JESIEŃ 2019 • NR 8

MESSENGER

Drodzy Czytelnicy,

witam w kolejnym wydaniu naszego biuletynu. Przygotowaliśmy dla Państwa mnóstwo ciekawych tematów.

Firma MESco jest na rynku już 25 lat i w związku z tym hucznie obchodziliśmy swoją rocznicę. Relację z tego wydarzenia zamieszczamy oczywiście na łamach MESSENGERA.

Bardzo ważnym wydarzeniem jest dla nas także nawiązanie współpracy przez firmy ANSYS i PTC, która zaowocowała integracją ANSYS Discovery w systemie PTC Creo.

Warto zwrócić uwagę na ciekawy opis jednego z nowszych produktów w stajni ANSYS, czyli ANSYS Motion. To bogaty zestaw narzędzi i modułów do wyrafinowanych symulacji *multibody dynamics*.

Zapraszam do lektury artykułów, które powstały na bazie prezentacji z tegorocznej edycji konferencji „Symulacja". Wbijają w fotel symulacje Justyny Pinkos i współpracowników, którzy badają wpływ udaru balistycznego na ciało człowieka. Wszyscy, którzy mają do czynienia z tworzywami sztucznymi, docenią pracę Damiana Bodniewicza z WABCO, poświęconą symulacjom komponentów polimerowych wzmacnianych ciętymi włóknami. Dla fanów elektroniki mamy natomiast artykuł o meandrach projektowania linii Blumleina, którego autorami są Yahia Achour z WAT i Jacek Starzyński z Politechniki Warszawskiej. Na deser polecam symulację falowania (z dziedziny mechaniki płynów) opisaną przez Maćka Krysia z zespołu MESco. Natomiast wszystkich śledzących wyczyny Roberta Kubicy na torach Formuły 1 zachęcam do lektury opracowania zespołu PolSl Racing. Z pomocą ANSYS i symulacji CFD udało się zoptymalizować bolid startujący w zawodach Formuły Student pod kątem aerodynamicznym.

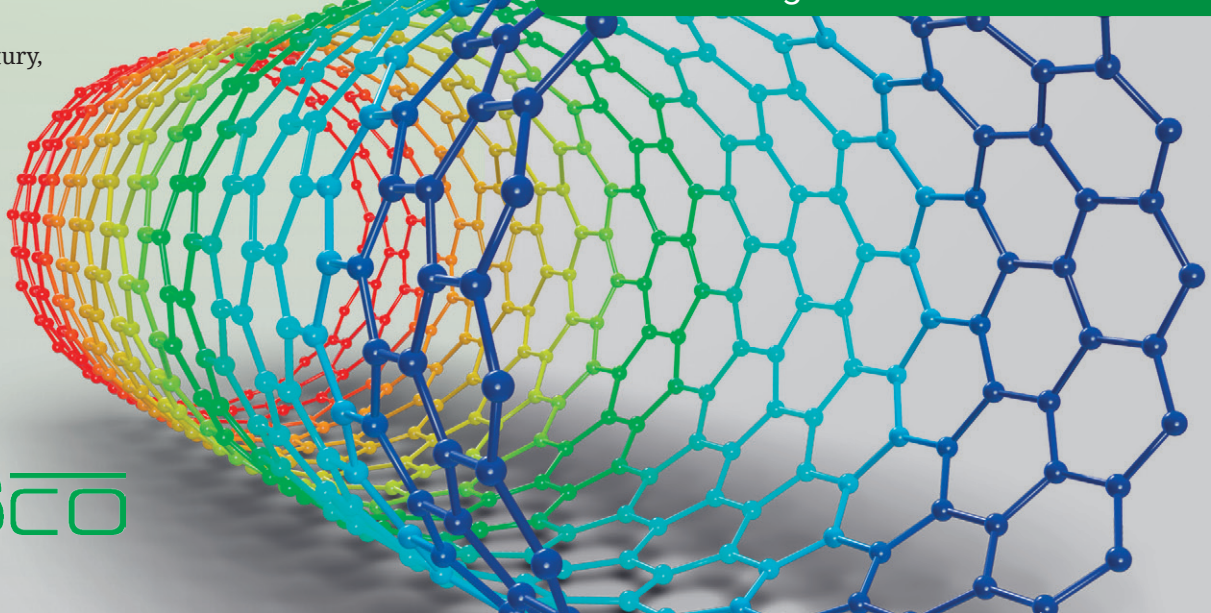
Oddajemy w Państwa ręce kolejną, dużą porcję wiedzy o najbardziej zaawansowanych symulacjach numerycznych, ale od przybytku głowa nie boli. No tak, a właśnie o głowie, a przede wszystkim o groźnym tętniaku pisze Wojciech Kaspera ze współpracownikami w artykule o naprężeniach ścinających. Biomechanika to jedna z najszybciej rozwijających się gałęzi przemysłu, w której nie może zabraknąć symulacji, a w tym produktów firmy ANSYS.

Życzę owocnej lektury,

Tomasz Czyż

W TYM NUMERZE:

3 25 lat minęło... ciąg dalszy
4 ANSYS and PTC partnership announced
5 Ulga B+R, czyli jak oszczędzić na podatkach w związku z nabyciem pakietu ANSYS
6 Triggo uczestnikiem ANSYS Startup Program
8 ANSYS Motion – rewolucja w analizach MBD
9 Analiza fizjologicznych skutków udaru balistycznego po niepenetrującym uderzeniu pocisku w ciało człowieka
13 Wpływ procesu wtrysku wzmacnianych komponentów polimerowych na dokładność strukturalnych symulacji numerycznych
17 Symulacje falowania w pakiecie ANSYS Fluent
19 Optymalizacja aerodynamiczna bolidu Formuły Student
22 Naprężenia ścinające oraz ich gradient w etiologii tętniaków mózgu
25 Projektowanie linii Blumleina w technologii PCB



MESco

MESCO

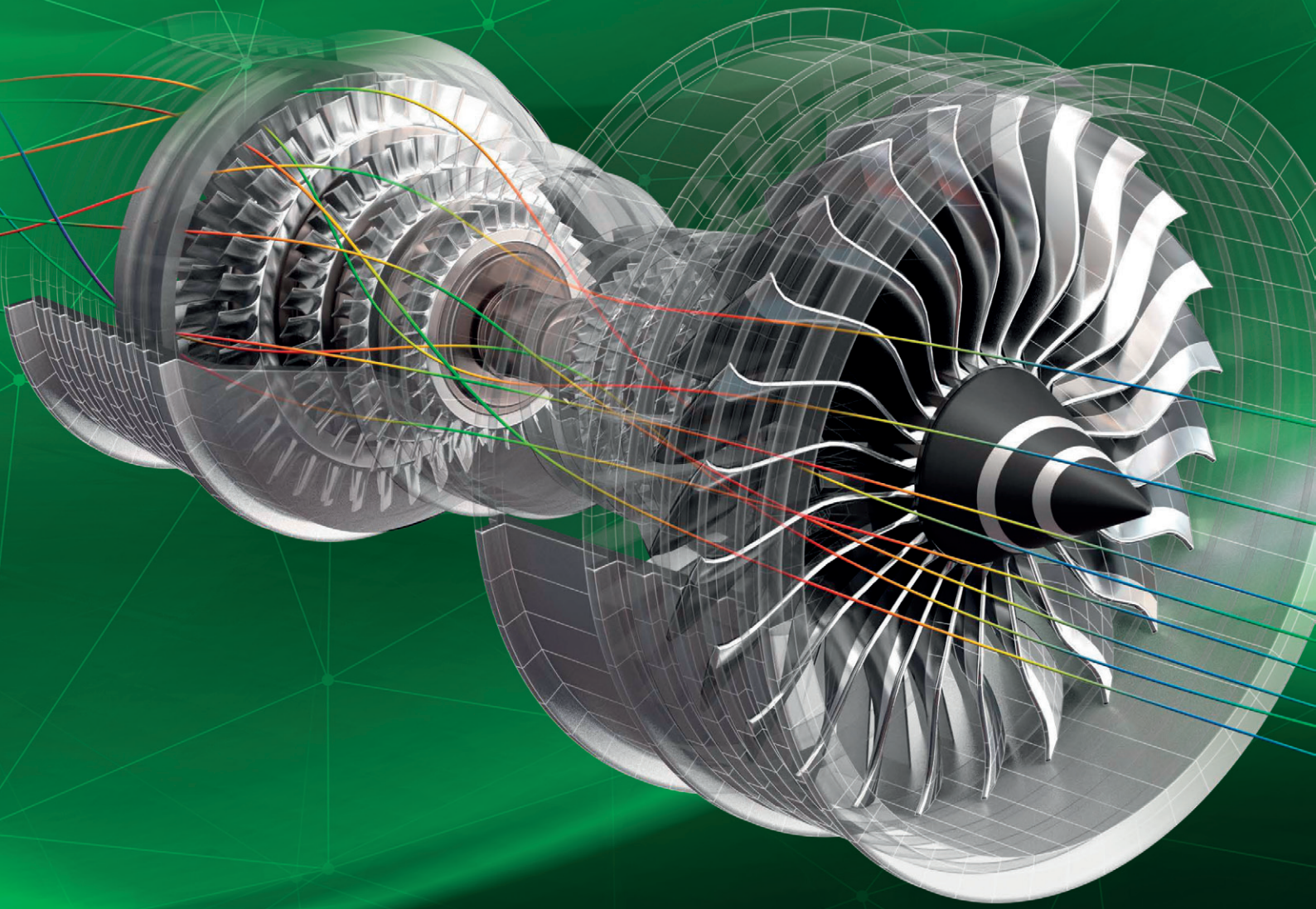
ANSYS

Konferencja

SymulacjΛ 2020

22-24.04.2020

Hotel Vienna House Andel's Lodz



www.mesco.com.pl/symulacja2020

25 lat minęło...

ciąg dalszy

Stanisław Wowra • MESco

Jak na tak poważne urodziny przystało, nie obyło się bez hucznej imprezy. Zorganizowaliśmy ją w Operze Śląskiej w Bytomiu. Ze względu na ograniczone możliwości lokalowe nie mogliśmy zaprosić wszystkich naszych wspaniałych i ważnych dla nas klientów. Myślę, że następne okrągłe urodziny uda się zorganizować w większej sali.

Zaczęliśmy od nieformalnych rozmów we *foyer* opery przy akompaniamencie kwartetu smyczkowego. Rozmowom nie byłoby końca, gdyby nie oficjalne otwarcie referatem prezesa Mariusza Gorola. Przypomniał nam nasze początki oraz jak firma i Polska zmieniły się przez ten czas.

25 lat – myślę, że ten wiek dobrze oddaje kondycję naszej firmy. Dawno już osiągnęliśmy pełnoletniość i jesteśmy na etapie, w którym świat stoi przed nami otworem. Staramy się łapać byka za rogi i cały czas podejmujemy nowe wyzwania, wykorzystujemy nadarzające się szanse. Rozwijamy się, przeprowadziliśmy się do nowej, zdecydowanie większej siedziby w Bytomiu – pięknej willi nadburmistrza Brüninga. Zatrudniamy kolejne osoby (najnowszy mechanik zaczął pracę 1 września) i poszukujemy nowych rozwiązań, takich jak narzędzia do symulacji optyki czy Digital Twin i IoT.

Reasumując: jesteśmy młodzi, a jednocześnie doświadczeni, pełni pomysłów i energii. Kolejne 25 lat należy do nas!

Nasze urodziny zaszczycił Prezydent Bytomia Mariusz Wołosz. W gorącym przywitaniu zapewnił nas o pełnym wsparciu przez miasto firm, zwłaszcza z sektora zaawansowanych technologii.

Po pierwszych referatach mieliśmy okazję do dalszych rozmów przy przepysznej kolacji serwowanej przez wyśmienitych kucharzy z restauracji Umami z Pyskowic. Przygrywał nam zespół Jazz Bar Band, a po deserze mogliśmy wysłuchać znanych i lubianych utworów operowych w wykonaniu znakomitych artystów Opery Śląskiej z Bytomia.

Na naszych urodzinach gościliśmy także Albrechta Gilla, dyrektora odpowiedzialnego w ANSYS za Channel Partner w Europie, który pokazał wizjonerką prezentację planów firmy i przyszłości symulacji. ANSYS jako niekwestionowany lider rynku wytycza kierunki, którymi inni starają się podążać. Obraz tego, co firma już osiągnęła, i tego, co ma zamiar zrobić, jest imponujący. Mogliśmy poczuć dumę, że jesteśmy częścią tak innowacyjnego przedsiębiorstwa.

Na koniec wysłuchaliśmy prezentacji naszego gościa specjalnego – Christiny Blunt z zespołu Aston Martin Redbull Racing Team z Wielkiej Brytanii. Dowiedzieliśmy się, jak oprogramowanie ANSYS jest wykorzystywane przy projektowaniu jednych z najlepszych bolidów Formuły 1. Blunt uświadomiła nam złożoność, zaawansowanie i ogrom prac zespołu przygotowującego bolid do każdego wyścigu.

Po oficjalnych prezentacjach mieliśmy czas na rozmowy przy dobrym winie. Było tak miło, że ostatni goście opuszczali operę grubo po północy.

Nie pozostaje mi nic innego, jak powiedzieć: do zobaczenia wkrótce!

ANSYS and PTC partnership announced

Robert Opletal • PTC • ropletal@ptc.com

ANSYS announced strategic partnership with PTC during PTC Conference LiveWorx 2018. Partnership combines award winning PTC Creo with ANSYS real-time simulation solution, ANSYS Discovery Live.

Ajei Gopal, president and CEO of ANSYS on partnership with PTC: *ANSYS is the global leader in engineering simulation, and Discovery Live is the latest example of our innovation in action. By embedding ANSYS Discovery Live into Creo, we will expand our audience to include design engineers – who will be able to design at the speed of thought. The power of simulation will now readily be provided to engineers as they make thousands of decisions and model explorations, providing them with unprecedented insight into their design choices.*

Jim Heppelmann, PTC CEO on this topic: *With the combined solution engineers will be able to see the real-time results of simulation during the modeling process, enabling them to understand design changes in their models. This capability has the potential to dramatically improve engineering productivity and quality and the combined solution can be a differentiator in the market... Partnering with ANSYS makes tremendous sense on every level.*

What should ANSYS and PTC customers expect from this partnership?

Combined ANSYS and PTC solution will offer customers a unified modeling and simulation environment, removing the boundaries between CAD and simulation and enabling design engineers to gain insight into each of the many design decisions they make throughout the product development process. This insight will enable design engineers to create higher quality products, while reducing product and development costs.

This combined solution will give designers the power of Creo, fully integrated with ANSYS Discovery Live. The integration of these two leading solutions brings real-time simulation into the modeling environment, creating an interactive design experience.

In the first phase, companies will integrate ANSYS Discovery Live into Creo to enable instantaneous static structural, thermal, and modal Simulation. Over time, both companies intend to integrate the full breadth of ANSYS Discovery simulation functionality into Creo.

Who is PTC?

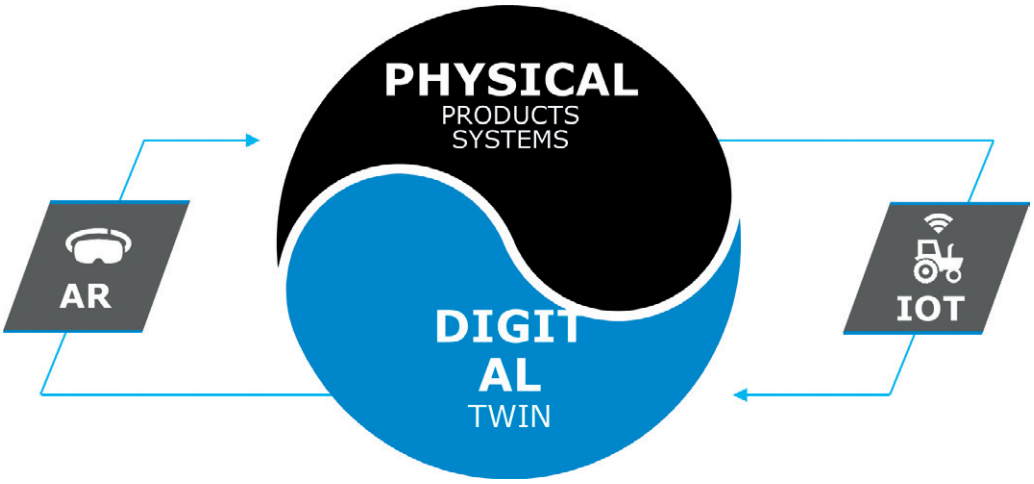
PTC is Boston, MA based company with about 6.000 employees in 30 countries, working with over 1.100 partners and over USD 1.1B in revenues.

PTC develops software solutions helping manufacturing, as well as retail companies to design, manufacture and service their innovative products with lower costs and shorter lead times. It consequently helps manufacturing companies to remain competitive on the global markets.

MESco to become PTC partner soon

To provide benefits of combined ANSYS and PTC solutions, MESco management works with PTC on partnership agreement. It is in line with ANSYS and PTC policy and in line with MESco plans for further development of better services for our customers via enablement of an access to Digital Twin technology and simulation democratization via Discovery Live products, so every engineer could benefit from ANSYS technology during everyday work.

You can expect more articles regarding smart connected products, Digital Twin technology and augmented reality soon.



PTC markets four key product lines:

- Creo, software tool to build and optimize digital product, foundation for its physical representation;
- Windchill, solution to manage entire product lifecycle and bill-of-material transformations as designed, manufacture and serviced;
- ThingWorx, innovation industrial Internet of Things platform helping companies realize benefits from having their processes, systems, machines, networks and people connected;
- Vuforia, augmented reality solution supporting teams from sales, production, service as well as HR to make people more productive.

Ulga B+R, czyli jak oszczędzić na podatkach w związku z nabyciem pakietu ANSYS

Michał Hankus • HMP Adwokaci, Doradcy Podatkowi, Radcy Prawni • m.hankus@hmplegal.pl

Ulga badawczo-rozwojowa (B+R) to zachęta podatkowa, która umożliwia odliczenie od podstawy opodatkowania podatkiem dochodowym wydatków związanych z działalnością B+R – tzw. kosztów kwalifikowanych. Od 2018 r. w ramach ulgi odliczeniu podlega 100% wartości kosztów kwalifikowanych, bez względu na rozmiar przedsiębiorstwa, a w przypadku podmiotów mających status centrum badawczo-rozwojowego – aż 150%.

Aby zdać sobie sprawę, jak dużą korzyść można osiągnąć dzięki uldze, wystarczy prosta kalkulacja. W przykładzie zaprezentowanym w tabeli I wydatki związane z działalnością B+R stanowią zaledwie około 5% kosztów, a pozwalają zmniejszyć podatek o 50%.

Ulgę B+R można stosować bez względu na rodzaj prowadzonej działalności, choć istnieją branże, w których przynosi ona szczególne korzyści, np. w automotive, produkcji przemysłowej, automatyce, robotyce i przetwórstwie spożywczym. Co więcej, ulgę B+R można zastosować zarówno do projektów zakończonych sukcesem, jak i zaniechanych, a także do wieloletnich projektów będących w toku.

Co obejmuje działalność B+R?

Definicja działalności B+R jest bardzo pojemna i ogólna, wobec czego w praktyce istotną rolę odgrywają indywidualne interpretacje podatkowe wydawane na wniosek podatników. Zgodnie z tymi interpretacjami za działalność B+R można uznać m.in. aktywność ukierunkowaną na:

- opracowywanie i tworzenie nowych produktów, w tym prototypów,
- ulepszanie i zwiększanie cech funkcjonalnych istniejących produktów,
- produkcję zindywidualizowanych maszyn i urządzeń,
- opracowywanie nowych i rozwój istniejących technologii oraz procesów,
- tworzenie nowych rozwiązań i systemów informatycznych,
- optymalizację procesów, np. redukcję pracochłonności, automatyzację, wzrost produktywności.

Jak widać, organy podatkowe stosują przychylną podatnikom wykładnię i obejmują pojęciem działalności B+R bardzo szeroki zakres czynności.

Zakup ANSYS a ulga B+R

Do kosztów kwalifikowanych uprawniających do skorzystania z ulgi B+R zalicza się m.in. odpisy amortyzacyjne od środków trwałych oraz wartości niematerialnych i prawnych wykorzystywanych w działalności badawczo-rozwojowej. W związku z tym po zakupie oprogramowania (np. ANSYS) dokonywane od niego odpisy amortyzacyjne mogą być odliczane od podstawy opodatkowania w ramach ulgi B+R.

Można to oszacować na przykładzie klienta, który nabył oprogramowanie ANSYS z licencją na pięciu użytkowników za kwotę 200 000 zł. Okres amortyzacji podatkowej licencji wynosi dwa lata (tabela II).

Pozostałe koszty kwalifikowane

Koszty kwalifikowane to nie tylko odpisy amortyzacyjne od infrastruktury wykorzystywanej w działalności B+R, ale także – a może przede wszystkim – wartość wynagrodzeń i składek na ubezpieczenia społeczne personelu realizującego prace B+R, w tym personelu współpracującego na podstawie umów o dzieło i umów-zleceń.

W praktyce zwykle ta grupa kosztów stanowi istotną część ulgi, ponieważ personel realizujący prace B+R (konstruktorzy, inżynierowie, projektanci, laboranci, informatycy) jest wysoko opłacany z uwagi na swoje kwalifikacje, a ponadto do tego personelu zaliczają się również osoby pośrednio zaangażowane w te prace, np. kadra kierownicza, pracownicy działów marketingu czy utrzymania ruchu i produkcyjnych.

Wracając do poprzedniego przykładu, opisane oprogramowanie jest obsługiwane przez pięciu pracowników, którzy

Tabela I

Przychody		10 000 000 zł	
Koszty uzyskania przychodów (w tym 500 000 zł kosztów kwalifikowanych)		9 000 000 zł	
Kalkulacja podatku bez ulgi B+R		**Kalkulacja podatku z ulgą B+R**	
Dochód	1 000 000 zł	Dochód	1 000 000 zł
		Dochód po odliczeniu kosztów kwalifikowanych	500 000 zł
Podatek (19%)	190 000 zł	Podatek (19%)	95 000 zł

Tabela II

Odliczenie odpisów amortyzacyjnych – ulga B+R	
Wartość rocznej amortyzacji	100 000 zł
Wartość kosztów kwalifikowanych	100 000 zł
Roczna korzyść podatkowa – ulga B+R (podatek 19%)	19 000 zł
Dwuletnia korzyść podatkowa – ulga B+R (podatek 19%)	38 000 zł

Tabela III

Odliczenie wynagrodzeń – ulga B+R	
Wartość rocznego wynagrodzenia brutto 5 pracowników	360 000 zł
Wartość kosztów kwalifikowanych	360 000 zł
Roczna korzyść podatkowa – ulga B+R (podatek 19%)	~68 000 zł
Dwuletnia korzyść podatkowa – ulga B+R (podatek 19%)	~136 000 zł

Tabela IV

Koszt zakupu pakietu ANSYS a ulga B+R	
Koszt zakupu ANSYS	200 000 zł
Dwuletnia korzyść z tytułu ulgi B+R – amortyzacja	38 000 zł
Dwuletnia korzyść z tytułu ulgi B+R – wynagrodzenia	~136 000 zł
Łączna korzyść z tytułu ulgi B+R	~174 000 zł
Koszt zakupu – korzyść z tytułu ulgi B+R	~26 000 zł

zarabiają 6 000 zł brutto miesięcznie. Wówczas odliczenia kształtują się tak, jak podano w tabeli III.

