanicznych (odpowiednika Mechanical Enterprise) oraz przepływowej (tylko Fluent). Zgodnie z zapowiedziami licencje elektromagnetyczne (Maxwell) będą dostępne w kolejnej wersji: ANSYS 2019 R2.

| FLUENT | Small | Medium | Large |
|---|---|---|---|
| Nodes | 1 | 2 | 8 |
| Cores | 12 | 32 | 112 |
| AEUs/hr (HW+SW) | 13 | 17 | 25 |

| MECHANICAL | Small | Medium | Large |
|---|---|---|---|
| Nodes | 1 | 3 | 8 |
| Cores | 12 | 36 | 96 |
| AEUs/hr (HW+SW) | 13 | 18 | 25 |

**Rys. 1.** *Konsumpcja jednostek AEU (ANSYS Elastic Units) w chmurze ANSYS Cloud w zależności od wybranego modelu klastra oraz rodzaju solvera*




**Rys. 2.** *Definicja zadania w ANSYS Cloud Compute*

Użytkownik powinien mieć przynajmniej dostęp do własnych licencji do pre- i postprocessingu, ponieważ chmura ANSYS Cloud zapewnia jedynie licencje typu solver.

Obecnie ANSYS Cloud działa jedynie z wersją ANSYS 19.2 i 2019 R1.

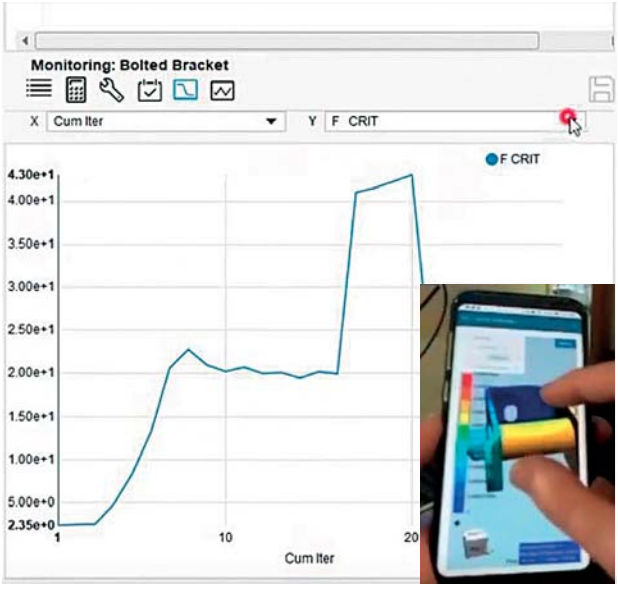
## Mechanizm rozliczenia za korzystanie z usługi ANSYS Cloud

Do rozliczeń za używanie zarówno sprzętu, jak i licencji, służą tzw. jednostki AEU (ANSYS Elastic Units). Można je kupować w pakietach lub jako okresową dzierżawę (w chwili pisania niniejszego artykułu: na rok lub trzy miesiące).

Zużycie jednostek AEU na godzinę zależy od wybranego przez użytkownika modelu klastra obliczeniowego oraz typu solvera (rys. 1). Dostępne są trzy rodzaje klastrów obliczeniowych: Small (12C), Medium (32C) oraz Large (112C).

## Jak w skrócie wygląda praca z wykorzystaniem ANSYS Cloud

1. Przygotowujemy model do obliczeń lokalnie – na własnej stacji roboczej (pełny preprocessing).
2. Bezpośrednio ze środowiska ANSYS logujemy się do ANSYS Cloud Compute za pomocą wizarda (wymagane preinstalowanie środowiska ANSYS Cloud zawierającego extension ACT: AnsysCloud). Definiujemy podstawowe parametry, tj. podajemy nazwę analizy, typ analizy (mechaniczna lub CFD)




**Rys. 3.** *Śledzenie obliczeń oraz prosty postprocessing są możliwe z poziomu przeglądarki internetowej, również na smartfonie*

i region (czyli miejsce, gdzie fizycznie znajduje się centrum obliczeniowe Microsoft Azure – najlepiej najbliżej naszego miejsca pracy) oraz wybieramy rodzaj klastra HPC – Small, Medium lub Large (rys. 2).

