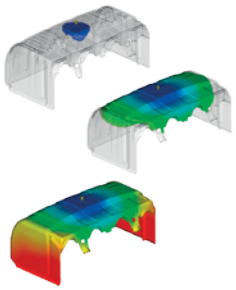
Metoda analizy numerycznej komponentów z tworzyw sztucznych ze wzmocnieniem, opracowana w firmie WABCO Polska



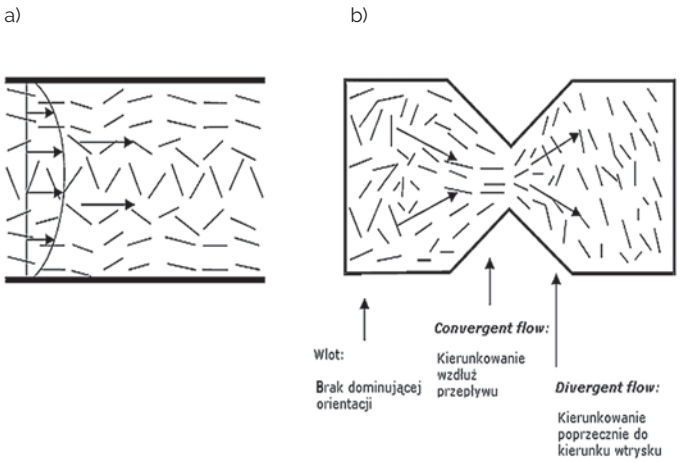
Damian Bodniewicz • WABCO Polska • damian.bodniewicz@wabco-auto.com

Tworzywa sztuczne znalazły szerokie zastosowanie w produkcji opakowań i sprzętu elektronicznego oraz w takich gałęziach przemysłu, jak budownictwo, motoryzacja czy rolnictwo. Według danych [1] roczna produkcja tworzyw sztucznych na świecie systematycznie wzrasta (2012 r. – 288 mln t, 2013 r. – 299 mln t, 2014 r. – 311 mln t), a w Europie utrzymuje się na poziomie ok. 60 mln t. WABCO Polska, jeden z wiodących na świecie dostawców bezpiecznych i wydajnych technologii oraz systemów sterowania do pojazdów użytkowych, oferuje systemy, w których znaczący udział mają komponenty z tworzyw sztucznych wzmacnianych włóknami. Firma dąży do tego, aby jej produkty spełniały rygorystyczne wymagania techniczne, a jednocześnie były oferowane za rozsądną cenę, dlatego dużą wagę przykłada do etapu projektowania nowych części.

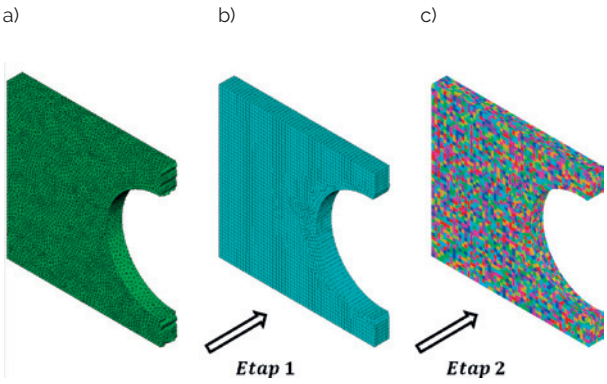
Dział inżynieryjny WABCO Polska korzysta z analiz numerycznych bazujących na metodzie elementów skończonych. Zakres tych analiz obejmuje m.in. symulacje procesu formowania komponentów z tworzyw sztucznych metodą wtrysku do formy (środowisko Autodesk Moldflow) oraz symulacje strukturalne (system ANSYS) uwzględniające obciążenia robocze, jakim poddawane są produkty w trakcie ich użytkowania.

W artykule zaprezentowano autorską metodę pozwalającą na uwzględnienie w obliczeniach strukturalnych rozkładu fazy wzmocnienia w wypraskach produkowanych metodą wtrysku ciśnieniowego. Metoda ta nie wymaga zakupu oprogramowania zewnętrznego (np. Converse, Digimat, MSA, MoldSim) do realizacji transferu anizotropowych właściwości mechanicznych między środowiskami Moldflow i ANSYS. Mapowanie danych materiałowych odbywa się z wykorzystaniem makr w języku APDL (ANSYS Parametric Design Language), który jest częścią systemu ANSYS.

