JESIEŃ 2021 • NR 12

MESSENGER

Serdecznie witam entuzjastów symulacji!

Skończyły się wakacje i pora nadrobić zaległości w prasie branżowej. Przed Państwem kolejny numer naszego biuletynu, który ukazuje się w najlepszym możliwym momencie. W październiku odbędzie się bowiem kolejne spotkanie użytkowników programu ANSYS „Symulacja 2021". Bardzo wyczekiwane po okresie izolacji. Sale hotelowe zatętnią życiem i gwarem rozmów o tym, co kto ciekawego policzył, a wieczorem poleją się trunki i potoczą kule.

W bieżącym numerze – jak zwykle – nowości i trendy. Zaczynamy od współpracy firmy ANSYS z PTC, której owocem jest moduł symulacyjny w środowisku Creo, bazujący na silniku Discovery. Zawsze aktualny jest temat złącz spawanych, dlatego przedstawiamy krótką charakterystykę metod obliczeniowych. W analizach przepływowych też dużo się dzieje. Na początek kilka słów o programie Fluent Post, który zyskał ciekawe funkcjonalności. Od kilku lat zajmujemy się obliczeniami dotyczącymi paneli fotowoltaicznych i temu również poświęcamy dużo uwagi w bieżącym numerze. Podchodzimy do tego zadania kompleksowo i analizujemy zarówno obciążenia spowodowane działaniem wiatru na panele, jak i rozchodzenie się promienia wewnątrz pojedynczego ogniwa fotowoltaicznego.

Fanów elektromagnetyzmu na pewno zainteresuje projektowanie pasywnych czujników temperatury, a inżynierów budownictwa i chemików – model wnikania jonów chlorków do betonu. Do tego gorący temat: wykorzystanie symulacji komputerowych w procesie tworzenia cyfrowych bliźniaków.

Na koniec nowina: ANSYS dokonał kolejnego przejęcia! Tym razem firmy Zemax, lidera symulacji złożonych układów optycznych, soczewek i pryzmatów. Jest to istotne zwłaszcza przy projektowaniu precyzyjnych układów z systemami autonomicznego widzenia. Już niedługo nikt się nie będzie śmiać ze starego dowcipu o biznesmenie, który zaprosił kolegę na przejażdżkę swoim nowym, luksusowym samochodem. Gdy zasiadł za kierownicą, kolega zaniepokojony spytał, czemu prowadzi bez okularów, chociaż jest krótkowidzem. Biznesmen odpowiedział: *Nie muszę jeździć w okularach. Przednią szybę kazałem zrobić według recepty.*

Życzę wszystkim dobrej zbieżności,

Tomasz Czyż

W TYM NUMERZE:

3 Aktualności

4 ANSYS dla konstruktorów w Creo Parametric

5 Obliczenia zmęczeniowe złącz spawanych

7 Analiza i modelowanie procesu produkcji addytywnej z materiału AlSi10Mg z wykorzystaniem modułu ANSYS Additive

9 Modelowanie stentów w ANSYS Workbench

12 Analiza obciążeń wiatrowych działających na konstrukcje farm fotowoltaicznych

14 Modelowanie numeryczne rozchodzenia się promieniowania wewnątrz ogniwa fotowoltaicznego

16 Fluent Post – uleczona pięta Achillesa

18 Budowa rzeczywistego modelu numerycznego wnikania jonów chlorków do wnętrza betonu

20 Aerodynamika samochodów ciężarowych – symulacja a rzeczywistość

23 Projektowanie pasywnych czujników temperatury na bazie planarnych struktur rezonansowych

26 Digital Twin – nowy poziom wykorzystania symulacji komputerowych

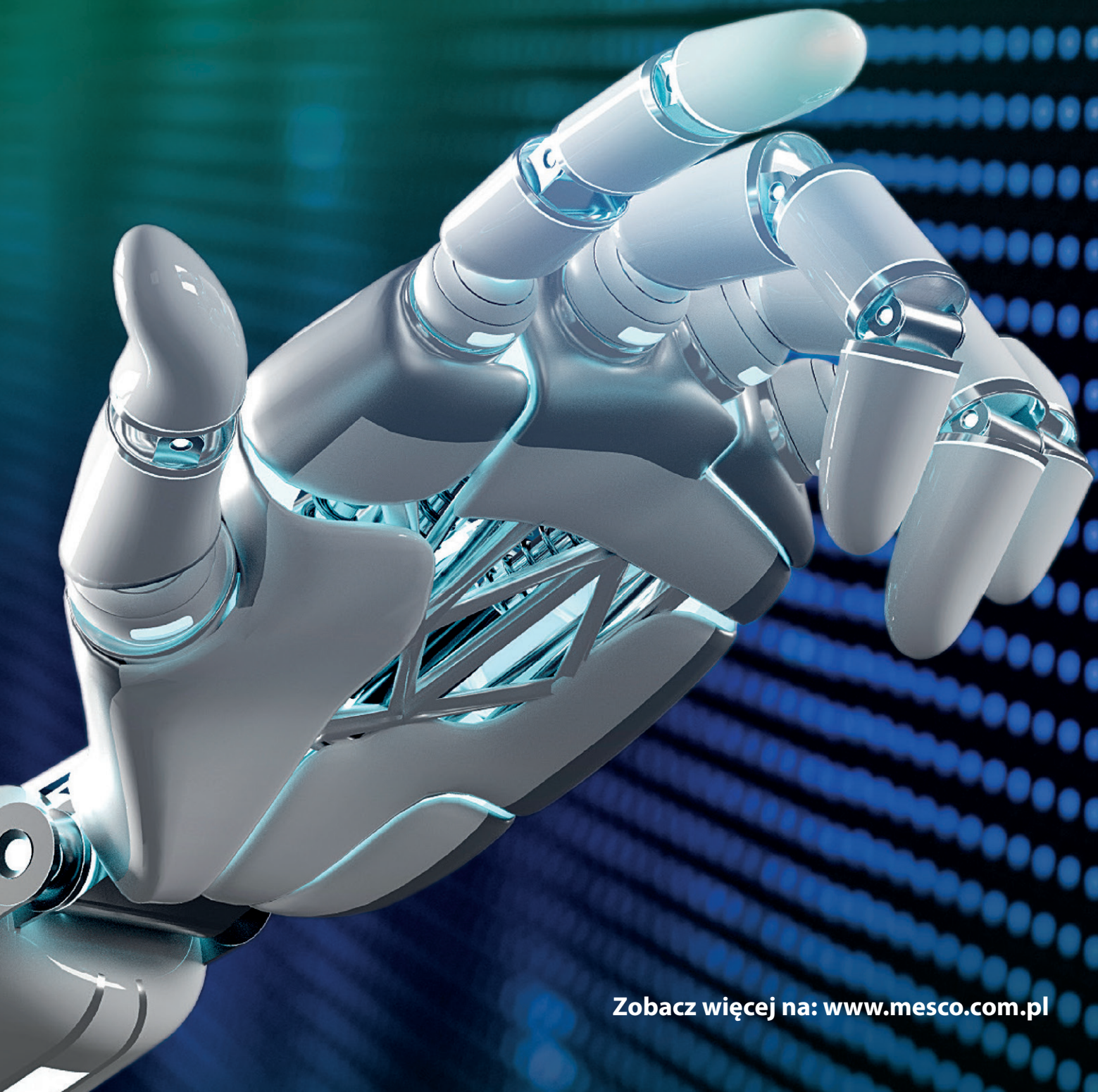
MESCO

Ansys MESCO

Medical Algorithms

Forum Medycyny In Silico 2021

Modelowanie, symulacja i wizualizacja procesów medycznych i biologicznych



Zobacz więcej na: www.mesco.com.pl

Nowa wersja ANSYS 2021 R2

W lipcu ukazała się najnowsza wersja oprogramowania ANSYS 2021 R2. Wprowadzone zmiany dają możliwość badania wczesnych etapów projektowania produktu i wdrożenia złożonej inżynierii systemowej od nanometrowej skali projektowania chipów do poziomu misji w środowiskach operacyjnych w zastosowaniach lotniczych i obronnych. Wiodące rozwiązania symulacyjne zapewniają otwarte podejście, które usprawnia inżynierię dzięki uproszczonemu przepływowi pracy, zintegrowanemu systemowi zarządzania danymi i łatwemu dostępowi do wydajnej mocy obliczeniowej (HPC) za pośrednictwem chmury.

Rozszerzenie licencji akademickich...

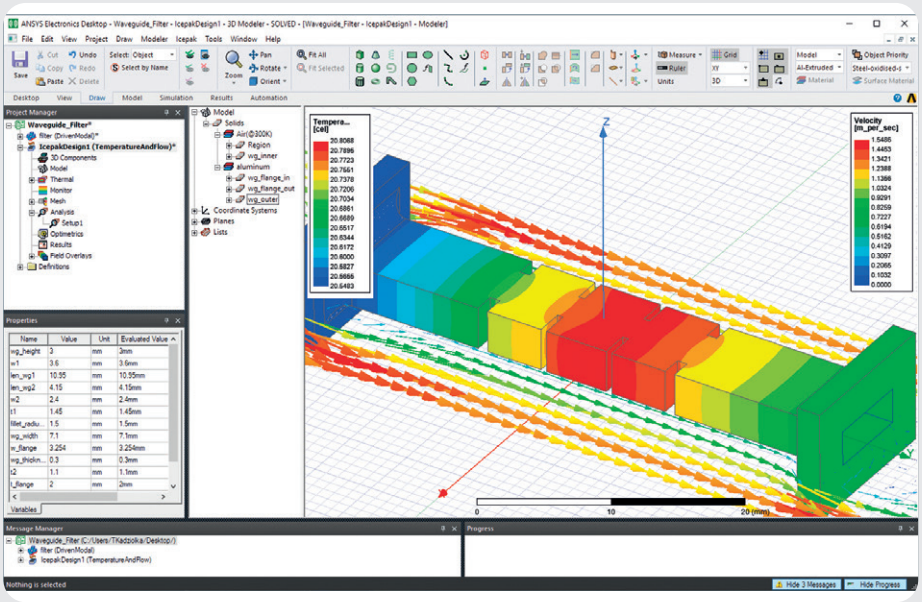
W wersji ANSYS 2021 R2 wprowadzono zmiany w licencjach akademickich, obecnych na prawie wszystkich największych uczelniach technicznych w Polsce – ANSYS Academic Multiphysics Campus Solution.

Campus Solution to pakiet licencji badawczych oraz dydaktycznych przeznaczonych dla uczelni. Do tej pory w jego skład wchodziły licencje do analiz mechanicznych, mechaniki płynów oraz elektromagnetycznych. Od nowej wersji licencja Campus Solution została rozszerzona o produkty do analiz kinematycznych (ANSYS Motion) oraz do symulacji optyki (ANSYS Speos).

...i studenckich – nowy ANSYS Electronics Desktop Student

Zdając sobie sprawę z tego, jak ważne są praktyczne umiejętności na dzisiejszym rynku pracy, firma ANSYS oferuje bezpłatną licencję ANSYS Student do samodzielnej nauki symulacji komputerowej.

Do tej pory zakres licencji obejmował wyłącznie analizy mechaniczne i mechaniki płynów. Od sierpnia 2021 r. rozciągnięto go na analizy elektromagnetyczne w ramach bezpłatnego produktu ANSYS Electronics Desktop Student. W nowym wydaniu licencji studenckiej możliwa będzie nauka projektowania szerokiej gamy systemów elektrycznych i elektromechanicznych dzięki dostępowi do takich programów, jak: ANSYS HFSS, ANSYS Maxwell, ANSYS Q3D i ANSYS Icepak.



Jesień z symulacją komputerową

Wraz z Medical Algorithms MESco przygotowuje kolejną edycję **Forum Medycyny In Silico**. Celem konferencji jest omówienie w gronie przedsiębiorców, naukowców, lekarzy oraz inżynierów wyzwań, które nowe technologie stwarzają w medycynie. Spotkanie będzie również okazją do wymiany wiedzy i doświadczeń między specjalistami z różnych dziedzin, co powinno się bezpośrednio przyczynić do rozwoju medycyny.

Jeśli pandemia nie pokrzyżuje naszych planów – spotkamy się z Państwem stacjonarnie już w drugiej połowie listopada.

Kolejnym wartym uwagi jesiennym wydarzeniem jest wirtualna konferencja **ANSYS Level Up 2.0**. W tym roku będzie ona poświęcona nie tylko licencjom mechanicznym, ale także pozostałym fizykom.

Niezależnie od tego, czy dopiero zaczynasz swoją przygodę z symulacją komputerową, czy zajmujesz się zaawansowanymi analizami, znajdziesz coś dla siebie!

Więcej informacji o wydarzeniach na naszej stronie internetowej.

Praca w MESco

Mimo pandemii MESco dynamicznie się rozwija. Obecnie prowadzimy rekrutację na stanowiska:

- **Account Manager/Product Manager**,
- **Application Engineer** – symulacje mechaniczne,
- **Application Engineer** – symulacje elektroniki.

Szukamy pasjonatów symulacji zmotywowanych i nastawionych na rozwój. Dołącz do najlepszego zespołu i razem z nami miej wpływ na transformację cyfrową w Polsce.

Szczegóły prowadzonych rekrutacji są dostępne na naszej stronie internetowej.

Sesja jesienna szkoleń ogólnodostępnych

Na początku października ruszamy z sesją jesienną kursów ogólnodostępnych MESco. W związku z nadal utrzymującą się sytuacją pandemiczną szkolenia będą się odbywały w trybie hybrydowym, co oznacza możliwość udziału kursantów zarówno w sposób stacjonarny, jak i online.

Pełna oferta kursów MESco jest dostępna na naszej stronie internetowej w zakładce *Usługi → Szkolenia*.

Serdecznie zapraszamy.

ANSYS dla konstruktorów w Creo Parametric

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

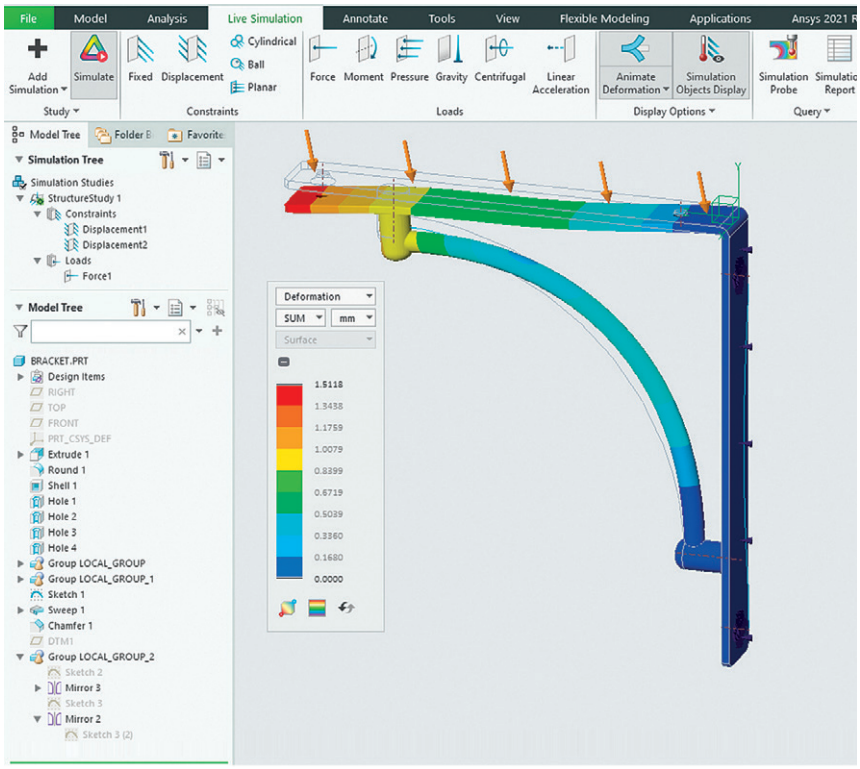
Od kilku lat ANSYS i PTC ściśle ze sobą współpracują. Zaowocowało to stworzeniem dwóch rozszerzeń do Creo Parametric: Creo Simulation Live oraz Creo ANSYS Simulation. Te dodatki umożliwiają prowadzenie analiz wytrzymałościowych, modalnych i termicznych wewnątrz systemu Creo. Bezpośrednia integracja ze środowiskiem do projektowania sprawia, że konstruktor pracuje w znajomym środowisku i nie musi się uczyć nowego interfejsu użytkownika. Takie rozwiązania pozwalają znaleźć odpowiedź na krytyczne pytania projektowe na wczesnym etapie procesu projektowania, a także oszczędzić czas i wysiłek podczas tworzenia prototypów.

Rozszerzenie Creo Simulation Live (rys. 1) jest oparte na ANSYS Discovery, w którym symulacja odbywa się w czasie rzeczywistym podczas projektowania. Oznacza to, że wyniki symulacji aktualizują się na bieżąco, gdy nastąpi edycja geometrii, zmiana materiału lub zmiana wartości obciążeń. Jest to możliwe, gdyż rozszerzenie wykorzystuje do obliczeń procesor karty graficznej GPU. Konstruktorzy mogą teraz na bieżąco analizować wpływ wprowadzanych zmian na projektowany model, bez konieczności oczekiwania na wyniki. Z użyciem Creo Simulation Live można przeprowadzać liniowe analizy statyczne, analizy termiczne w stanie ustalonym i nieustalonym, analizy modalne oraz analizy przepływowe dla przepływu wewnętrznego i opływu wybranego obiektu.

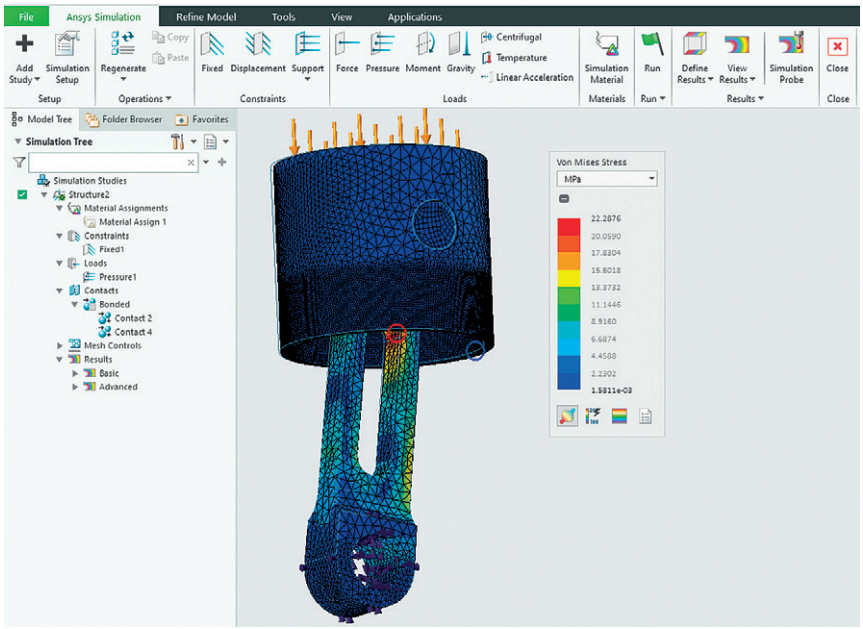
Natomiast rozszerzenie Creo ANSYS Simulation (rys. 2) powstało z myślą o prowadzeniu analiz metodą elementów skończonych. Dodatek wykorzystuje w obliczeniach solver ANSYS Mechanical, co daje gwarancję wysokiej dokładności wyników. Rozszerzenie pozwala na uzyskanie następujących symulacji:

- liniowych analiz wytrzymałościowych,
- analiz termicznych w stanie ustalonym,
- analiz modalnych.

Proces generowania siatki odbywa się automatycznie, jednakże można również ręcznie kontrolować siatki poprzez



Rys. 1. *Interfejs w Creo Simulation Live*



Rys. 2. *Interfejs w Creo ANSYS Simulation*

określenie minimalnego i maksymalnego rozmiaru elementu. Dodatkowo istnieje możliwość wykorzystania znanych opcji globalnych z pakietu ANSYS Meshing, np. Curvature, Proximity, lub opcji lokalnych. Środowisko Creo ANSYS Simulation pozwala także na importowanie modelu obciążeń i utwierdzeń z Creo Simulation Live oraz eksportowanie geometrii do ANSYS Workbench/Mechanical.

W Creo Simulation Live i Creo ANSYS Simulation możliwe jest również zdefiniowanie wielu analiz w obrębie jednego modelu obliczeniowego oraz wyznaczenie ich wyników. Na podstawie tych wyników można określać wartości badanych wielkości w wybranym punkcie lub w postaci maksimum albo minimum na wskazanej geometrii i na całym modelu. Można uzyskać takie wyniki, jak: naprężenia, przemieszczenia oraz reakcje. Dostępna jest też opcja animowania otrzymanych wyników bezpośrednio na geometrii modelu.

Główne różnice między pakietem Creo Simulation Live a Creo ANSYS Simulation to rodzaj solvera oraz możliwość uszczegółowienia symulacji w Creo ANSYS Simulation o dodatkowe warunki brzegowe, tj.: frictionless, temperaturę, punkt masowy, element sprężyny oraz kontakty (tj.: no separation) i jointy (tj.: fixed, hinged, translational, slot, cylindrical, universal, spherical, planar).