Kolejną ważną kategorią kosztów kwalifikowanych są wydatki na materiały i surowce wykorzystywane w działalności B+R. Tu również jest dużo możliwości. Odwołując się do interpretacji podatkowych, można wymienić wydatki na materiały i surowce wykorzystywane bezpośrednio przy budowie prototypu urządzenia, przez odczynniki i wyposażenie laboratorium czy pracowni B+R, po odzież roboczą i artykuły BHP, meble czy papier do drukarek używanych w ramach projektów B+R.

Jak widać, przedsiębiorstwo nabywające z myślą o działalności B+R oprogramowanie ANSYS może nie tylko skorzystać z ulgi B+R w odniesieniu do tego konkretnie zakupu, ale z dużym prawdopodobieństwem w tym przedsiębiorstwie istnieje szereg innych wydatków, które mogą zostać zaliczone do kategorii kosztów kwalifikowanych i podlegać pod ulgę B+R.

Co więcej, z analizy przywołanych przykładów wynika, że oszczędność podatkowa osiągnięta dzięki uldze B+R może pozwolić w znacznym stopniu pokryć ciężar wydatku na zakup pakietu ANSYS.

Niewykorzystany potencjał ulgi B+R

Na koniec warto zwrócić uwagę, że według najnowszych danych Ministerstwa Finansów w 2018 r. z ulgi B+R, tak jak w poprzednich latach, skorzystało bardzo niewielu podatników, tj. mniej niż 1000 z około 500 000 podatników CIT, a wartość odliczeń wyniosła 1,7 mld zł wobec szacowanych przez Ministerstwo Finansów 5,3 mld zł.

Mimo możliwości dokonania odliczenia od 2018 r. 100% kosztów kwalifikowanych ulga B+R to nadal instrument, którego potencjału nie dostrzega ogromna część przedsiębiorstw.

Zachęcamy do kontaktu w celu przeprowadzenia wstępnej weryfikacji możliwości zastosowania w Państwa przypadku ulgi B+R.

Niniejsza publikacja ma charakter wyłącznie informacyjny, nie stanowi porady prawnej ani podatkowej i nie może być podstawą do wdrożenia omawianych w niej rozwiązań.

Triggo uczestnikiem ANSYS Startup Program

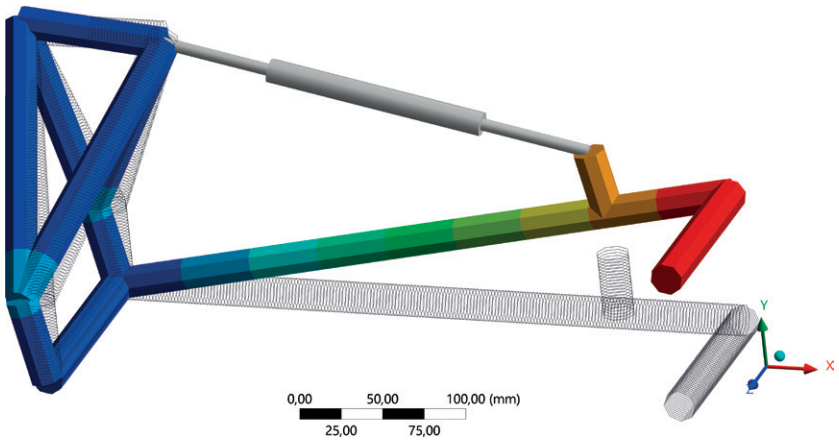
Michał Kowalewski • Triggo • michal.kowalewski@triggo.pl

Triggo to polski miejski pojazd elektryczny, zaprojektowany z myślą o wykorzystaniu w platformach współdzielenia środków transportu (*mobility as a service, car sharing*). Jego nowatorska konstrukcja jest objęta międzynarodową ochroną patentową w krajach o łącznej populacji 3,9 mld ludzi. Opatentowane rozwiązanie podwozia o zmiennym rozstawie kół pozwala Triggo na sprawne poruszanie się w ruchu miejskim oraz parkowanie na niewielkiej przestrzeni – podobnie jak w przypadku jednośladów, jednak z zachowaniem poziomu bezpieczeństwa, praktyczności i komfortu typowych dla małego samochodu miejskiego.

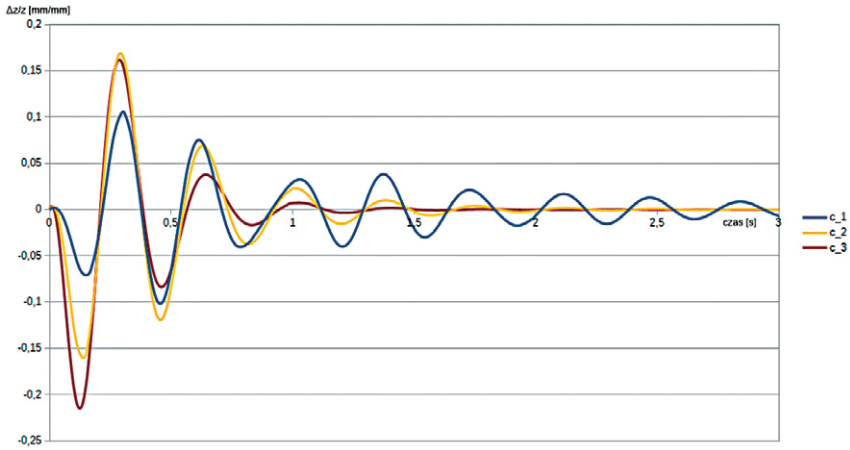
Dzięki zastosowaniu cyfrowego sterowania w technologii *drive-by-wire* pojazdem może skutecznie kierować posiadacz prawa jazdy kategorii B. W przyszłości Triggo może być łatwo zaadaptowany do autonomicznego systemu sterowania i przyczynić się do radykalnej zmiany nawyków użytkowników platform mobilności współdzielonej.

Firma Triggo jest objęta programem ANSYS Startup. To ułatwia jej prowadzenie symulacji na wielu polach.

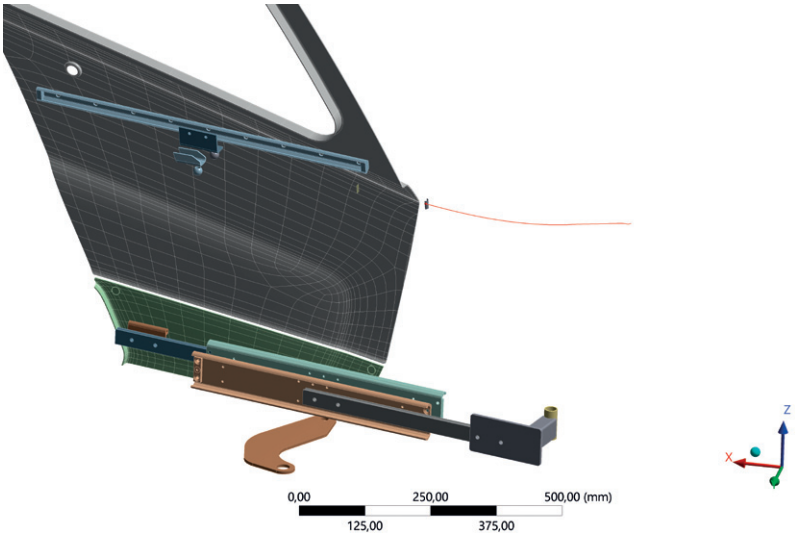
Triggo jest na etapie tworzenia kolejnych prototypów. Prace rozpoczynają się m.in. od przygotowania sparametryzowanego modelu CAD. Jest on następnie wykorzystywany w analizach *rigid body dynamics*. Pozwalają one przedstawić kinematykę i dynamikę. W modelu implementuje się elementy podatne, takie jak sprężyny czy tłumiki. Badane są odpowiedzi na zadane wymuszenia wynikające z charakteru pracy pojazdu. Wyznaczane są wartości sił i momentów w węzłach. Na podstawie analizy wyników przeprowadza się modyfikacje geometrii, które poprawiają pracę systemu



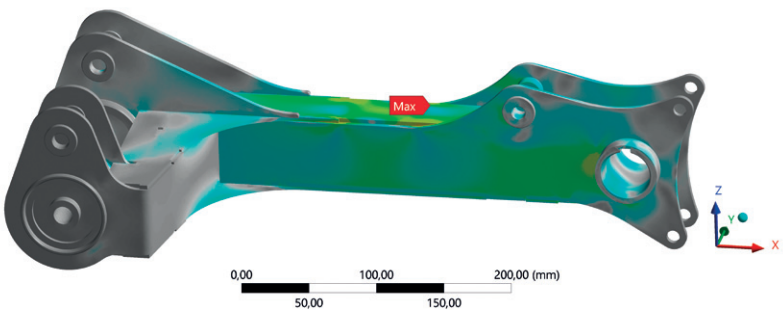
Rys. 1. *Układ wahacza wleczonego*



Rys. 2. *Przemieszczenie względne końca wahacza dla różnych parametrów amortyzatorów*



Rys. 3. *Tor ruchu rygla*



Rys. 4. *Wahacz wleczony*

komponentów, i dobierane są wartości sztywności oraz tłumień. Na rys. 1–4 przedstawiono wyniki analizy dla wahacza wleczonego tylnego oraz systemu zamykania drzwi.

Następnym polem wykorzystywania oprogramowania ANSYS są analizy *static structural*. Komponenty pojazdu bądź układy elementów są poddawane obciążeniom wyznaczonym w poprzednim kroku. Za pomocą programu SpaceClaim bardzo szybko można doprowadzić model do formy uproszczonej. Przekształcanie brył cienkościennych w modele shellowe czy wprowadzanie dodatkowych podziałów geometrii zajmuje dosłownie kilka minut. Sprawdza się maksymalne naprężenia, odkształcenia i przemieszczenia. Wyznacza się również zastępczą sztywność skrętną, która odnosi się do poszczególnych norm.

Na tym etapie często dołączana jest analiza topologiczna. Sugeruje ona konstruktorowi, w którym kierunku wprowadzić modyfikację elementu, tak aby zmniejszyć masę, ale zachować przy tym ograniczenia wynikające ze sztywności, wytrzymałości i możliwości produkcyjnych.

W trakcie projektowania podzespołów przeprowadza się analizy modalne. W ten sposób sprawdza się, czy częstotliwości wymuszeń panujących w układzie nie są zbliżone do częstotliwości rezonansowych konstrukcji.

Z racji obciążenia zmiennego wiele elementów jest sprawdzanych pod kątem zmęczenia. Dane materiałowe uzyskane od producenta są implementowane w oprogramowaniu, a na ich podstawie sprawdza się możliwą liczbę cykli pracy.

Przy wymianie informacji na linii analityk–konstruktor bardzo pomocne jest narzędzie ANSYS Viewer. Daje ono konstruktorowi dostęp do geometrii z wynikami. Można spojrzeć na model dokładnie tak, jak się chce, a nie tylko poprzez przygotowane zrzuty ekranu.

Dzięki oprogramowaniu ANSYS firma Triggo może sprawdzać poprawność projektu jeszcze na etapie modelu komputerowego. Wspiera ono działania konstruktorów na każdym kroku. W znacznym stopniu przyspiesza możliwość uzyskania gotowego produktu, zmniejszając przy tym koszty związane z liczbą niezbędnych prototypów.

ANSYS Motion
– rewolucja w analizach MBD

Jakub Lisicki
- MESco
- jlisicki@mesco.com.pl

W dobie prężnego rozwoju technologii coraz częściej konieczne jest wykonywanie skomplikowanych analiz numerycznych złożonych układów mechanicznych. Na przestrzeni lat powstało wiele środowisk obliczeniowych do prowadzenia symulacji kinematycznych i dynamicznych różnego rodzaju konstrukcji, jednak wszystkie miały liczne ograniczenia, nie były intuicyjne albo ich wydajność obliczeniowa była niewystarczająca. W tych okolicznościach narodziła się współpraca między spółką ANSYS a koreańskim przedsiębiorstwem Virtual Motion. Jej celem był rozwój nowej generacji środowiska obliczeniowego typu *multibody dynamics* (zwanego także analizą MBD). Tak powstał ANSYS Motion – zestaw narzędzi, które miały być wolne od słabości dotychczasowych rozwiązań, będący swoistym następstwem dostępnego dotychczas w obszarze środowiska ANSYS Workbench modułu Rigid Dynamics.

Czym się wyróżnia ANSYS Motion?

Głównym założeniem, którym się kierowano w trakcie rozwoju oprogramowania, było stworzenie środowiska obliczeniowego o jak najwyższej wydajności, przejrzystego i intuicyjnego, a jednocześnie uniwersalnego – dostosowanego do potrzeb różnych gałęzi przemysłu.

Pierwsze założenie udało się zrealizować poprzez implementację supersolvera DAFUL, którego przewagę nad konkurentami (takimi jak: Siemens LMS Virtual.Lab, RecurDyn czy też MSC ADAMS) udowodniono w wielu testach. Dodatkowo w ANSYS Motion jest uporządkowany i intuicyjny interfejs graficzny, więc przygotowywanie i przeprowadzanie symulacji nie sprawia użytkownikom problemów. Wewnątrz programu umieszczono wiele rozbudowanych bibliotek predefiniowanych komponentów i elementów konstrukcyjnych, co jeszcze upraszcza proces przygotowania modelu numerycznego. Jedną z wielu zalet jest także możliwość łatwego łączenia z oprogramowaniem MATLAB czy interfejsem FMI.

Funkcjonalności ANSYS Motion

Wersja podstawowa pozwala na wykonywanie symulacji *multibody dynamics*, analiz mechanicznych w zakresie liniowo-sprężystym i sprężysto-plastycznym, analiz modalnych, harmonicznych i zmęczeniowych, badań wibroakustycznych czy też obliczeń z dziedziny przepływu ciepła w stanie ustalonym i nieustalonym. Świetnie sobie radzi z układami o bardzo dużej liczbie stopni swobody. Ma narzędzia do planowania eksperymentu, a także optymalizacji parametrycznej. Dodatkowo do dyspozycji jest jedno z czterech środowisk specjalistycznych: Car Toolkit, Links Toolkit, Drivetrain Toolkit oraz Easyflex Toolkit.

Car Toolkit

Moduł Car Toolkit pozwala badać systemy i podsystemy samochodowe, takie jak układ kierowniczy, zawieszenie, koła czy hamulce. Umożliwia przeprowadzanie niezależnych analiz fragmentów pojazdów oraz łączenie wyników w całość. Jego dodatkowym atutem jest zintegrowana biblioteka opon, którą można wykorzystać w trakcie przygotowywania analizy. Podczas tworzenia modelu numerycznego można się posłużyć predefiniowanymi schematami obciążeń i manewrów, które mogą zachodzić w czasie użytkowania badanego komponentu. Cechy te czynią moduł Car Toolkit szczególnie przydatnym w branży automotive.

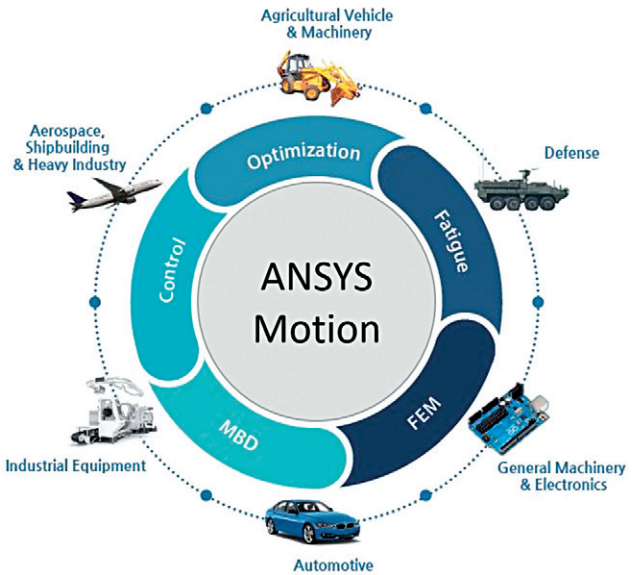
Links Toolkit

Moduł Links Toolkit umożliwia badanie wszelkiego rodzaju przekładni pasowych, linowych czy łańcuchowych. Jego wyróżnikiem są rozbudowane narzędzia do prostego generowania cięgna, bazujące na geometrii pojedynczego ogniwa oraz wskazaniach krzywej (będącej prowadnicą), a także do automatycznego tworzenia niezbędnych kontaktów między współpracującymi elementami.

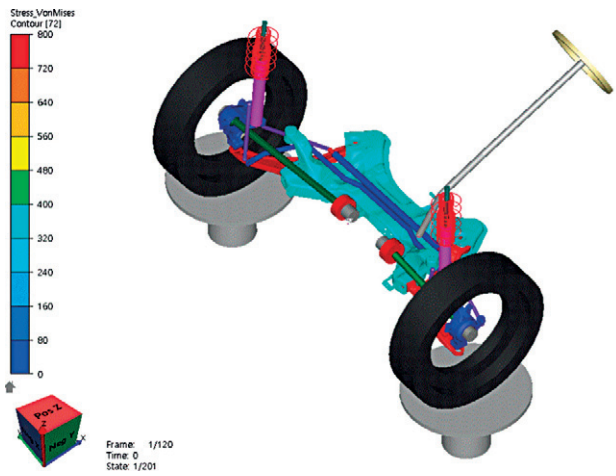
Drivetrain Toolkit

Moduł Drivetrain Toolkit jest przeznaczony do analiz przekładni zębatych. Można dzięki niemu prowadzić analizy dynamiczne, wyznaczać siły wzbudzenia, sprawdzać luz osiowy poszczególnych kół,

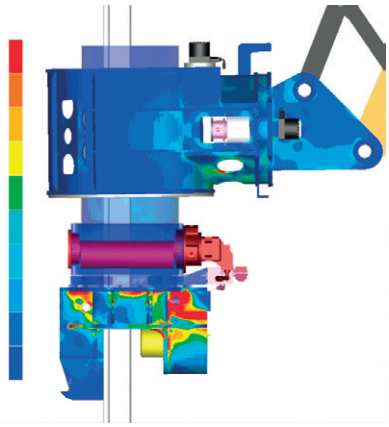
Rys. 1. *Pola zastosowań oprogramowania ANSYS Motion*



Rys. 2. *Analiza kinematyczna zawieszenia samochodu*



a także badać charakterystykę wibroakustyczną układu. Sporym atutem tego środowiska jest zintegrowany katalog łożysk wiodących producentów, takich jak SKF, NSK, Koyo, czy FAG.



Rys 3. *Bezsiatkowa analiza wytrzymałościowa młota wibracyjnego*

Easyflex Toolkit

Moduł Easyflex Toolkit pozwala wykonywać bezsiatkowe analizy elementów podatnych w złożonych układach kinematycznych. Dzięki temu osoby bez dużego doświadczenia w tworzeniu siatek elementów skończonych mogą przeprowadzać skomplikowane i dokładne analizy numeryczne.

Ze względu na swoje funkcjonalności pakiet ANSYS Motion jest niezwykle obiecujący. Znajdują się w nim praktycznie wszystkie moduły obliczeniowe niezbędne do przeprowadzania dowolnych symulacji mechanicznych. To sprawia, że jest to oprogramowanie uniwersalne i kompletne.

Dla kogo jest ANSYS Motion?

Ze względu na szerokie zastosowanie ANSYS Motion sprawdzi się w wielu dziedzinach. Jego możliwości mogą się okazać szczególnie przydatne w branży maszynowej, zbrojeniowej, górniczej, stoczniowej, a także w dziedzinie robotyki, transportu i w motoryzacji.

Oprogramowanie to zostało ciepło przyjęte na rynku azjatyckim, a japoński koncern samochodowy DENSO wybrał je jako główne narzędzie do wykonywania analiz MBD.

ANSYS Motion jest więc odpowiedzią na potrzeby klientów, którzy w analizach MBD muszą uwzględniać zarówno ciała sztywne, jak i odkształcalne, skomplikowane zagadnienia kontaktu lub dużą ilość nieliniowości; potrzebują środowiska obliczeniowego najnowszej generacji, które jest ciągle rozwijane i udoskonalane; lub w sytuacji, gdy dotychczas wykorzystywane oprogramowanie nie spełnia ich oczekiwań pod względem funkcjonalności bądź wydajności obliczeniowej. Jest to kompletny, samodzielny pakiet oprogramowania – nie jest wymagane posiadanie licencji Mechanical Enterprise.

W razie dodatkowych pytań zachęcamy do bezpośredniego kontaktu.

Analiza fizjologicznych skutków udaru balistycznego po niepenetrującym uderzeniu pocisku w ciało człowieka

Justyna Pinkos • Politechnika Łódzka • justyna.pinkos@p.lodz.pl
Zbigniew Stempień • Politechnika Łódzka
Anna Smędra • Uniwersytet Medyczny w Łodzi

Badania fizjologicznych skutków udaru balistycznego pokazują, że często decydują one o zdrowiu i życiu użytkowników tekstylnych osłon balistycznych w warunkach ostrzału. Ze względów etycznych takich badań nie można prowadzić z udziałem ludzi ani zwłok ludzkich. Praktycznie podczas każdego niepenetrującego uderzenia pocisku dochodzi do uszkodzenia narządów i tkanek ciała o skali zależnej od parametrów pocisku i efektywności balistycznej osłony. Stąd celem badań była ocena fizjologicznych skutków udaru balistycznego po niepenetrującym uderzeniu pocisku Parabellum 9×19 mm FMJ w tekstylny pakiet wykonany z tkaniny dwuosiowej i trójosiowej Kevlar 29 o porównywalnej masie powierzchniowej.

Na podstawie sekwencji obrazów tomografii komputerowej mężczyzny opracowano model numeryczny ciała ludzkiego. Badania numeryczne zweryfikowano na bazie badań eksperymentalnych z wykorzystaniem fizycznego modelu korpusu człowieka. W wyniku badań numerycznych i eksperymentalnych dla obu pakietów tekstylnych oceniano fizjologiczne skutki udaru balistycznego z uwzględnieniem deformacji organów oraz ciśnień występujących w miejscu uderzenia pocisku.