3. Po uruchomieniu analizy mamy wgląd do monitoringu postępu obliczeń w postaci logu oraz wykresów. Podgląd jest interakcyjny. Zaletą jest to, że ten sam podgląd możemy uzyskać również z poziomu przeglądarki internetowej – nic nie stoi na przeszkodzie, aby w dowolnym momencie śledzić postęp obliczeń np. na ekranie naszego smartfona.
4. Po zakończeniu obliczeń jesteśmy o tym powiadamiani e-mailem. Możemy wtedy, również z poziomu przeglądarki internetowej (czyli m.in. z poziomu naszego smartfona), przejrzeć wyniki analizy i poczynić pierwsze zrzuty danych (snapshoty) (rys. 3).
5. Końcowe wyniki ściągamy na naszą stację roboczą, na której przygotowywaliśmy preprocessing i definiowaliśmy zadanie do chmury obliczeniowej.
6. Pełny postprocessing wykonujemy lokalnie, na naszej stacji roboczej.

Podsumowując, proces jest niemal analogiczny jak w przypadku wysyłania naszych obliczeń na lokalny serwer poprzez usługę ANSYS Remote Solver Manager (z dodatkową opcją monitoringu za pośrednictwem przeglądarki internetowej).

## Dla kogo ANSYS Cloud?

ANSYS Cloud zapewnia szybkość, moc i zdolność obliczeniową chmury obliczeniowej bez żadnego wkładu własnego użytkownika w przygotowanie i zarządzanie klastrem obliczeniowym. Dzięki dostępowi do większych zasobów HPC użytkownicy mogą przeprowadzać większe, bardziej złożone i dokładniejsze symulacje. W tym samym czasie można poddać ocenie więcej wariantów analizowanego projektu, by ostatecznie wybrać najbardziej optymalny.

Zalety chmury obliczeniowej ANSYS Cloud docenią zwłaszcza firmy, które sporadycznie potrzebują dostępu do większych zasobów HPC. W tym przypadku oszczędności wynikają z braku potrzeby zakupu własnego klastra obliczeniowego (a także serwisowania go i administrowania nim) oraz dodatkowych licencji, np. ANSYS HPC.

Na zakończenie rada dla tych, którzy zamierzają korzystać z chmury obliczeniowej (w tym ANSYS Cloud). Otóż warto podchodzić do tego rozwiązania bardzo rozsądnie, zgodnie z zasadą ***Cloud is not viable if we do not save money*** (chmura jest nieopłacalna, jeśli nie oszczędzamy przy tym pieniędzy).

Uwaga:
Program ANSYS Cloud oficjalnie wystartował 15 lutego 2019 r. Zainteresowane osoby zachęcamy do śledzenia informacji na naszej stronie internetowej, gdzie postaramy się zamieszczać przydatne informacje na temat usługi ANSYS Cloud.
W przypadku pytań dotyczących kosztów AEU (ANSYS Elastic Units) oraz pakietów AEU prosimy o kontakt z naszym działem handlowym.
W przypadku wszelkich pytań technicznych należy kontaktować się z autorem artykułu.

ANSYS CERTIFIED ELITE CHANNEL PARTNER

hp

MESCO jest przedstawicielem firmy ANSYS w Polsce oraz Preferowanym Partnerem Hewlett-Packard.

Firma wykonuje zlecone symulacje komputerowe z zakresu mechaniki, przepływów i elektromagnetyzmu, tworzy specjalistyczne oprogramowanie, prowadzi sprzedaż i wsparcie techniczne oprogramowania ANSYS, nCode i LSTC.

MESCO jako Partner HP w Polsce oferuje wsparcie IT i dostarcza prekonfigurowane stanowiska pracy, oparte na rozwiązaniach sprzętowych HP – od mobilnych stacji roboczych po serwery obliczeniowe.

**Wydawca:** MESCO Sp. z o.o.
al. Legionów 4, 41-902 Bytom
tel. +48 (32) 768 36 36, faks +48 (32) 768 36 35
info@mesco.com.pl, www.mesco.com.pl

Redakcja i korekta: Małgorzata Pilewicz, Anna Wojewódzka
Projekt graficzny i skład: Marzena Rosochacz