Rozszerzenia Creo Simulation Live i Creo ANSYS Simulation zostały zaprojektowane specjalnie dla inżynierów-konstruktorów na potrzeby analizowania działania prototypów 3D przed ich wdrożeniem do produkcji. Rozwiązania ujednolicają środowisko modelowania i symulacji, pozwalając projektantom na szybką i dokładną analizę procesu rozwoju produktu w dobrze znanym oprogramowaniu Creo Parametric. ■

Obliczenia zmęczeniowe złącz spawanych

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

Inżynierowe, którzy przeprowadzają swoje pierwsze analizy wytrzymałości zmęczeniowej, często trafiają na wzmianki o metodach przeznaczonych specjalnie do połączeń spawanych. Podczas najprostszych analiz, np. w Fatigue Tool w ANSYS Mechanical, wybiera się odpowiednią metodę obliczeń (*S-N/E-N*), ustala wartości współczynników korekcyjnych, dobiera *mean stress theory* itd., aby na końcu otrzymać wartość liczby cykli. Jednak gdy zdecydujemy się na przeprowadzenie obliczeń zmęczeniowych np. według tzw. eurokodów, okazuje się, że aby uzyskać liczbę cykli, należy dobrać klasę połączenia spawanego. Czasem trzeba wyznaczyć naprężenia metodą *hot spot* zamiast po prostu wykorzystać ABS Max. Principal Stress w Fatigue Tool. Z czego wynika takie specjalne traktowanie złącz spawanych?

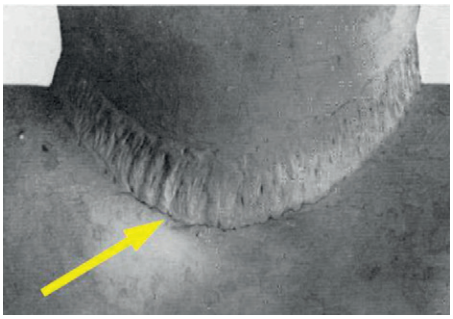
W połączeniach spawanych mogą wystąpić następujące problemy:

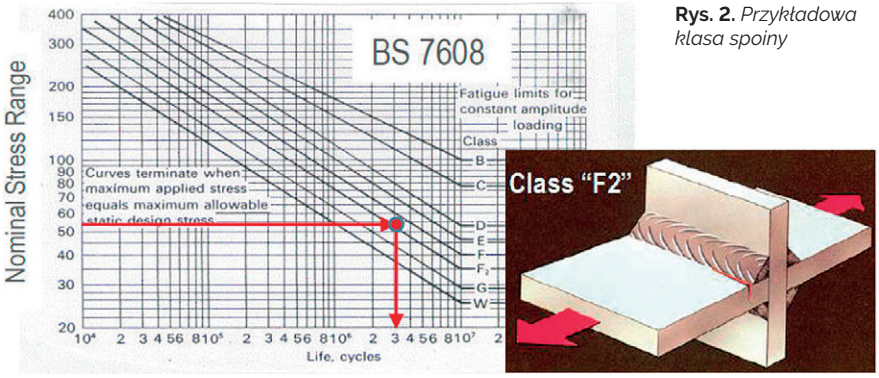
- spiętrzenia naprężeń wynikające ze zmiany przekroju,
- wysokie (oraz nieznane) wartości rozciągających naprężeń resztkowych,
- właściwości materiałowe zmieniają się w nieznanym stopniu i różnią się w przekroju połączenia,
- połączenie spawane ciężej jest odwzorować w modelu (rzeczywisty kształt spoin może być skomplikowany – rys. 1).

Sytuację pogarsza to, że użycie stali o wyższej wytrzymałości (zarówno doraźnej, jak i zmęczeniowej) niczego nie poprawia w przypadku spoin. Materiały o bardzo różnych parametrach po spawaniu wykazują podobne właściwości zmęczeniowe. Jak zatem przeprowadzić analizę zmęczeniową złącz spawanych?

Po pierwsze trzeba pamiętać, że dane zmęczeniowe używane w analizach bez połączeń spawanych obowiązują dla danego materiału (np. S355). Różnice pomiędzy próbką testową a rzeczywistym obiektem uwzględnia się poprzez różne współczynniki korekcyjne (współczynnik rozmiaru, typu obciążenia, wykończenia powierzchni itd.). Natomiast same dane materiałowe, np. krzywa *S-N*, są specyficzne dla danego materiału, bez względu na kształt próbki, jej wielkość czy typ obciążenia. W przypadku spoin dane „materiałowe" otrzymuje się nie tyle dla danego materiału (ponieważ po spawaniu – jak wspomniano – różne materiały

Rys. 1. *Rzeczywista geometria spoin*





Rys. 2. *Przykładowa klasa spoiny*

wykazują podobne właściwości), ile dla typu połączenia oraz typu obciążenia, które razem definiują tzw. klasę spoiny (rys. 2). Krzywa *S-N* dla połączenia spawanego uwzględnia uśrednione wartości naprężeń resztkowych, prawdopodobieństwo wystąpienia wad produkcyjnych itd.

Stanowi to główną różnicę pomiędzy analizą zmęczeniową materiałów spawanych i niespawanych. Oczywiście zmiana właściwości materiałowych dotyczy samej spoiny oraz jej sąsiedztwa. W lokalizacjach odległych od spoin można korzystać ze standardowych metod.

Kolejnym istotnym zagadnieniem w analizach zmęczeniowych spoin jest sposób określania zakresu naprężeń (dla złącz spawanych najczęściej używa się metody *S-N*, ponieważ jest sprawdzona i opiera się na niej zdecydowana większość norm). W związku z tym, że spoina prawie zawsze działa jako karb, potrzebne są metody wyznaczania odpowiednich wartości naprężeń. Najprostsza klasyfikacja tych metod wygląda następująco:

- wyznaczanie naprężeń nominalnych,
- wyznaczanie naprężeń konstrukcyjnych przez ekstrapolację, tzw. *hot spot*,
- wyznaczanie naprężeń konstrukcyjnych przez linearyzację, tzw. metoda ASME,
- wyznaczanie naprężeń typu *effective notch*.

Naprężenia nominalne są określane w pewnej odległości od spoiny (najczęściej główne lub normalne, w zależności od normy czy wytycznych). Chodzi po prostu o otrzymanie naprężeń pozbawionych jakiegokolwiek wpływu obecności spoiny.

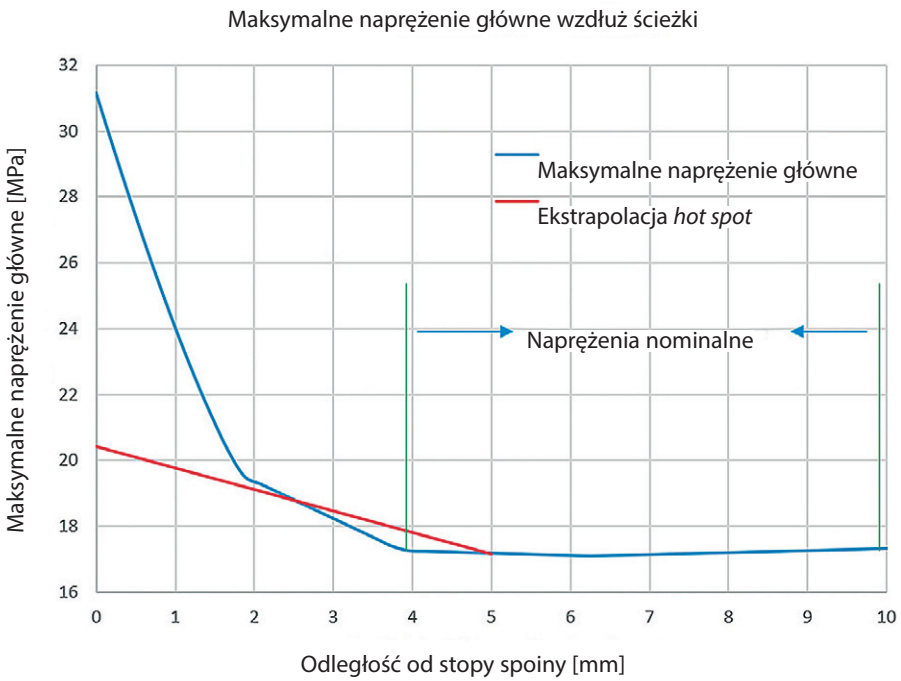
Zastosowanie ekstrapolacji, tzw. *hot spot*, pozwala na wyznaczenie naprężeń uwzględniających efekt karbu wynikający z nagłej zmiany wielkości przekroju. Jednocześnie umożliwia pominięcie osobliwości numerycznej będącej skutkiem istnienia ostrej krawędzi w modelu numerycznym. „Ostre krawędzie" to takie, na styku których sąsiadujące powierzchnie nie są styczne. Gdy takie krawędzie są obciążane w kierunku wzdłużnym, nie powinno być problemu z koncentracją naprężeń (brak nagłej zmiany przekroju). Natomiast przy innym obciążeniu można zauważyć fałszywe spiętrzenie naprężeń, którego nie da się wyeliminować przez zagęszczenie siatki.

W metodzie *hot spot* wyznacza się naprężenia wzdłuż ścieżki prostopadłej do stopy spoiny (najczęściej główne, działające możliwe najbardziej prostopadle do stopy spoiny), odczytuje się wartości naprężeń w dwóch lub trzech punktach wzdłuż wspomnianej ścieżki, a następnie wykonuje ekstrapolację (liniową bądź kwadratową) naprężeń do stopy spoiny. Otrzymane w ten sposób naprężenia uwzględnia się w analizie zmęczeniowej.

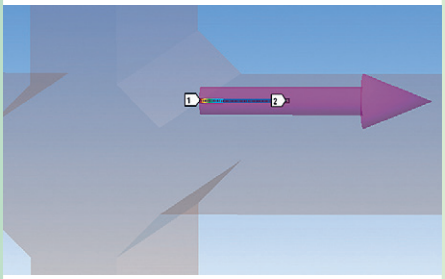
Metoda określania naprężeń konstrukcyjnych wyznaczonych przez linearyzację została opracowana i rozpowszechniona przez stowarzyszenie ASME – The American Society of Mechanical Engineers. Jest to podejście przeznaczone do grubościennych zbiorników ciśnieniowych. Polega ono na wyznaczeniu naprężeń membranowych oraz zginających wzdłuż ścieżki (a tak naprawdę wielu ścieżek) wytyczonej po grubości blach w stopie spoiny (rys. 5). Pełne wykorzystanie metody ASME zakłada wykonanie jeszcze innych operacji, natomiast linearyzacja naprężeń po grubości jest jej najważniejszym elementem.

Metoda *effective notch* zakłada odczytywanie naprężeń bezpośrednio z wybranej lokalizacji (np. stopy spoiny) po uprzednim zaokrągleniu ostrych krawędzi (rys. 6). Idea jest taka sama jak w przypadku metody *hot spot* – uwzględnienie efektu karbu przy jednoczesnym pominięciu osobliwości numerycznej.

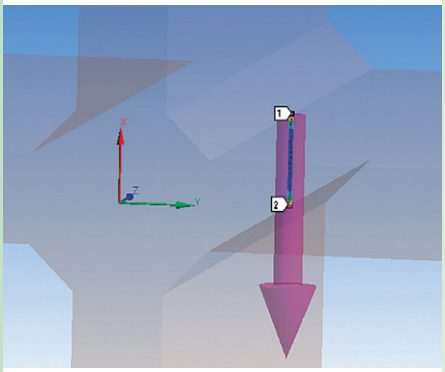
Na tym nie kończą się możliwości analiz zmęczeniowych złącz spawanych. Poza wspomnianymi podejściami jest jeszcze metoda Volvo/Chalmers, przeznaczona do cienkościennych struktur. Warto wspomnieć, że metody Volvo/Chalmers oraz ASME nie polegają na wybieraniu klas spoin. Natomiast analiza złącz spawanych w większości przypadków (z użyciem tzw. eurokodów, normy BS7608, wytycznych IIW itd.) zakłada określenie zakresu naprężeń w odpowiedni sposób, uwzględnienie współczynników korekcyjnych (np. grubości blachy) oraz wybranie klasy spoiny. ■



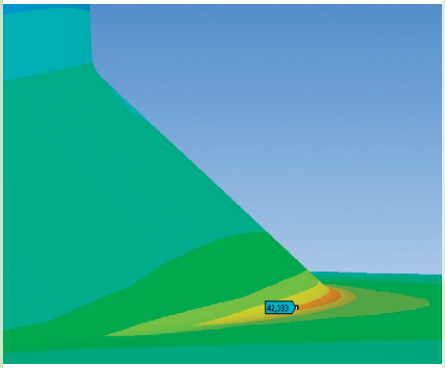
Rys. 3. *Przebieg naprężeń głównych wzdłuż ścieżki prostopadłej do stopy spoiny*



Rys. 4. *Ścieżka prostopadła do stopy spoiny*



Rys. 5. *Ścieżka do wyznaczania naprężeń w metodzie ASME*



Rys. 6. *Naprężenia wykorzystywane w metodzie* effective notch

Analiza i modelowanie procesu produkcji addytywnej z materiału AlSi10Mg z wykorzystaniem modułu ANSYS Additive

Grzegorz Fiuk • ŁUKASIEWICZ – Instytut PIAP, koło Creative Students • g.fiuk@doktorant.po.edu.pl
Maciej Cader • ŁUKASIEWICZ – Instytut PIAP, opiekun koła Creative Students • maciej.cader@piap.lukasiewicz.gov.pl

Produkcja addytywna jest nowoczesnym, zauważalnym wyznacznikiem postępu technicznego – ostatnie lata nie pozostawiają co do tego wątpliwości. Miejsca w przemyśle, gdzie wysoka wartość produktu koreluje z jego niskim wolumenem wytwarzania, doskonale się nadają do jej wdrażania. ŁUKASIEWICZ – Instytut PIAP, którego obszar badawczy obejmuje zaawansowane aplikacje przemysłowe z obszaru automatyzacji i robotyzacji, od lat rozwija działalność bezpośrednio związaną z technikami szybkiego prototypowania.

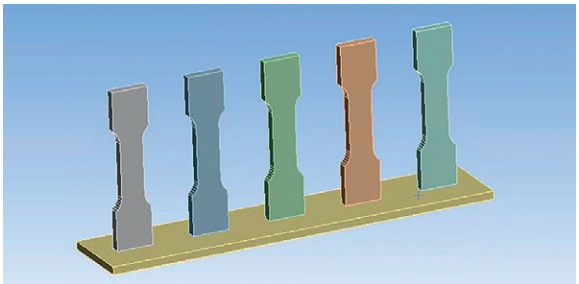
Jednym z narzędzi wspierających prowadzone badania jest – zaimplementowany od ostatnich wersji programu ANSYS – moduł Additive, który zarówno na poziomie Workbench, jak i Additive Science pozwala na realizację scenariuszy „*what if*" bez aranżowania środków produkcji. W ramach badań prowadzonych w ŁUKASIEWICZ – Instytucie PIAP, skoncentrowanych na produkcji przyrostowej części z materiału AlSi10Mg, wykonano pierwsze analizy numeryczne z zastosowaniem modułu Additive. Dla pięciu próbek wyprodukowanych metodą przyrostową i przeznaczonych do próby rozciągania przeprowadzono symulacje odkształceń poprocesowych, przy ustawieniach maszyny addytywnej zbliżonych do rzeczywistych.

Na rys. 1 pokazano próbki do badań wytrzymałościowych w stosunku do kierunku wytwarzania *w*, tj. w osi *Z* maszyny. Na rys. 2*a–d* widać kolejne kroki symulacji procesu addytywnego. Taka analiza kolejnych *w* prowadzona symulacyjnie dla następujących po sobie kroków wytwarzania addytywnego pozwala wyznaczyć potencjalne miejsca kumulacji odkształceń *w* i optymalizować wykorzystanie podpór.

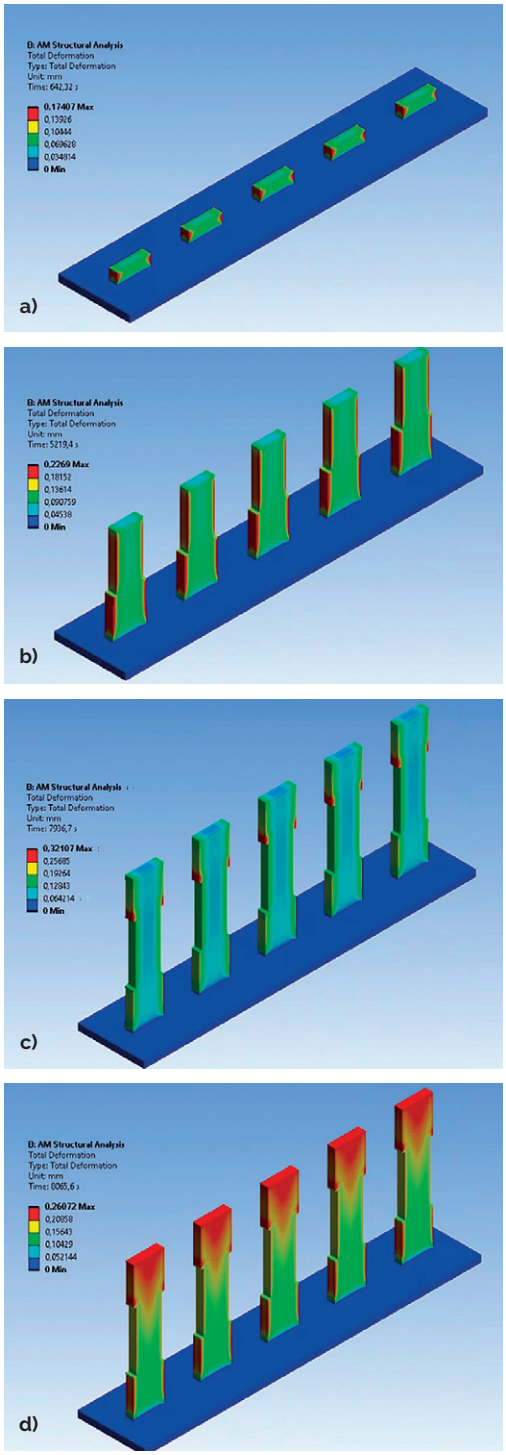
Wartościowym narzędziem jest również analiza predykcyjna mikrostruktury materiałowej. W ramach badań została ona zrealizowana w module ANSYS Additive po procesie wytwarzania. Na rys. 3 znajduje się przykład mikrostruktury stopu aluminium z widocznymi granicami ziaren. Rysunek 3*a* prezentuje płaszczyznę *XY*, a rys. 3*b* – płaszczyznę *XZ*.

Dodatkowo w ramach badań próbki zostały zeskanowane skanerem 3D w celu analizy odkształceń po procesie produkcji w odniesieniu do wzorca modelu CAD. W ten sposób przeprowadzono analizę pól odchyłek i ich weryfikację w odniesieniu do wyników uzyskanych w środowisku ANSYS Workbench. Wyniki analizy porównawczej przedstawiono na rys. 4*a–b*, dla dwóch reprezentatywnych próbek.

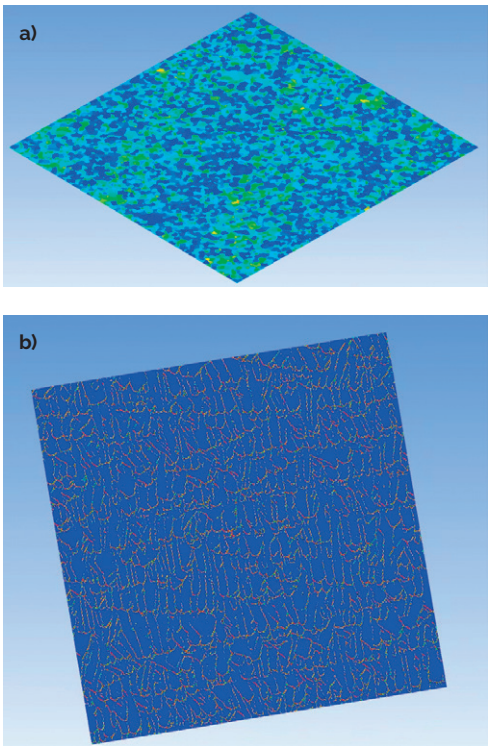
Próba jednoosiowego rozciągania próbek została wykonana na maszynie wytrzymałościowej Instron współpracującej z zewnętrznym ekstensometrem optycznym, którego funkcję pełnił w badaniach system do analizy odkształceń Aramis, produkcji GOM. Sposób pracy systemu Aramis, który umożliwia monitorowanie stanów dynamicznych, jest szczegółowo opisany na stronie producenta (www.gom.com/pl/systemy-pomiarowe/aramis.html).



Rys. 1. *Model CAD próbek drukowanych wzdłuż osi Z maszyny wytwórczej EOS*



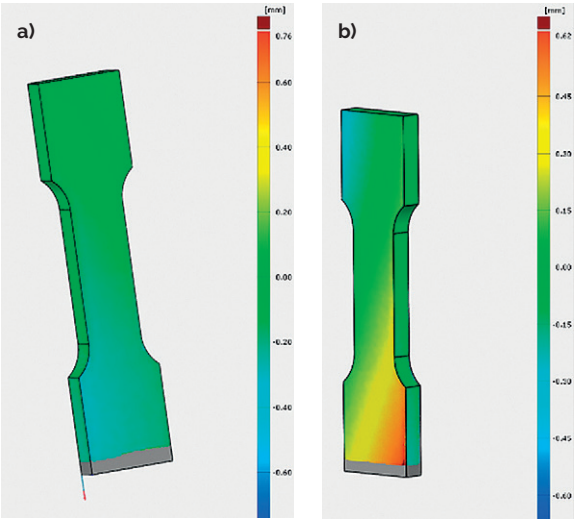
Rys. 2. *Symulacja przebiegu druku w Workbench Additive:*
a) 1/4 etapu druku z wyznaczonymi deformacjami;
b) 2/4 etapu druku z wyznaczonymi deformacjami;
c) 3/4 etapu druku z wyznaczonymi deformacjami;
d) końcowy etap druku z wyznaczonymi deformacjami



Rys. 3. *Prognozowana mikrostruktura wyznaczona w module ANSYS Additive Science: a) dla płaszczyzny XY; b) dla płaszczyzny YZ*

Dzięki badaniom otrzymano współczynniki materiałowe (moduł Younga i współczynnik Poissona) dla trzech charakterystycznych kierunków głównych próbki produkowanej przyrostowo. Wyniki badań pokrywają się z dokładnością do 5% dla trzech badanych kierunków oraz modelu izotropowego materiału użytego do badań symulacyjnych w module Additive.