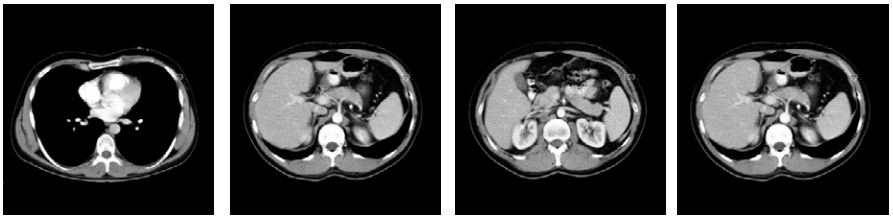
Model numeryczny korpusu człowieka

Model geometryczny korpusu człowieka opracowano z wykorzystaniem sekwencji obrazów (rys. 1) – poprzecznych przekrojów narządów wewnętrznych wykonanych za pomocą tomografu komputerowego. Obszar badań radiologicznych obejmował jamę klatki piersiowej, jamę brzuszną oraz jamę miednicy.

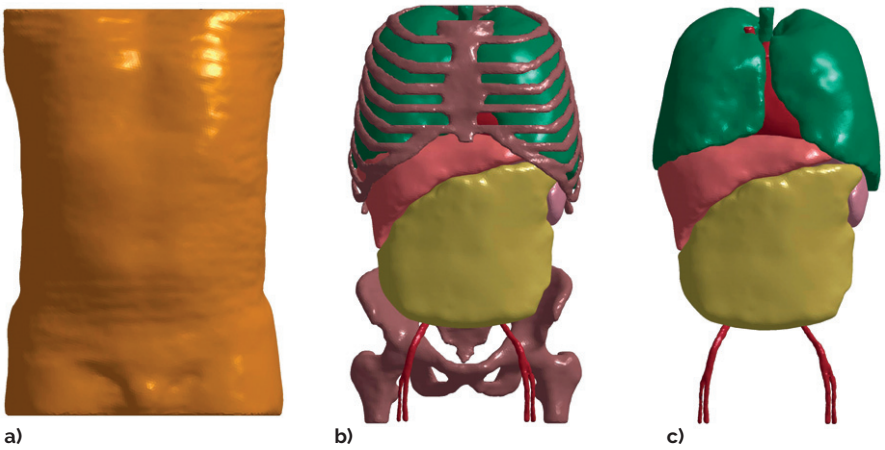
W modelu numerycznym (rys. 2) uwzględniono najważniejsze organy: mięsień serca; aortę; płuca z tchawicą; wątrobę; układ kostny obejmujący klatkę piersiową z mostkiem, kręgosłupem oraz miednicą; rdzeń kręgowy w kanale kręgowym; śledzionę; nerki; jelito cienkie i grube; układ mięśniowy ze skórą.

Model numeryczny warstw pakietu balistycznego

W programie Geomagic Design X opracowano model geometryczny warstw pakietu balistycznego dopasowanego do krzywizny ciała człowieka. Poszczególne warstwy modelowano w postaci

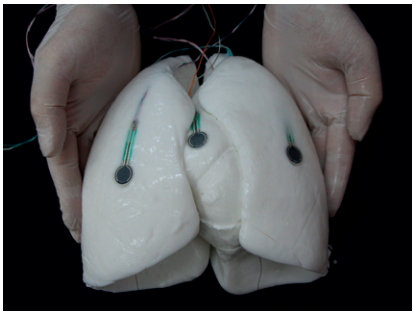


Rys. 1. *Wybrane obrazy poprzecznych przekrojów narządów wewnętrznych z badania radiologicznego*



Rys. 2. *Model numeryczny korpusu człowieka: a) układ mięśniowy, b) układ kostny z narządami wewnętrznymi, c) narządy wewnętrzne*

Rys. 3. *Model geometryczny pakietu balistycznego w postaci zhomogenizowanych powłok 2D*



Rys. 4. *Modele fizyczne serca i płuc*

zhomogenizowanych powłok 2D. Pakiet balistyczny składał się z 30 warstw. Na rys. 3 pokazano model ciała człowieka wraz z modelem pakietu balistycznego dopasowanego do jego krzywizny oraz przód pakietu.

Metodyka badań numerycznych modelu korpusu człowieka

Siatki elementów skończonych dla modeli geometrycznych narządów wewnętrznych korpusu człowieka, pocisku Parabellum 9 × 19 mm FMJ oraz pakietu balistycznego wygenerowano w programie ANSYS ICEM. Natomiast badania numeryczne ostrzału ciała chronionego przez pakiet balistyczny z tkanin dwuosiowej i trójosiowej Kevlar 29 przeprowadzono w programie LS-Dyna. Istotnym etapem przygotowania modelu do obliczeń było ustalenie kontaktujących się obiektów oraz określenie typu kontaktu i współczynników tarcia. Zastosowano typ kontaktu AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE i zdefiniowano kontakty pomiędzy obiektami modelu oraz współczynniki tarcia statycznego i dynamicznego (na podstawie danych z literatury [1–7]).

Kolejny etap definiowania warunków początkowych i brzegowych modelu do obliczeń numerycznych polegał na przyjęciu modeli materiałowych narządów wewnętrznych, pocisku oraz pakietów tekstylnych. Korzystając z literatury z zakresu biomechaniki, zdefiniowano parametry wytrzymałościowe modeli materiałowych narządów wewnętrznych ciała człowieka [8–14]. Na tej samej podstawie przyjęto parametry wytrzymałościowe dla ołowianego rdzenia i płaszcza pocisku Parabellum 9 × 19 mm FMJ dla modelu materiałowego *MAT_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK [7].

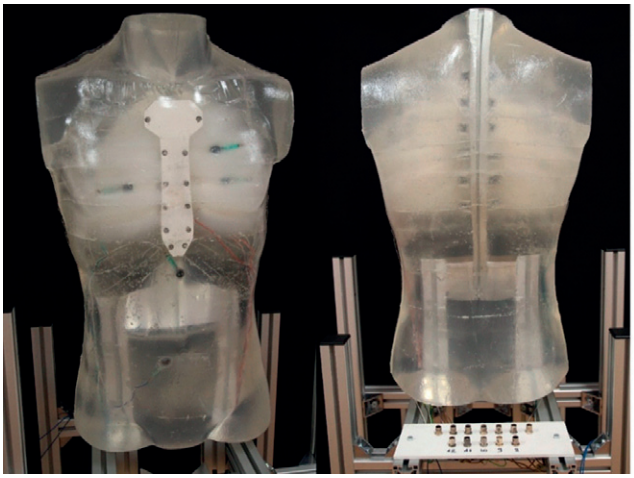
Aby ocenić wpływ struktury pakietu balistycznego na fizjologiczne skutki udaru balistycznego, zastosowano zróżnicowane rodzaje modeli materiałowych z zachowaniem takich samych parametrów wytrzymałościowych przędzy Kevlar 29 [1, 15–17]. Zaproponowano rodzaj modelu materiałowego dla powłoki 2D modelującej tkaninę dwuosiową *MAT_ORTHO_ELASTIC_PLASTIC, który łączy ortotropowe właściwości materiału sprężysto-plastycznego [18]. Aby określić kryterium zniszczenia dla materiału, przyjęto dodatkową kartę ustawień materiałowych *ADD_ERROSION. Dla analizowanej tkaniny trójosiowej Kevlar 29 przyjęto rodzaj modelu materiałowego *MAT_PLASTIC_KINEMATIC, który służy głównie do modelowania obiektów sprężysto-plastycznych [18].

Model fizyczny korpusu człowieka

Na podstawie opinii medycznej przyjęto założenie, że fizyczny model korpusu człowieka będzie miał: serce, płuca, układ mięśniowy i kostny. W pierwszym kroku opracowano modele płuc i serca, które wykonano z silikonu (rys. 4). Aby dobrać parametry silikonu, przeprowadzono badania statyczne jednoosiowego ściskania wypreparowanych próbek z płuc i serca świni. To pozwoliło na wyznaczenie charakterystyki naprężenia w funkcji odkształcenia. Następnie przeprowadzono serię badań jednoosiowego ściskania próbek silikonu przy różnych proporcjach wagowych jego składników. Porównano krzywe ściskania próbek płuc i serca pochodzących od świni z próbkami silikonowymi i w ten sposób wytypowano wariant składu chemicznego silikonu.

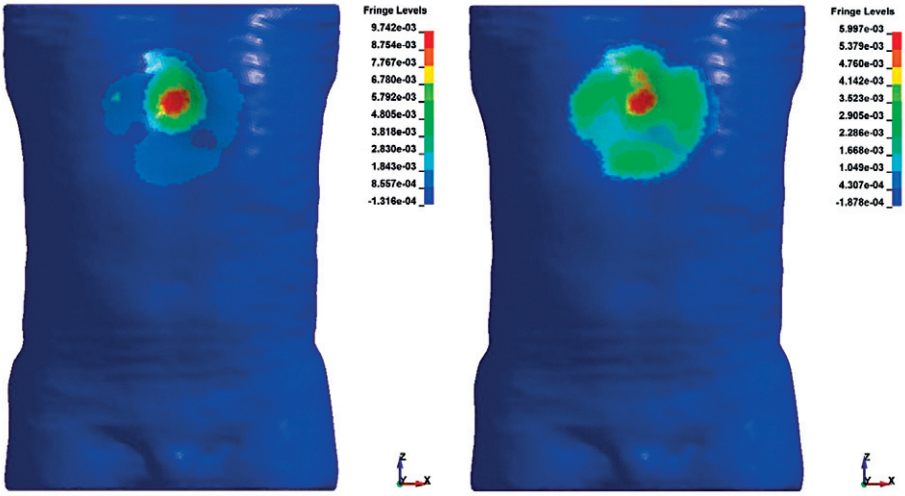
W następnym kroku przystąpiono do budowy układu kostnego. Model mostka wykonano z porowatej płyty PVC o grubości ok. 10 mm. Układ żeber powstał z płaskowników o grubości ok. 6 mm i szerokości ok. 20 mm. Żebra wykonano z tworzywa pleksiglas. W celu odwzorowania kształtów żeber każdą listewkę poddano obróbce cieplnej, która pozwoliła zamodelować kształt kości.

Wykonanie modelu układu kostnego polegało na precyzyjnym zamocowaniu każdej pary żeber na kręgosłupie oraz mostku. Model kręgosłupa wykonano z profilu aluminiowego. W ostatnim kroku wykonano układ mięśniowy z żelu balistycznego Clear Ballistics. Do pomiaru ciśnienia występującego podczas niepenetrującego uderzenia pocisku w modelu fizycznym korpusu człowieka (rys. 5) zastosowano czujniki siły nacisku.



Rys. 5. *Zdjęcia modelu fizycznego korpusu człowieka*

Rys. 6. *Model fizyczny korpusu ciała człowieka chroniony przed ostrzałem przez pakiet balistyczny z tkaniny: a) dwuosiowej, b) trójosiowej*



a) b)

Rys. 7. *Deformacja powierzchni ciała człowieka chronionego przez pakiet balistyczny z tkaniny: a) dwuosiowej, b) trójosiowej*

Rys. 8. *Uszkodzenie mostka po badaniach eksperymentalnych pakietu balistycznego z tkanin: a) dwuosiowych, b) trójosiowych*

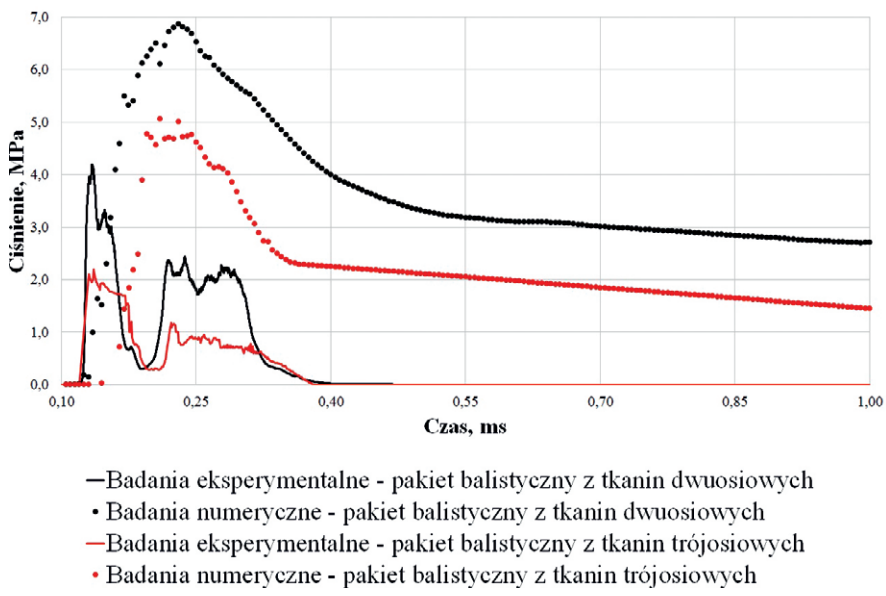
Metodyka badań eksperymentalnych

Badania kuloodporności wielowarstwowych miękkich pakietów tekstylnych przeprowadzono w Laboratorium Badań Balistycznych na Wydziale Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów Politechniki Łódzkiej.

Ocenę fizjologicznych skutków udaru balistycznego przeprowadzono z użyciem modelu fizycznego korpusu człowieka oraz pakietów wykonanych z tkanin dwuosiowych i trójosiowych Kevlar 29. W tunelu balistycznym przygotowano miękkie pakiety balistyczne składające się z 30 warstw tkanin. Poszczególne warstwy wykrojono zgodnie z szablonem przodu ciała człowieka, opracowanym na podstawie wymiarów klatki piersiowej modelu fizycznego (rys. 6).

Analiza fizjologicznych skutków udaru balistycznego

Charakter oraz następstwa fizjologicznych skutków udaru balistycznego, będącego efektem niepenetrującego uderzenia



Rys. 9. *Wartości ciśnienia w funkcji czasu dla uderzenia pocisku w mostek na linii położenia serca w badaniach eksperymentalnych i numerycznych*

pocisku, zależą od miejsca trafienia. Stąd jednym z przeprowadzonych wariantów ostrzału było uderzenie pocisku w mostek na linii położenia serca.

Z punktu widzenia analizy fizjologicznych skutków udaru balistycznego w zależności od pakietu balistycznego istotne mogą być wartość deformacji i sposób jej rozkładu na powierzchni ciała. Na rys. 7 przedstawiono deformację powierzchni ciała człowieka w początkowej fazie uderzenia pocisku podczas badań numerycznych.

W trakcie analizy rozkładu deformacji zauważono, że w przypadku zastosowania pakietu balistycznego z tkanin dwuosiowych uwidocznił się wpływ ich anizotropowej struktury i na powierzchni ciała można było wyróżnić dwa kierunki rozprzestrzeniania się odkształceń. W przypadku ochrony ciała pakietem balistycznym z tkanin trójosiowych kierunkowość rozchodzenia się deformacji wokół punktu uderzenia pocisku była mniejsza. To wpływ bardziej izotropowych właściwości struktury tkaniny trójosiowej.

Skutki obrażeń wewnętrznych powstałych w wyniku uderzenia pocisku uwidoczniły się na powierzchni ciała człowieka oraz w układzie kostnym. Podczas oględzin modelu fizycznego korpusu człowieka zauważono złamania mostka niezależnie od zastosowanego pakietu balistycznego (rys. 8).

Podczas oceny obrażeń zewnętrznych fizycznego modelu ciała człowieka zaobserwowano miejscowe mikrouszkodzenia żelu balistycznego. Największe obrażenia były w mostku, który uległ licznym pęknięciom, przy czym liczba pęknięć była większa po uderzeniu pocisku w pakiet balistyczny z tkanin dwuosiowych. Analiza medyczna wskazuje, że w wyniku przerwania ciągłości anatomicznej mostka może dojść do uszkodzenia wewnętrznych struktur naczyniowo-nerwowych chronionych przez mostek. Specyfika złamania kości w odróżnieniu od innych uszkodzeń jest taka, że są to złamania wieloodłamkowe, w których odłamy mogą się stać pociskami wtórnymi.

Na kolejnym etapie analizowano wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych w postaci ciśnień wywieranych w modelu fizycznym i numerycznym ciała człowieka po uderzeniu pocisku w mostek (rys. 9).

Zarówno w badaniach numerycznych, jak i eksperymentalnych (rys. 9) stwierdzono, że większe wartości ciśnień w mostku występują podczas ochrony ciała pakietem balistycznym z tkanin dwuosiowych niż z tkanin trójosiowych. W wyniku uderzenia pocisku w pakiet z tkanin dwuosiowych nacisk jest bardziej miejscowy i obejmuje mniejszą powierzchnię ciała, co wpływa na większe ciśnienie w miejscu uderzenia penetratora. W przypadku pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych siła nacisku rozkłada się na większej powierzchni i maksymalna wartość ciśnienia w miejscu uderzenia pocisku jest mniejsza. Dodatkowo na podstawie przebiegu ciśnienia z badań eksperymentalnych można wnioskować, że charakterystyczny spadek, a następnie wzrost wartości ciśnienia jest wynikiem pęknięcia mostka.

Podsumowanie

Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych fizjologicznych skutków udaru balistycznego po niepenetrującym uderzeniu pocisku w pakiety tekstylne składające się z 30 warstw tkanin aramidowych. Zauważono istotny wpływ struktury tkaniny pakietu na obrażenia w fizycznym i numerycznym modelu korpusu człowieka. W przypadku tkaniny trójosiowej istnieje możliwość zminimalizowania deformacji i wartości ciśnienia w miejscu uderzenia pocisku. Z punktu widzenia medycznego prowadzi to do mniejszej traumy balistycznej, obejmującej pęknięcie żebra, rozerwanie miąższu płuc czy zaburzenia rytmu serca. Przy ochronie pakietem z tkaniny dwuosiowej obrażenia wewnętrzne mogą być większe, gdyż wartość deformacji i ciśnienia w miejscu uderzenia były wyższe. Struktura miękkiego pakietu balistycznego ma istotny wpływ na skalę traumy balistycznej potencjalnego użytkownika kamizelki kuloodpornej.

LITERATURA

[1] C.T. Lim, V.P.W. Shim, Y.H. Ng, *Finite Element Modeling of the Ballistic Impact of Fabric Armor*, „International Journal of Impact Engineering", nr 28, 2008, s. 13–31.

[2] J.C. Roberts i in., *Modeling Nonpenetrating Ballistic Impact on a Human Torso*, Johns Hopkins Apl Technical Digest, t. 26, nr 1, 2005.

[3] J.C. Roberts i in., *Computational and Experimental Models of the Human Torso for Non-penetrating Ballistic Impact*, „Journal of Biomechanics", t. 40, 2007, s. 125–136.

[4] V.B.C. Tan, X.S. Zeng, V.P.W. Shim, *Characterization and Constitutive Modeling of Aramid Fibers at High Strain Rates*, „International Journal of Impact Engineering", t. 35, nr 11, 2007, s. 1303–1313.

[5] M.P. Rao i in., *Modeling the Effects of Yarn Material Properties and Friction on the Ballistic Impact of a Plain Weave Fabric*, „Composite Structures", t. 89, nr 4, 2009, s. 556–566.

[6] W. Shen i in., *Characterizing the interaction among bullet, body armor, and human and surrogate targets*, „Journal of Biomechanical Engineering", t. 132, nr 12, 2010.

[7] J. Dominiak, Z. Stempin, *Modelowanie numeryczne i analiza kuloodporności wielowarstwowych pakietów wykonanych z włókien paraaramidowych*, „Problemy Mechatroniki Uzbrojenie, Lotnictwo, Inżynieria Bezpieczeństwa", t. 7, nr 1 (23), 2016, s. 43–60.

[8] K.F. Yuen, *The Development of a Numerical Human Body Model for the Analysis of Automotive Side Impact Lung Trauma*, UWSpace, 2009, http://hdl.handle.net/10012/5005.

[9] Z. Li i in., *Rib fractures under anterior-posterior dynamic loads: Experimental and finite-element study*, „Journal of Biomechanics", t. 43, nr 2, 2010, s. 228–234.

[10] V. Esat, D.W. Van Lopik, M. Acar, *Combined multi-body dynamic and FE models of human head and neck*, „IUTAM Symposium on Impact Biomechanics: Fundamental Insights to Applications, Solid Mechanics and Its Applications", t. 124, 2005.

[11] J.C. Walker i in., *MRI-based finite-element analysis of left ventricular aneurysm*, „American Journal of Physiology Heart Circulatory Physiology", t. 289, nr 2, 2005.

[12] J.Z. Zhao, G. Narwani, *Development of human body finite element model for restraint system R&D applications*, TAKATA-Automative Systems Laboratory, Inc., nr 05–0399, 2005.

[13] Y. Shao i in., *Blunt liver injury with intact ribs under impacts on the abdomen: a biomechanical investigation*, PLoS ONE 8 (1), 2013.

[14] A.R. Kemper i in., *Multi-scale biomechanical characterization of human liver and spleen*, „Proceedings of the 22nd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles" (ESV).

[15] P.M. Cunniff i in., *High performance „M5" fiber for ballistics/structural composites*, „The 24th Army Science Conference, Orlando, 2004.

[16] M. Szudrowicz, K. Rutyna, K. Jamroziak, *Osłony balistyczne – laminaty na bazie tkanin aramidowych*, Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, 2005.

[17] Du Pont de Nemours & Company, Inc., Aramid Fibers, https://polycomp.mse.iastate.edu/files/2012/01/3-Aramid-Fibers.pdf.

[18] LS-Dyna, *Keyword User's Manual*, t. II, Material Models, 2012, Version 971, Livermore Software Technology Corporation.

Wpływ procesu wtrysku wzmacnianych komponentów polimerowych na dokładność strukturalnych symulacji numerycznych

Damian Bodniewicz • WABCO Polska • damian.bodniewicz@wabco-auto.com

Do najważniejszych materiałów wykorzystywanych w przemyśle samochodowym należą: stal, aluminium oraz materiały polimerowe zwane tworzywami sztucznymi. Ostatnia grupa jest najkrócej obecna w historii ludzkości – pierwsze wzmianki naukowe dotyczące wytwarzania polimerów pojawiły się dopiero w połowie lat dwudziestych XX w. [1]. Jednak to właśnie tworzywa sztuczne przeżywają dziś najbardziej dynamiczny rozwój, czego głównym motorem jest niska gęstość materiału, możliwość relatywnie łatwego formowania oraz otrzymywania elementów niewymagających dodatkowych zabiegów po produkcji.

Coraz bardziej imponujące właściwości mechaniczne i termiczne tworzyw skutkują ich nowymi zastosowaniami; w wielu przypadkach zastępują one tradycyjne materiały. Zjawisko to jest tym bardziej interesujące, gdy weźmie się pod uwagę, że średnio w porównaniu ze stalą konstrukcyjne tworzywa sztuczne wykazują:

- o dwa rzędy mniejszą sztywność (E),
- o rząd mniejszą wytrzymałość doraźną (Rm),
- kilka do kilkunastu razy wyższą rozszerzalność cieplną (α).

Ze względu na budowę tworzywa sztuczne można podzielić na: termoplasty, duroplasty, elastomery i elastomery termoplastyczne. Niniejszy artykuł skupia się na termoplastach, które jako polimery nieusieciowane wykazują wysoką sztywność w temperaturze otoczenia, a podgrzewane miękną aż do przejścia w stan uplastyczniony, umożliwiający relatywnie łatwe ich formowanie, np. metodą wtrysku ciśnieniowego do formy.