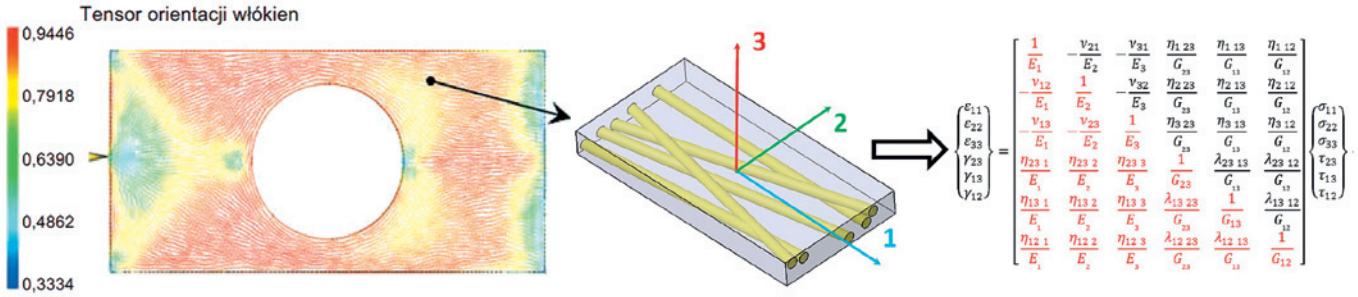
W rezultacie zaawansowane obliczenia z uwzględnieniem anizotropii właściwości mechanicznych można prowadzić bez konieczności ponoszenia jakichkolwiek dodatkowych kosztów na zakup zewnętrznej licencji na oprogramowanie.



Rys. 1. *Proces kierunkowania fazy wzmocnienia podczas wtrysku tworzywa do formy: a) po grubości elementu, b) w wyniku zmiany przekroju kanału we wnętrzu formy [3]*



Rys. 3. *Proces transferu danych materiałowych pomiędzy modelami dyskretnymi tej samej geometrii: etap 1 – lokalizacja i parowanie elementów między dwoma modelami, etap 2 – przypisanie i transfer anizotropowych danych materiałowych do elementów modelu docelowego*



Rys. 2. *Wyznaczanie lokalnych właściwości mechanicznych tworzywa sztucznego ze wzmocnieniem [4]*

Tworzywo ze wzmocnieniem – anizotropia właściwości mechanicznych

Polimer z wypełnieniem w postaci krótkich włókien (o długości ≤ 1 mm) jest z zasady materiałem kompozytowym, w którym fazą wzmacniającą są cząsteczki (o określonej geometrii) zawieszone w lepkim medium [2]. W wyniku wtrysku uplastycznionego materiału do formy dochodzi do kierunkowania włókien w wyprasce, która dodatkowo wykazuje charakter warstwowy po grubości (rys. 1).

Do głównych czynników mających wpływ na proces i stopień orientacji włókien zalicza się:

- ogólną dynamikę uplastycznionego polimeru,
- wartość naprężeń ścinających w polimerze,
- geometrię oraz koncentrację fazy wzmacniającej,
- interakcję uplastycznionego polimeru z fazą wzmacniającą,
- mechaniczne i/lub hydrodynamiczne oddziaływanie między poszczególnymi włóknami.

Środowisko Moldflow firmy Autodesk umożliwia analizę dynamiki przepływu uplastycznionego polimeru z uwzględnieniem jego interakcji z fazą wzmacniającą oraz oddziaływania pomiędzy samymi włóknami. Po określeniu przestrzennej dystrybucji wypełnienia następuje uśrednienie właściwości mechanicznych po objętości poszczególnych elementów skończonych modelu dyskretnego. W efekcie wtrysku do formy tworzywa ze wzmocnieniem otrzymuje się wypraskę wykazującą anizotropię właściwości mechanicznych. Dokładny opis matematyczny jej lokalnych parametrów w zakresie sprężystym wymaga przyporządkowania każdemu z elementów siatki MES unikatowej macierzy sztywności/podatności zawierającej 21 niezależnych składowych (rys. 2). Taka definicja materiału komplikuje obliczenia inżynierskie.