Dalszym przedmiotem badań zespołu, oprócz prac ukierunkowanych na modelowanie struktur i geometrii wytwarzanych przyrostowo, będzie wykonanie analiz porównawczych badań laboratoryjnych i symulacyjnych dla mikrostruktur próbek. ■



Rys. 4. *Zeskanowana próbka (oś druku Z) po procesie druku, z naniesioną analizą odchyłek wytwórczych (rzeczywistych, względem modelu CAD)*

Modelowanie stentów w ANSYS Workbench

Radosław Ciemierkiewicz • MESco • rciemierkiewicz@mesco.com.pl

Dbałość o zdrowie decyduje o kondycji psychofizycznej człowieka i jego nastawieniu do życia. Zdrowie fizyczne jest uzależnione od poprawnej pracy układów. Jednym z nich jest układ krwionośny – ważnym jego zadaniem jest przepływ krwi, wymuszany przez pracę serca. Niezdrowy tryb życia może się przyczynić do powstawania schorzeń układu krwionośnego, w tym częściowego lub całkowitego zamknięcia części żył lub wystąpienia powikłań zespołu pozakrzepowego (coraz powszechniej występującego zarówno wśród kobiet, jak i mężczyzn).

Od jakości obiegu krwi wiele zależy – to właśnie w układzie krwionośnym odbywa się transport krwi, gazów oddechowych i substancji odżywczych do najważniejszych organów człowieka. Jego nieprawidłowa praca skutkuje wystąpieniem schorzeń, które bez podjęcia odpowiednich działań mogą prowadzić do śmierci. Jednym z ich objawów jest zator w tętnicach, wywołujący zaburzenie przepływu tlenu do poszczególnych obszarów organizmu, a w konsekwencji – ich obumieranie (rys. 1).

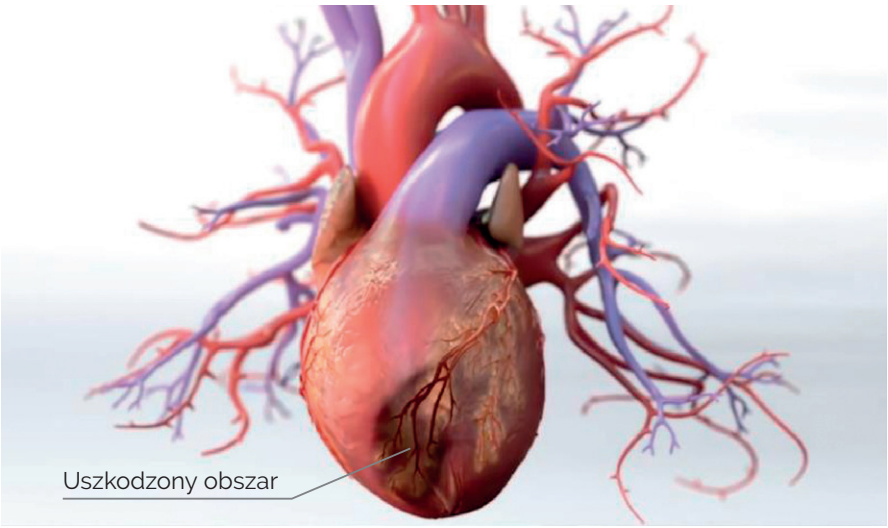
Nie tylko układ krwionośny jest narażony na zaburzenia funkcjonowania. Mogą też wystąpić np. niedrożność układu oddechowego czy kamienie nerkowe w układzie moczowym, które przyczyniają się do zwężenia moczowodu albo blokują przepływ moczu.

Na przestrzeni lat medycyna musiała wykształcić metody walki z takimi dolegliwościami. W jednej z nich stosuje się stenty. Są to protezy o niewielkich rozmiarach, zbudowane najczęściej z połączonych ze sobą drucików, tworzących strukturę (rys. 2). Są umieszczane wewnątrz naczyń krwionośnych, aby przywrócić ich drożność.

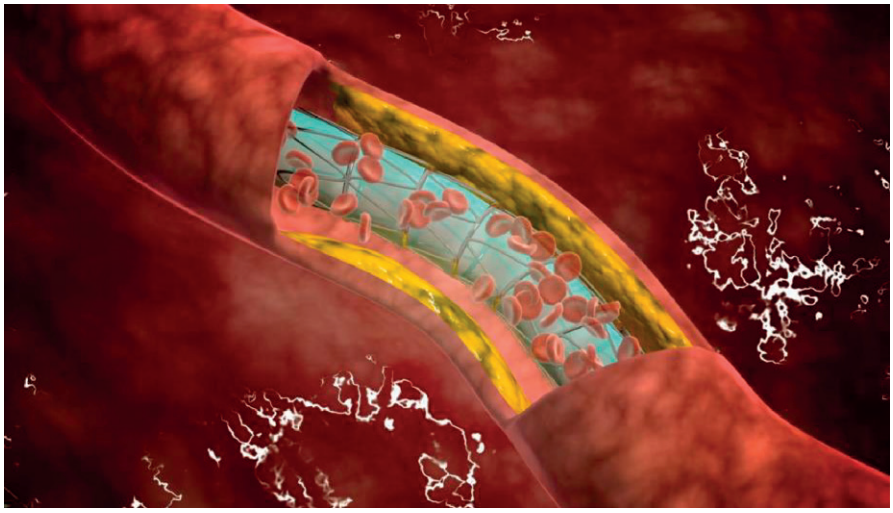
Stenty można podzielić na:

- rozprężane za pomocą balonu (rys. 2),
- rozprężające się samoczynnie (samorozprężne, rys. 3).

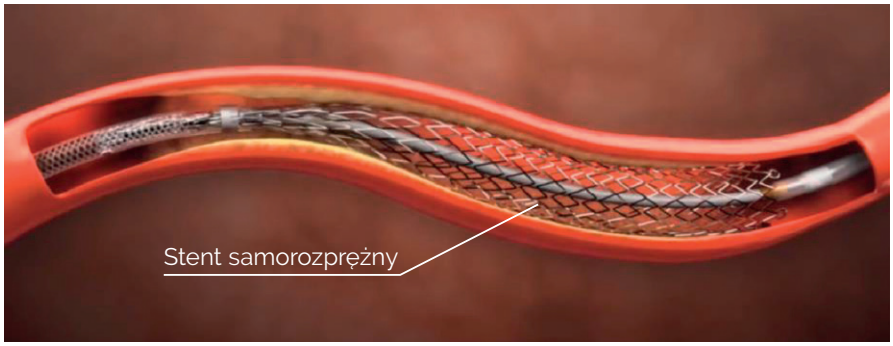
Każdy z tych rodzajów ma inne własności wytrzymałościowe, co należy uwzględnić na wczesnym etapie projektowania. Cechami szczególnie pożądanymi w przypadku stentów są: kompaktowość



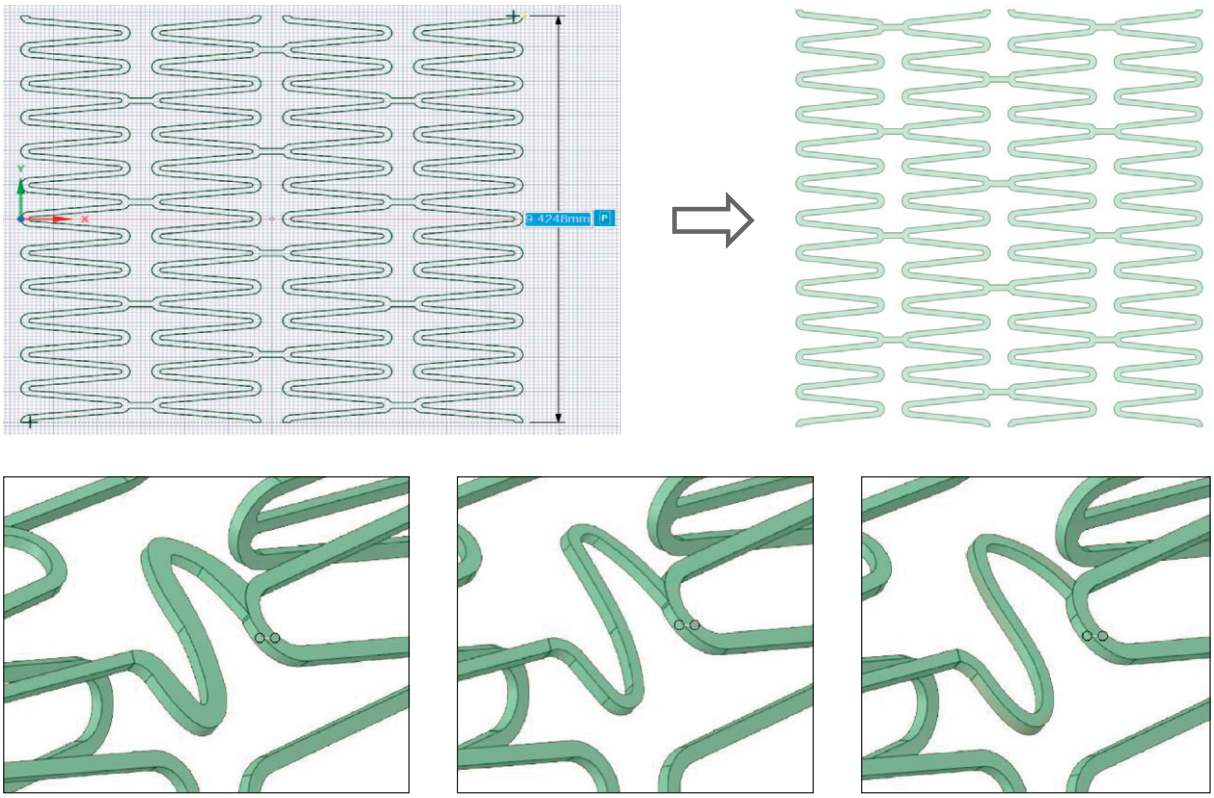
Rys. 1. *Choroba wieńcowa jest przykładem powikłań wynikających z nieprawidłowej pracy układu krwionośnego*



Rys. 2. *Przykład stentu rozprężanego za pomocą balonika*



Rys. 3. *Stent samorozprężny*

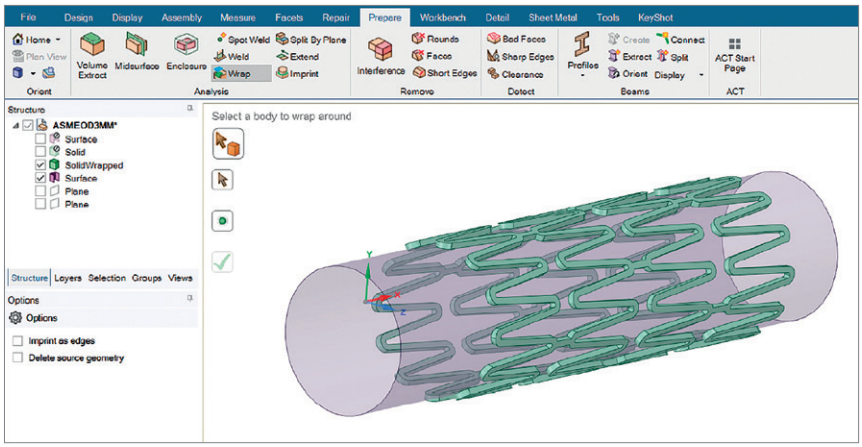


Rys. 4. *Model geometryczny stentu może zostać opracowany w edytorach dostępnych w ANSYS Workbench, np. w aplikacji SpaceClaim Direct Modeler*

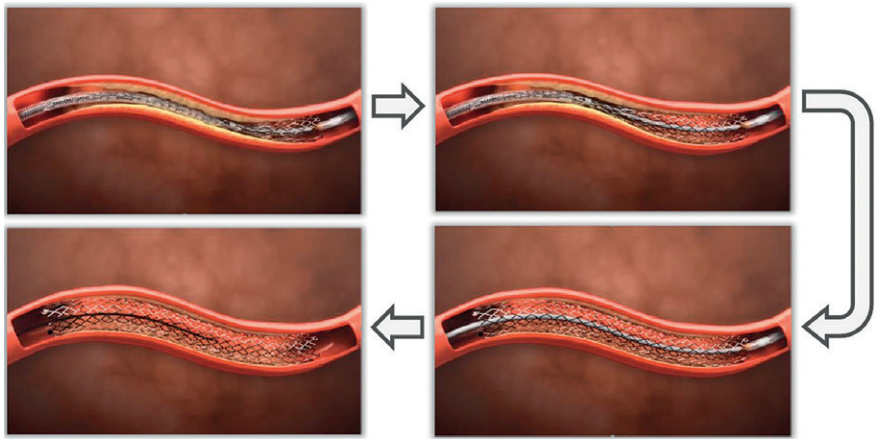
(możliwość zaciśnięcia do wymiarów niewielkiego cewnika), podatność na zmianę kształtu w określonych warunkach, sztywność na kierunku promieniowym (pozwalająca stawić opór odrzutowi przy rozprężeniu), niska podatność na wyboczenie, odpowiednia wykrywalność (widoczność) i biokompatybilność. Stenty powinny także być odporne na zużycie zmęczeniowe powodowane: obciążeniami pulsacyjnymi (naprzemiennymi zmianami ciśnienia wywoływanymi kurczeniem i rozkurczaniem się naczynia), zmianami stanu naprężenia oddziałującego na konstrukcję, naciskami od pracujących mięśni lub występowaniem odkształceń mogących inicjować proces pękania.

Modelowanie stentów na potrzeby badań rozpoczyna się od przygotowania modelu geometrycznego (rys. 4–5), zwykle na podstawie dokumentacji technicznej. Decyzje podjęte na tym etapie (np. zmiany promienia zaokrąglenia, szerokości drutu) rzutują na sztywność i elastyczność modelu. Należy uwzględnić aspekty związane zarówno z procesem produkcji stentu, jak i warunkami jego wykorzystania, np. poprzez dobór średnicy stentu samorozprężnego, która powinna być o około 10% większa niż średnica naczynia krwionośnego.

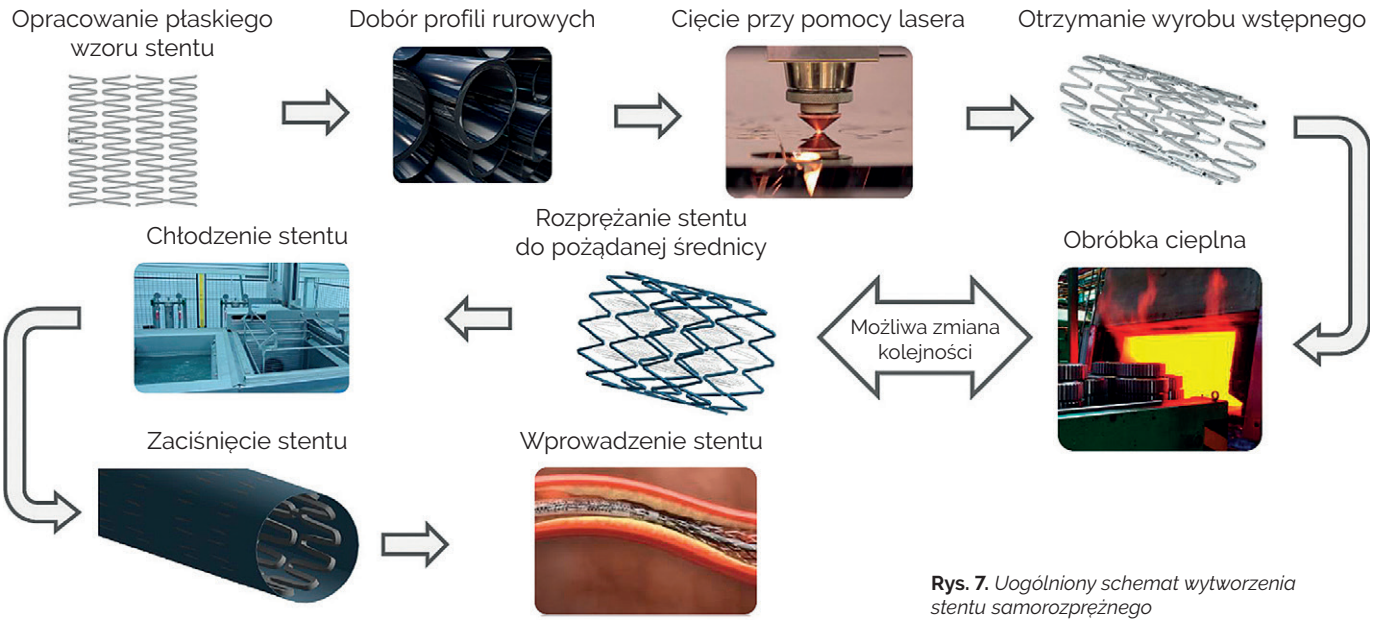
Stent przed rozprężeniem jest zaciśnięty i zazwyczaj otulony osłonką o średnicy mniejszej niż średnica, do jakiej jest rozprężany, co pozwala na jego bezpieczne wprowadzenie do tętnicy. Po wprowadzeniu osłonka jest usuwana, a stent wraca



Rys. 5. *Narzędzie Wrap, dostępne w SCDM, używane do nadania stentowi zamkniętego kształtu*



Rys. 6. *Zasada działania stentów samorozprężnych*

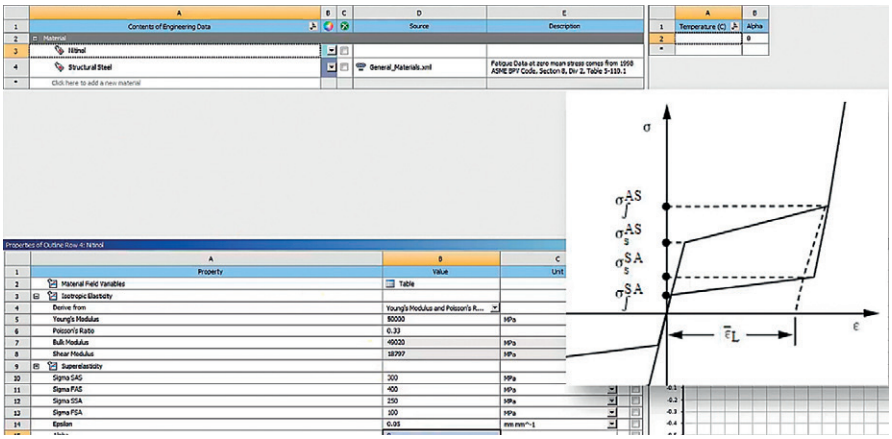


Rys. 7. *Uogólniony schemat wytworzenia stentu samorozprężnego*

do swoich oryginalnych rozmiarów i wywiera nacisk na ściany naczynia krwionośnego (rys. 6). Cały proces od momentu zaprojektowania do etapu wprowadzenia stentu jest złożony – jego uogólniony schemat przedstawiono na rys. 7.

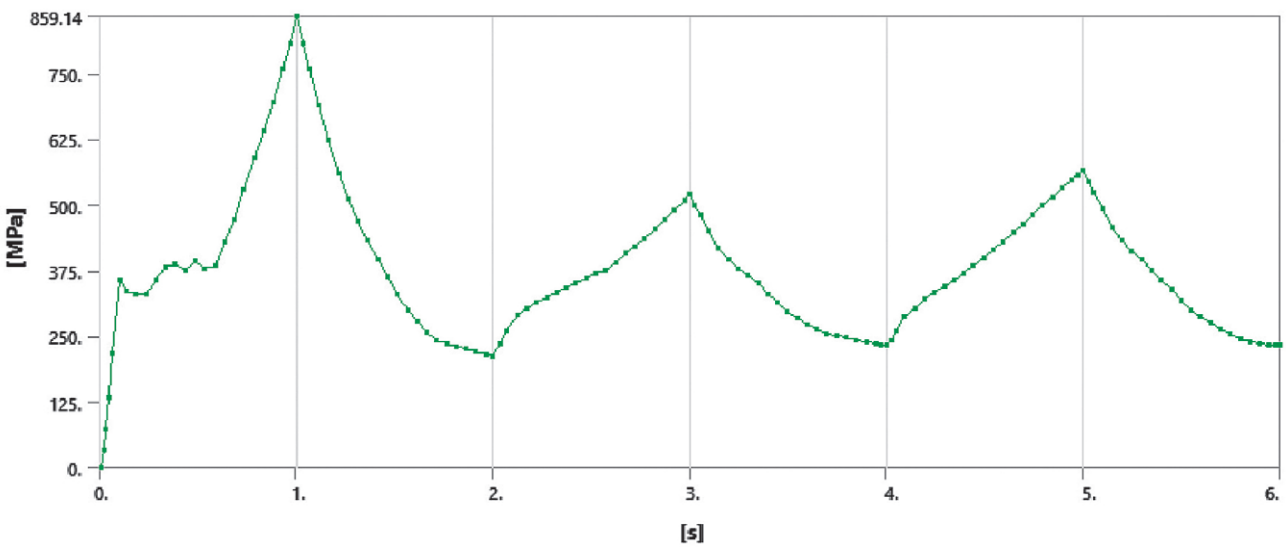
Istotnym zagadnieniem w projektowaniu stentów dożylnych jest dobór materiałów na ich wykonanie, uzależniony od typu stentu. Materiałami do produkcji stentów rozprężanych balonikowo są najczęściej stal nierdzewna, tytan lub stopy chromowo-kobaltowe. Stenty samorozprężne wykonuje się z materiałów superspręży stych i stopów z pamięcią kształtu (*shape memory alloys*), np. niklowo-tytanowych. ANSYS Workbench umożliwia skorzystanie z wymienionych typów materiałów (rys. 8) po wprowadzeniu ich w Engineering Data.