Polimery termoplastyczne ze wzmocnieniem

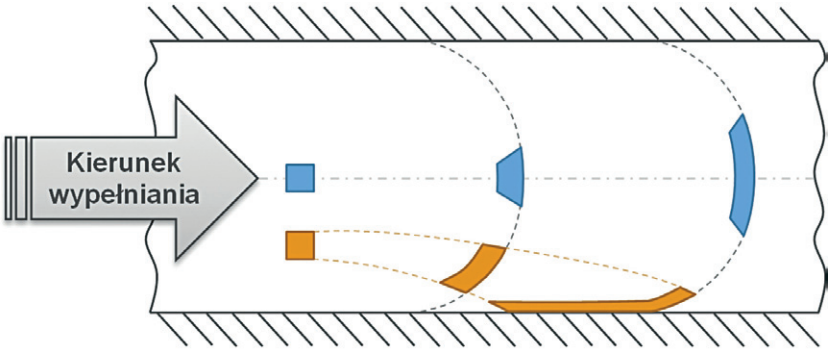
Jednym z kamieni milowych na drodze rozwoju materiałów polimerowych było zastosowanie fazy wzmacniającej w postaci wypełniaczy, np. ciętych, krótkich włókien (szklanych, węglowych, aramidowych). Wprowadzone do termoplastu wzmocnienie przenosi w dużej mierze działające na materiał zewnętrzne obciążenie. W rezultacie wzrasta np. sztywność i wytrzymałość materiału w kierunku ułożenia włókien, które charakteryzuje stosunek długości do ich średnicy zwykle mieszczący się w przedziale 5÷40.

Proces orientacji łańcuchów polimeru i wzmocnienia

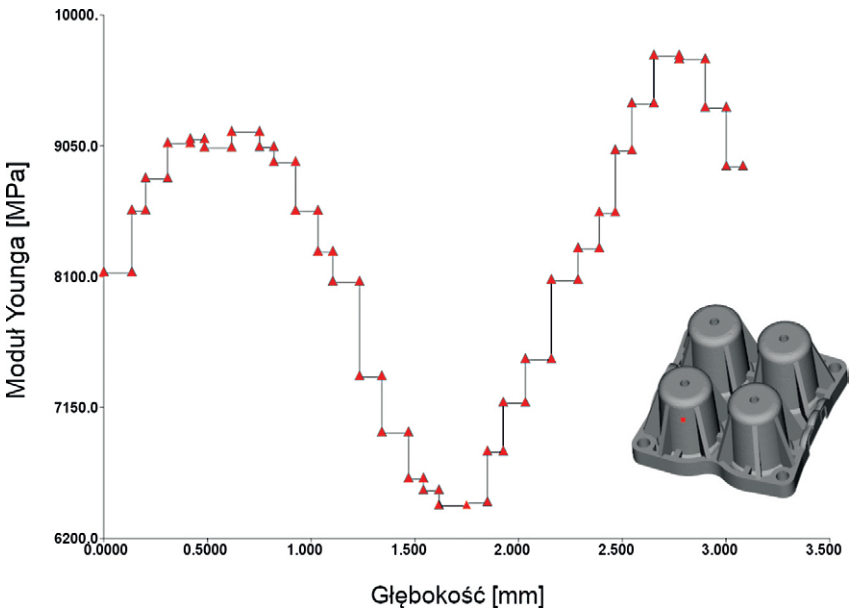
We wnętrzu formy wtryskowej stop ulega ścinaniu w okolicy ścianek, na drodze zróżnicowania lepkości między szybko ochładzaną warstwą przyścienną a gorącym centralnym rdzeniem. Dodatkowo na czole strugi polimer jest lokalnie rozciągany przez napór dostarczanego na bieżąco materiału.

Schematycznie proces orientacji materiału polimerowego przedstawiono na rys. 1. Można zauważyć, że dwie identyczne objętości materiału są poddane odmiennym trybom obciążenia i sposobom deformacji.

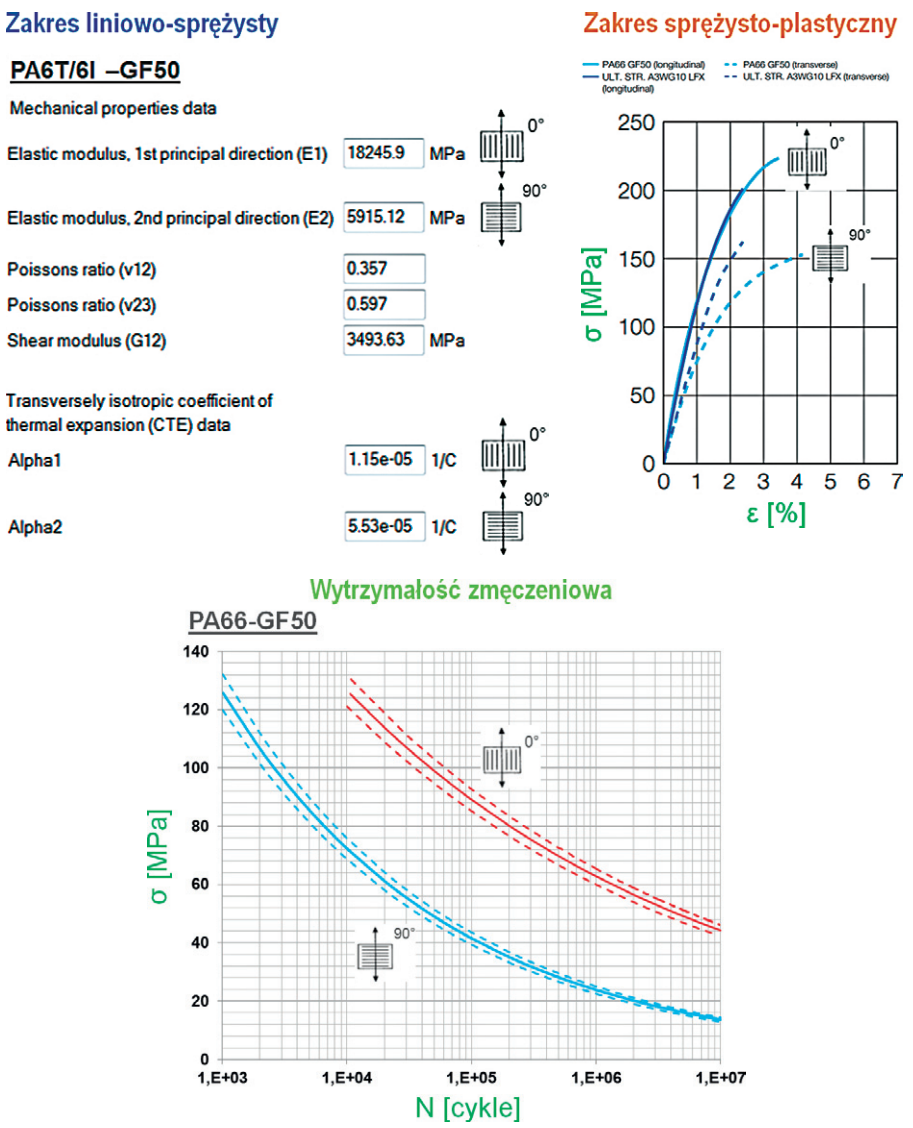
Mikroskopowo dochodzi do orientacji nieuporządkowanych i splątanych łańcuchów polimeru stanowiącego matrycę kompozytu, którym jest polimer ze wzmocnieniem. Jednocześnie w skali makro ten sam polimer jest w ciągłej i dynamicznej interakcji z fazą zbrojenia (ciętymi włóknami), która ulega podobnemu



Rys. 1. *Orientacja materiału polimerowego w trakcie wtrysku do formy [2]*



Rys. 2. *Zróżnicowanie modułu Younga po grubości 3 mm ścianki wypraski wykonanej z polimeru PBT z dodatkiem 30% ciętych włókien szklanych określonych wagowo*



Rys. 3. *Porównanie właściwości mechanicznych i termicznych w kierunku ułożenia fazy wzmocnienia (0°) oraz prostopadle do niego (90°) [3–4]*

ukierunkowaniu. Finalnie na wskroś ścianki elementu otrzymuje się zróżnicowanie orientacji zarówno łańcuchów, jak i włókien, przy czym orientacja łańcuchów może ulec częściowej relaksacji w czasie i w podwyższonych temperaturach.

Przykładowym rezultatem opisanego procesu są lokalne zmiany modułu sztywności po grubości 3 mm ścianki wypraski wykonanej z PBT-30GF, pokazane na rys. 2. Zaprezentowany przebieg uzyskano w wyniku analizy numerycznej formowania wtryskowego w programie Autodesk Moldflow.

Można zauważyć, że wartości w kierunku głównym ułożenia włókien są najwyższe w niedużej odległości od ścianek formy i osiągają minimum w części środkowej, gdzie znaczna część włókien szklanych nie jest zorientowana zgodnie z kierunkiem płynięcia uplastycznionego polimeru.

Wpływ orientacji na właściwości mechaniczne i termiczne

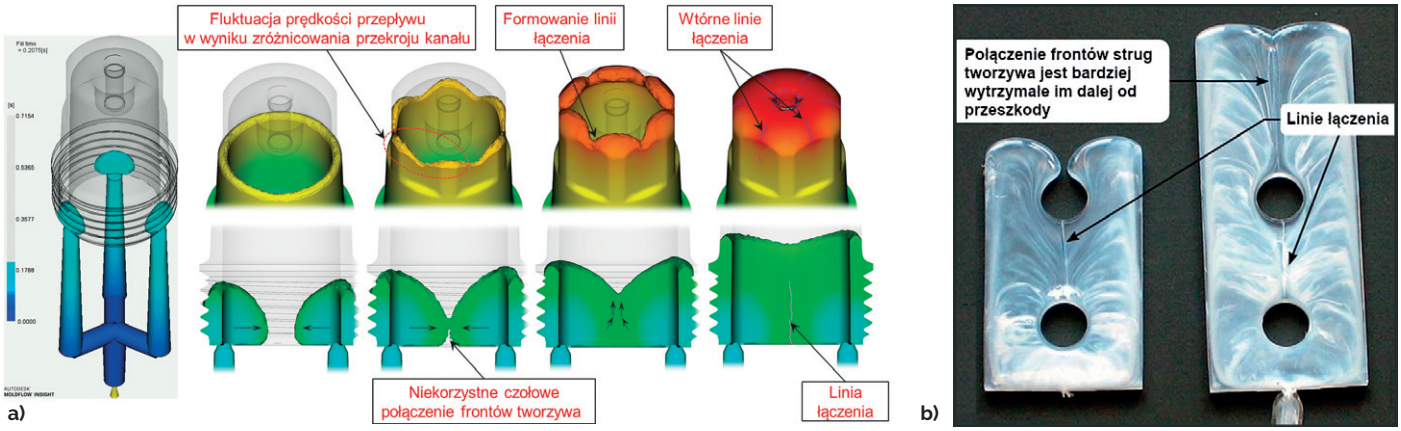
Do zróżnicowania właściwości mechanicznych oraz termicznych w wyprasce dochodzi zarówno w głąb grubości jej ścianek, jak i lokalnie, w zależności od kierunku płynięcia tworzywa. Na rys. 3 zaprezentowano różnicę parametrów w kierunku ułożenia włókien oraz poprzecznie do niego.

Na uwagę zasługuje znaczna dysproporcja właściwości między skrajnymi orientacjami umocnienia. Przykładowo dla: sztywności $E_1 = 3 \cdot E_2$, wytrzymałości doraźnej $Rm_1 = 1{,}5 \cdot Rm_2$, czy rozszerzalności cieplnej $\alpha_2 = 4{,}8 \cdot \alpha_1$. Mając na uwadze wykazane fluktuacje parametrów na grubości ścianek komponentu oraz lokalną anizotropię będącą efektem kierunkowości wypełniania wnęki formy, poważnym błędem byłoby rozpatrywanie wypraski jako wykonanej z materiału izotropowego, nawet z uwzględnieniem ewentualnych współczynników korekcyjnych. Tak przygotowany model symulacyjny w zależności od kierunku działania obciążenia byłby lokalnie przeszacowany bądź niedoszacowany, np. pod kątem sztywności materiału.

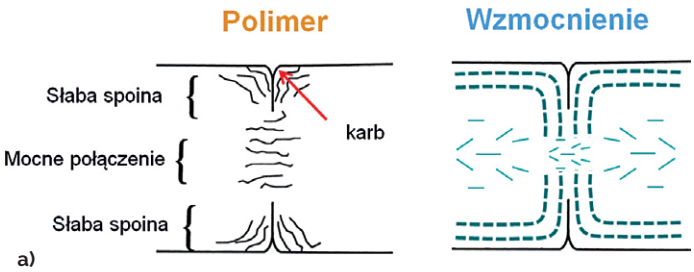
Linia łączenia strug tworzywa

Kolejnym utrudnieniem modelowania numerycznego komponentów z termoplastów wzmocnionych ciętymi włóknami jest linia łączenia strumieni tworzywa (*weld line*). W definicji jest to linia, a w rzeczywistości płaszczyzna połączenia strug polimeru, powstająca po rozdzieleniu czoła stopu na przeszkodzie (np. po ominięciu rdzenia formującego otwór), albo strumieni z różnych punktów wtrysku bądź na drodze przepływu przez zróżnicowane pola przekroju – rys. 4.

Obecność takich linii łączenia wiąże się ze spadkiem sztywności oraz wytrzymałości w miejscu ich lokacji, o czym świadczy



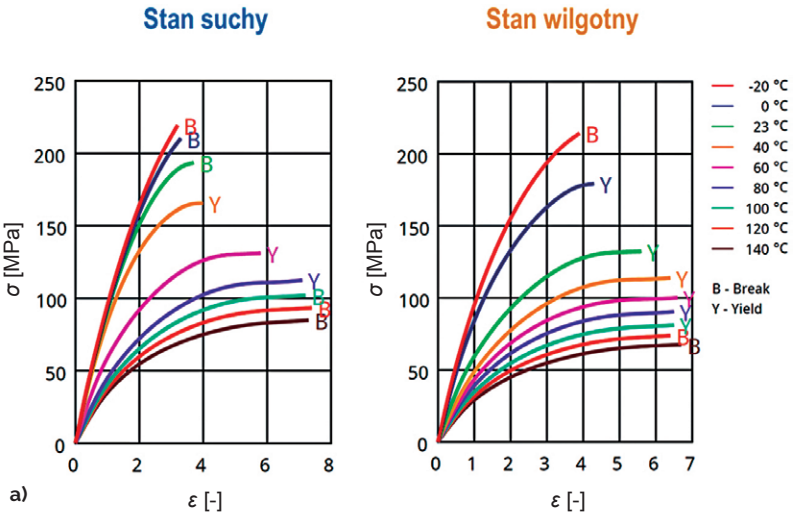
Rys. 4. *Linia łączenia strug tworzywa: a) symulacja procesu formowania; b) widok rzeczywistej próbki materiałowej [5]*



Polimer	Udział GF [%]	*Rm* materiału [MPa]	*Rm* linii łączenia [MPa]	Retencja [%]
PSU	30	115	70	62
SAN	30	110	45	40
PP	20	65	30	47
PP	30	-	-	34
PPS	10	70	25	38
PPS	40	140	28	20
PA 66	10	-	-	87-93
PA 66	30	-	-	56-64

b)

Rys. 5. *Linia łączenia strug tworzywa: a) schemat struktury wewnętrznej polimeru zbrojonego włóknami krótkimi z podziałem na polimer stanowiący matrycę oraz zbrojenie włóknami [6]; b) porównanie wytrzymałości materiału w miejscu połączenia w odniesieniu do materiału rodzimego [7]*



PA66-GF 35

Mechanical properties	dry / cond	Unit
Tensile modulus	10000 / 7200	MPa
Stress at break	190 / 130	MPa
Strain at break	3 / 5	%
Tensile creep modulus, 1h	* / 6100	MPa
Tensile creep modulus, 1000h	* / 5300	MPa
Charpy impact strength, +23°C	85 / 100	kJ/m²
Charpy impact strength, -30°C	70 / -	kJ/m²
Charpy notched impact strength, +23°C	13 / 22	kJ/m²
Charpy notched impact strength, -30°C	10 / -	kJ/m²

b)

Rys. 6. *Porównanie właściwości mechanicznych PA66 z 35% udziałem włókien szklanych w stanie suchym i kondycjonowanym [8]*

orientacyjna wartość retencji wytrzymałości materiału zamieszczona w tabeli na rys. 5*b*. Powodem takiego stanu rzeczy są:

- karb mechaniczny na powierzchni wypraski;
- prostopadłe ułożenie włókien wobec kierunku przepływu stopu;
- osłabienie połączenia w wyniku np. przechłodzenia czoła łączących się strumieni, gromadzenia się zanieczyszczeń i/lub powietrza pomiędzy frontami, czy spowodowane niekorzystnymi parametrami procesu wtrysku.

W przypadku komponentów mechanicznych, np. produkowanych w firmie WABCO Polska, linie łączenia są często nie do uniknięcia ze względu na skomplikowaną konstrukcję elementów bądź konieczność zapewnienia prawidłowego przebiegu procesu produkcyjnego poprzez użycie licznych punktów wtrysku. W rezultacie wykonanie wiarygodnych, strukturalnych obliczeń numerycznych wymaga uwzględnienia powstałych w procesie produkcyjnym linii łączenia strug, których rozmieszczenie można przewidzieć, wykonując analizę procesu wtrysku. Jednocześnie niezbędne jest wdrożenie dodatkowych kryteriów oceny wytężenia materiału w miejscach łączenia strug tworzywa, czyli w obszarach o obniżonej możliwości przenoszenia obciążenia w porównaniu z materiałem rodzimym.

Wpływ wilgoci na zachowanie niektórych polimerów

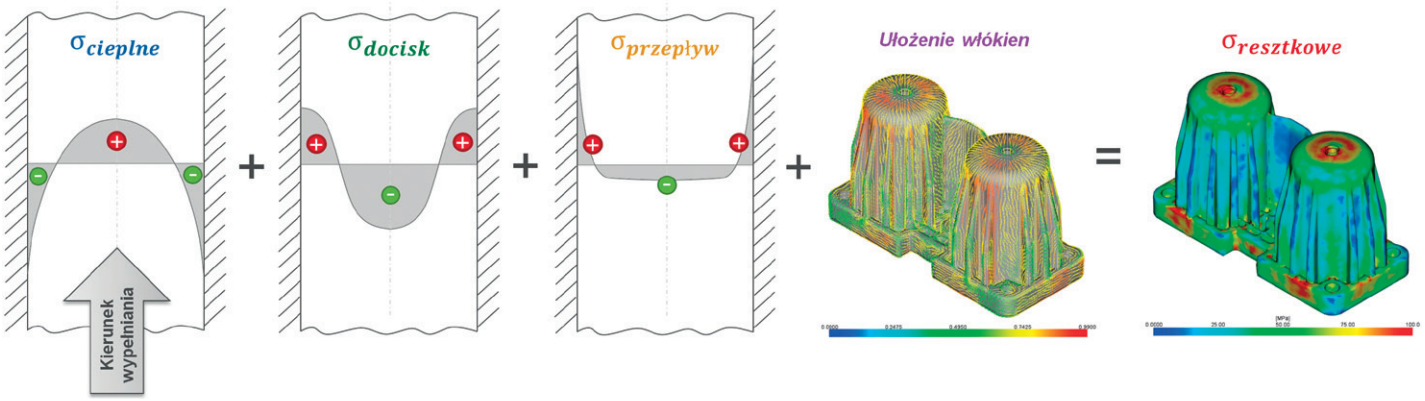
Specyficzną grupą wśród termoplastów są poliamidy (PA). Te popularne materiały na komponenty techniczne mają cenne właściwości mechaniczne i termiczne, które niestety ulegają wahaniom w zależności od zawartości wody w wyprasce. Zmiana polega na przesunięciu temperatury zeszklenia materiału (T_g), która stanowi granicę między obszarem zachowania energo-sprężystego a entropowo-sprężystego. Im większa wilgotność, tym mniejsza sztywność i wytrzymałość materiału, np. na rozciąganie, lecz jednocześnie można rejestrować większe jego dopuszczalne odkształcenie – rys. 6.

Wszystko zaczyna się podczas procesu produkcyjnego, w którym wymaga się, by dostarczony w postaci granulatu materiał był dokładnie osuszony, a zawartość wilgoci nie przekraczała zalecanego poziomu (np. PA – 0,2%, PBT – 0,02%, POM – 0,05%). W rezultacie z wtryskarki otrzymuje się produkt w stanie suchym. Warto zaznaczyć, że właśnie w takim stanie element jest poddawany finalnej ocenie w oprogramowaniu symulacyjnym, np. Autodesk Moldflow. Stąd analiza przyszłego produktu, np. pod kątem deformacji czy stanu wytężenia, już na początku jest obarczona błędem, ponieważ komponenty z materiałów chłonących wodę pobierają ją stopniowo z otoczenia w czasie użytkowania lub w czasie kondycjonowania w komorach klimatycznych.

Poprodukcyjne naprężenia resztkowe w wyprasce

Naprężenia w materiale kojarzone są zazwyczaj przez inżynierów jako efekt przyłożonego do konstrukcji obciążenia zewnętrznego (np. mechanicznego, termicznego). W przypadku elementów z tworzyw termoplastycznych warto mieć jednak na uwadze również naprężenia resztkowe (*residual stresses*), stanowiące pozostałość procesu produkcyjnego (rys. 7).

W rezultacie kilku zjawisk, które zostaną przedstawione dalej, podczas wytwarzania komponentów z tworzywa sztucznego otrzymuje się z wtryskarki elementy mniej lub bardziej wstępnie obciążone polem naprężeń i odkształceń.



Rys. 7. *Schemat powstawania naprężeń resztkowych w wyprasce z termoplastu ze wzmocnieniem w postaci ciętych włókien. Na podstawie [2]*

Każdy inżynier konstruktor czy zajmujący się analizami numerycznymi powinien być tego świadom, przystępując do oceny stanu wytężenia konstrukcji poddanej obciążeniom roboczym. To ważne, ponieważ stan naprężeń resztkowych może czasem niebezpiecznie zredukować poziom dopuszczalnych obciążeń zewnętrznych.