Mapowanie danych numerycznych Moldflow/ANSYS

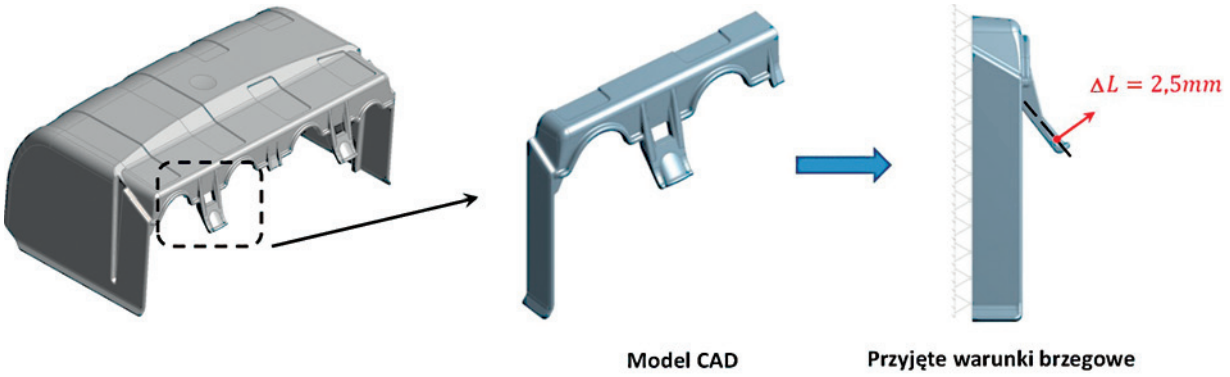
Po określeniu lokalnej dystrybucji i orientacji włókien we wnętrzu wypraski (rys. 3a) możliwe jest przetransferowanie danych numerycznych (orientacji włókien, wypaczenia części i naprężeń resztkowych po wtrysku) na model dyskretny obiektu, który zostanie wykorzystany w analizie strukturalnej (rys. 3b) – określa się to mianem *mapowania*. Cały proces jest realizowany automatycznie za pomocą makra w języku APDL.

Nowy model MES (rys. 3b) może zostać zdyskretyzowany według uznania i doświadczenia użytkownika wykonującego obliczenia wytrzymałościowe, np. z uwzględnieniem zagęszczenia siatki w miejscach przewidywanej koncentracji naprężeń bądź w okolicach linii łączenia strug tworzywa określonych w analizie wtrysku ciśnieniowego do form. Jednocześnie model do analizy strukturalnej może stanowić zaledwie wycinek oryginalnej geometrii, co znacząco skraca czas obliczeń numerycznych, zwłaszcza w analizach nieliniowych. W rezultacie otrzymuje się model z przypisanymi danymi materiałowymi unikalnymi dla każdego elementu siatki (rys. 3c).

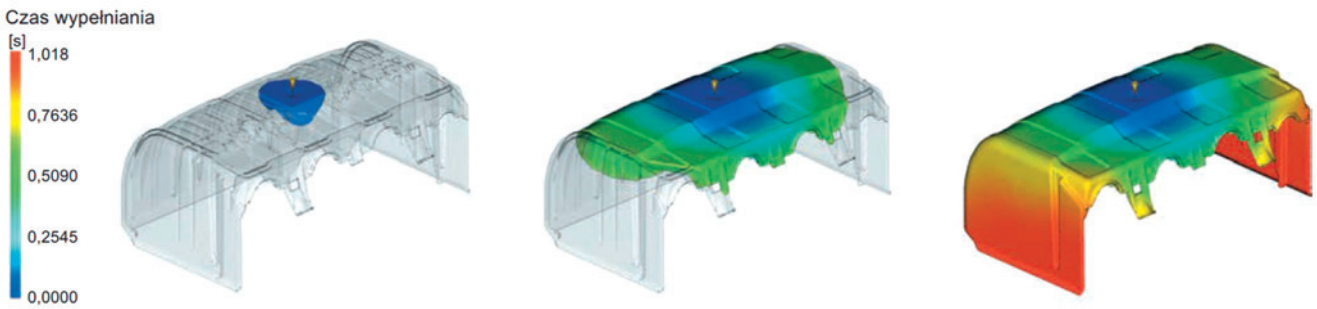
Weryfikacja eksperymentalna algorytmu mapowania

Opisany algorytm transferu anizotropowych danych numerycznych na model do analizy strukturalnej poddano weryfikacji eksperymentalnej. Jako obiekt do testów przyjęto pokrywę elektroniki jednego z produktów oferowanych przez firmę WABCO Polska. Część zamodelowano numerycznie (proces wtrysku wraz z analizą strukturalną) i przetestowano w rzeczywistości. Badany obiekt miał zatrzask, który w trakcie montażu/demontażu ulega odgięciu w kierunku normalnym do osi wskazanej na rys. 4, na odległość ΔL. W odpowiedzi na zadane przemieszczenie rejestrowano siłę reakcji F, którą wyznaczono na drodze testów oraz oszacowano numerycznie.