Stenty muszą spełniać wiele wymagań, część z nich jest sprawdzana w procesie symulacji. Analizy numeryczne w ANSYS Workbench dostarczają wyniki trudne do uzyskania za pomocą rzeczywistych pomiarów, np. dotyczące zmian naprężeń (rys. 9) lub odkształceń w cienkich komponentach medycznych. Czyni je to szczególnie użytecznymi. ■



Rys. 8. *Definiowanie materiału z pamięcią kształtu w module Engineering Data*

Artykuł opracowano na podstawie grafik i informacji dostarczonych przez ANSYS Inc.



Rys. 9. *Wykres zmiany maksymalnych naprężeń redukowanych według hipotezy Hubera–Misesa–Hencky'ego, uzyskanych dla stentu*

Analiza obciążeń wiatrowych działających na konstrukcje farm fotowoltaicznych

Piotr Eliasz • Politechnika Śląska • pioteli459@student.polsl.pl

Wzrost popularności korzystania z energii słonecznej w kraju skutkuje pojawianiem się nowych wyzwań dla konstruktorów i montażystów. Intensywne zjawiska pogodowe występujące w Europie Środkowej powodują konieczność walidacji stosowanych rozwiązań – każdy inwestor i użytkownik chciałby mieć przecież sprawdzone i niezawodne instalacje na wiele lat. Tymczasem jest coraz więcej doniesień o awariach, takich jak pożar, uszkodzenie przez grad czy oderwanie i zrzucenie ogniw z dachu przez wiatr.

W symulacji wpływu zjawisk atmosferycznych na konstrukcje pomocne jest oprogramowanie ANSYS, dzięki któremu można:

- wyznaczyć obciążenia wywierane przez wiatr na ogniwa fotowoltaiczne, których nie da się łatwo wyliczyć za pomocą norm, a także przewidzieć następstwa takich obciążeń (ANSYS Fluent + ANSYS Mechanical),
- oszacować prawdopodobieństwo uszkodzenia urządzeń przez gradobicie (ROCKY + ANSYS),
- zamodelować newralgiczne punkty falowników, liczników i całych instalacji.

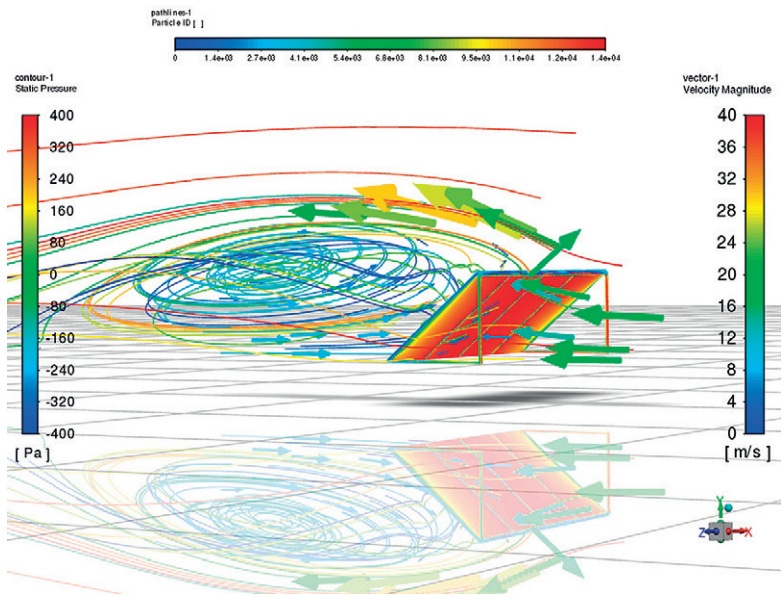
Sprzężenie ANSYS Fluent z ANSYS Mechanical (FSI – *fluid structure interaction*)

O różnorodności rozwiązań montażowych ogniw u użytkowników na pewno można powiedzieć jedno – jest ogromna. Pomimo tego, że każde z rozwiązań proponowanych przez konstruktorów projektowane jest tak, aby było wytrzymałe, to rzeczywistość weryfikuje te wyliczenia. Trudność polega zazwyczaj na niestandardowym kształcie elementów łączących, podpór czy samego sposobu kotwienia paneli. Dodatkowo należy uwzględnić nie tylko stały napór wiatru, ale również jego porywy czy wpływ otaczających konstrukcji. Począwszy od małych instalacji przydomowych po instalacje wielohektarowych farm fotowoltaicznych, z pomocą przychodzi oprogramowanie ANSYS.

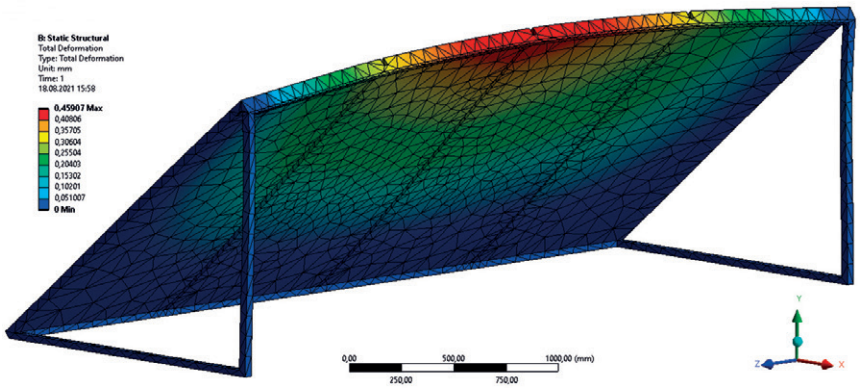
MESco dysponuje wszystkimi narzędziami potrzebnymi do przeprowadzenia tego typu analiz i organizuje szkolenia, na których można poznać tajniki modelowania rozmaitych zjawisk od A do Z. Poza możliwością wyznaczenia sił działających na konstrukcję oprogramowanie umożliwia zbadanie odkształceń na ogniwie oraz wpływu zjawisk chwilowych, takich jak porywy wiatru.

W przypadku niektórych kierunków wiatru panel ułożony na konstrukcji może działać jak żagiel, a czasem wpływ wiatru powinien być niezauważalny – jak np. wiatru wiejącego z boku. Farmy fotowoltaiczne zazwyczaj projektowane są w taki sposób, że ogniwa ułożone są na konstrukcji, potocznie nazywanej stołem, i nachylone pod odpowiednim kątem w stosunku do powierzchni ziemi. Stoły natomiast są skierowane na południe i ustawione w równej odległości od siebie (w naszych szerokościach geograficznych trackery zmieniające ustawienie ogniw w ciągu dnia są rzadko spotykane i zazwyczaj ich zastosowanie jest nieopłacalne).

Dla prostego modelu opływu zewnętrznego przez wiatr pojedynczego stołu z ogniwami (model konstrukcji, na której położono cztery ogniwa pod kątem 40° – jest to kąt zbliżony do optymalnego w polskiej szerokości geograficznej) został wyznaczony wariant najgorszy, czyli taki, w którym konstrukcja będzie obciążona wiatrem bezpośrednio od tyłu. Analizę przeprowadzono dla normowej wartości prędkości wiatru dla 1. strefy obciążenia wiatrem; możliwa jest symulacja o dowolnych wartościach stałych czy konkretnym rozkładzie, np. zależnym od wysokości. Wyniki takiej analizy przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. *Wyniki analiz CFD obciążenia wiatrem. Kontur ciśnień na panelu oraz wektory prędkości wokół panelu*



Rys. 2. *Wyniki analizy mechanicznej obciążenia wiatrem urządzenia – kontur odkształceń całkowitych*

Wektory prędkości płynu ujawniają miejsce o najwyższej prędkości przepływu, blisko górnej krawędzi rozpatrywanego modelu ogniwa fotowoltaicznego. Rozkład ciśnienia wyraźnie wskazuje miejsce, gdzie siły działające na ściankę modelu są największe.

Dzięki unikalnym możliwościom oprogramowania ANSYS bez trudu można przenieść wyniki analizy CFD do analizy mechanicznej. W środowisku ANSYS Workbench taka symulacja jest bardzo prosta i szybka do wdrożenia. Natomiast wyniki, które można otrzymać, dają szerokie pole do wyciągania wniosków w zależności od potrzeb. Odkształcenia poszczególnych elementów czy siła, z jaką należy przymocować konkretną konstrukcję, to tylko część z nich.

Indywidualne rozwiązania dla każdego użytkownika

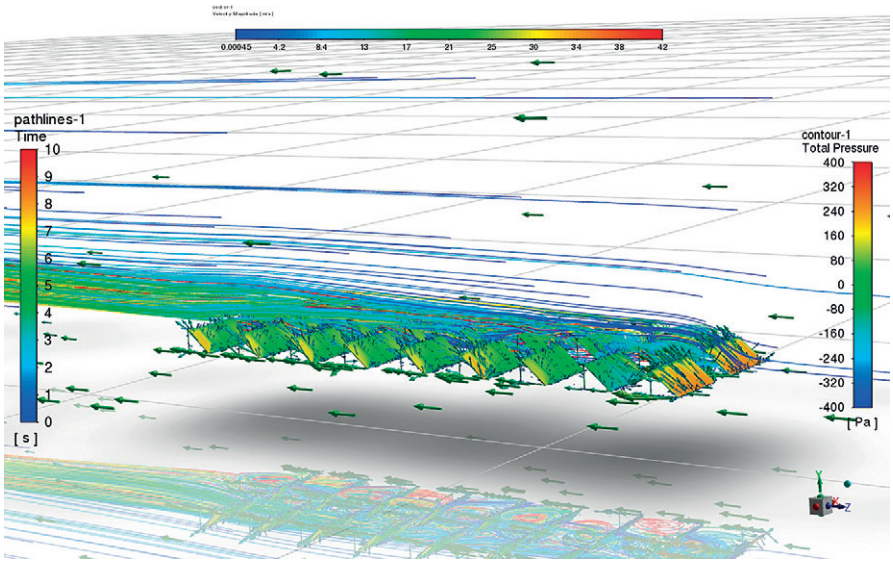
Rozważając temat obciążenia wiatrem takich konstrukcji, należy wziąć pod uwagę to, w jaki sposób są one zwykle sytuowane. Popularne opcje to: budowa farm wiatrowych na ziemi, na fabrykach i budynkach gospodarczych, blokach oraz dachach domów jednorodzinnych – dlatego z pewnością należy zbadać też takie warianty.

Z rys. 3 można odczytać, że największe obciążenie wiatrem przypada na pierwszy rząd paneli, natomiast kolejne są osłonięte od wiatru przez poprzednie rzędy, jednak maksymalne obciążenie jest bardzo zbliżone do tego, które się obserwuje dla pojedynczej konstrukcji.

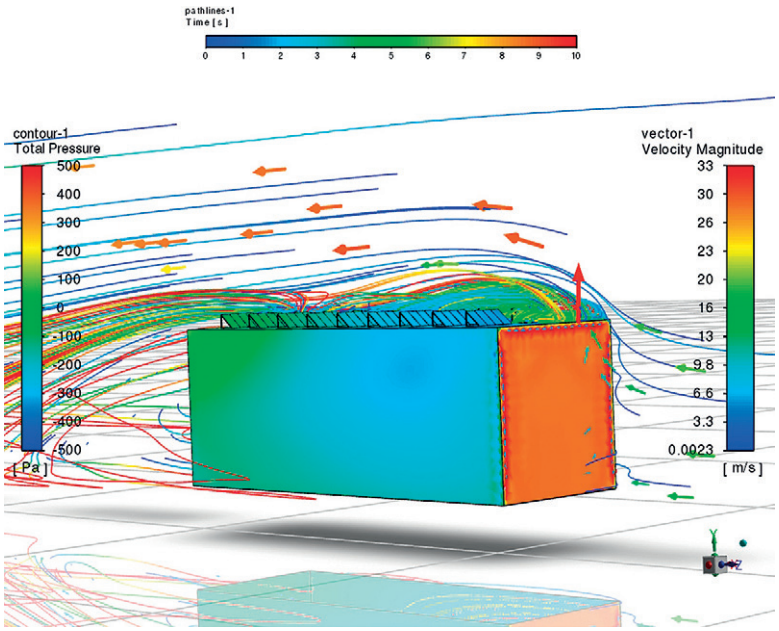
Rezultaty dla modelu farmy fotowoltaicznej usytuowanej na dachu budynku bardzo się różnią od wyników innych modeli (rys. 4). Tym razem ściana budynku przejmuje większość obciążenia wiatrem, kształtując przepływ płynu tak, że konstrukcje ogniw są odciążone w dużej części i delikatnie dociążone w miejscu ustabilizowania strugi.

Każdy rodzaj montażu generuje inne trudności, jednak analizy dla dachów o różnym nachyleniu nie stanowią problemu. Dzięki używanemu oprogramowaniu można również zamodelować otoczenie w postaci innych budynków oraz drzew, a idąc dalej, można modelować zacienienie paneli przez takie obiekty.

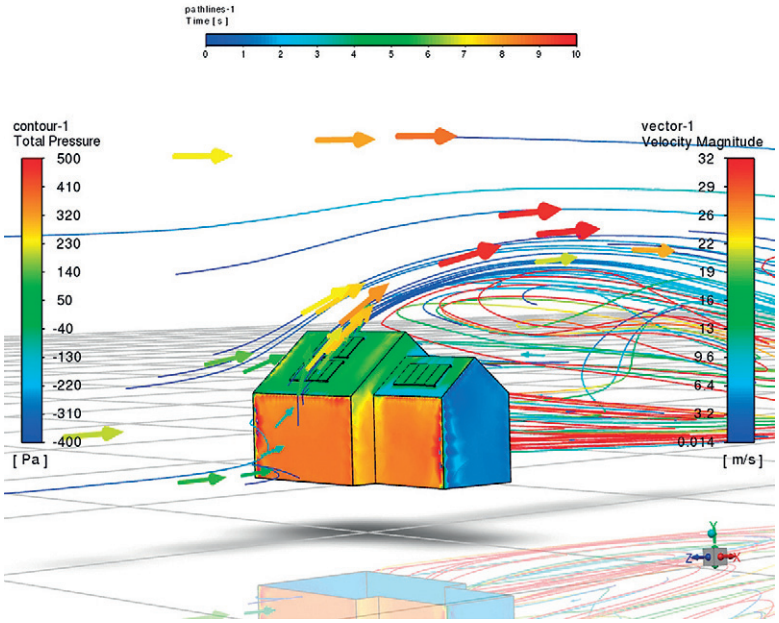
Ważnym elementem każdej symulacji jest znalezienie wszystkich krytycznych warunków, w których wiatr może spowodować niebezpieczny wzrost obciążeń. Oprogramowanie ANSYS ma bardzo szerokie zastosowanie do modeli o różnej skali, a ten typ analiz jest dostępny dla każdego użytkownika. Wystarczy wykorzystać licencję ANSYS Mechanical oraz ANSYS Fluent z CFD w wersji PRO. Takie symulacje mogą być bardzo przydatne i ułatwić proces tworzenia nowych rozwiązań konstrukcyjnych, a co za tym idzie – pewniejszych i trwalszych produktów. ■



Rys. 3. *Analiza sił działających na farmę fotowoltaiczną umieszczoną na powierzchni ziemi*



Rys. 4. *Analiza sił działających na farmę fotowoltaiczną umieszczoną na dachu bloku*



Rys. 5. *Analiza sił działających na ogniwa fotowoltaiczne umieszczone na spadzistym dachu domu jednorodzinnego*

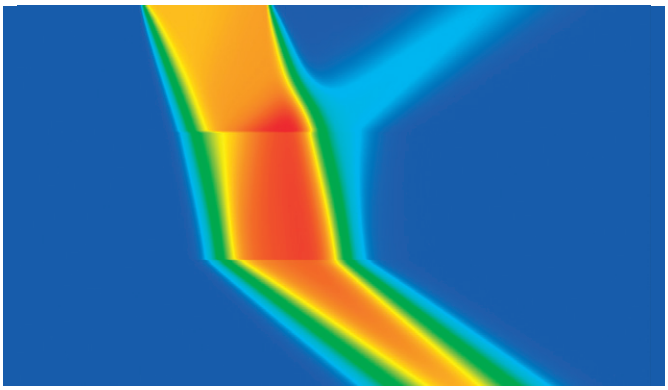
Modelowanie numeryczne rozchodzenia się promieniowania wewnątrz ogniwa fotowoltaicznego

Piotr Eliasz • Politechnika Śląska • pioteli459@student.polsl.pl
Zbigniew Buliński • Politechnika Śląska • zbigniew.bulinski@polsl.pl
Maciej Bara • Politechnika Śląska • macibar533@student.polsl.pl

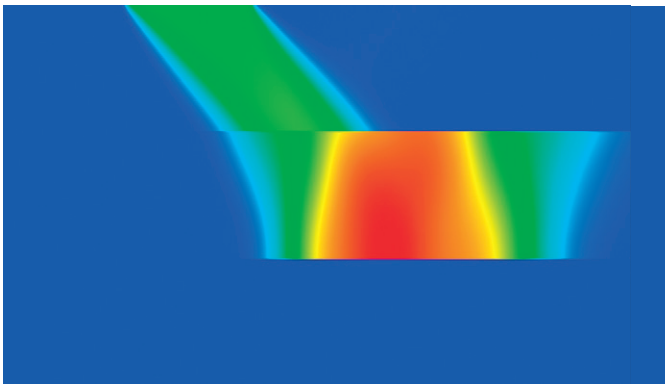
Spadek cen ogniw fotowoltaicznych w ostatnich latach przełożył się na szybki wzrost liczby instalacji fotowoltaicznych. Dzięki temu energetyka słoneczna zdominowała rynek OZE w zakresie małych i średnich mocy. Zwiększenie popytu na ogniwa fotowoltaiczne spowodowało intensyfikację rozwoju tej technologii i dalszy spadek cen. Aktualnie najnowsze konstrukcje paneli fotowoltaicznych osiągają sprawności istotnie wyższe od 20% i dalszy postęp w tej dziedzinie wymaga zastosowania zaawansowanych narzędzi obliczeniowych.

Jak działa panel fotowoltaiczny? Światło pada na ogniwa i oddziałuje z nimi, a co za tym idzie – wymienia energię. Duże znaczenie dla oddziaływania materii i promieniowania mają natężenie oraz długość fali padającego promieniowania – wzrost natężenia powoduje zwiększenie liczby wybijanych elektronów, co przekłada się bezpośrednio na moc oddawaną przez ogniwo. Istotny wpływ na sprawność ogniwa mają straty optyczne, definiowane jako światło, które mogło utworzyć parę elektron–dziura, ale tego nie zrobiło, gdyż zostało odbite od powierzchni panelu lub nie zostało zaabsorbowane przez ogniwo. W przypadku najpowszechniejszych ogniw krzemowych całe widmo światła widzialnego ma wystarczającą energię do utworzenia pary elektron–dziura, dlatego, aby opracować wysoko wydajne panele fotowoltaiczne, trzeba ograniczyć straty optyczne. W praktyce odbicie (strata) jest redukowane głównie przez teksturowanie i nakładanie powłok antyrefleksyjnych (ARC).

Model matematyczny rozchodzenia się promieniowania wewnątrz ogniwa fotowoltaicznego zbudowano w oprogramowaniu ANSYS Fluent. Spośród modeli promieniowania dostępnych w tym oprogramowaniu wstępnie wybrano Discrete Ordinate (DO) i Monte Carlo (MC). Aby jednoznacznie ocenić przydatność każdego



Rys. 1. *Wyniki analizy dla metody DO dla światła padającego na szkło pod kątem 20° w stosunku do normalnej do powierzchni szkła*



Rys. 3. *Wyniki analizy dla metody DO dla światła padającego na szkło pod kątem 40° w stosunku do normalnej do powierzchni szkła*

Rys. 2. *Wyniki analizy dla metody MC dla światła padającego na szkło pod kątem 20° w stosunku do normalnej do powierzchni szkła*

Rys. 4. *Wyniki analizy dla metody MC dla światła padającego na szkło pod kątem 40° w stosunku do normalnej do powierzchni szkła*

z modeli do analizy rozprzestrzeniania się promieniowania w ogniwie, sprawdzono, jak dokładnie są one w stanie przewidzieć kąt załamania światła na granicy faz. Geometrie obszarów obliczeniowych na potrzeby przeprowadzenia testów modeli DO i MC przygotowano tak, aby łatwo było zaobserwować kąt załamania (rys. 5).

Metody modelowania promieniowania (MC i DO) zbadano przy identycznych ustawieniach obliczeń. Założono współczynnik załamania światła wynoszący 1 – dla górnej oraz dolnej warstwy (co odpowiada próżni lub powietrzu), natomiast dla warstwy środkowej przyjęto wartość współczynnika 1,5 (co odpowiada szkłu). Model ma w założeniu obrazować efekt załamania światła oraz wewnętrznego odbicia przy przejściu pomiędzy ośrodkami o różnych prędkościach rozchodzenia się fali świetlnej.

W pierwszej analizie (rys. 1 oraz rys. 2) założono, że światło pada na szkło pod kątem 20° w stosunku do normalnej do powierzchni szkła. W kolejnych przypadkach kąt ten wynosił 30° oraz 40° względem normalnej do powierzchni szkła (rys. 3 i 4).