Powstaje pytanie, dlaczego wtryskiwane wypraski są obciążone już na początku użytkowania i czy można temu przeciwdziałać? Mając na uwadze pochodzenie naprężeń resztkowych, zasadniczo można je podzielić na:

- **Naprężenia cieplne:** są związane z nierównomiernym odbieraniem ciepła z wypraski w formie, a co za tym idzie zróżnicowanym skurczem w różnych jej obszarach. Należy pamiętać, że obrzeża komponentu są gwałtownie chłodzone przez odbiór ciepła w kontakcie z relatywnie zimnymi ściankami formy, natomiast we wnętrzu, a zwłaszcza w akumulacjach materiału, dalej istnieją obszary uplastycznionego polimeru. Dodatkowo sprawę komplikuje temperatura przejścia szklistego (T_g), poniżej której termoplast gwałtownie zyskuje m.in. na sztywności i opiera się skurczowi gorętszych obszarów. Na ściankach wypraski zostają wzbudzone naprężenia ściskające, a w jej wnętrzu – rozciągające. Ten stan potrafi być szczególnie wzmocniony w termoplastach częściowo krystalicznych, które wykazują większy skurcz materiałowy, wywołany powstawaniem uporządkowanej i upakowanej fazy krystalicznej [1].
- **Naprężenia wynikające z docisku:** nieodłącznym etapem procesu wtrysku jest faza docisku, której celem jest kompensacja skurczu ochładzanego termoplastu. Proces docisku – jeżeli jest poprawnie zaplanowany i przeprowadzony – przeciwdziała nadmiernemu skurczowi materiału prowadzącemu do zapadnięć na powierzchni bądź niebezpiecznych pustek wewnętrznych. Niestety w przypadku zbyt wysokich wartości ciśnienia element zostaje nadmiernie „napompowany". W rezultacie w sztywniejszej warstwie przyściennej mogą się pojawić naprężenia rozciągające, a pod nią – w części środkowej – naprężenia ściskające.
- **Naprężenia wywołane przepływem plastycznego rdzenia w okolicy zastygających ścianek:** mechanizm ich powstawania polega na wzbudzeniu naprężeń rozciągających w zastygającej warstwie przyściennej, która jest ciągnięta przez przemieszczający się pod nią plastyczny rdzeń [2].
- **Naprężenia wynikające z obecności wypełniaczy:** można je podzielić w zależności od skali analizowania problemu. Lokalnie na drodze różnicy współczynników rozszerzalności cieplnej termoplastu i wzmacniających go np. ciętych włókien szklanych dochodzi do powstania naprężeń na granicy włókno–polimer. Z drugiej strony obecność takiego wypełniacza wprowadza globalnie dla wypraski anizotropię właściwości mechanicznych i termicznych, co komplikuje opis procesu skurczu. Skurcz w kierunku ułożenia włókien jest zdecydowanie mniejszy od tego w kierunku do niego prostopadłym (np. dla PA6T/6I-50GF jest to stosunek ok. 6:1) [3].

W rezultacie z produkcji otrzymuje się wypraskę zdeformowaną po wtrysku oraz z ukrytymi naprężeniami resztkowymi. Może to utrudnić spełnienie wymagań wymiarowych przez produkt. Dodatkowo w przypadku zbyt wysokich naprężeń rozciągających na powierzchni mogą się pojawić pęknięcia naprężeniowe, zazwyczaj niedługo po otwarciu formy.

Gdy wstępne obciążenie komponentu wynika z któregokolwiek z wymienionych powodów (prócz orientacji fazy wzmocnienia), pomocne może się okazać poddanie wypraski procesowi odpuszczania. Niestety wiąże się to z dodatkowymi kosztami oraz wydłużeniem czasu produkcji. Mając to na uwadze, niezwykle ważne jest zapewnienie prawidłowej konstrukcji elementu z termoplastu oraz parametrów procesu wtrysku. W tym celu nieodłącznym i wydaje się jedynym narzędziem do dyspozycji inżyniera (prócz doświadczenia), są analizy numeryczne, które – prawidłowo wykonane – mogą ukazać wady produktu niewidoczne na pierwszy rzut oka.

Podsumowanie

Artykuł jest wprowadzeniem do tematu modelowania numerycznego komponentów z termoplastów wzmacnianych ciętymi włóknami, którego przykłady zostaną zaprezentowane w kolejnym numerze biuletynu MESSENGER. Przedstawione zagadnienia skłaniają do wniosku, że niemożliwe jest wykonanie godnych zaufania symulacji obciążenia konstrukcji z takich materiałów polimerowych bez rozważenia np.: lokalnej anizotropii właściwości mechanicznych i termicznych, osłabienia materiału w miejscu linii łączenia strug tworzywa, wpływu wilgoci na poliamidy czy naprężeń resztkowych po produkcji. W rezultacie wymaga się od inżynierów ds. symulacji numerycznych stosowania zaawansowanych technik modelowania, uwzględniających historię i efekty procesu wtrysku w analizie strukturalnej, np. w środowisku ANSYS.

LITERATURA

[1] G.W. Ehrenstein, *Polymer Werkstoffe: Struktur – Eigenschaften – Anwendung*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2011.
[2] H. Zawistowski, D. Frenkler, *Konstrukcja form wtryskowych do tworzyw termoplastycznych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1986.
[3] Baza danych programu Autodesk Moldflow Insight.
[4] BASF Corporation, *Ultramid Structure Brochure*.
[5] https://www.ptonline.com.
[6] R.A. Malloy, *Plastic Part Design for Injection Molding*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2010.
[7] BASF Corporation, *Mechanical Performance of Knit Lines and Welded Butt Joints*.
[8] https://www.campusplastics.com.

Symulacje falowania w pakiecie ANSYS Fluent

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

Transport morski to wbrew pozorom jeden z filarów naszej cywilizacji. Szacuje się, że w samym 2018 r. drogą morską przetransportowano 12 mld ton towarów i co roku odnotowuje się wzrost tej wielkości [1]. Przy tej skali każda, nawet kilkuprocentowa poprawa wydajności przekłada się na ogromne pieniądze. Symulacja komputerowa jest uważana za idealne narzędzie optymalizacyjne, co czyni ją doskonałym aparatem do zwiększania możliwości urządzeń morskich.

Nie ma fal

Jednym z podstawowych narzędzi modelowania przepływu w akwenach otwartych jest moduł Open Channel. Jest to dodatek do modelu wielofazowego VOF, który odczuwalnie ułatwia pracę, gdy warunki brzegowe są „wyjściem" do ośrodka o znanym poziomie cieczy. Użytkownik może wtedy określić współrzędne dna oraz wysokość lustra wody, a warunki wlotu i wylotu będą wymuszały zdefiniowany poziom akwenu w środku domeny obliczeniowej.

Naturalnym rozwinięciem modułu Open Channel jest Wave Boundary Condition. Jak sugeruje jego nazwa, pozwala on na zadawanie fal na warunkach brzegowych (głównie velocity inlet). W zależności od stromości fal można je zadać za pomocą kilku wbudowanych typów z teorii fal – od prostych liniowych pierwszego rzędu po fale Stokesa piątego rzędu. Dodatkowym ułatwieniem jest wywoływana z konsoli funkcja sprawdzająca poprawność wykorzystanej przez użytkownika aproksymacji w stosunku do wprowadzonych podstawowych danych fali.

Ciekawym aspektem symulacji falowania jest tzw. numeryczna plaża (*numerical beach*). Powszechnym zjawiskiem jest to, że fala po uderzeniu w warunek brzegowy wylotu odbija się od niego, a nie wędruje poza domenę. Żeby zniwelować ten efekt, stosuje się wewnętrzne źródła pędu tuż przy ujściu z domeny. Źródła te mają „uspokoić" falę, aby się nie odbijała. Brzmi to skomplikowanie, jednak numeryczna plaża jest bardzo prostym rozwiązaniem. Wszystkie potrzebne informacje są kopiowane z warunku wlotu, a użytkownik musi jedynie określić, w jakim obszarze znajduje się plaża.

Użycie modułu Open Channel nie eliminuje podstawowych narzędzi używanych najczęściej z modułem VOF. Użytkownik może więc wybrać formę *explicit* lub *implicite* modelu z powiązanymi z nimi schematami dyskretyzacji albo moduł zmniejszający dyfuzję numeryczną interfejsu. Aby jeszcze dokładniej odwzorować interfejs międzyfazowy, można sięgnąć po adaptacyjne zagęszczanie siatki, które w każdym kroku czasowym podzieli elementy na mniejsze w rejonie, gdzie występuje powierzchnia swobodna.

Przechyły i przechyły!

Symulowanie falowania w pustym akwenie nie wydaje się zbyt ciekawe. Najczęściej jednak do falującego akwenu dodaje się konstrukcję stałą (platformę wiertniczą czy elementy nabrzeża) albo ruchomy obiekt (statek, boję).

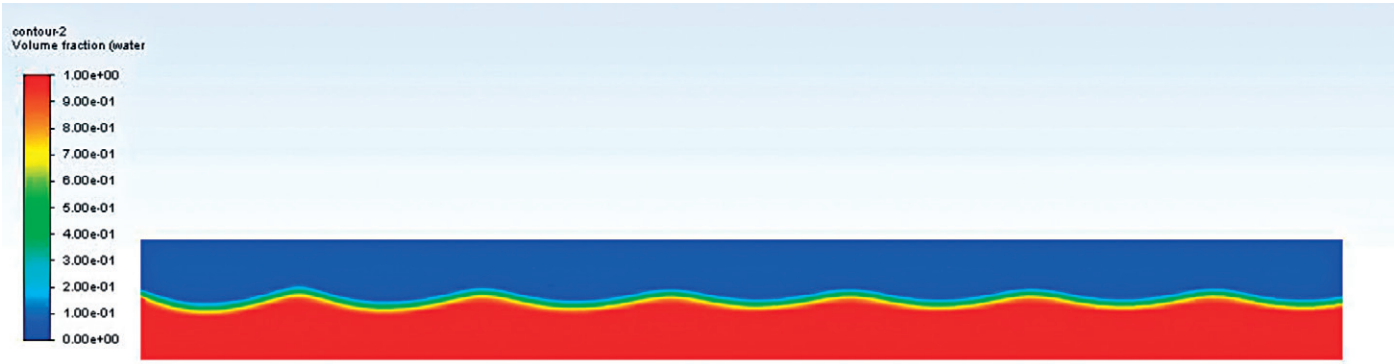
W ANSYS Fluent możliwe jest oczywiście zasymulowanie pływania takiego ruchomego elementu na podstawie jego masy, sił hydrodynamicznych czy momentów bezwładności. Jeżeli w domenie obecny jest inny ruch niż obrotowy, najczęściej wiąże się to z dynamicznymi siatkami. I owszem, przy niewielkiej deformacji takie podejście wydaje się słuszne. Jednak przy dużych przemieszczeniach wygładzanie i przesiatkowywanie modelu może się okazać mocno niepraktyczne.

Dlatego ostatnio dość często wykorzystuje się do takich celów moduł Overset Mesh służący do sprytnego nakładania siatek. W takim modelu na siatkę pustego akwenu można nałożyć ruchomą siatkę elementu pływającego. (Więcej o nakładanych siatkach można przeczytać w numerze 4 biuletynu MESSENGER).

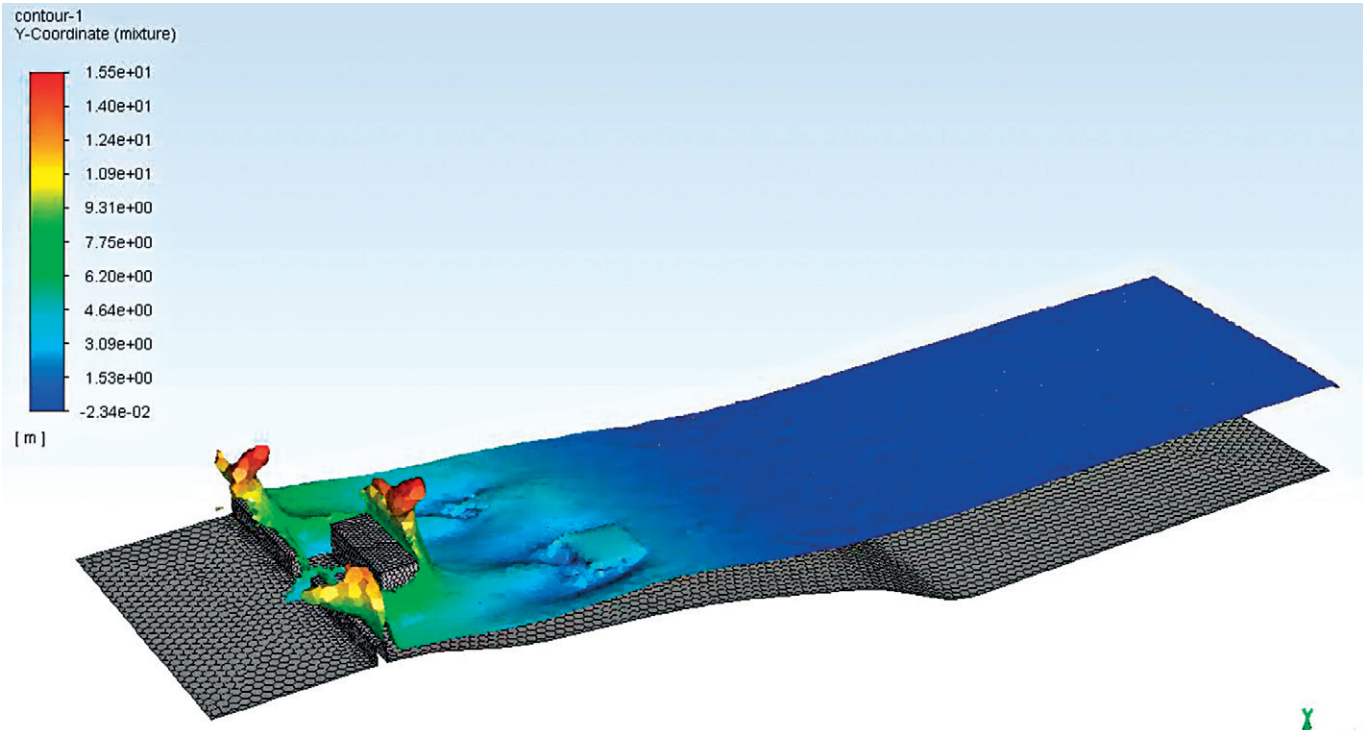
Aqwa vitae

Na koniec warto jeszcze wspomnieć o module Aqwa, który zasłynął głównie z obliczeń mechanicznych w aplikacjach typu *off-shore*. Jednak moduł ten może równie dobrze posłużyć do symulacji falowania.

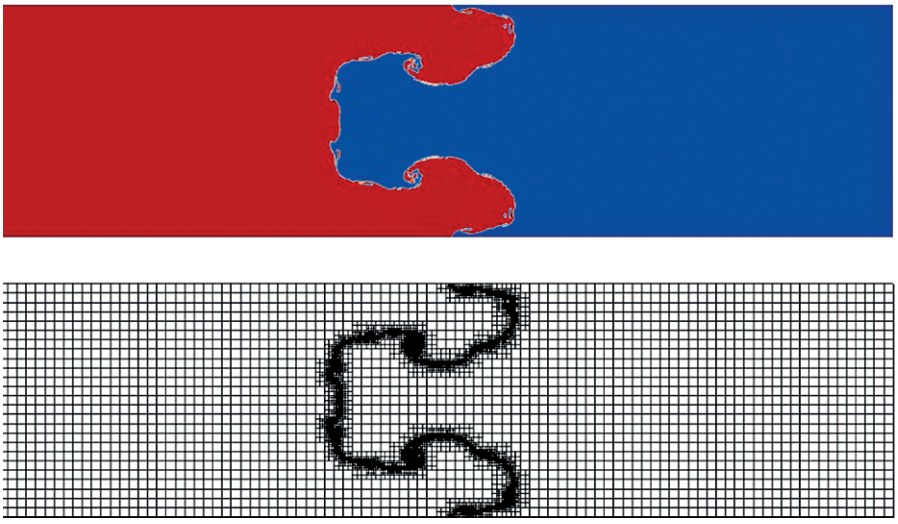
Okazuje się, że metoda elementów skończonych całkiem dobrze sobie radzi z odwzorowaniem kształtu fali – nie jest aż tak wrażliwa na dyfuzję numeryczną jak metoda objętości skończonych. Z drugiej jednak strony nie jest też zbyt precyzyjna w obszarach, w których fala natrafia na przeszkodę. Niemniej wydaje się, że moduł ten jest wart uwagi ze względu na inne przeznaczone do tego typu aplikacji narzędzia.



Rys. 1. *Prosta symulacja falowania*



Rys. 2. *Symulacja uderzenia wysokiej fali o nabrzeże*



Rys. 3. *Adaptacyjne zagęszczenie siatki w miejscu występowania interfejsu*

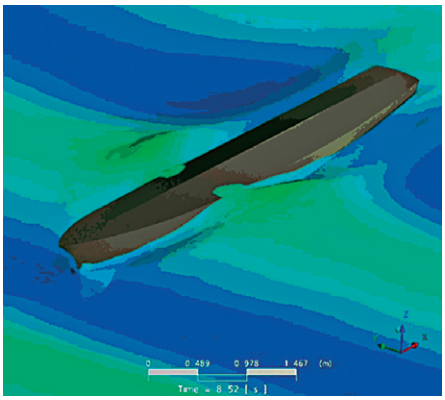
Panta rhei

Branża *off-shore* to ogromny wycinek inżynierii, który rok do roku się powiększa. Aby sprostać wyzwaniom stawianym nowoczesnym konstrukcjom statków czy platform wiertniczych, inżynierowie muszą je nieustannie ulepszać i optymalizować. Jak widać, symulacje komputerowe oferują bardzo wiele narzędzi właśnie do takich celów.

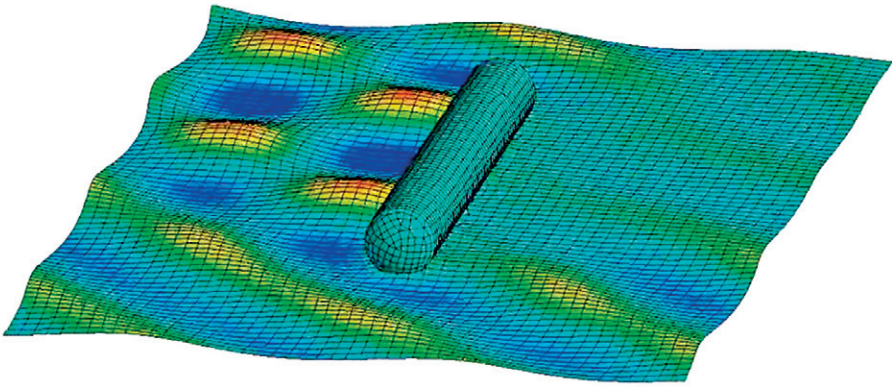
Niezależnie od tego, czy trzeba zaprojektować kadłub kontenerowca, elektrownię morską czy port jachtowy, ANSYS ma rozwiązania, które pozwolą wyprzedzić konkurencję.

LITERATURA

[1] Raport roczny (2018) Konferencji Narodów Zjednoczonych ds. Handlu i Rozwoju, https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2018_en.pdf.



Rys. 4. *Symulacja falowania połączona z ruchem bryły sztywnej*



Rys. 5. *Symulacja falowania w Aqwa*

Optymalizacja aerodynamiczna bolidu Formuły Student

Artur Ziemianin • PolSl Racing • artur.ziemianin@racing.polsl.pl

W 2019 r. koło naukowe PolSl Racing z sukcesami rywalizowało na torach Formuły Student nowym bolidem – SW-02 Quarado. Charakterystyczną cechą nowej konstrukcji jest rozbudowany pakiet aerodynamiczny – pierwsze takie rozwiązanie zastosowane na Politechnice Śląskiej. Przy jego projektowaniu chciano zachować prostotę, ale także zapewnić jak najlepszą efektywność.

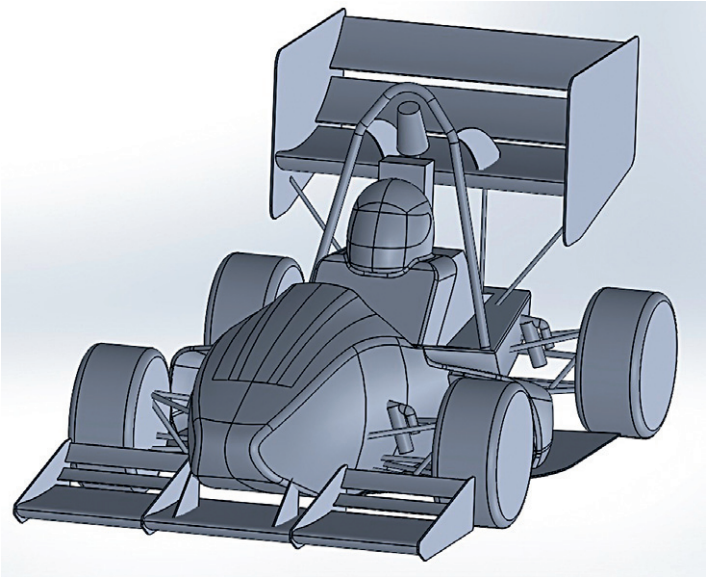
Ze względu na ograniczenia czasowe w trakcie konstruowania nowego pojazdu konieczne było określenie terminu, po którym niemożliwe jest wprowadzanie znaczących zmian głównych części bolidu (*design freeze*). Nie oznacza to jednak całkowitego zaprzestania ulepszania projektu. Poprzez wprowadzanie łatwych do zaimplementowania modyfikacji próbowano poprawić aerodynamikę bolidu. Podobnie jak cały pakiet aerodynamiczny były one badane metodami komputerowej mechaniki płynów w programie ANSYS CFX.

Przygotowania do analiz

Aby dokładnie przeanalizować parametry aerodynamiczne bolidu, trzeba było przygotować model jego pełnego złożenia. Starano się zawrzeć w nim wszystkie elementy mające istotny wpływ na aerodynamikę pojazdu, a jednocześnie uprościć geometrię w celu skrócenia czasu obliczeń.

W ramach analiz sprawdzono wiele modyfikacji i dodatków, np. montowano różne deflektory czy listwy Gurneya, wprowadzano zmiany położenia i pochylenia skrzydeł, zmiany dyfuzora oraz kąta nachylenia całego pojazdu. Badania przeprowadzano najczęściej przy prędkości 20 m/s, ale najlepiej rokujące rozwiązania sprawdzano również w innych prędkościach.

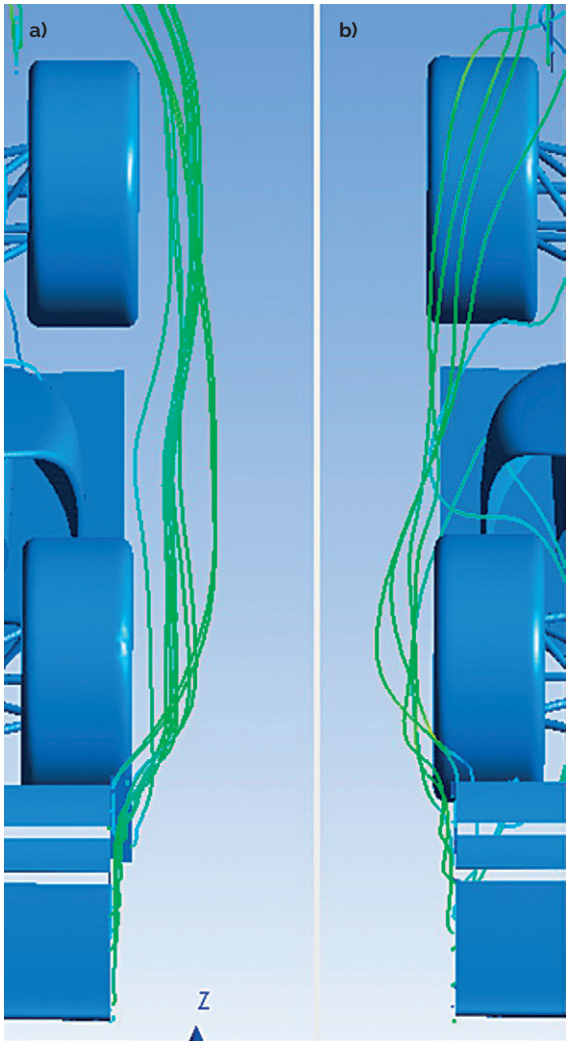
Z myślą o jak najlepszym oddaniu rzeczywistych warunków jazdy zasymulowano ruch kół poprzez zadanie warunku obrotu ich powierzchni. Uwzględniono również przemieszczanie się podłoża względem pojazdu. Zastosowano model turbulencji SST, gdyż łączy on zalety modeli k-ω i k-ε i daje zadowalające wyniki zarówno w rdzeniu strugi, jak i przy powierzchni.



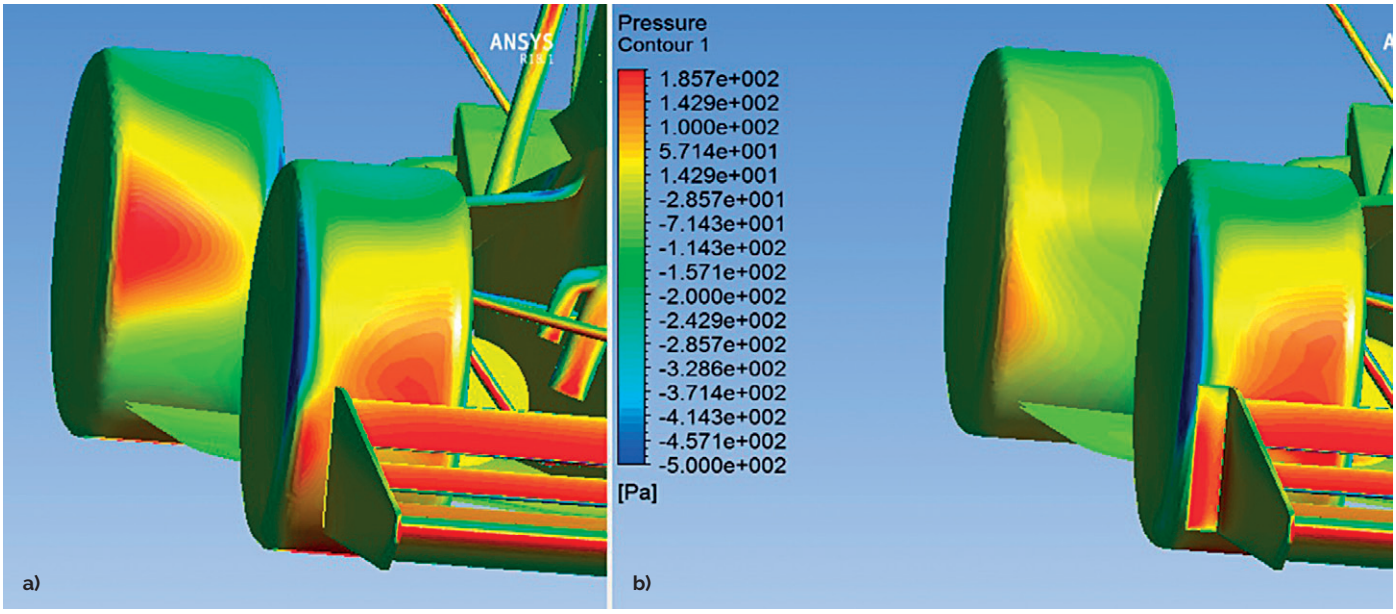
Rys. 1. *Uproszczony model bolidu*

Tabela I. *Porównanie wybranych parametrów bazowej konfiguracji bolidu oraz konfiguracji ze zmodyfikowanym endplatem*

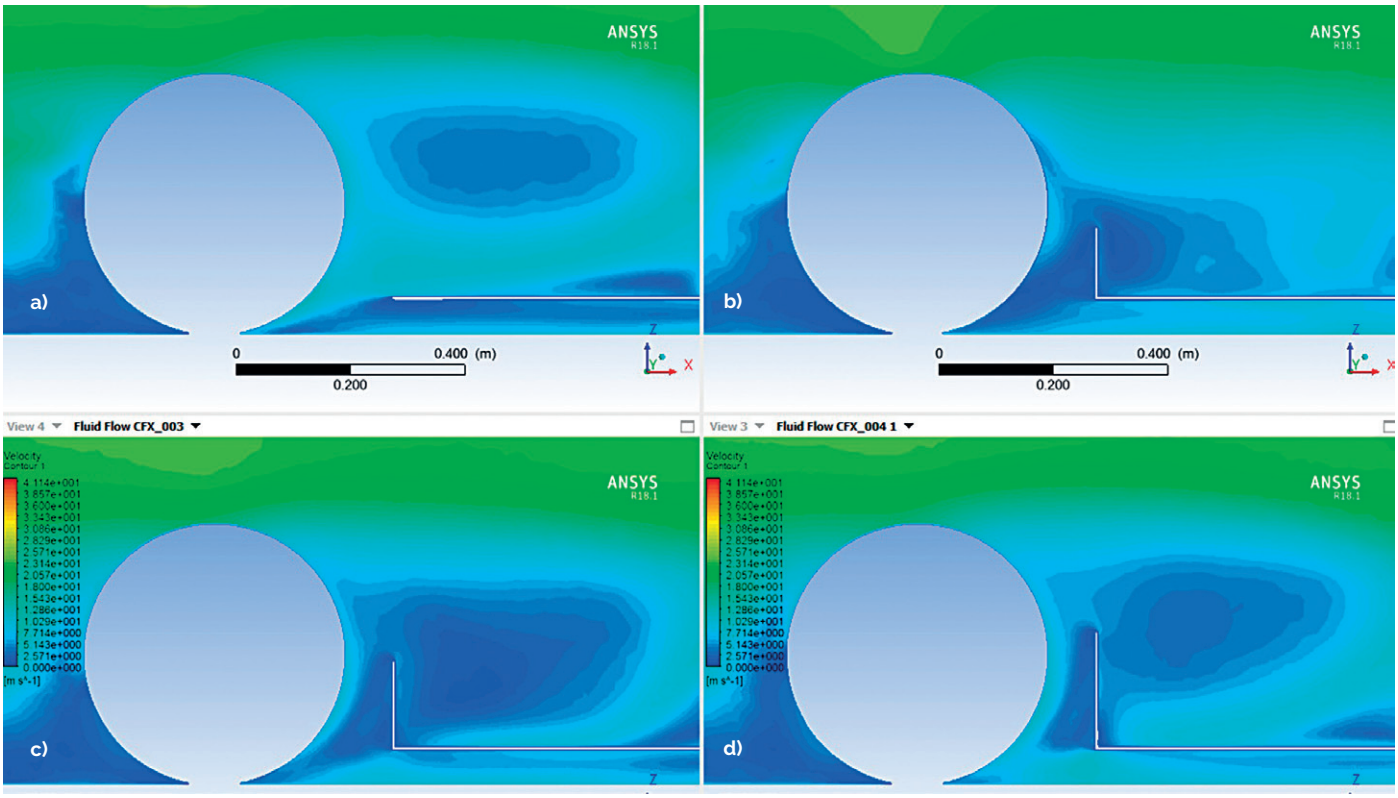
	Konfiguracja bazowa	Zmodyfikowany endplate
Drag – przednie koła [N]	19,89	12,14
Lift – przednie koła [N]	25,97	23,10
Drag – tylne koła [N]	15,36	8,02
Lift – tylne koła [N]	22,60	12,08
Drag – cały bolid [N]	250,79	239,26
Lift – cały bolid [N]	–396,65	–425,07
L/D	–1,582	–1,777



Rys. 2. *Wizualizacja linii przepływu dookoła kół pojazdu z: a) bazowym i b) zmodyfikowanym przednim endplatem*



Rys. 3. *Porównanie rozkładu ciśnień na kołach bolidu w wersji: a) bazowej i b) zmodyfikowanej*

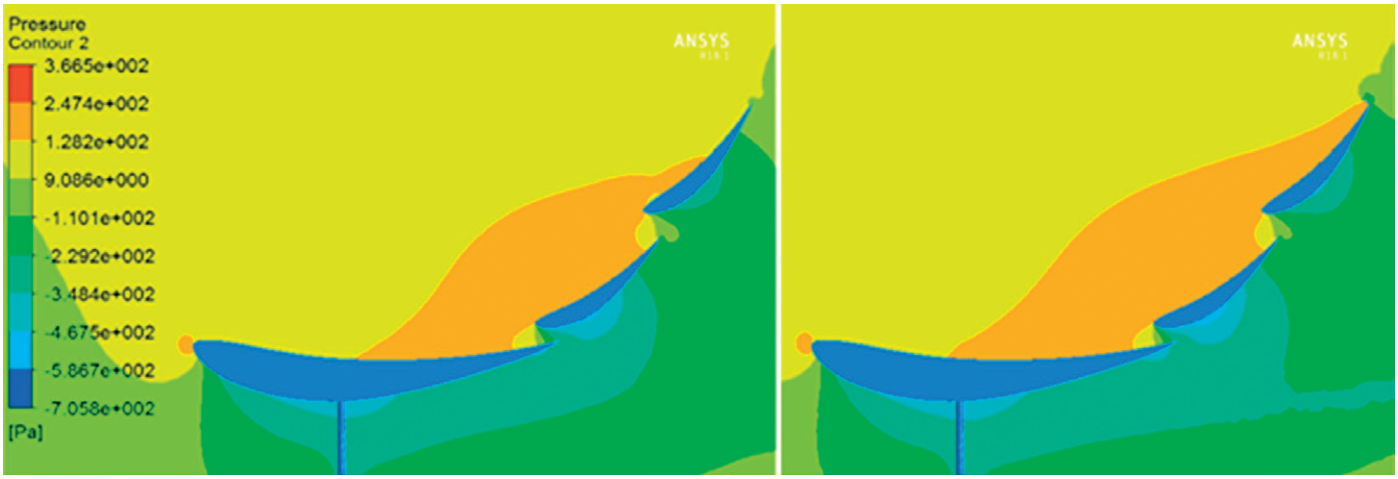


Rys. 4. *Rozkład prędkości w obszarze przed tylnym kołem dla różnych konfiguracji bolidu: a) brak deflektora, b) deflektor 120 mm, c) deflektor 150 mm, d) deflektor 200 mm*

Tabela II. *Porównanie wybranych parametrów różnych wymiarów deflektora przed tylnym kołem*

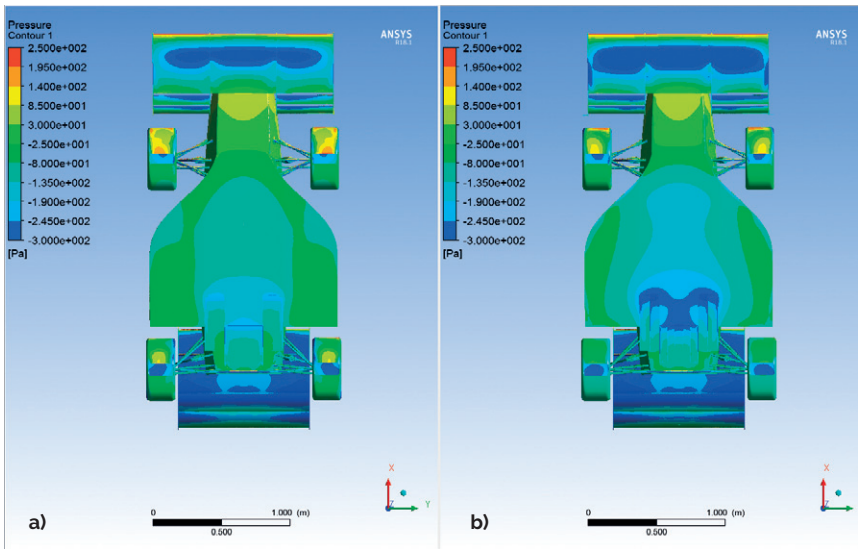
	Brak deflektora	Deflektor 120 mm	Deflektor 150 mm	Deflektor 200 mm
Drag – tylne koła [N]	8,02	7,64	8,04	6,91
Lift – tylne koła [N]	12,08	13,13	11,18	11,64
Lift – podłoga [N]	–100,28	–101,42	–109,03	–110,77
Drag – cały bolid [N]	239,26	241,18	243,11	242,82
Lift – cały bolid [N]	–425,07	–434,56	–446,74	–450,37
L/D	–1,777	–1,802	–1,838	–1,854

Podczas analiz wielu podobnych, lecz nieznacznie zmodyfikowanych geometrii nieoceniony okazał się dodatek ANSYS do programu Solidworks. Umożliwił on tworzenie bezpośrednio w środowisku CAD grup (*named selection*) składających się z różnych powierzchni bolidu, do których w środowisku ANSYS przypisywano warunki brzegowe i inne parametry analizy. Dzięki temu po modyfikacji geometrii modelu jego powierzchnie ciągle były przypisane do odpowiednich grup. Zapewniło to skrócenie czasu przygotowania kolejnych symulacji o ponad 90%. Inną zaletą tego



a) b)

Rys. 5. *Rozkład ciśnienia w obszarze tylnego skrzydła w wersji: a) bez listwy Gurneya i b) z listwą Gurneya*



Rys. 6. *Porównanie rozkładu ciśnień pod bolidem w konfiguracji: a) bazowej i b) ostatecznej*

rozwiązania była możliwość określenia sił działających na wybrane zestawy powierzchni (np. koła, sidepody czy płaty skrzydeł).

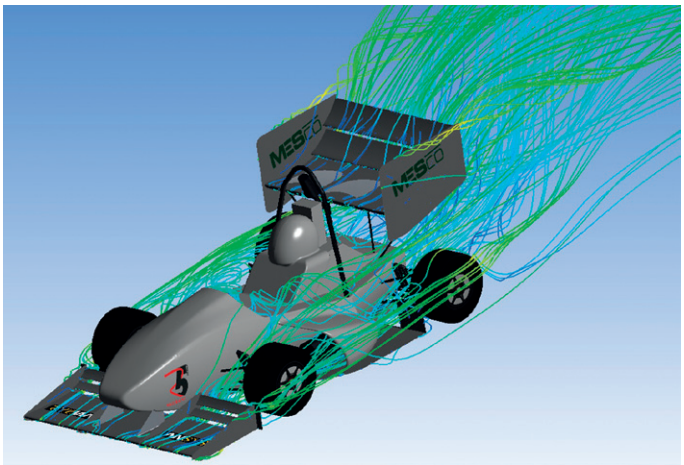
Jedną z najbardziej efektywnych modyfikacji było dodanie małego deflektora na końcu przedniego skrzydła. W ten sposób zwiększono energię strugi powietrza, by mogła ona ominąć przednie i tylne koła. Spowodowało to spadek sił oporu i unoszenia generowanych przez koła i cały bolid. Ta jedna modyfikacja pozwoliła na podniesienie efektywności aerodynamicznej (*lift-to-drag ratio*) z –1,582 do –1,777.

Największe modyfikacje można było wprowadzić w obszarze podłogi przed tylnymi kołami. Sprawdzono kilka rozwiązań, lecz ostatecznie ponownie najefektywniejszy i prosty do wykonania okazał się deflektor w postaci płytki. Szukano jego odpowiedniej wysokości. Optymalna okazała się płyta o wysokości 200 mm, która pomimo zwiększenia oporu aerodynamicznego zapewniała najlepszą siłę docisku oraz efektywność aerodynamiczną: –1,854.

Testowano także tzw. listwy Gurneya. Są to małe kątowniki dodane na końcu płatów skrzydeł, które pozwalają na zwiększenie generowanego docisku aerodynamicznego. Jednocześnie zwiększają one siły oporu, dlatego istotne jest odpowiednie dobranie ich wysokości.

Poprzez sprawdzanie wielu rozwiązań i sukcesywne wprowadzanie najlepszych z nich do modelu uzyskano ulepszoną, ostateczną konfigurację bolidu.

Stosunkowo niewielkie modyfikacje zwiększyły całkowitą siłę docisku SW-02 Quarado z 397 N do 499 N. Co więcej, całkowity opór aerodynamiczny został nieznacznie zmniejszony – z 251 N do 249 N. To znacząco poprawiło efektywność aerodynamiczną pojazdu: z –1,582 do –2,002.



Rys. 7. *Wizualizacja linii prądu w ostatecznej konfiguracji bolidu SW-02 Quarado PolSl Racing*

Tabela III. *Porównanie wybranych parametrów dla bazowej i ostatecznej konfiguracji pojazdu*

	Konfiguracja bazowa	Konfiguracja ostateczna
Drag – cały bolid [N]	250,79	249,32
Lift – przednie skrzydło [N]	–165,88	–187,23
Lift – tylne skrzydło [N]	–278,30	–284,21
Lift – podłoga [N]	–106,70	–171,28
Lift – cały bolid [N]	–396,65	–499,11
L/D	–1,582	–2,002

Naprężenia ścinające oraz ich gradient w etiologii tętniaków mózgu

Mikołaj Zimny • Śląski Uniwersytet Medyczny
Wojciech Wolański • Politechnika Śląska
Edyta Kawlewska • Politechnika Śląska
Wojciech Kaspera • Śląski Uniwersytet Medyczny • wkaspera@sum.edu.pl

Tętniaki wewnątrzczaszkowe stanowią przykład nabytych malformacji naczyniowych mózgu. Pęknięcie tętniaka prowadzi do krwotoku podpajęczynówkowego (SAH). Dane epidemiologiczne mówią o 10÷15 przypadkach SAH rocznie na 100 tys. osób w populacji [1, 2]. Mimo coraz lepszych wyników leczenia tętniaków (endowaskularnego i mikrochirurgicznego) skutki krwotoku podpajęczynówkowego pozostają katastrofalne – ze względu na efekt, jaki powoduje krwotok do mózgu. Śmiertelność wśród chorych hospitalizowanych z powodu SAH sięga 40% [3]. Zgodnie z aktualnym poglądem na temat etiopatogenezy tętniaków mózgu głównym czynnikiem odpowiedzialnym za powstanie tętniaka mózgu, jego powiększanie się i pęknięcie są siły hemodynamiczne działające na ścianę naczynia w miejscu jego podziału [4, 5].

Zdaniem Fergusona uderzenie strumienia krwi w wierzchołek podziału naczynia prowadzi do istotnego wzrostu naprężeń ścinających (WSS), które są głównym czynnikiem generującym zmiany w ścianie tętnicy, mogące stanowić uwarunkowanie do powstania tętniaka. Wcześniej badacze wykazali, że gwałtowny wzrost naprężeń ścinających działających na powierzchnię naczynia uszkadza endotelium i sprzyja odkładaniu się mikroskrzeplin osłabiających ścianę naczynia [6].

Badania Fergusona, realizowane na szklanych modelach naczyń, znalazły odbicie w wynikach eksperymentów przeprowadzonych na modelach zwierzęcych z wykorzystaniem numerycznych symulacji przepływów krwi (*computational fluid dynamics*, CFD) [7]. Udało się wykazać, że wysoki poziom WSS w połączeniu z dodatnim gradientem WSS (WSSG), powstałych wskutek rozdzielenia strumienia krwi przy wierzchołku bifurkacji, prowadzi do zmian degeneracyjnych w ścianie naczynia. Obejmują one endotelium, blaszkę elastyczną wewnętrzną oraz błonę środkową, inicjujące powstanie tętniaka mózgu.

Trwają intensywne badania nad etiologią tętniaków mózgu. Do analizy CFD wykorzystuje się modele naczyń ludzkich zaczerpnięte z wyników badań obrazowych angiografii tomografii komputerowej (angioTK), rezonansu magnetycznego (angioMR) i angiografii subtrakcyjnej (DSA) [8–9]. Wyniki tych badań, jakkolwiek obiecujące, dalekie są od jednoznacznych rozstrzygnięć. Jedna z przyczyn tych niepowodzeń tkwi w ustalaniu warunków początkowych dla powierzchni wlotowych i wylotowych w analizowanych modelach naczyń w oparciu o wspólny dla wszystkich chorych, zaczerpnięty z literatury profil prędkości krwi, który nie uwzględnia poważnych indywidualnych różnic.

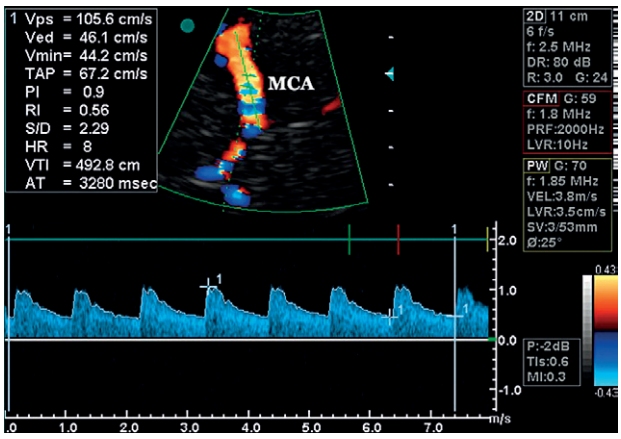
Materiał i metoda

Artykuł prezentuje przypadki dwóch chorych. Są to mężczyzna (58 l.) z rozpoznanym tętniakiem tętnicy środkowej mózgu (MCA) oraz kobieta (42 l.) bez istotnej patologii w zakresie tętnic wewnątrzczaszkowych). U obu pacjentów przeanalizowano i porównano naprężenia ścinające oraz ich gradient z wykorzystaniem CFD, na podstawie modeli naczyń wygenerowanych z badania angioTK oraz profilu prędkości krwi pozyskanego z przezczaszkowej ultrasonografii dopplerowskiej z kolorowym kodowaniem przepływu krwi (TCCS). Badanie TCCS wykonano aparatem Vivid 3 Pro (GE Healthcare, USA) wyposażonym w głowicę sektorową o częstotliwości 1,5–3,6 MHz, aby wygenerować profil prędkości przepływu krwi w tętnicach środkowych mózgu (MCA) (rys.1).