Analizy pokazały, że model DO nie jest w stanie odwzorować załamania promieni słonecznych zgodnie z prawem Snella (rys. 1 i 3). Ponadto można zaobserwować występowanie całkowitego wewnętrznego odbicia w zakresie kątów, dla których nie powinno mieć ono miejsca. Analizy przeprowadzone metodą Monte Carlo cechują się bardzo dobrą zgodnością z prawem Snella (rys. 2 i 4). Podsumowując: do obliczeń promieniowania rozchodzącego się w strukturze rzeczywistego panelu fotowoltaicznego zastosowano metodę MC.

W celu pełnego wykorzystania możliwości oprogramowania ANSYS przy tego typu zagadnieniu wzięto pod uwagę dwa podejścia:

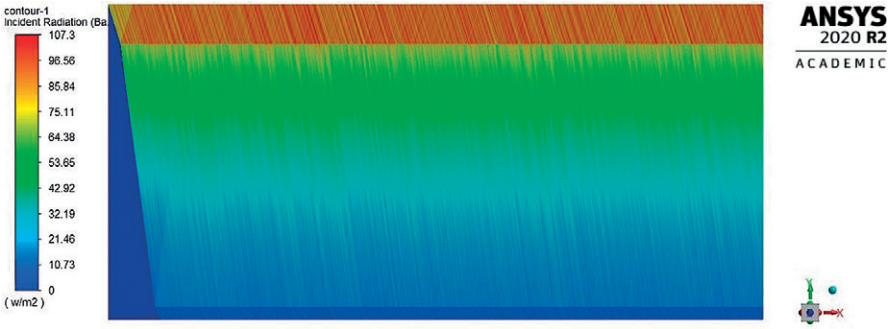
- model mikroskopowy wycinka ogniwa wykonanego z krzemu monokrystalicznego,
- model makroskopowy pojedynczego ogniwa panelu fotowoltaicznego.

Aby w sposób wiarygodny symulować pracę ogniwa fotowoltaicznego, należy wziąć pod uwagę różne zjawiska, które w nim zachodzą – od oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego z materią przez przepływ prądu po efekty cieplne: przewodzenie i konwekcję ciepła. W opracowanym modelu skupiono się jedynie na aspektach związanych z rozchodzeniem się promieniowania oraz jego oddziaływaniem z materią wewnątrz ogniwa fotowoltaicznego. Środowisko ANSYS Fluent pozwala na implementację w modelu m.in.:

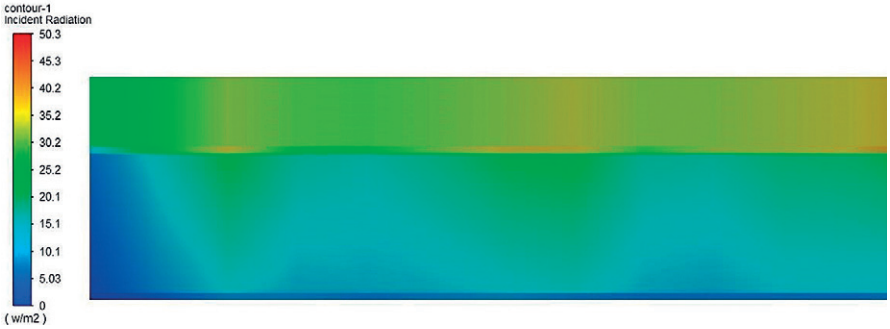
- wybranego kąta padania promieni słonecznych,
- konkretnych funkcji promieniowania przekładających się na ilość energii docierającej ze słońca w dowolnym miejscu na świecie w wybranej długości fali (rys. 6 i 7),
- funkcji zmiennej absorpcyjności promieniowania w różnych zakresach długości fal dla każdego materiału.

Zaprezentowany model odwzorowuje wycinek struktury ogniwa fotowoltaicznego. Dzięki zastosowaniu oprogramowania ANSYS Fluent można zaobserwować załamanie fal promieniowania wewnątrz ogniwa, a także ilość promieniowania absorbowanego w każdej z warstw. Koncepcja wykorzystania narzędzi symulacyjnych może znaleźć zastosowanie w badaniach innych ogniw wykonanych z dowolnych materiałów oraz w różnej technologii, możliwe jest również jej rozszerzenie o analizę przepływu ciepła na potrzeby modeli (chociażby na potrzeby technologii PV-T czy kolektorów). Podejście do modelowania ogniwa fotowoltaicznego zaprezentowane w niniejszej pracy nie było wcześniej przedstawione w żadnej publikacji, która mogłaby posłużyć jako rozwiązanie odniesienia, stąd też konieczna była weryfikacja modelu, który jest w stanie w rzeczywistości odwzorować prawo Snella. ■

Rys. 5. *Siatka numeryczna na krawędzi pojedynczego ogniwa fotowoltaicznego opracowanego z użyciem oprogramowania ANSYS*



Rys. 6. *Promieniowanie w zakresie fal zielonych wewnątrz modelu wycinka ogniwa dla wybranego kąta padania*



Rys. 7. *Promieniowanie w zakresie fal żółtych wewnątrz modelu pojedynczego ogniwa*

LITERATURA

[1] "Optical properties of silicon", https://www.pveducation.org/pvcdrom/materials/optical-properties-of-silicon.

[2] Sujala Bhattarai, Jae-Heun Oh, Seung-Hee Euh, Gopi Krishna Kafle, Dae Hyun Kim. "Simulation and model validation of sheet and tube type photovoltaic thermal solar system and conventional solar collecting system in transient states". *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 103 (2012): 184–193, https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.04.017.

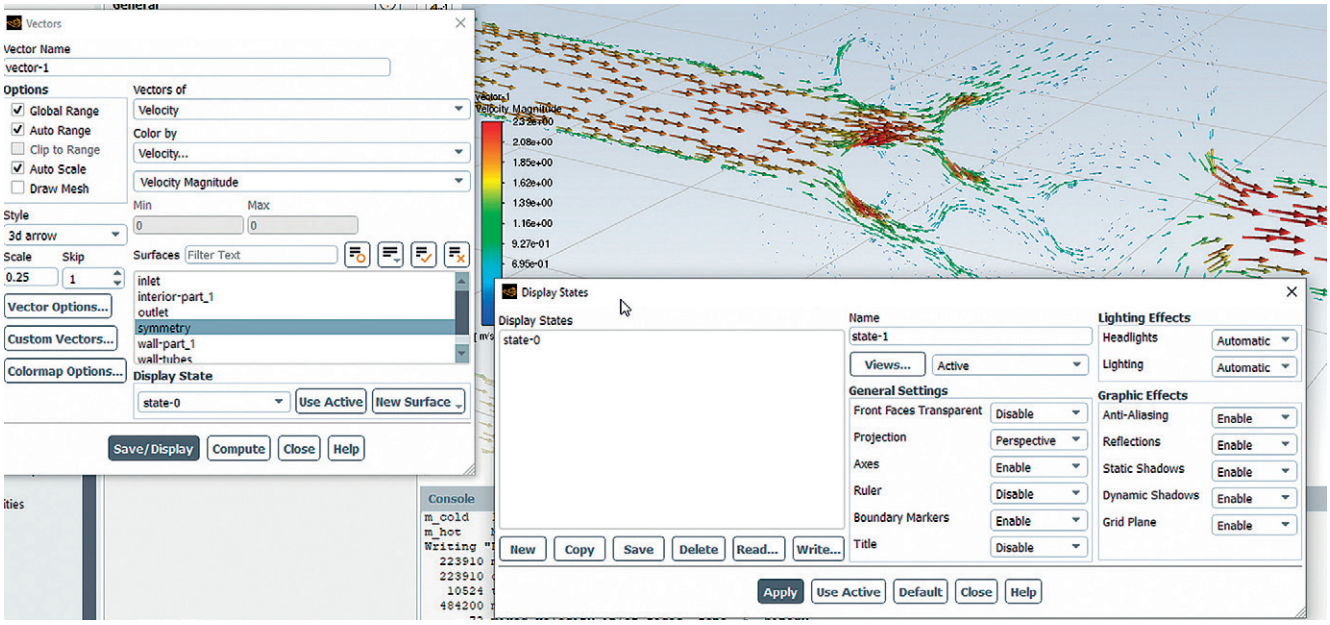
[3] Seyed Reza Maadi, Meysam Khatibi, Ehsan Ebrahimnia-Bajestan, David Wood. "Coupled thermal-optical numerical modeling of PV/T module – Combining CFD approach and two-band radiation DO model". *Energy Conversion and Management*. 198 (2019): 111781, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111781.

[4] Abdolzadeh Morteza, Zarei Tahereh. "Optical and Thermal Modeling of a Photovoltaic Module and Experimental Evaluation of the Modeling Performance". *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 36 (October 2016), https://doi.org/10.1002/ep.12493.

Fluent Post – uleczona pięta Achillesa

Maciej Kryś • MESco • mkrys@mesco.com.pl

Odkąd pamiętam, na kursach wprowadzających do analiz przepływowych powtarzam: *Post processing we Fluencie jest w porządku, ale tutaj mamy CFD-Posta…* I rzeczywiście, moduł do obróbki wyników we Fluencie miał chyba tylko jedną przewagę nad narzędziem CFX-a – pracował na wielu rdzeniach. Od kilku wersji można jednak zaobserwować bardzo intensywne prace nad usprawnieniem tej – jednej z niewielu – słabych stron Fluenta.



Rys. 1. *Ustawienia stanu dla wyświetlanego obiektu*

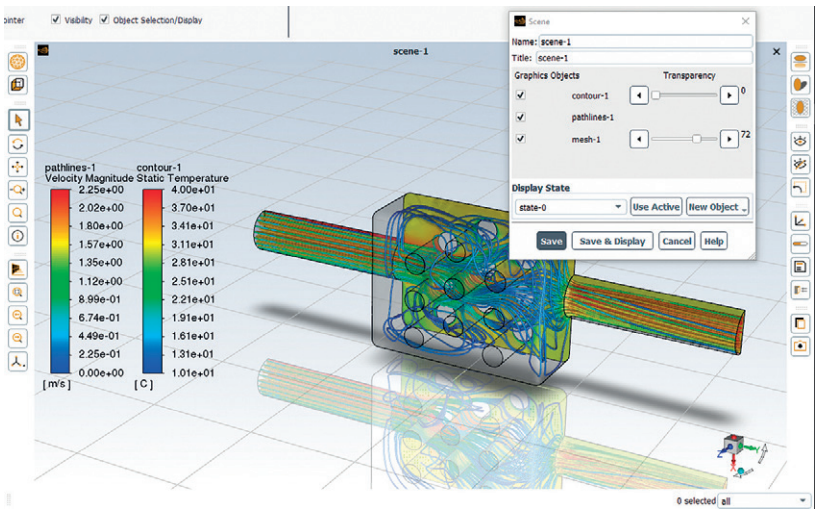
Stan umysłu

Jedną z rzeczy, która była trudna do przeskoczenia niczym parawany na bałtyckich plażach, był fakt, że obiekty post processingu (czyli kontury, wektory itd.) wyświetlały się z kamery aktywnej. Jeśli użytkownik chciał uzyskać konkretną perspektywę na obiekt, musiał ręcznie po wyświetleniu wywołać okno z zapisanymi widokami i aktywować odpowiednią pozycję. Nie mówiąc już o dodatkowych parametrach, takich jak oświetlenie czy widoczność dolnego paska z opisem, które były globalne dla wszystkich obiektów. Niby nic, ale gdy trzeba porównać 10 przypadków, każdy po pięć obrazków, to problem zaczyna wywoływać u inżyniera stany lękowe.

Obecnie w oknach do tworzenia obiektów można wybrać zapisany stan (*state*), który zawiera wszystkie ustawienia dotyczące widoku, oświetlenia czy jakości wyświetlanej grafiki (rys. 1).

Dantejskie sceny

Skoro mowa o obiektach graficznych, warto wspomnieć o scenach (*scenes*) (rys. 2). To narzędzie ma dwie zasadnicze funkcje. Po pierwsze pozwala łączyć obiekty graficzne na jednym zrzucie. Po drugie w przypadku niektórych obiektów (np. widoku siatki) umożliwia ustawienie półprzeźroczystości. Jeśli więc ktoś ma artystyczny dryg i akronim CFD rozwija jako Colorfull Fluid Dynamics, wówczas to narzędzie pozwoli mu się spełnić.

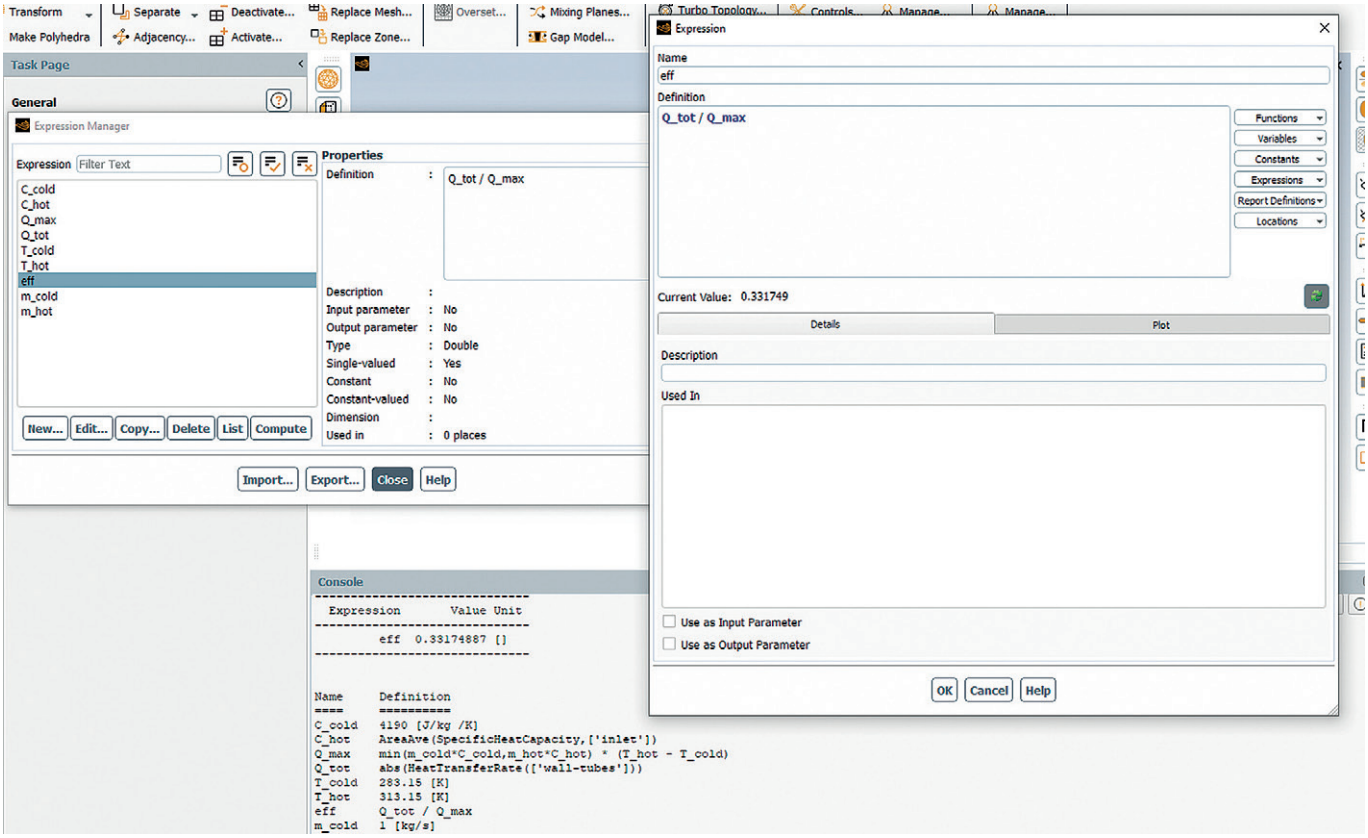


Rys. 2. *Przykład zastosowania scen*

Wyrażenia

O wyrażeniach (*expressions*) pisałem już w 10. numerze *MESsengera*, jednak chciałbym na chwilę do nich wrócić. Od tamtego czasu bowiem sporo się zmieniło, również w kontekście post processingu (rys. 3).

Obecnie możliwe jest chociażby stworzenie raportu (w Report Definitions) na podstawie wyrażenia. Pozwala to monitorować niestandardowe wielkości fizyczne



Rys. 3. *Przykład użycia wyrażeń do wyliczania efektywności wymiennika ciepła*

podczas obliczeń (np. sprawność urządzenia czy znormalizowane wielkości fizyczne). Poza tym wyrażenia zostały wzbogacone o działania wektorowe i wyświetlanie ich wartości w formie konturów. Ostatecznie wyrażenia mogą również zostać dołączone do raportu końcowego w formie prostej tabeli.

Automatyczne raporty

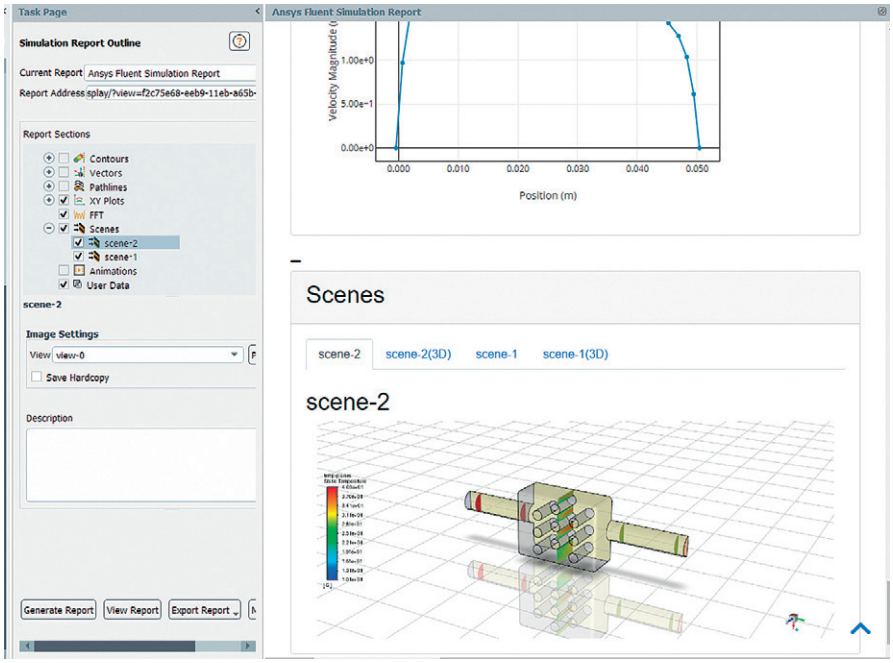
Raportu końcowego? Otóż nie, Drogi Czytelniku, nie przewidziałeś się. W tym roku Święty Mikołaj oraz zwrot podatku przybyły wcześniej. Od wersji 2021R1 we Fluencie dostępne są automatyczne raporty, podobne do tych, które można utworzyć w CFD-Post.

Raport zrobiony we Fluencie będzie zawierać nie tylko obiekty graficzne, jak wykresy, kontury czy linie prądu, ale także: szczegółowy opis użytych modeli, warunków brzegowych i materiałów, a nawet informacje o jakości elementów siatki czy listę użytych wyrażeń (rys. 4). Zawartość można oczywiście dostosować, a cały raport opublikować jako dokument HTML lub PDF. W moim przypadku brak tej funkcjonalności przesądzał o tym, że na co dzień korzystałem z CFD-Posta, a nie Fluenta.

Podsumowanie – Fluent czy CFD-Post?

Czy zatem Fluent Post stał się lepszy niż CFD-Post? Odpowiedź nie jest jednoznaczna. W większości obszarów te pogramy mogą obecnie ze sobą konkurować. W innych zaś każdy z nich ma swoje mocne strony. Fluent na pewno o wiele lepiej sobie radzi z dużymi case'ami, z kolei CFD-Post uratuje nas, gdy przy analizie *transient* nie ustawimy animacji przed uruchomieniem obliczeń. Natomiast aby robić post processing we Fluencie, nie trzeba uruchamiać żadnej dodatkowej aplikacji i wczytywać plików. Od razu po zakończeniu obliczeń można rozpocząć pracę.

Zachęcam, aby przetestować nową odsłonę post processingu we Fluencie. Dla mnie jest ona dużym pozytywnym zaskoczeniem, a wydaje się, że ANSYS jeszcze nie powiedział w tej sprawie ostatniego słowa. ■



Rys. 4. *Podgląd raportów*

Budowa rzeczywistego modelu numerycznego wnikania jonów chlorków do wnętrza betonu

Piotr Eliasz • Politechnika Śląska • pioteli459@student.polsl.pl
Zbigniew Buliński • Politechnika Śląska • zbigniew.bulinski@polsl.pl
Maciej Bara • Politechnika Śląska • macibar533@student.polsl.pl

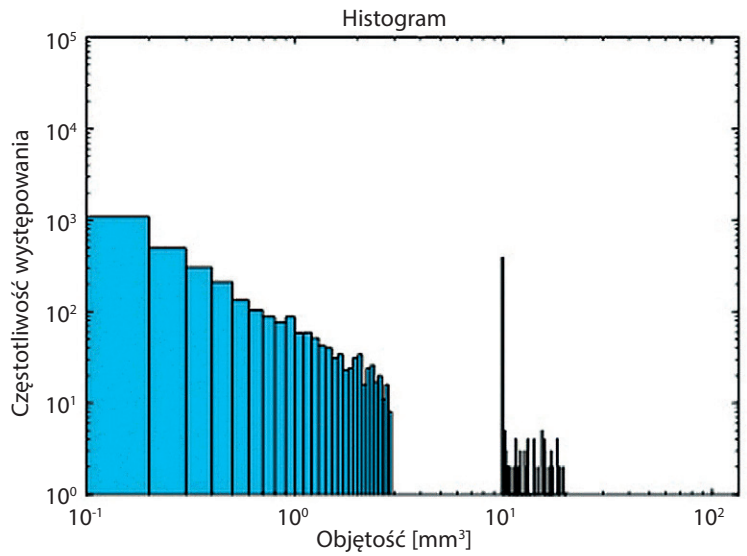
Beton należy do najczęściej używanych materiałów inżynierskich. Stosuje się go zarówno do budowy niewielkich domów jednorodzinnych, jak i wznoszenia konstrukcji o imponujących rozmiarach (główną część konstrukcji nośnej najwyższego budynku świata – Burdż Chalifa, który pnie się na 828 m – stanowi żelbetonowy szkielet). Kwestia bezpieczeństwa oraz przewidywania trwałości konstrukcji żelbetonowych jest więc niezwykle istotna.

Beton jest układem dwóch lub trzech faz, na które składają się stalowe zbrojenie, beton oraz pory wypełnione cieczą porową lub gazem. Co więcej, w cyklu życia konstrukcji jej właściwości zmieniają się wskutek postępujących reakcji fizykochemicznych. Prognozowanie trwałości konstrukcji żelbetonowych z wykorzystaniem zaawansowanych metod obliczeniowych jest niezwykle złożonym problemem inżynierskim, ponieważ wiarygodny model obliczeniowy powinien obejmować wiele zjawisk fizycznych (przepływ płynu, dyfuzję składników betonu, odkształcenia wskutek przyłożenia sił zewnętrznych czy zmiany objętości komponentów betonu).

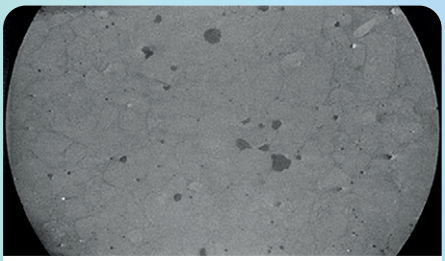
Jednym z głównych czynników odpowiedzialnych za korozję żelbetonu jest migracja jonów chlorkowych, których źródłem mogą być środki do odladzania jezdni lub woda morska. W artykule zostanie przedstawiony model numeryczny transportu jonów chlorkowych w betonie uwzględniający heterogeniczny charakter tego ośrodka. W opracowanym modelu wykorzystano trójwymiarowe odwzorowanie porowatej mikrostruktury betonu oparte na obrazie uzyskanym z użyciem tomografii komputerowej. Dotychczas w modelowaniu dyfuzji jonów chlorkowych do betonu stosowano głównie jednorodny – zhomogenizowany – model betonu. Prezentowany model obejmuje transport chlorków w utwardzonej części betonu i ich adwekcję w dużych porach, które mogą być połączone ze sobą i wypełnione powietrzem lub wodą.

Badania z użyciem tomografii komputerowej są coraz popularniejszym narzędziem w praktyce inżynierskiej, stosowanym głównie do wykrywania niedoskonałości materiału: pustek powietrznych, pęknięć, niepożądanych wtrąceń itd. W prezentowanej pracy narzędzie to wykorzystano do opracowania rzeczywistej geometrii betonu, uwzględniającej jego mikrostrukturę.

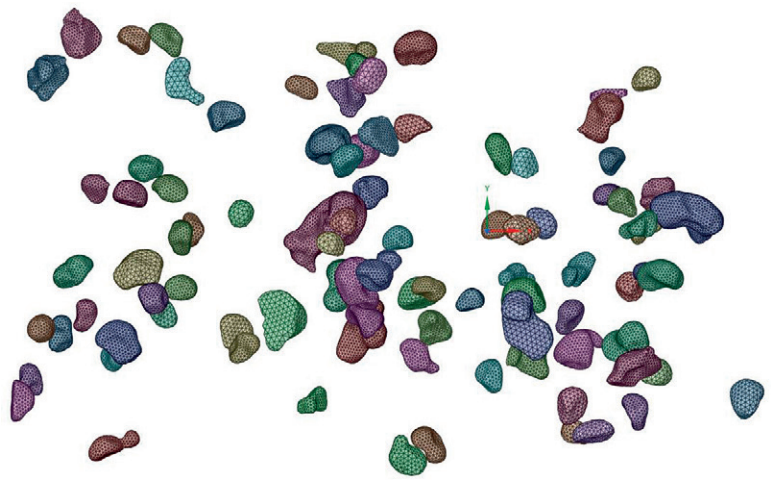
Na rys. 1 pokazano rozkład objętości porów tworzących próbkę analizowanego betonu, otrzymany na podstawie wyników badań tomograficznych. Jak widać, skala wielkości porów w betonie obejmuje prawie trzy rzędy. Nie jest więc możliwe uwzględnienie wszystkich porów w modelu geometrycznym, ponieważ wiązałoby się to z ogromnym kosztem obliczeniowym. Z tych powodów opracowany model obejmował tylko pory o średnicy większej niż 0,5 mm.



Rys. 1. *Histogram objętości mikrostruktur w próbce betonu C4-23*



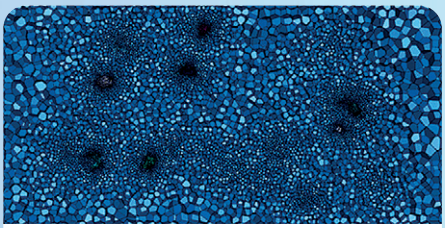
Rys. 2. *Obraz przekroju betonu C4-23 otrzymany z wykorzystaniem tomografii komputerowej*



Rys. 3. *Trójwymiarowy obraz porów analizowanego betonu*

Na rys. 3 przedstawiono geometrię porów, odtworzoną na podstawie skanu próbki betonowej, która została zaimportowana do oprogramowania ANSYS SpaceClaim w postaci modelu powierzchniowego. W dalszej kolejności opracowano model objętościowy porów oraz model objętościowy badanej próbki betonu.

Siatka numeryczna powstała z użyciem narzędzia ANSYS FluentMeshing. Zbudowano ją z elementów wielościennych i zagęszczono wokół powierzchni porów, aby lepiej odwzorować zjawiska zachodzące na granicy pomiędzy strukturą ciała stałego a cieczą porową w betonie oraz konwekcję wewnątrz porów. Na rys. 4 pokazano przekrój siatki numerycznej badanej próbki.



Rys. 4. *Przekrój siatki numerycznej modelu betonu C4-23*

Obliczenia numeryczne transportu jonów chlorkowych w badanej próbce przeprowadzono w oprogramowaniu ANSYS Fluent. W modelu założono, że transport jonów chlorkowych w zhomogenizowanym obszarze obejmującym pory o wielkości poniżej 0,5 mm jest zdominowany przez dyfuzję, natomiast w dużych porach transport chlorków jest wynikiem zjawisk konwekcyjnych i dyfuzyjnych. Wraz ze wzrostem stężenia jonów chlorkowych we wnętrzu betonu rośnie również gęstość wody znajdującej się w porach. Aby to uwzględnić, w modelu matematycznym zaimplementowano funkcję opisującą zmienność gęstości wody w funkcji stężenia jonów chlorkowych.

Prędkość cieczy porowej w pojedynczej pustce przestrzennej przedstawiono na rys. 5. Potwierdza to dominację ruchu konwekcyjnego jonów chlorkowych wewnątrz porów (ciecz porowa o mniejszej gęstości unosi się ku górze, natomiast cięższa, o większej zawartości chlorków, opada w dół) oraz ich penetrację w głąb. Struktura porowata oraz obecność pustek przestrzennych powodują przyspieszanie wnikania chlorków w strukturę betonu.

Na rys. 6 zaprezentowano rozkład jonów chlorkowych w przekroju modelu po 180 dniach od początku procesu wnikania. Wizualizuje on głębokość penetracji na podstawie wartości stężenia w danym obszarze próbki oraz wpływu obecności porów tworzących jej mikrostrukturę.

Artykuł prezentuje metodologię opracowania wieloskalowego modelu transportu jonów chlorkowych w betonie za pomocą oprogramowania ANSYS. Model zbudowano z wykorzystaniem rzeczywistej geometrii struktury wewnętrznej betonu otrzymanej na podstawie tomografii komputerowej próbki betonowej. Naprawę modelu powierzchniowego oraz opracowanie modelu objętościowego na bazie modelu powierzchniowego na potrzeby obliczeń numerycznych przeprowadzono z wykorzystaniem narzędzi ANSYS SpaceClaim, natomiast siatka numeryczna, model matematyczny oraz obliczenia powstały w oprogramowaniu ANSYS Fluent.

Stworzony model w zadowalający sposób odwzorowuje zjawisko transportu jonów chlorkowych w mikrostrukturze betonu. Ponadto może on być rozbudowywany o inne zjawiska zachodzące w betonie i mające istotne znaczenie dla jego trwałości i bezpieczeństwa konstrukcji żelbetonowych, takie jak pękanie struktury betonu czy wpływ temperatury i wilgotności otoczenia oraz obecności innych czynników agresywnych, np. dwutlenku węgla. ■

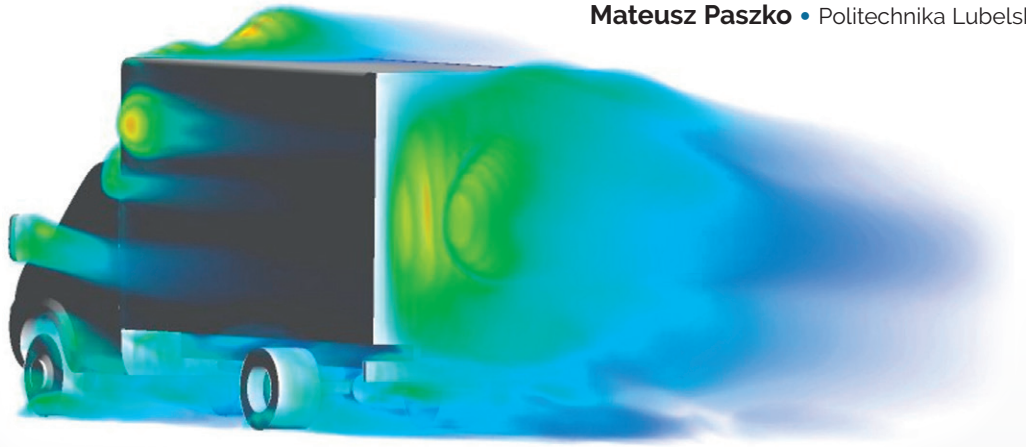
Badania współfinansowane przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego w ramach projektu „Politechnika Śląska jako Centrum Nowoczesnego Kształcenia opartego o badania i innowacje" nr POWR-03.05.00–00-Z098/17/00.

Rys. 5. *Model kierunku oraz wartości wektorów prędkości w jednym z porów podczas analizy*

Rys. 6. *Przekrój przedstawiający stężenie jonów chlorkowych w próbce betonowej oraz głębokość ich penetracji*

AERODYNAMIKA samochodów ciężarowych – symulacja a rzeczywistość

Mateusz Paszko • Politechnika Lubelska • m.paszko@pollub.pl



Rys. 1. *Wizualizacja rozkładu turbulencji w trakcie opływu samochodu dostawczego*

W związku ze stale obserwowanym wzrostem średniej temperatury na powierzchni Ziemi i ryzykiem doprowadzenia do nieodwracalnych zmian klimatu, ograniczenie emisji CO_2 wynikającej z działalności człowieka jest jednym z kluczowych kierunków obecnej polityki klimatycznej. Ogólnie rozumiany transport jest odpowiedzialny za 21,7% całkowitej emisji CO_2 w Unii Europejskiej. Ponad 98% samochodów ciężarowych w UE jest napędzanych silnikami spalinowymi zasilanymi olejem napędowym i pomimo ciągłej poprawy efektywności zużycia paliwa poziom emisji CO_2 z roku na rok rośnie. Coraz surowsze normy dotyczące ograniczenia emisji spalin stanowią nieustanne wyzwanie dla konstruktorów, zwłaszcza w sektorze pojazdów dostawczych, ciężarowych i autobusów. Zgodnie z danymi ACEA (European Automobile Manufacturers' Association) poza usprawnianiem napędów jednym z głównych kierunków rozwoju tego sektora, prowadzącym do zmniejszenia zapotrzebowania pojazdu na energię napędową, a tym samym ograniczenia emisji CO_2, jest rozwój aerodynamiki.

Opór aerodynamiczny – problem o znaczeniu globalnym

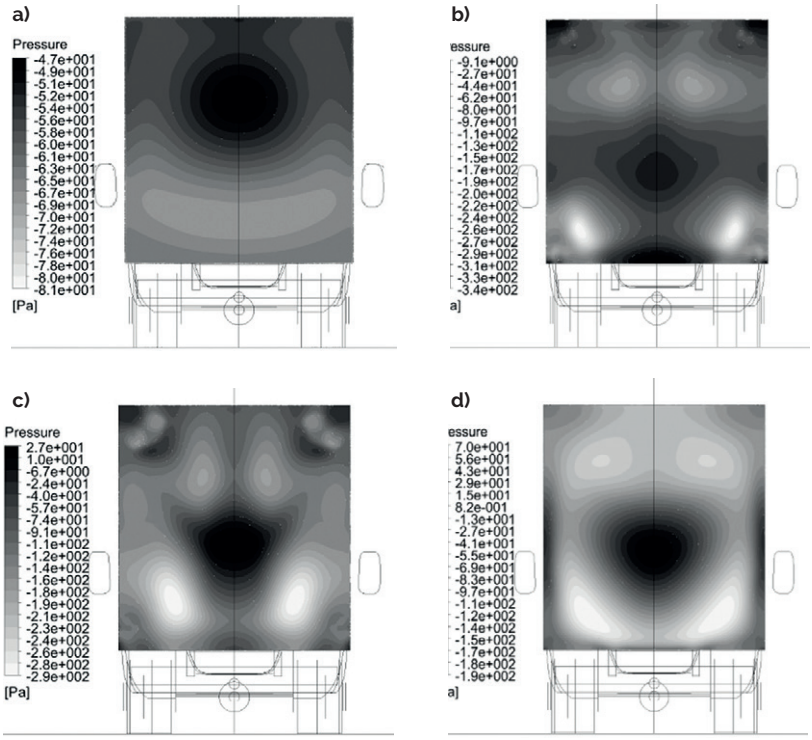
Podczas ruchu pojazdu prędkość powietrza w poszczególnych strefach nadwozia nieustannie się zmienia. Powietrze nie zawsze podąża za kształtem ciała, co powoduje powstawanie niestabilnych obszarów oraz zjawiska oderwania przepływu. Takie obszary są szczególnie widoczne w śladzie aerodynamicznym za poruszającym się pojazdami o tzw. wertykalnym lub pełnym zakończeniu tylnej części nadwozia. Są to przede wszystkim samochody dostawcze i ciężarowe z zabudową skrzyniową oraz autobusy miejskie i dalekobieżne.

Strefa obniżonego względem otoczenia ciśnienia jest wynikiem zjawiska trójwymiarowego oderwania przepływu i w połączeniu ze stosunkowo dużą powierzchnią tylną pojazdu prowadzi do powstania jednego z głównych składników jego całkowitego oporu aerodynamicznego. Opór indukowany, wynikający z pojawienia się strefy obniżonego ciśnienia za pojazdem przy prędkości

Rys. 2. *Model 3D badanego pojazdu uproszczony do symulacji CFD*

Tabela. *Średnie ciśnienie na tylnej powierzchni zabudowy i wynikająca z niego składowa siły oporu*

Wariant modelowania	Sposób modelowania turbulencji i warstwy przyściennej	Średnie ciśnienie statyczne [Pa]	Składowa siły oporu *Fz* [N]
SIM1	*k-ε*, standard wall function, *y*+ > 30 na wszystkich powierzchniach	–61	–281
SIM2	*k-ε*, non-equilibrium wall function, *y*+ > 30 na wszystkich powierzchniach	–142	–657
SIM3	*k-ε*, scalable wall function, *y*+ > 30 na wszystkich powierzchniach	–130	–600,5
SIM4	SST *k-ω*, *y*+ ≈ 1 na tylnej powierzchni nadwozia, *y*+ ≈ 30 na powierzchniach pozostałych	–89	–412,5



Rys. 3. *Rozkład ciśnienia statycznego na tylnej części nadwozia dla wariantów: a) SIM1, b) SIM2, c) SIM3 i d) SIM4*

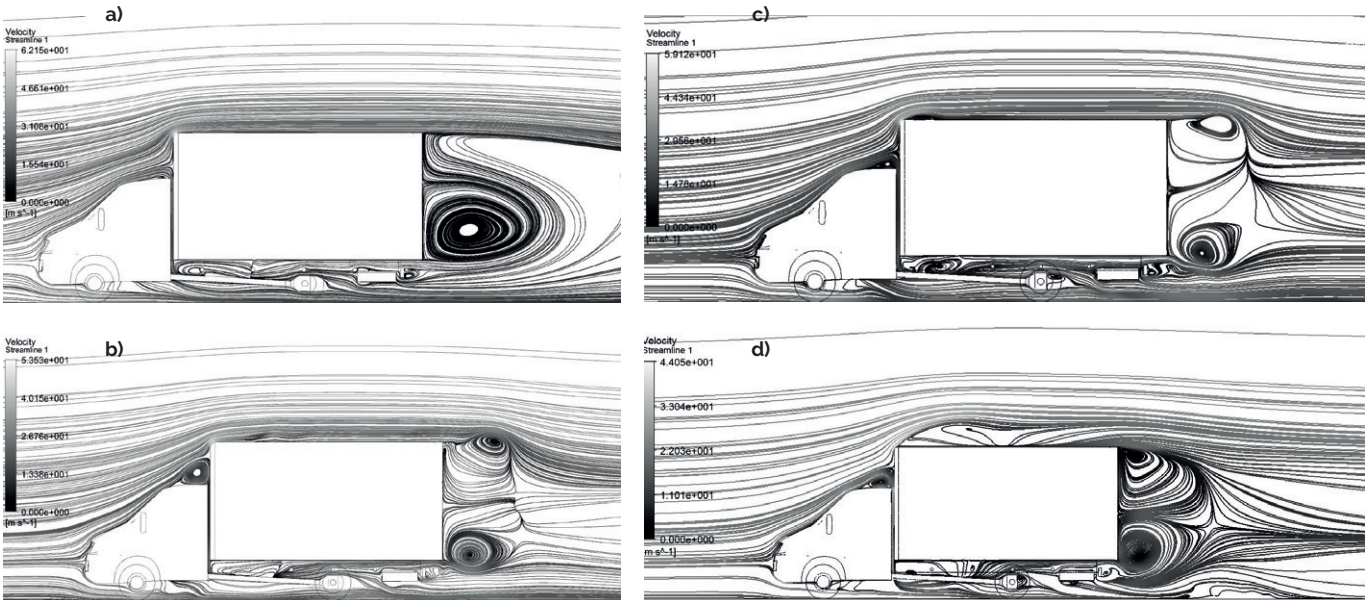
90 km/h, odpowiada za 25% całkowitego oporu aerodynamicznego zestawu ciągnik siodłowy–naczepa.

Jest wiele metod ograniczania oporu aerodynamicznego pojazdów, ale zarówno samochody dostawcze, ciężarowe, jak i autobusy należą do grupy tzw. pojazdów nieaerodynamicznych. Ich nadwozia nie można poddawać znaczącym modyfikacjom, całkowicie zmieniającym jego kształt, np. poprzez znaczące wydłużenie lub zaokrąglenie tylnej części, ponieważ oczekuje się od nich odpowiedniej funkcjonalności, a jednocześnie zachowania gabarytów regulowanych przez prawo. Uzasadnione jest zatem dążenie do opracowania rozwiązania, które będzie skutecznie ograniczać opór aerodynamiczny, nie wpływając znacząco na geometrię nadwozia. Aby jednak ten cel osiągnąć, konieczne jest pełne zrozumienie zjawisk zachodzących w trakcie opływu badanych pojazdów, w czym niewątpliwie przydatne są symulacje numeryczne.

Symulacja wspomaga wyobraźnię, ale niejeden może mieć wynik

Sukcesywny rozwój technologii i wzrost mocy obliczeniowej komputerów powodują wypieranie klasycznych metod obliczeniowych na rzecz metod numerycznych. Te ostatnie znacznie skracają czas wstępnej weryfikacji zagadnień i optymalizację konstrukcji, a przede wszystkim obniżają koszty badań eksperymentalnych. Głównym ograniczeniem dokładności metod numerycznych jest jednak moc obliczeniowa komputerów, która w rezultacie decyduje o sposobie modelowania turbulencji i warstwy przyściennej.

Obecnie najbardziej popularnym podejściem jest wciąż stosowanie modeli turbulencji opartych na RANS. Trzeba jednak pamiętać, że wybór modelu turbulencji



Rys. 4. *Rozkłady linii prędkości w płaszczyźnie symetrii modelu dla wariantów: a) SIM1, b) SIM2, c) SIM3 i d) SIM4*

i metody modelowania warstwy przyściennej ma kluczowe znaczenie dla prawidłowego przewidywania zjawisk zachodzących podczas opływu pojazdu.

W artykule przedstawiono krótkie porównanie wyników badań symulacyjnych przeprowadzonych na modelu samochodu ciężarowego z użyciem funkcji ścian oraz modelowania pełnej warstwy przyściennej. W następnym kroku porównano otrzymane wyniki z wizualizacją opływu na rzeczywistym pojeździe. W tym celu zastosowano oprogramowanie CFD ANSYS Fluent w wersji 20. Model 3D pojazdu został przygotowany na podstawie bryły samochodu ciężarowego Iveco Daily 50C15 z zabudową kontenerową (rys. 1). Obszar symulacji numerycznej obejmuje strukturę geometryczną modelu pojazdu w skali 1:1 z uproszczonymi do celów symulacji fragmentami nadwozia.