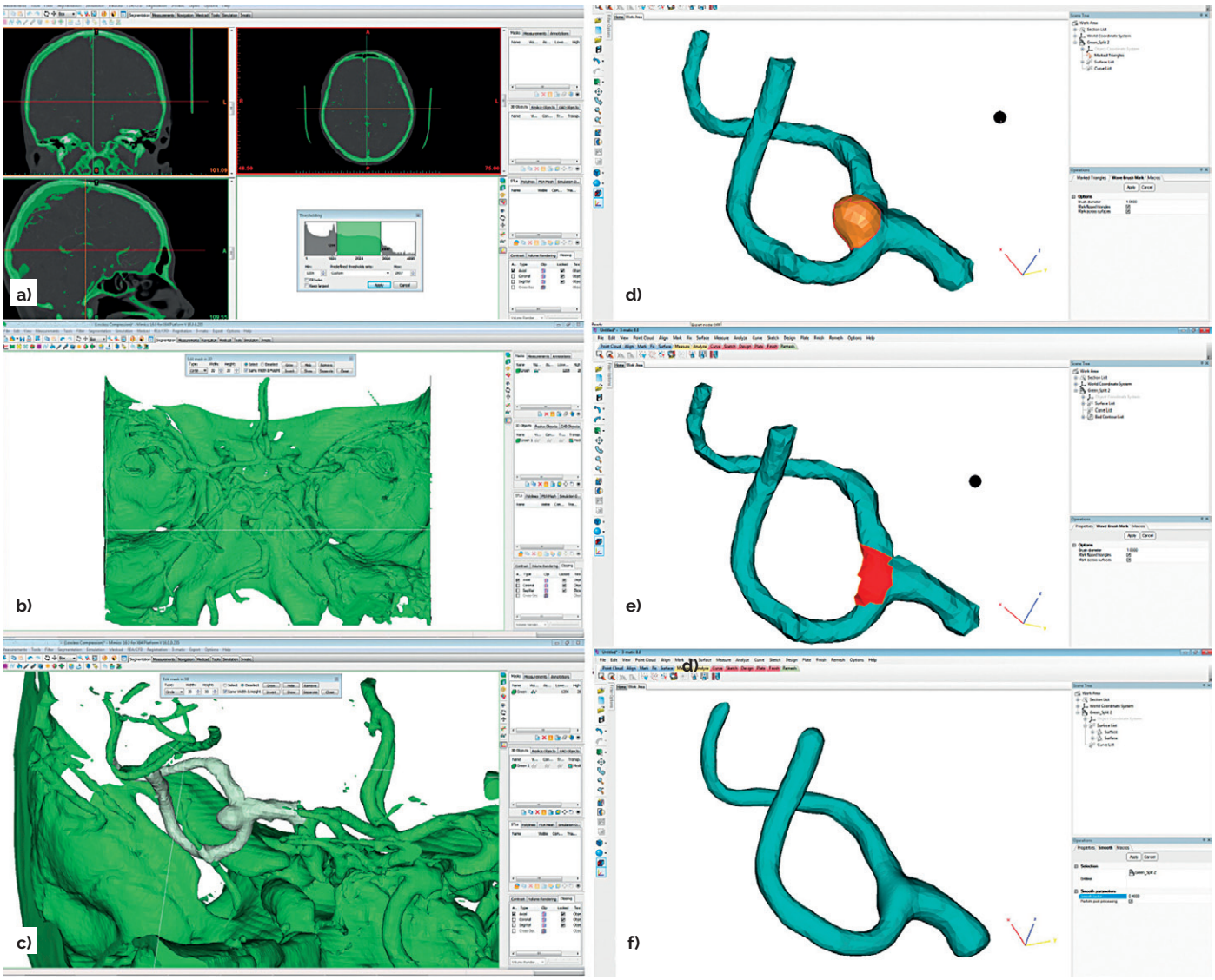
Pozyskane z badania angioTK pliki DICOM wyeksportowano do programu Mimics Innovation Suite (Materialise, Belgia), w którym wysegmentowano naczynia podziału MCA i wygenerowano modele 3D bifurkacji MCA (rys. 2). U mężczyzny usunięto cyfrowo tętniaka, żeby do dalszych symulacji odtworzyć podział naczynia sprzed powstania patologii (rys. 2). Modele te zostały przeniesione do programu ANSYS (ANSYS, Inc., USA) i na ich podstawie wygenerowano siatkę do dalszych symulacji numerycznych. Po ustaleniu warunków brzegowych i właściwości fizycznych cieczy (w tym wypadku krwi) przeprowadzono symulacje komputerowe przepływów krwi w modelu bifurkacji.

Przed zamodelowaniem przepływu krwi w ANSYS założono nieelastyczność ścian MCA (z uwagi na brak wystarczających danych literaturowych opisujących grubość i elastyczność ścian tętnic wewnątrzczaszkowych). Krew potraktowano jako ciecz newtonowską (czyli o stałej gęstości 1056 kg/m^3 i lepkości 0,0035 kg/m·s). Z użyciem autorskiego (MZ) skryptu komputerowego napisanego w języku Python wygenerowano plik wsadowy określający warunki brzegowe na wlocie każdej z tętnic. Na podstawie wykresu prędkości od czasu skrypt tworzy profil prędkości przepływu krwi i zapisuje go w postaci tekstowej. Tak przygotowany plik może zostać zaimportowany i wykorzystany w symulacji.

Celem symulacji była ocena wielkości dwóch parametrów hemodynamicznych działających na ścianę naczynia, czyli



Rys. 1. *Wynik badania przezczaszkowej ultrasonografii dopplerowskiej z kolorowym kodowaniem przepływu krwi z widmem prędkości przepływu krwi w tętnicy środkowej mózgu*

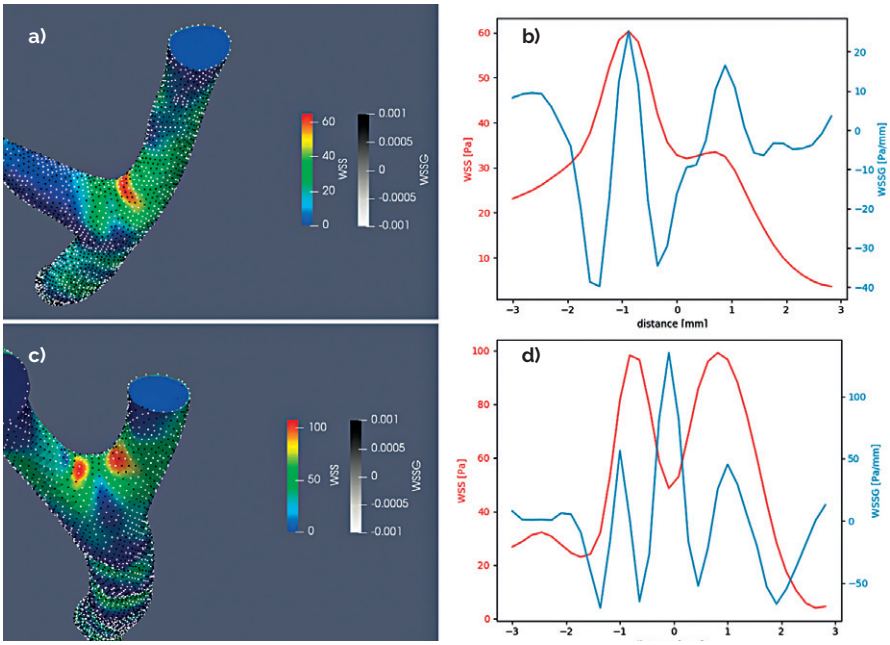


Rys. 2. *Proces segmentowania naczyń z wyniku badania angiografii tomografii komputerowej (a–c), cyfrowego usuwania tętniaka mózgu i tworzenia modelu 3D do dalszych symulacji przepływu krwi (d–f)*

naprężeń ścinających (WSS), a dokładnie ich wartości uśrednionej w czasie (taWSS), oraz gradientu naprężeń ścinających (WSSG). Na rys. 3*a*, *c* pokazano efekt symulacji w postaci kolorowej mapy naprężeń ścinających nałożonych na ściany bifurkacji MCA. Kolor czerwony ilustruje miejsca o najwyższych wartościach WSS, a niebieski – o najniższej. Można zauważyć, że obszar maksymalnego WSS jest zlokalizowany nie na samym wierzchołku bifurkacji, ale w jego bezpośrednim otoczeniu, na jednej ze ścian, tworzącej odgałęzienie bifurkacji.

Na mapę naprężeń ścinających nałożono punkty odpowiadające zwrotom gradientu WSS. Czarne punkty odpowiadają dodatniemu (zgodnemu z kierunkiem przepływu krwi) WSSG, a białe – ujemnemu (przeciwnemu). Stwierdzono, że w otoczeniu samego wierzchołka obserwuje się obszary o dodatnim gradiencie WSS, które następnie, w kierunku obwodu, przechodzą w wartości ujemne.

Na rys. 3*b*, *d* przedstawiono rozkład wartości WSS i WSSG u obu chorych



Rys. 3. *Mapa naprężeń ścinających (WSS) oraz zwrotu gradientu WSS (WSSG) w obu analizowanych przypadkach chorych (a – chory z tętniakiem mózgu, c – chory bez tętniaka) oraz odpowiadający im rozkład wartości WSS i WSSG poprowadzony wzdłuż bifurkacji (odpowiednio: b, d)*

poprowadzony wzdłuż bifurkacji. U chorego z rozpoznanym tętniakiem mózgu w obszarze maksymalnego wzrostu WSS obserwuje się dodatni gradient WSS. U chorego bez tętniaka mózgu obszar wysokich wartości WSS charakteryzuje ujemny gradient WSS.

Dyskusja

Naprężenia ścinające to jedna z sił działających na ścianę naczynia, styczna do długiej osi naczynia, proporcjonalna do prędkości przepływu i lepkości krwi i odwrotnie proporcjonalna do promienia naczynia, wyrażona zazwyczaj w paskalach. Na prostych odcinkach naczyń, charakteryzujących się szybkim laminarnym przepływem, rejestruje się najniższe wartości naprężeń ścinających – rzędu 3 Pa. W miejscu gdzie strumień krwi uderza w rozgałęzienie naczynia, dochodzi do wzrostu wartości WSS, a towarzyszące temu rozdzieleniu strumienia krwi na bifurkacji przyspieszenie i opóźnienie prędkości przepływu krwi tworzą odpowiednio dodatnie i ujemne gradienty WSS.

Uważa się, że śródbłonek rejestruje wartości naprężeń ścinających działających na jego powierzchnię i przetwarza je na sygnały biochemiczne. Wartości naprężeń ścinających rzędu 1,5–7 Pa działają protekcyjnie na śródbłonek naczyń i zapobiegają np. odkładaniu się materiału aterogennego. Z kolei małe oscylacyjne WSS, wywołane przepływami cyrkulacyjnymi, zawierającymi obszary przepływu wstecznego, działają proaterogennie [10].

Pozostaje kwestią dyskusji rola wysokich WSS oraz gradientu WSS w etiologii tętniaków mózgu u ludzi. Generalnie panuje zgoda co do tego, że istotny wzrost WSS w otoczeniu bifurkacji, będący efektem uderzenia i rozdzielenia strumienia krwi, jest czynnikiem inicjującym powstanie tętniaka [4, 11]. Okazuje się jednak, że w procesie tym obok wysokich WSS istotną rolę odgrywa zwrot gradientu WSS.

Kluczowe dla zrozumienia wpływu obu tych czynników okazały się eksperymenty na modelach zwierzęcych, w których obok symulacji CFD dokonano również analizy histopatologicznej fragmentów naczyń poddanych działaniu wysokiego WSS oraz dodatniego *vs* ujemnego gradientu WSS. Wykazano, że zwrot gradientu WSS oddziałuje odmiennie na śródbłonek naczyniowy w obszarach o wysokim WSS. Dodatni zwrot gradientu WSS prowadzi do rozbicia połączeń międzykomórkowych komórek śródbłonka naczyniowego, stymuluje jego proliferację oraz apoptozę i uruchamia procesy zapalne prowadzące do uszkodzenia blaszki elastycznej wewnętrznej oraz błony mięśniowej środkowej.

U podstaw tych procesów leży odmienna w zależności od zwrotu gradientu WSS regulacja procesów ekspresji genów odpowiedzialnych za apoptozę i proliferację komórek oraz odpowiedź zapalną. Wstępne doniesienia wskazują, że dodatni gradient WSS powoduje negatywną regulację ekspresji genów odpowiedzialnych za hamowanie omawianych procesów, jak również zwiększa ekspresję genów ADAMTS1 i TAGLN odpowiedzialnych za produkcję proteaz zdolnych do trawienia białkowych składników macierzy zewnątrzkomórkowej [12]. Wypadkowa tych procesów powoduje osłabienie ściany naczynia inicjujące powstanie tętniaka mózgu [11].

Do tej pory pojawiły się tylko pojedyncze doniesienia, w których wyniki opisanych eksperymentów znalazły odbicie w wynikach badań nad etiologią tętniaków u ludzi. Kulcsár i in. opisali trzech chorych, u których dokonali analizy CFD przed uformowaniem się tętniaka i po nim. Wykazali, że do jego powstania doszło na bifurkacji w obszarach charakteryzujących się wysokimi wartościami WSS oraz dodatnim zwrotem gradientu WSS [13].

Alfano i in. na podstawie symulacji CFD przeprowadzonej w 31 przypadkach wykazali, że na podziałach naczyń obciążonych zwiększonym ryzykiem powstania tętniaka mózgu charakterystyczny jest wzrost WSS oraz dodatni gradient WSS [9].

Opisane w tym artykule dwa przypadki chorych wpisują się w te obserwacje. U chorego z rozpoznanym tętniakiem MCA zaobserwowano, że obszar wysokiego WSS powstały wokół bifurkacji charakteryzował się dodatnim gradientem WSS. Dla porównania ten sam obszar wysokiego WSS u chorego bez tętniaka mózgu cechował ujemny zwrot gradientu WSS. Te obserwacje będą wymagały dalszych badań z wykorzystaniem symulacji CFD na większej grupie chorych z tętniakiem mózgu.

LITERATURA

[1] D.L. Labovitz i in., *Subarachnoid hemorrhage incidence among Whites, Blacks and Caribbean Hispanics: the Northern Manhattan Study*, „Neuroepidemiology", nr 26 (3) 2006, s. 147–150, www.karger.com/Article/FullText/91655.

[2] A.M. Shea i in., *Characteristics of nontraumatic subarachnoid hemorrhage in the United States in 2003*, „Neurosurgery", nr 61 (6) 2007, s. 1131–7-8, academic.oup.com/neurosurgery/article/61/6/1131/2558567.

[3] *Epidemiology of aneurysmal subarachnoid hemorrhage in Australia and New Zealand: incidence and case fatality from the Australasian Cooperative Research on Subarachnoid Hemorrhage Study (ACROSS)*, sierpień 2000, s. 1843–1850, www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10926945.

[4] G.G. Ferguson, *Physical factors in the initiation, growth, and rupture of human intracranial saccular aneurysms*, „J Neurosurg", nr 37 (6) 1972, s. 666–677, thejns.org/doi/10.3171/jns.1972.37.6.0666.

[5] W.E. Stehbens, *Etiology of intracranial berry aneurysms*, „J Neurosurg", nr 70 (6) 1989, s. 823–831, www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/2654334.

[6] D.L. Fry, *Acute vascular endothelial changes associated with increased blood velocity gradients*, „Circ Res", nr 22 (2) 1968, s. 165–197, www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/5639037.

[7] H. Meng i in., *Complex Hemodynamics at the Apex of an Arterial Bifurcation Induces Vascular Remodeling Resembling Cerebral Aneurysm Initiation*, „Stroke", nr 38 (6) 2007, s. 1924–1931, www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17495215.

[8] M.S. Alnaes i in., *Computation of hemodynamics in the circle of Willis*, „Stroke", nr 38 (9) 2007, s. 2500–2505, stroke.ahajournals.org/cgi/doi/10.1161/STROKEAHA.107.482471.

[9] J.M. Alfano i in., *Intracranial aneurysms occur more frequently at bifurcation sites that typically experience higher hemodynamic stresses*, „Neurosurgery", nr 73 (3) 2013, s. 497–505, academic.oup.com/neurosurgery/article-lookup/doi/10.1227/NEU.0000000000000016.

[10] C.M. Gibson i in., *Relation of vessel wall shear stress to atherosclerosis progression in human coronary arteries*, „Arterioscler Thromb a J Vasc Biol", nr 13 (2) 1993, s. 310–315, www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8427866.

[11] B. Staarmann, M. Smith, *Prestigiacomo CJ. Shear stress and aneurysms: a review*, „Neurosurg Focus", nr 47 (1) 2019, s. E2, thejns.org/view/journals/neurosurg-focus/47/1/article-pE2.xml.

[12] J.M. Dolan i in., *Differential gene expression by endothelial cells under positive and negative streamwise gradients of high wall shear stress*, „Am J Physiol Cell Physiol", nr 305 (8) 2013, s. C854–66, www.physiology.org/doi/10.1152/ajpcell.00315.2012.

[13] Z. Kulcsár i in., *Hemodynamics of Cerebral Aneurysm Initiation: The Role of Wall Shear Stress and Spatial Wall Shear Stress Gradient*, „Am J Neuroradiol", nr 32 (3) 2011, s. 587–594, www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21310860.

Projektowanie linii Blumleina w technologii PCB

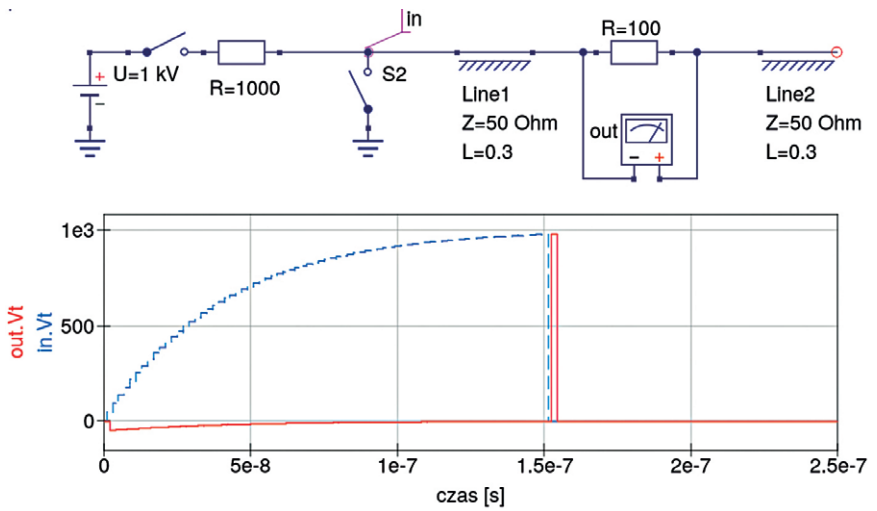
Yahia Achour • Wojskowa Akademia Techniczna
Jacek Starzyński • Politechnika Warszawska • jstar@ee.pw.edu.pl

Korzystając z oprogramowania ANSYS-HFSS, można np. zaprojektować kompaktową linię Blumleina. W połączeniu z generatorem impulsów wysokiego napięcia linia ta tworzy niewielki, tani generator quasi-prostokątnych impulsów wysokiego napięcia o szerokości 20÷40 ns. Generator jest przeznaczony do badania zjawiska elektroporacji.

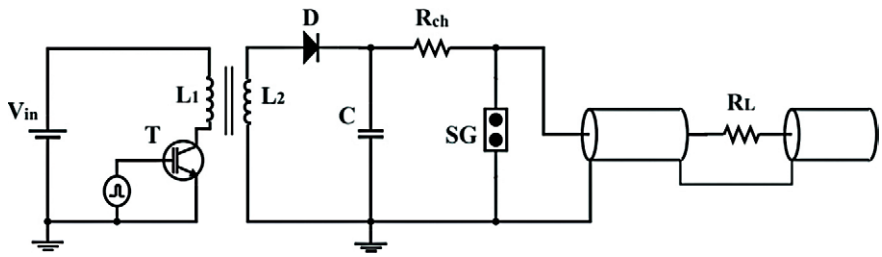
Generację szybkich impulsów wysokiego napięcia realizuje się przez stosunkowo powolną koncentrację energii elektrycznej w zasobniku, którym może być kondensator lub cewka, i następnie szybkie rozładowanie zasobnika z przekazaniem energii do odbiornika [1].

Niezależnie od tego, czy zasobnikiem energii jest cewka, czy kondensator, oraz niezależnie od zastosowanego przełącznika otrzymany impuls ma kształt dwuwykładniczy lub tłumionej wykładniczo sinusoidy [2]. Aby zmienić kształt impulsu, wykorzystuje się różnego rodzaju układy, określane najczęściej skrótem PFN (*pulse forming network*). Jednym z bardziej popularnych rozwiązań PFN jest linia Blumleina, nazwana na cześć swego wynalazcy Alana Blumleina [3]. Poglądowy schemat takiego urządzenia oraz przebiegi napięcia ładowania i na odbiorniku przedstawiono na rys. 1.

Linia Blumleina to dwie identyczne linie transmisyjne, pomiędzy którymi umieszcza się odbiornik (obciążenie). Impedancja odbiornika powinna być dwukrotnie większa niż impedancja charakterystyczna linii transmisyjnej. Generacja impulsu polega na stosunkowo wolnym naładowaniu obu linii do określonego napięcia, a następnie szybkim zwarciu końca linii od strony zasilania. W efekcie zwarcia końca jednej linii wzdłuż układu przemieszcza się fala zanikającego napięcia, która po dotarciu do obciążenia w połowie odbija się od niego, a w połowie przechodzi do drugiej linii. Od momentu dotarcia fali do odbiornika pojawia się na nim napięcie równe napięciu zasilającemu. Napięcie to utrzymuje się aż do momentu, kiedy do odbiornika dotrą ponownie „połówkowe" fale zaniku napięcia odbite od obu końców linii: od zwartego w przeciwfazie, a od otwartego w fazie, i wzajemnie się zniosą [4]. Jak widać, linia Blumleina jest bardzo efektywnym sposobem dopasowania zasilania do odbiornika – pozwala przekazać na odbiornik całe napięcie źródła.



Rys. 1. *Poglądowy model linii Blumleina; schemat elektryczny i przebiegi napięcia: na początku linii (przerywana, niebieska) i na obciążeniu (ciągła, czerwona)*



Rys. 2. *Architektura generatora prostokątnych impulsów wysokiego napięcia*

Opis urządzenia

Generator impulsów składa się z układu impulsowego wysokiego napięcia [5] podłączonego do niewielkiej linii Blumleina (rys. 2).