Symulacje przeprowadzono dla pojazdu poruszającego się z prędkością 90 km/h w czterech wariantach modelowania turbulencji i warstwy przyściennej:

- SIM1 – k-ε, standard wall function, $y+ > 30$ na wszystkich powierzchniach,
- SIM2 – k-ε, non-equilibrium wall function, $y+ > 30$ na wszystkich powierzchniach,
- SIM3 – k-ε, scalable wall function, $y+ > 30$ na wszystkich powierzchniach,
- SIM4 – SST k-ω, $y+ \approx 1$ na tylnej powierzchni nadwozia, $y+ \approx 30$ na pozostałych powierzchniach.

A co z rzeczywistością?

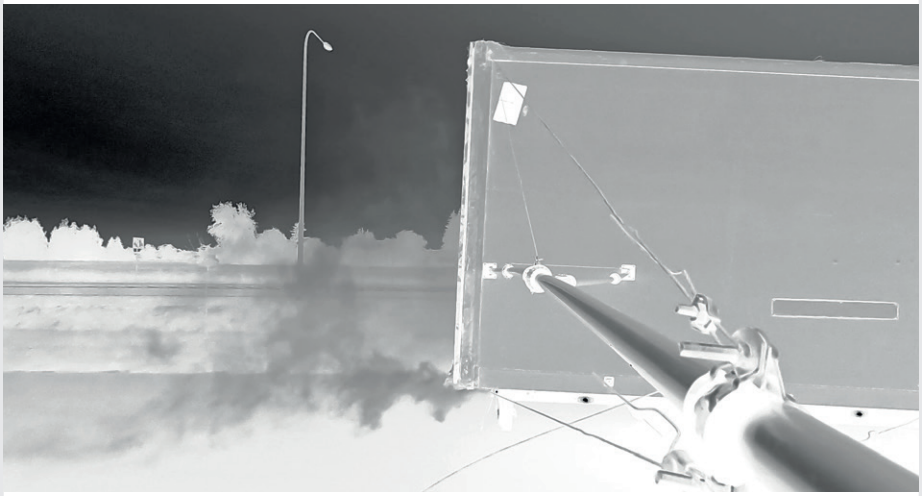
W zależności od przyjętej metody modelowania turbulencji ciśnienie statyczne na powierzchniach pojazdu i prędkość powietrza w jego otoczeniu przyjmują znacząco różne rozkłady i wartości (rys. 3). Rozkłady ciśnienia na tylnej powierzchni nadwozia są bezpośrednio zależne od kształtu śladu aerodynamicznego za pojazdem, natomiast rozkład prędkości powietrza w otoczeniu pojazdu zależy od skuteczności przewidywania zjawisk oderwania i przyklejania się przepływu. Aby jednak zrozumieć mechanizm powstawania tych zjawisk na przykładzie badanego pojazdu i wiedzieć, która z metoda zapewnia wyniki najbardziej zbliżone do rzeczywistości, niezbędne jest częściowe zweryfikowanie doświadczalne.

Wstępną walidację przeprowadzono na dwa sposoby. Pierwszy polegał na zastąpieniu tylnych drzwi zabudowy pojazdu folią, której kształt ulegał deformacji zgodnie z działaniem ciśnienia (rys. 6). W drugiej metodzie rejestrowano ruch zabarwionego powietrza za pomocą kamery zamontowanej na wysięgniku do nadwozia pojazdu (rys. 7).

Uzyskane wyniki uwidoczniły przewagę podejścia k-ε standard wall function w przewidywaniu opływu tylnej sekcji nadwozia badanego pojazdu i wśród porównywanych metod wskazały bezpośrednią zbieżność z rozkładem rzeczywistym. Jednak w celu dokładnego poznania sił działających na pojazd niezbędne jest wykonanie pomiarów rozkładu ciśnień na nadwoziu pojazdu. Zweryfikowany w ten sposób model numeryczny będzie cennym narzędziem, zarówno w trakcie analizy aerodynamiki pojazdów, jak i szybkiej ewaluacji różnych koncepcji układów zmniejszających opór aerodynamiczny, których ewaluacja w podejściu klasycznym byłaby czasochłonna i kosztowna. ■

Rys. 5. *Pojazd testowy z powierzchnią do wizualizacji rozkładów ciśnienia*

Rys. 6. *Odkształcenie powierzchni pomiarowej zgodnie z działaniem ciśnienia*



Rys. 7. *Rozkład barwionego powietrza za badanym pojazdem*

Projektowanie pasywnych czujników temperatury na bazie planarnych struktur rezonansowych

Mateusz Mazur • Microsensor
Łukasz Maciejewski • Microsensor • lukasz.maciejewski@microsensor.pl
Alicja Wysocka • Nobo Solutions

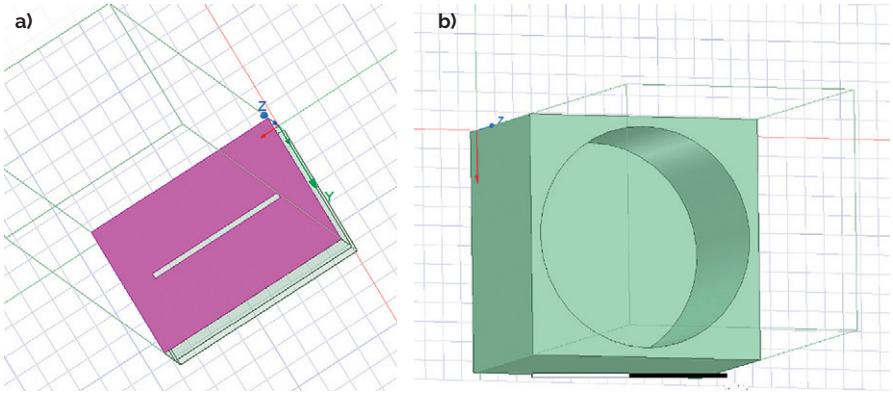
W firmie Microsensor sp. z o.o. opracowano projekt czujnika temperatury. W trakcie prac projektowych wykorzystano oprogramowanie HFSS. Licencję na preferencyjnych warunkach uzyskano w ramach ANSYS Startup Program.

Powstały dwa warianty czujnika temperatury:

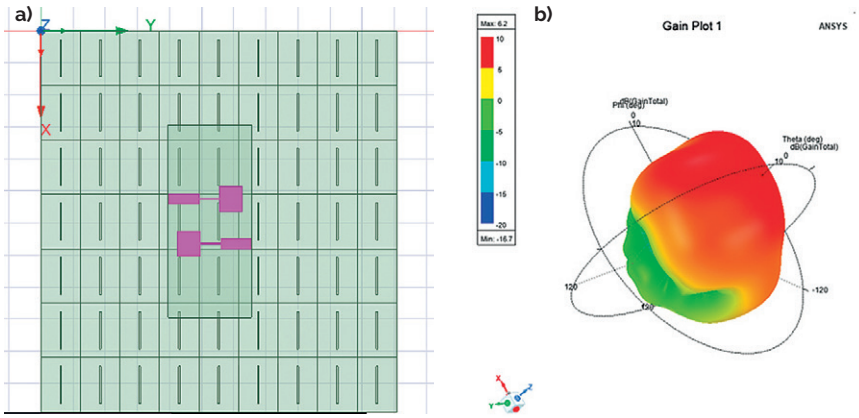
- wielowarstwowy, zbudowany na podłożu mikrofalowym z warstwami metalizacji po obu stronach,
- jednowarstwowy, wykonany z płyty przewodnika.

Podstawowym założeniem przeprowadzonych badań była zmienność częstotliwości rezonansowej analizowanych struktur na skutek zmian wymiarów liniowych tych struktur wywołanych zmianami temperatury.

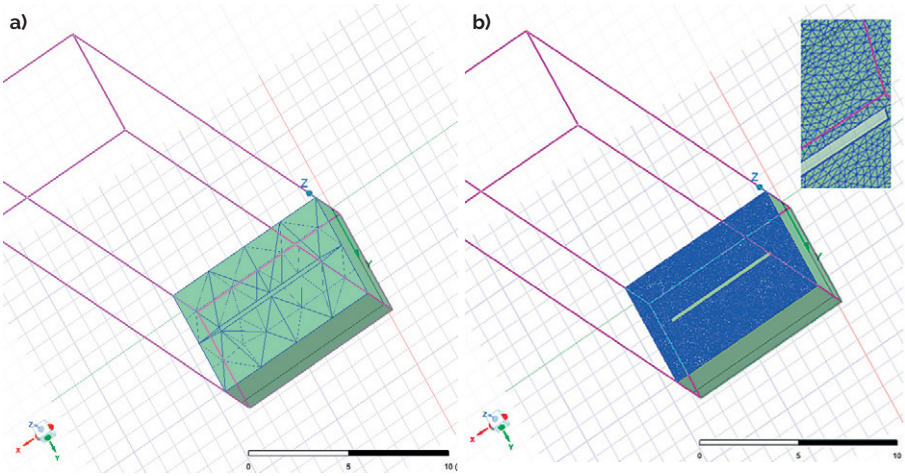
Do symulacji i optymalizacji planarnych struktur rezonansowych (FSS – *frequency selective surface*) zastosowano oprogramowanie HFSS. Pozwala ono na symulację parametrów rozproszenia nieskończonej struktury periodycznej z użyciem pojedynczej komórki struktury i odpowiednio zdefiniowanych warunków brzegowych ograniczających tę komórkę. W ten sposób przeliczono i zoptymalizowano pod kątem docelowego zastosowania wybrane struktury periodyczne FSS odpowiadające wariantom czujnika (rys. 1):



Rys. 1. *Wybrane pojedyncze komórki dla struktur FSS symulowanych w środowisku HFSS: a) szczelina prostokątna w metalizacji wykonanej na ceramice alundowej, b) otwory wykonane w płycie z materiału przewodzącego elektrycznie*



Rys. 2. *Ograniczona wymiarowo periodyczna struktura FSS wraz z układem anten pomiarowych (kolor fioletowy) umieszczonych równolegle nad strukturą FSS (a). Charakterystyka promieniowania pojedynczej anteny w układzie anten pomiarowych przy braku struktury FSS (b)*



Rys. 3. *Siatka przykładowej badanej struktury:*
a) standardowa, wykorzystana podczas wstępnej optymalizacji i symulacji struktury FSS wraz z układem anten;
b) zagęszczona (wymiary liniowe elementów siatki około 20-krotnie mniejsze w porównaniu z siatką standardową), użyta podczas symulacji wpływu zmian temperatury (niewielkich zmian wymiarów geometrycznych) na działanie układu

- szczeliny oraz inne wzory wykonane na laminacie RF i ceramice alundowej,
- płytę przewodnika z nieprzelotowymi otworami.

Zmiennymi w optymalizacji były wymiary fizyczne wzorów struktur oraz grubości warstw. Optymalizację przeprowadzono w celu uzyskania częstotliwości rezonansowej struktury FSS w zdefiniowanym paśmie.

Dla tych struktur uzyskano charakterystyki rozproszenia odznaczające się rezonansem o dużej dobroci w zdefiniowanym w założeniach projektowym paśmie częstotliwości.

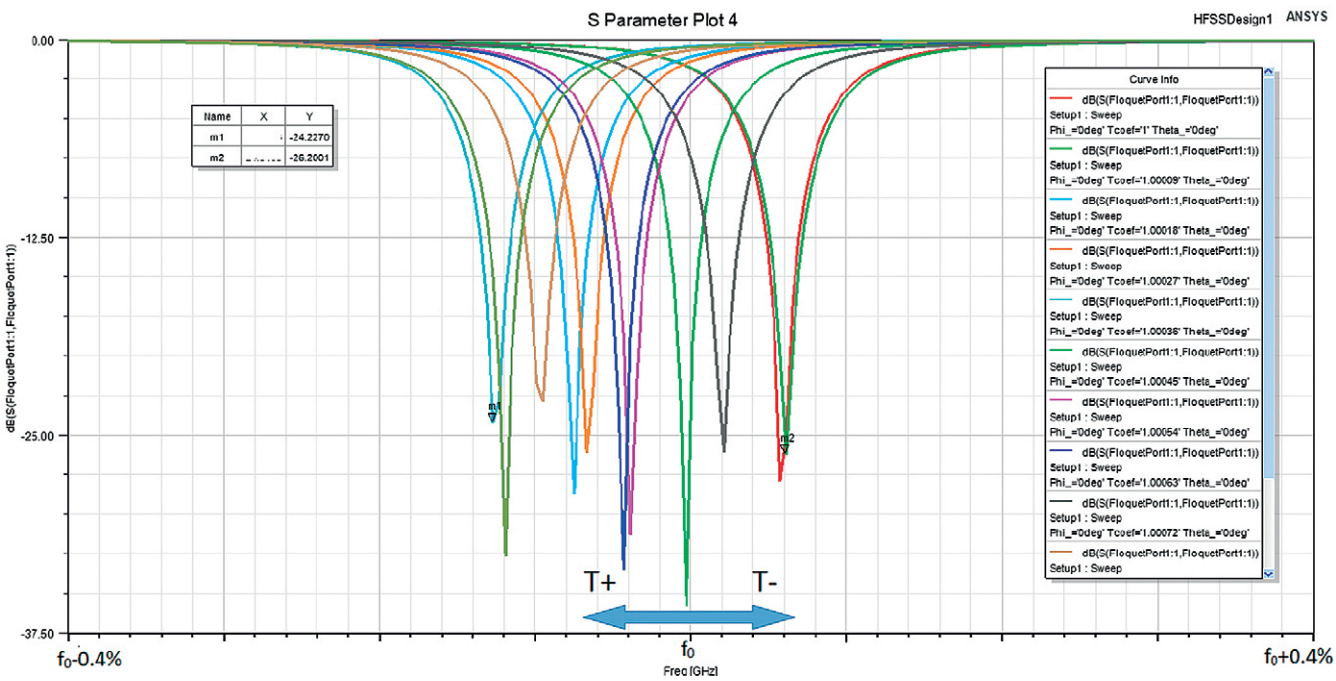
Na kolejnym etapie prac przygotowano modele numeryczne odzwierciedlające geometrię czujnika i anten, a przede wszystkim:

- ograniczono nieskończone struktury FSS do wymiarów planarnych wymaganych w aplikacji fizycznej,
- zaprojektowano układ anten nadawczo-odbiorczych o dużej wzajemnej izolacji, które mają posłużyć do identyfikacji częstotliwości rezonansowej układu,
- zestawiono razem strukturę FSS i układ antenowy w celu symulacji całego układu.

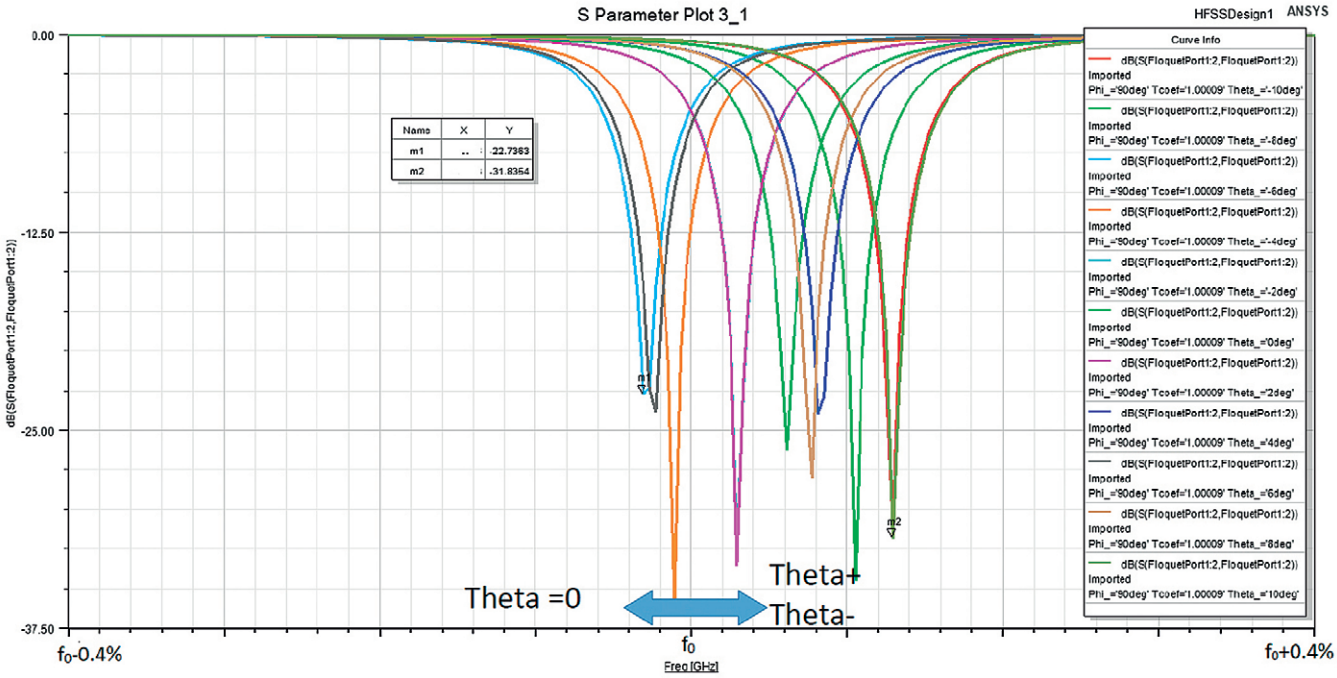
Przeprowadzono symulacje. Obliczenia te miały na celu zbadanie, w jaki sposób struktura FSS oraz układ antenowy wzajemnie wpłyną na siebie (rys. 2). Sprzężenia pomiędzy tymi elementami spowodowały, że obserwowane rezonanse struktur FSS ze względu na bliskość anten zostały przesunięte nieznacznie w dół. Efekt ten został przewidziany przez projektantów, a narzędzie CAE (ANSYS HFSS) dało możliwość określenia ilościowego (procentowo) przesunięcia pasma rezonansowego w funkcji temperatury.

W kolejnym kroku z zastosowaniem ANSYS Mechanical wyznaczono zmiany wymiarów struktury rezonansowej w funkcji temperatury dla zdefiniowanego w założeniach projektowych zakresu zmian tego parametru oraz zdefiniowanych materiałów warstw struktury FSS. Zmiany wymiarów liniowych struktur w funkcji temperatury były niewielkie, co implikowało konieczność znacznego zagęszczenia siatki, aby uzyskać reprezentatywne i prawidłowe wyniki symulacji. Z tych powodów zdecydowano się na badanie FSS dla różnych temperatur jako pojedynczych komórek w nieskończonej strukturze periodycznej, co znacznie przyspieszyło obliczenia (rys. 3–4).

W dalszej części badań struktur periodycznych sprawdzono zmiany rezonansu w funkcji wychylenia kątowego. Wcześniejsze symulacje dotyczyły tylko konfiguracji równoległej płaszczyzny struktury FSS i anteny. Dodatkowo poddano analizie wpływ cienkich warstw substancji osadzających się na strukturze FSS podczas pracy w warunkach przemysłowych. W ten sposób zasymulowano



Rys. 4. *Zmiany parametrów rozproszenia struktury ze szczelinami pod wpływem zmian temperatury*



Rys. 5. *Zmiany parametrów rozproszenia wybranej struktury w funkcji zmian kąta pomiędzy strukturą FSS i układem anten w zakresie Theta od -10° do +10°*

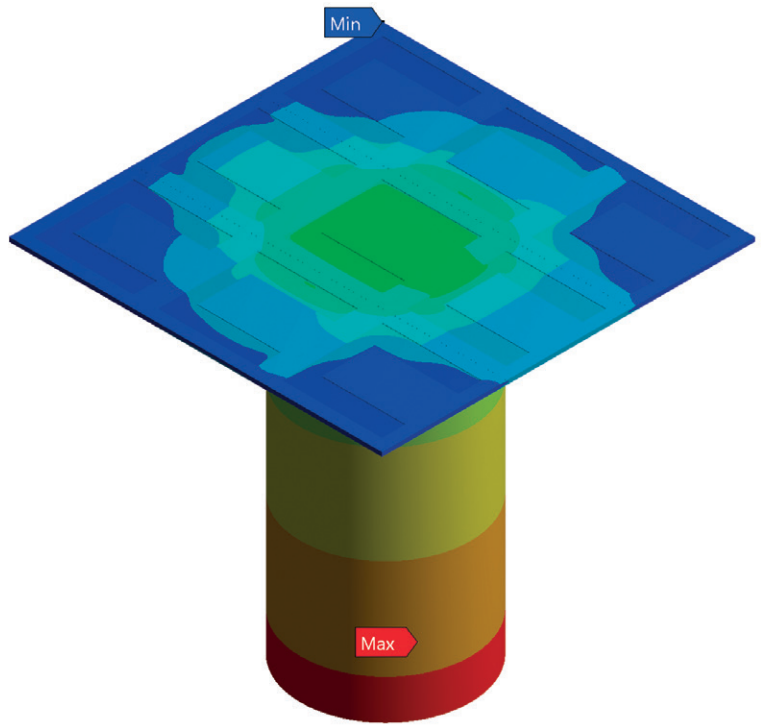
wpływ czynników charakterystycznych dla środowiska pracy na zmiany rezonansu oraz określono rzeczywiste możliwości pomiaru temperatury (rys. 5).

Wykonano fizycznie optymalne struktury FSS. Na otrzymanych prototypach zweryfikowano pozytywnie jakościowo działanie struktur i ich stosowalność jako czujników temperatury. Zaobserwowano zwłaszcza zmiany rezonansu w funkcji odległości anten od struktur FSS oraz zmiany rezonansu struktur periodycznych przy schładzaniu ich sprężonym gazem. Zmiany temperatury struktur FSS wpływają na zmiany mierzonych charakterystyk rozproszenia, zarówno S_{11} (pomiaru odbicia dla pojedynczej anteny), jak i S_{21} (pomiaru transmisji pomiędzy dwiema antenami w obecności FSS).

Przeprowadzono symulację zmiany temperatury czujnika z zastosowaniem elementu przewodzącego ciepło od jego źródła do struktury FSS (rys. 6). Symulacja stanu nieustalonego zmiany temperatury odzwierciedlała jeden z możliwych scenariuszy zastosowania czujnika. W wyniku symulacji w oprogramowaniu ANSYS Mechanical uzyskano spodziewany rozkład temperatury w strukturze FSS dla wybranych chwil czasu. Wyznaczony rozkład temperatury implikuje zmiany geometryczne struktury, a tym samym – zmiany jej charakterystyk mikrofalowych.

Narzędzie ANSYS HFSS umożliwiło efektywne opracowanie wariantów struktur potencjalnie stosowalnych jako pasywne elementy termoczułe. Dzięki wdrożeniu symulacji na wczesnym etapie projektowania, do badań prototypowych, opracowano egzemplarze prototypowe zbliżone funkcjonalnie do finalnych. Określono ich czułość na zmiany temperatury, która jest docelową mierzoną wartością. Zbadano wpływ zmian innych parametrów stanowiących zakłócenia pomiaru temperatury.

Wstępne badania eksperymentalne modeli fizycznych potwierdzają uzyskanie rezonansu w zakładanym paśmie częstotliwości oraz jego zmiany w funkcji temperatury. Dalsze badania weryfikujące ustalenia teoretyczne zostaną wykonane na budowanym stanowisku pomiarowym. ■



Rys. 6. *Przykładowy rozkład temperatur uzyskany dla struktury FSS przy zmianach temperatury źródła spodziewanych w warunkach roboczych*

Digital Twin

– nowy poziom wykorzystania symulacji komputerowych

Stanisław Wowra • MESco • swowra@mesco.com.pl
Tomasz Czyż • MESco • tczyż@mesco.com.pl

Symulacje – a w związku z tym oprogramowanie ANSYS – są już od dawna stosowane w wielu firmach w procesie projektowania nowych konstrukcji i udoskonalania istniejących. Duża część przedmiotów, które nas otaczają, została zaprojektowana z użyciem symulacji. Jeżeli więc ta technologia jest znana od wielu lat, to czy można się spodziewać jakiejś poważnej zmiany? Dzięki nieustannemu rozwojowi i wdrażaniu innowacyjnych metod – co jest domeną firmy ANSYS – pojawiły się nowe możliwości wykorzystania tego, co już mamy.

Obecnie firmy mogą wyjść z symulacją poza proces projektowy – na obszar eksploatacji. Wykorzystanie technologii Digital Twin (DT) oraz Internet of Things (IoT) dostarcza dużo więcej informacji o produkcie, właśnie z etapu eksploatacji, i aktywuje nowe usługi dla klientów.

Co to jest Digital Twin?

Cyfrowy bliźniak czy Digital Twin to cyfrowe odwzorowanie rzeczywistego obiektu. Jeżeli to takie proste, to można się zastanawiać, na czym polega nowość? Nasze modele numeryczne to nic innego jak cyfrowa reprezentacja rzeczywistego obiektu. Nowością jest użycie tych modeli – stosowanych dotąd w procesie projektowym – na etapie użytkowania obiektu. Co to oznacza? Możemy zasymulować pracę cyfrowego modelu w różnych, często skrajnych warunkach, a następnie stworzyć matematyczny opis jego zachowania w postaci modelu zredukowanego ROM (*reduced order model*). Brzmi groźnie, ale mamy do tego gotowe narzędzia.

Co zyskujemy? Dostajemy model, który w postaci blackboxa dostarcza natychmiastową odpowiedź układu na warunki, w jakich pracuje.

Jest jeszcze jeden element układanki potrzebny do tego, aby cały układ działał. To podłączenie istniejącego obiektu do internetu. Czemu pompa nie ma się komunikować z innymi pompami w zakładzie albo w oddziale w Australii? Aby urządzenie współpracowało z cyfrowym bliźniakiem, łączymy je przez Internet Rzeczy (czyli IoT).

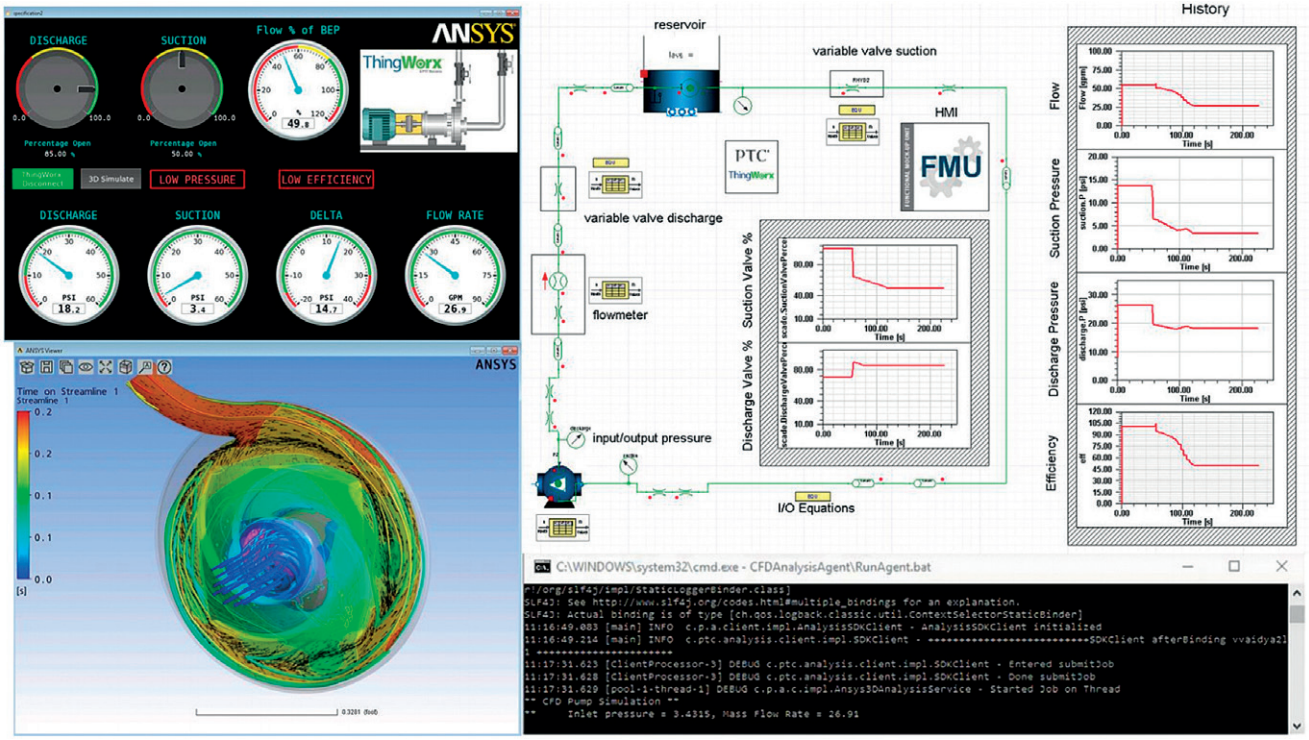
Teraz najważniejsze pytanie: jak wykorzystać tę technologię?

Jak zarobić na Digital Twin

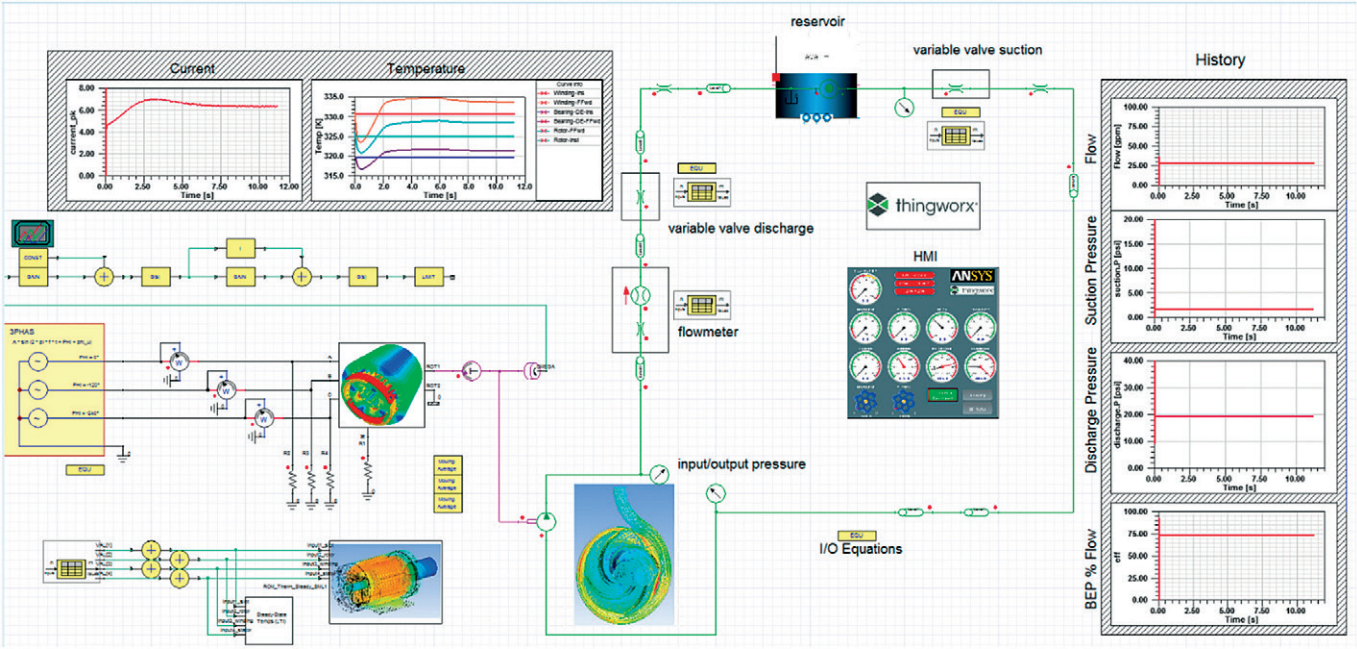
Zastosowań DT jest sporo. Dzięki nim zyskuje się dodatkową wiedzę i można aktywować nowe rodzaje usług dla klientów.

Wirtualne sensory w ANSYS

Na podstawie przeliczonego modelu numerycznego można stworzyć wirtualne sensory. Takie zastosowanie jest przydatne wszędzie tam, gdzie nie da się bezpośrednio zmierzyć jakiejś wartości na rzeczywistym modelu. Tak jest np. w przypadku obliczania naprężeń powstających w żeliwnym korpusie zaworu w czasie zmiany temperatury medium. Dzięki przeliczeniu modelu numerycznego znamy zależność wartości naprężeń od zmian temperatury czynnika. Temperatura na obiekcie jest często łatwo mierzalna, a dzięki DT można otrzymać zwrotnie w czasie rzeczywistym wartości naprężeń. Pozwala to na poszerzenie opomiarowania o wartości wcześniej niemożliwe do uzyskania.



Rys. 1. *Digital Twin – model pompy wykonany przez Flowserve*



Rys. 2. *Digital Twin – model pompy wykonany przez Flowserve*

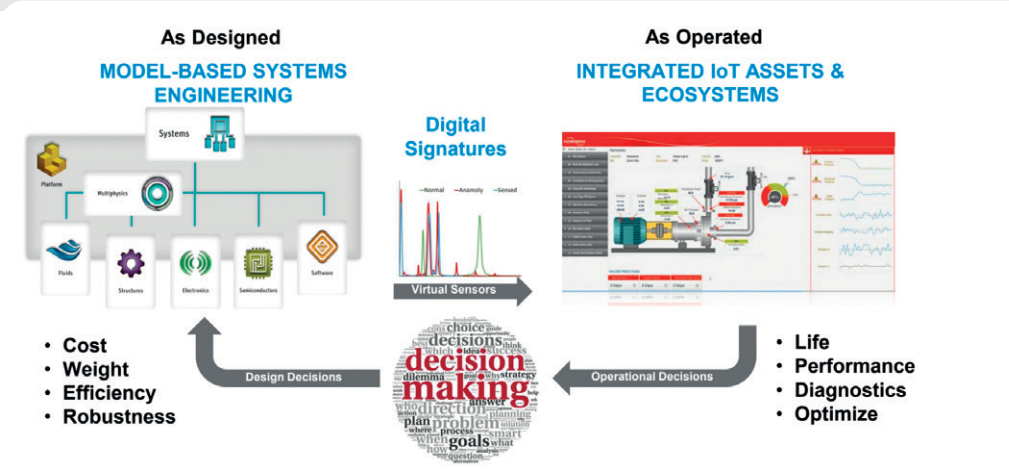
Predictive maintenace

Pozostając przy przykładzie korpusu... Z monitorowania zmian temperatury w czasie otrzymujemy historię naprężeń w modelu. Wykonując symulację zmęczeniową i sprzęgając uzyskane dane na temat przewidywanej żywotności z mierzonymi danymi, można na bieżąco obserwować zużywanie się zaworu. Na podstawie tych informacji jesteśmy w stanie przewidywać potencjalne problemy i planować przeglądy czy naprawy w optymalnym czasie, a nie w trybie awaryjnym.

Czemu takie podejście jest lepsze od książkowych przeglądów planowych? Ponieważ sprzęgnięcie DT z rzeczywistym modelem daje dostęp do rzeczywistych danych, a nie zgrubnej aproksymacji. Łatwo można sobie wyobrazić, że nawet na jednej instalacji jeden zawór będzie pracował przy dużym obciążeniu, a drugi będzie „odpoczywał". Na podstawie znajomości zachowania modeli można zaplanować przegląd ograniczony do zaworu, który tego wymaga, oszczędzić na serwisie, a do tego zapobiec groźnym awariom.

A teraz wyobraźmy sobie dziesiątki albo setki podpiętych zaworów, z których dane są zbierane i obrabiane przez algorytm z *machine learning*. Po zestawieniu danych z wirtualnego modelu z danymi z wielu urządzeń otrzymuje się bardzo dokładny system, potrafiący przewidzieć awarie.

Bogatą wiedzę na temat pracy urządzeń u klientów można wykorzystać do projektowania nowych, lepiej dopasowanych do rzeczywistych warunków urządzeń (nie tylko spełniających wyidealizowane założenia projektowe). Jest to potężna dawka wiedzy, która może być efektywnie spożytkowana przez konstruktorów na potrzeby optymalizacji nowych produktów.



Rys. 3. *Schemat wykorzystania Digital Twin*

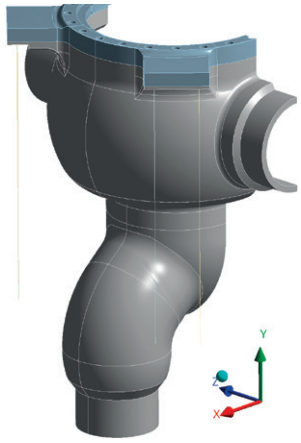
Dogłębna wiedza o zachowaniach produktu może przynieść jeszcze jeden dodatkowy profit. Coraz częściej urządzenia czy całe instalacje są wynajmowane przez klientów. W przypadku uruchomienia przez producenta opcji *product as a service* (PaaS) kluczowa zaczyna być wiedza o tym, w jakich warunkach pracowało urządzenie i kiedy wykonać serwis. Taka wiedza często pomaga rozstrzygnąć, czy awaria jest efektem błędów projektowych, czy nieprawidłowego użytkowania urządzenia.

Poza wymienionymi zastosowaniami cały czas pojawiają się kolejne. Jak widać, koncepcje DT i IoT otwierają wiele możliwości. Należy być świadomym, że niektóre aplikacje pociągają za sobą potrzebę wprowadzenia wielu zmian w firmach i wdrożenia nowych technologii. Nie bez znaczenia zaczyna być kwestia przetwarzania dużej ilości danych, często zawierających sporo szumu, oraz zadbanie o cyberbezpieczeństwo systemu. Jednak zastosowanie tych technologii przynosi wiele korzyści i umożliwia szersze wykorzystanie posiadanych narzędzi do symulacji.

Jeżeli zainteresował Państwa ten temat i chcieliby Państwo przedyskutować możliwość wprowadzenia tej technologii w swoich przedsiębiorstwach, to serdecznie zapraszamy do kontaktu.

Przykład zastosowania Digital Twin w energetyce

W firmie MESco został zrealizowany projekt, w którym użyto technologii Digital Twin w praktyce. Projekt polegał

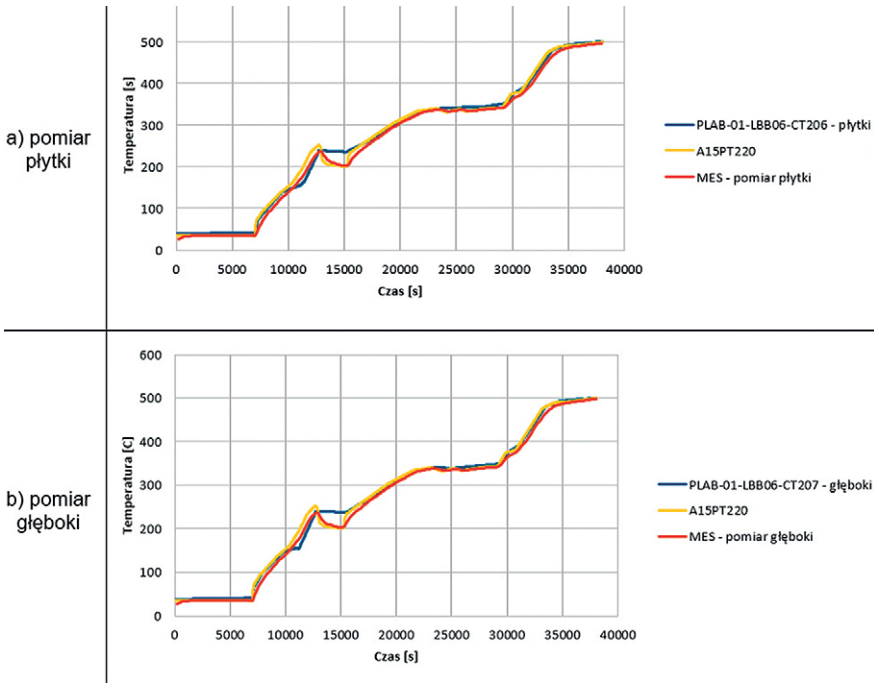


Rys. 4. *Geometria zaworu*

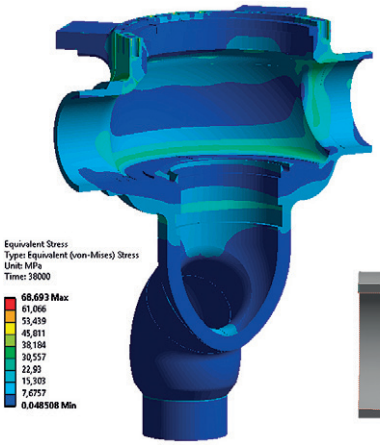
na stworzeniu wielu modeli zredukowanych dla elementów krytycznych elektrowni.

Podobnie jak w omówionych przykładach, na bazie znanych warunków brzegowych stworzyliśmy model numeryczny istniejącego zaworu, a następnie model zredukowany. Model ten odwzorowywał zależności pomiędzy danymi wejściowymi – mierzonymi temperaturami i ciśnieniami medium – a rezultatami przemieszczenia i naprężenia w krytycznych lokalizacjach. W kolejnym kroku model został zwalidowany na testowych przebiegach danych wejściowych temperatury i ciśnienia medium. Testy wykazały, że wyniki temperatury metalu w danych miejscach pokrywają się z informacjami z rzeczywistych czujników.

Model zredukowany został podpięty do istniejącego systemu pomiarowego, co pozwoliło na uzyskiwanie informacji o stanie zaworu w czasie rzeczywistym i przewidywanie jego trwałości. Takie informacje poprawiają bezpieczeństwo użytkowania instalacji oraz pozawalają lepiej planować remonty, czy przewidywać, np. zbliżające się problemy. ■

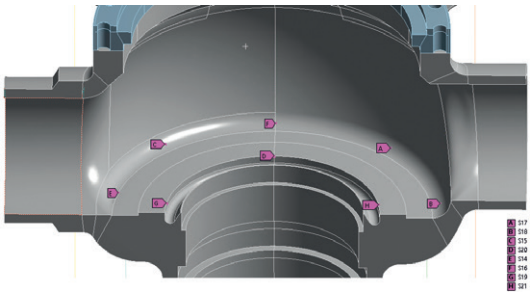


Rys. 5. *Porównanie temperatury z czujników metalu i symulacji*



Rys. 6. *Mapa naprężeń modelu pełnego w określonym czasie*

Rys. 7. *Zdefiniowane punkty pomiarowe – krytyczne lokalizacje*



Ansys CERTIFIED ELITE CHANNEL PARTNER

Wydawca: MESCO Sp. z o.o.
al. Legionów 4, 41-902 Bytom
tel. +48 (32) 768 36 36
pl. Konstytucji 6/83, 00-550 Warszawa
tel. +48 530 785 464
info@mesco.com.pl, www.mesco.com.pl

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

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.

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.