W czasie gdy przewodzi tranzystor IGBT, oznaczony jako *T*, następuje ładowanie cewki pierwotnej L_1. Prąd w obwodzie pierwotnym narasta liniowo, a jego maksymalna wartość jest określona przez napięcie zasilające, indukcyjność cewki pierwotnej i czas otwarcia tranzystora – T_{on}:

$$I_1 = \frac{V_{in}}{L_1} T_{on} \tag{1}$$

Po wyłączeniu tranzystora *T* energia zgromadzona w cewce L_1 jest przekazywana do cewki L_2, w której zaczyna płynąć prąd. Jego początkową (maksymalną) wartość określa zasada zachowania strumienia magnetycznego w rdzeniu transformatora L_1L_2:

$$N_1I_1 = N_2I_2 \tag{2}$$

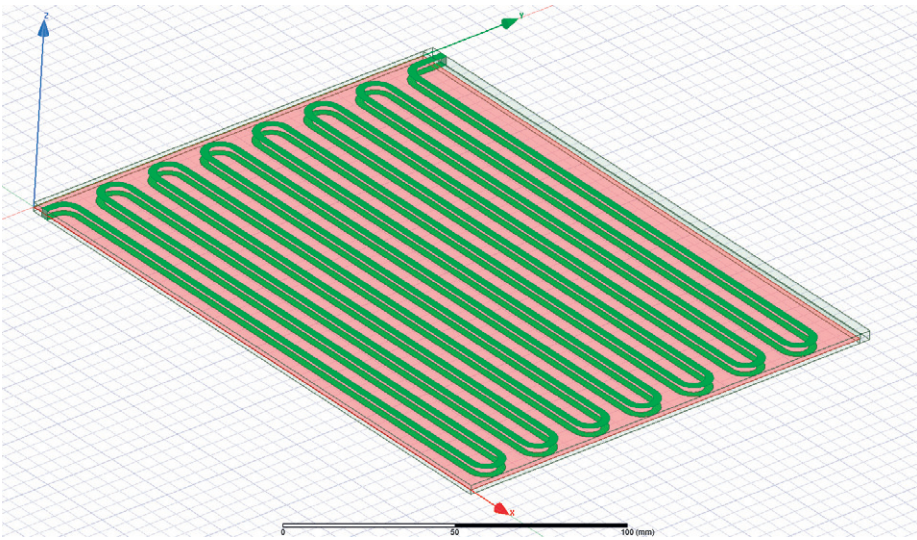
Wzór (2) nie uwzględnia strumienia rozproszenia, ale to uproszczenie na pewno nie wpływa na opis działania generatora. Pamiętając, że indukcyjność cewki jest proporcjonalna do kwadratu liczby jej zwojów, można wyrazić relację pomiędzy prądami w równaniu (2) jako pierwiastek z relacji pomiędzy L_1 a L_2. Ponieważ pojemność linii Blumleina jest znacznie mniejsza niż pojemność kondensatora *C*, można przyjąć, że:

$$V_C = -L_2 \frac{di_2}{dt} \tag{3}$$

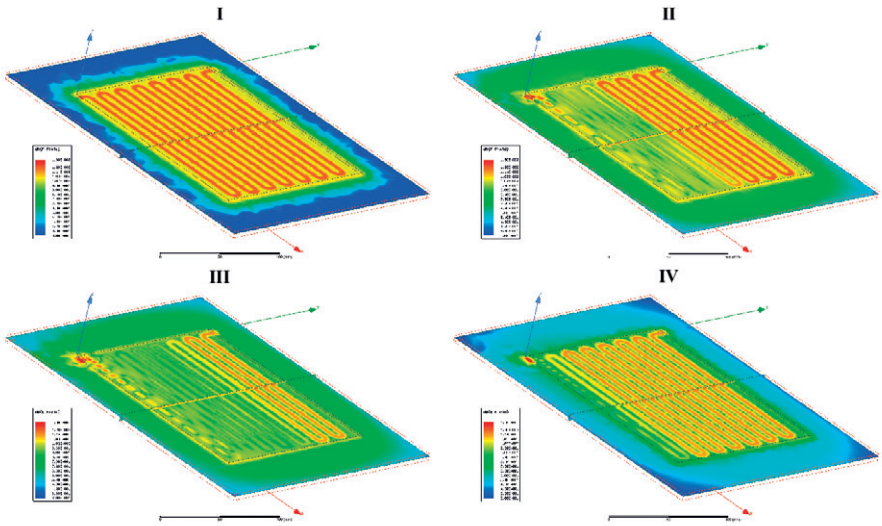
Przyjmując jako warunek początkowy dla i_2 wartość wynikającą z równań (1) i (2), po rozwiązaniu równania (3) i po prostych przekształceniach otrzymuje się zależność prądu ładującego kondensator *C* w postaci:

$$i_2(t) = I_2 \cos\left(\frac{t}{\sqrt{L_2C}}\right) \tag{4}$$

Po podstawieniu (4) do (3) i wykonaniu przekształcenia z wykorzystaniem (1), (2) oraz zależności pomiędzy liczbą zwojów



Rys. 3. *Model linii Blumleina wykonanej w technologii PCB (ANSYS-HFSS)*



Rys. 4. *Obraz pola elektrycznego (|E|) w pierwszej połowie linii Blumleina w wybranych chwilach czasowych: I: t = 0, II: t = 10 ns, III: t = 25 ns, IV: t = 35 ns*

cewki i jej indukcyjnością otrzymuje się równanie określające maksymalną wartość napięcia na kondensatorze:

$$U_{max} = V_{in} \frac{T_{on}}{\sqrt{CL_2}} \qquad (5)$$

Maksymalna wartość napięcia zostanie osiągnięta w momencie, gdy prąd $i_2(t)$ opisany równaniem (4) osiągnie wartość 0. Dioda umieszczona we wtórnym obwodzie transformatora nie pozwoli na rozładowanie kondensatora. Jeśli iskiernik umieszczony na wejściu linii Blumleina zostanie ustawiony na napięcie bliskie wartości maksymalnej, to po osiągnięciu tej wartości zewrze on linię i rozpocznie się w niej opisany wcześniej proces propagacji. Całe urządzenie można zamodelować w symulatorze obwodów, takim jak SPICE, ale model obwodowy nie uwzględnia specyfiki rzeczywistej realizacji linii.

Model linii Blumleina

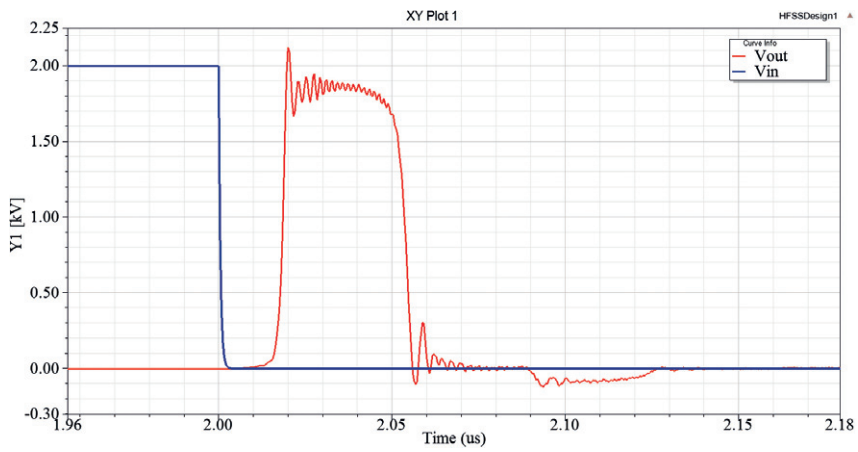
Wymóg budowy kompaktowego urządzenia zainspirował do zaprojektowania linii Blumleina w postaci odpowiednio ukształtowanych ścieżek na trójwarstwowej płytce drukowanej (PCB). To pozwoliłoby uzyskać dość długą linię przy niewielkich wymiarach urządzenia. Należy pamiętać, że sygnał propaguje się w niej z prędkością równą prędkości światła podzielonej przez pierwiastek ze względnej przenikalności dielektrycznej substratu, a szerokość impulsu podawanego na obciążenie R_L jest dwa razy większa niż czas przejścia impulsu przez linię. Aby to osiągnąć, można zaproponować linię Blumleina o konstrukcji przedstawionej na rys. 3.

Linia Blumleina w technologii PCB składa się z trzech warstw: środkowa to wspólna dla obu linii masa. Pod spodem znajduje się otwarta linia odpowiadająca linii po prawej stronie obciążenia na rys. 2. Górna ścieżka to podłączony do generatora i iskiernika lewy koniec lewej linii z rys. 2.

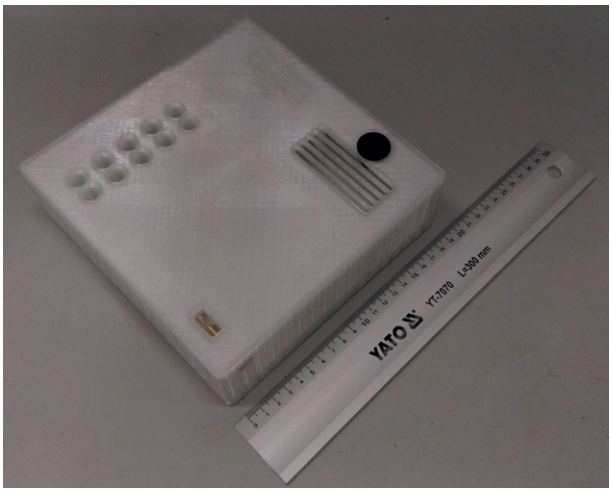
Komputerowy model linii wykonano w programie ANSYS HFSS. Jako wymuszenia użyto wyników symulacji samego generatora w programie SPICE. Analiza czasowa pola elektromagnetycznego wykonana za pomocą programu HFSS pozwoliła na wyznaczenie rozkładu pola elektromagnetycznego oraz określenie wpływu parametrów konstrukcji linii (takich jak szerokość ścieżki, grubość substratu czy odstęp między sekcjami) na działanie linii. Najbardziej interesujące było zbadanie wpływu „wężowej" konstrukcji, skutkującej sprzężeniami elektrycznymi i magnetycznymi pomiędzy poszczególnymi sekcjami. Na rys. 4 przedstawiono otrzymany w wyniku symulacji rozkład pola elektrycznego (|E|) w pierwszej (lewej na rys. 2) linii, w wybranych chwilach czasowych.

Na podstawie wartości pola elektrycznego w poszczególnych chwilach czasowych wyznaczono rozkład napięcia na obciążeniu. W tym celu obliczano dla każdej chwili czasowej całkę liniową z natężenia pola elektrycznego wzdłuż odcinka łączącego końce górnej i dolnej linii. Wyznaczony w ten sposób przebieg czasowy napięcia na obciążeniu przedstawiono na rys. 5, gdzie zestawiono go z napięciem podanym na początek linii.

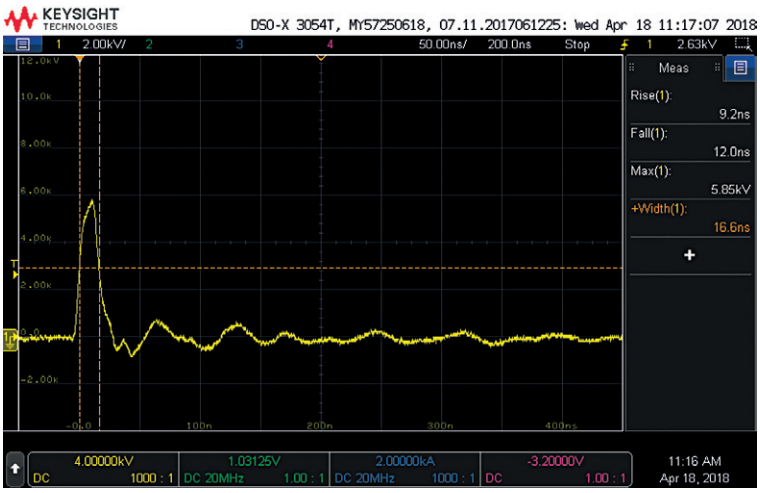
Na rys. 5 widać wyraźnie quasi-prostokątny impuls wyjściowy z nałożonymi dodatkowymi impulsami wynikającymi ze sprzężeń pomiędzy poszczególnymi segmentami. Sprzężenia te można zauważyć także po wnikliwej analizie



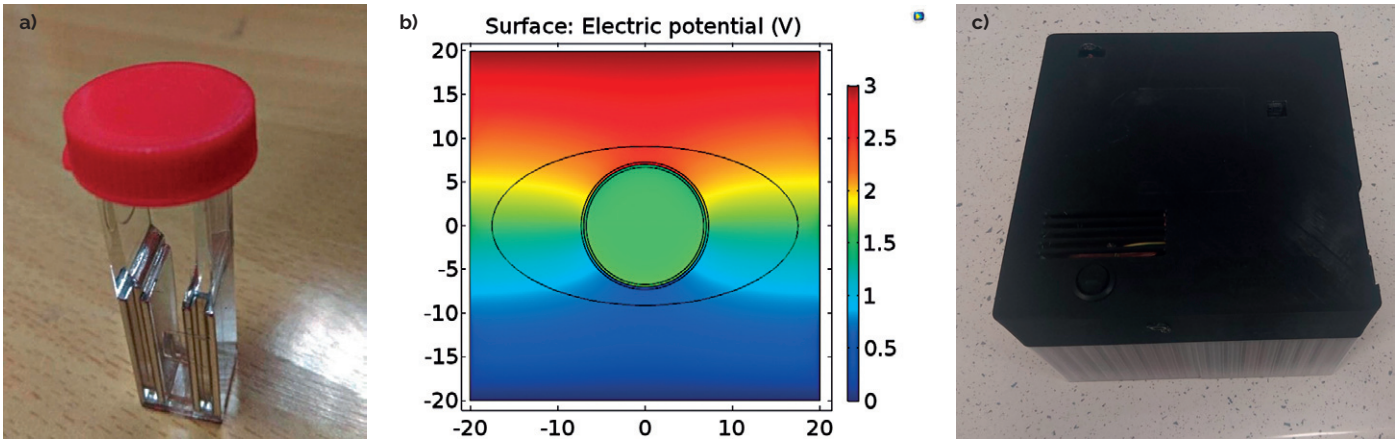
Rys. 5. *Napięcie na wejściu linii (kolor niebieski) i na obciążeniu (kolor czerwony) otrzymane w wyniku symulacji za pomocą programu ANSYS-HFSS*



Rys. 6. *Pierwszy prototyp generatora*



Rys. 7. *Impuls napięciowy rzeczywistego generatora*



Rys. 8. *Kuweta elektroporacyjna (a), symulacja pola elektrycznego w otoczeniu modelu komórki w programie ANSYS Maxwell (skala osi w mikrometrach) (b), i zdjęcie drugiego generatora (c)*

rys. 4 – zwłaszcza na rozkładzie pola dla t = 25 ns (obraz III) widać artefakty napięcia w skrajnych segmentach obu sekcji. Wydaje się, że jest to nieunikniony skutek pogięcia linii w celu zmniejszenia rozmiarów urządzenia.

Weryfikacja symulacji

Prawdziwą weryfikacją rezultatów symulacji były badania prototypu generatora przedstawionego na rys. 6. Całe urządzenie udało się zmieścić w obudowie o wymiarach 20 × 20 × 6 cm, włącznie z sześcioma litowo-jonowymi akumulatorami 18650 stanowiącymi zasilanie. Widać okienko pozwalające obserwować pracę iskiernika i 10 otworów na pojemniki z komórkami poddawanymi elektroporacji. Pojemniki umieszczono pomiędzy wbudowanymi w urządzenie elektrodami generującymi pole elektryczne.

Generator impulsów wysokiego napięcia oparto na tranzystorze IGBT International Rectifier IRG4PH50K o maksymalnym napięciu 1,2 kV. Cewki mają indukcyjność 1 μH i 1 mH, kondensator 500 pF. Rezystor ładujący linię ma wartość 150 Ω. Charakterystyczna impedancja linii transmisyjnych to 75 Ω, a opóźnienie jednej sekcji to 20 ns.

Wyjściowe napięcie generatora (pojedynczy impuls) pokazano na rys. 7. Widać duże podobieństwo do wyników symulacji w programie ANSYS, choć oczywiście wyjściowy impuls różni się nieco – jest to spowodowane uproszczeniami przyjętymi w modelu numerycznym.

Kolejnym etapem prac były symulacje pola elektrycznego wewnątrz kuwety umieszczonej w zewnętrznym polu elektrycznym. Wykazały one, że ze względu na specyfikę hodowli komórek poddawanych testom niezbędne jest doprowadzenie napięcia bezpośrednio do elektrod zanurzonych w płynie zawierającym komórki. To zmusiło autorów do przebudowy urządzenia, by dopasować konstrukcję linii do impedancji kuwety wypełnionej płynem.

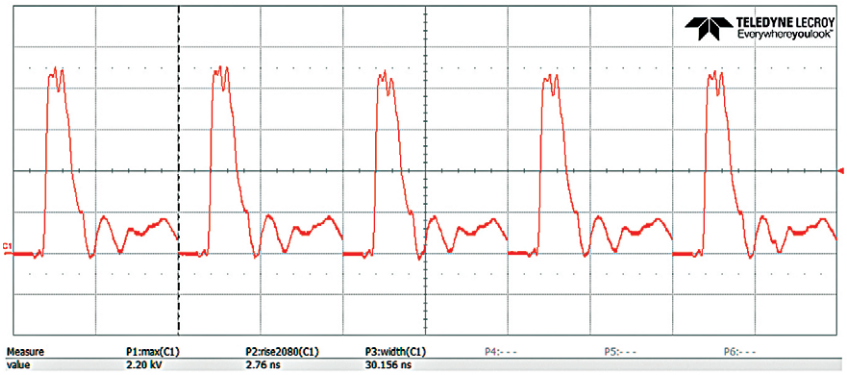
Po przeprowadzeniu badań pozwalających ustalić zastępczą impedancję kuwety przy wymuszeniu nanosekundowymi impulsami okazało się, że optymalna impedancja charakterystyczna sekcji linii Blumleina powinna wynosić około 15 Ω. Realizacja takiej linii w technologii PCB wymagałaby zastosowania bardzo cienkiego substratu (impedancja charakterystyczna linii jest odwrotnie proporcjonalna do pierwiastka z jednostkowej pojemności linii, która jest tym większa im cieńszy jest substrat), co mogłoby spowodować problemy z wytrzymałością napięciową linii. Łatwiejszym rozwiązaniem było wykorzystanie trzech linii 50-omowych połączonych równolegle, co pozwoliło na zastępczą impedancję na poziomie 16,6 Ω.

Na rys. 8 przedstawiono kuwetę elektroporacyjną, wyniki symulacji pola elektrycznego w otoczeniu uproszczonego modelu komórki oraz drugi generator impulsów, dopasowany impedancyjnie do kuwety.

Na rys. 9 widać serię impulsów poprawionego generatora. Charakteryzują się one dobrą powtarzalnością. Czas narastania (około 2,75 ns) w porównaniu z szerokością 30 ns pozwala uznać ich kształt za zadowalający. Eksperymenty prowadzone w Centrum Inżynierii Biomedycznej Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie potwierdziły, że parametry impulsów wystarczają do uzyskania efektu elektroporacji.

Wnioski

Z użyciem oprogramowania ANSYS-HFSS zaprojektowano w drodze symulacji komputerowych niewielką linię Blumleina o wymaganych parametrach.



Rys. 9. *Seria impulsów generatora przedstawionego na rys. 8*

Szybko opracowano niewielki, tani generator o bardzo zadowalających osiągach: zasilany z akumulatorów o wypadkowym napięciu około 22 V pozwala on na uzyskanie quasi-prostokątnych impulsów wysokiego napięcia o amplitudzie 2 kV i szerokości 30 ns z powtarzalnością sięgającą 100 impulsów na sekundę. Generator podłączony do elektrod urządzenia do elektroporacji wytwarza impulsowe pole elektryczne wystarczające do uzyskania efektu elektroporacji błony komórkowej.

Prezentacja wyników na międzynarodowej konferencji IEEE „Pulsed Power and Plasma Science Conference" w czerwcu 2019 r. wzbudziła duże zainteresowanie. Okazało się, że dzięki dobremu dopasowaniu impedancji generatora do kuwety elektroporacyjnej do uzyskania efektów potrzeba niemal trzykrotnie niższego napięcia niż wartości stosowane w innych ośrodkach.

Dzięki wykorzystaniu symulacji komputerowych proces projektowania linii zajął niecałe dwa tygodnie.

LITERATURA

[1] J. Starzyński, *Symulacje komputerowe w projektowaniu kompaktowych generatorów szybkich i silnych impulsów pola elektromagnetycznego*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2019.

[2] G. Mesyats, *Pulsed Power*. Springer US, 2005.

[3] A.D. Blumlein, *British Patent Specification 394, 335*, „Journal of the Audio Engineering Society", 1958.

[4] A. Haddad, D.F. Warne, *Advances in high voltage engineering*. Institution of Electrical Engineers, 2004.

[5] Y. Achour, J. Starzyńki, A. Łasica, *New embedded nanosecond pulse generator based on spark gap and IGBT*, IEEE 21st International Conference on Pulsed Power (PPC), IEEE, 2017.

[6] Y. Achour, J. Starzyńki, A. Łasica, *New Marx based generator using IGBTs for adjustable quasi-rectangular pulses*, IEEE Pulsed Power and Plasma Science Conference, Orlando, 2019, http://www.ppps2019.org/assets/AbstractBook-20190524.pdf.

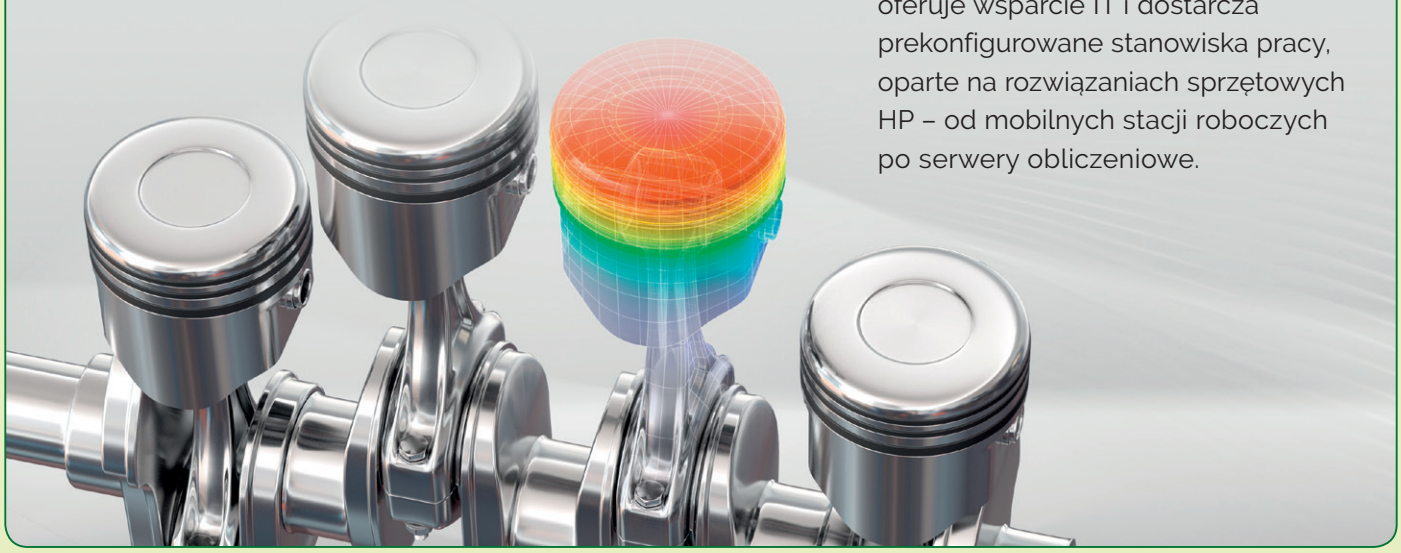
ANSYS CERTIFIED ELITE CHANNEL PARTNER

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