W pierwszej kolejności wykonano symulację wypełniania formy tworzywem



Rys. 4. *Badany obiekt (pokrywa elektroniki) wraz ze schematem obciążenia wypraski w trakcie jej montażu*



Rys. 5. *Proces wypełniania formy tworzywem sztucznym pod ciśnieniem*

z 30% udziałem włókien szklanych (rys. 5), aby uzyskać informację na temat rozkładu i kierunkowości fazy wzmocnienia w całej objętości wypraski (rys. 6).

Następnie, aby oszacować wpływ sposobu definiowania właściwości polimeru ze wzmocnieniem w obliczeniach numerycznych, przygotowano dwie analizy strukturalne dla następujących modeli materiałowych:

- z wykorzystaniem algorytmu mapowania danych („MES – wł. anizotropowe"),
- przy założeniu stałego modułu sztywności odczytanego z karty materiału od dostawcy („MES – wł. izotropowe").

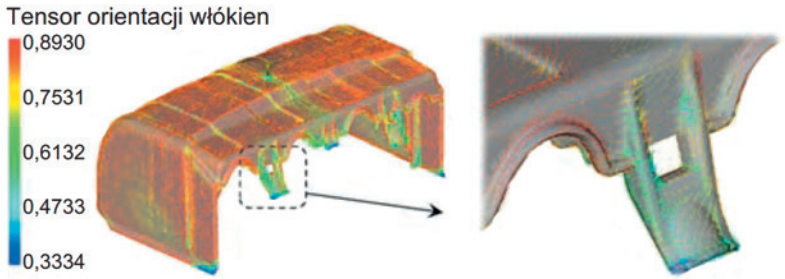
Model przyjęty do obliczeń strukturalnych stanowił wycinek pokrywy, na który nałożono warunki brzegowe zaprezentowane na rys. 4. Wyznaczono deformację wypraski oraz zmianę siły reakcji w funkcji przemieszczenia punktu kontrolnego na zatrzasku. Otrzymane numerycznie przebiegi siły porównano z wartościami zarejestrowanymi podczas testów próbek (testy 1–4). Zestawienie wyników pokazano na rys. 7b.

Analiza rys. 7b wskazuje na wysoką zgodność wyników eksperymentalnych z wartościami otrzymanymi z symulacji uwzględniającej anizotropię materiału („MES – wł. anizotropowe"). Zaprezentowane przebiegi są zwłaszcza zbliżone w zakresie przemieszczenia punktu kontrolnego zatrzasku do 2 mm. Wytłumaczeniem rozbieżności występującej powyżej tego poziomu może być nieliniowy charakter krzywej umocnienia materiału $\sigma(\varepsilon)$ przy wyższych wartościach odkształcenia bądź przejście materiału z zakresu sprężystego do sprężysto-plastycznego. Tych zjawisk nie uwzględniono w analizie numerycznej ze względu na wykorzystany w trakcie mapowania liniowy model materiału anizotropowego. Trwają prace nad rozbudowaniem przedstawionej metody o zakres plastycznej deformacji materiału w oparciu o nieliniowe krzywe umocnienia $\sigma(\varepsilon)$ otrzymane z prób jednoosiowego rozciągania próbek materiałowych.

Jednocześnie rys. 7b wskazuje, że siła reakcji zarejestrowana przy założeniu stałej wartości modułu sztywności („MES – wł. izotropowe") była zdecydowanie wyższa od wartości odczytanych dla modelu anioztropowego i danych eksperymentalnych. Bezpośrednim powodem takiego zachowania jest sposób wyznaczania modułu Younga dla tworzyw sztucznych ze wzmocnieniem w próbie jednoosiowego rozciągania (dane te są dostępne w kartach producentów). W rzeczywistości próbki materiałowe (zazwyczaj wiosełkowe, zgodne z normą ISO 527) mają fazę wzmocnienia w części pomiarowej zorientowaną zgodnie z kierunkiem obciążania. W rezultacie rejestrowana jest wysoka wartość modułu sztywności, co powoduje przesztywnienie modelu numerycznego w miejscach o niższym poziomie orientacji włókien lub tam, gdzie ułożenie włókien nie jest zgodne z kierunkiem przenoszenia obciążenia. Oba zjawiska zaobserwowano w obszarze analizowanego zatrzasku (rys. 6).

Podsumowanie

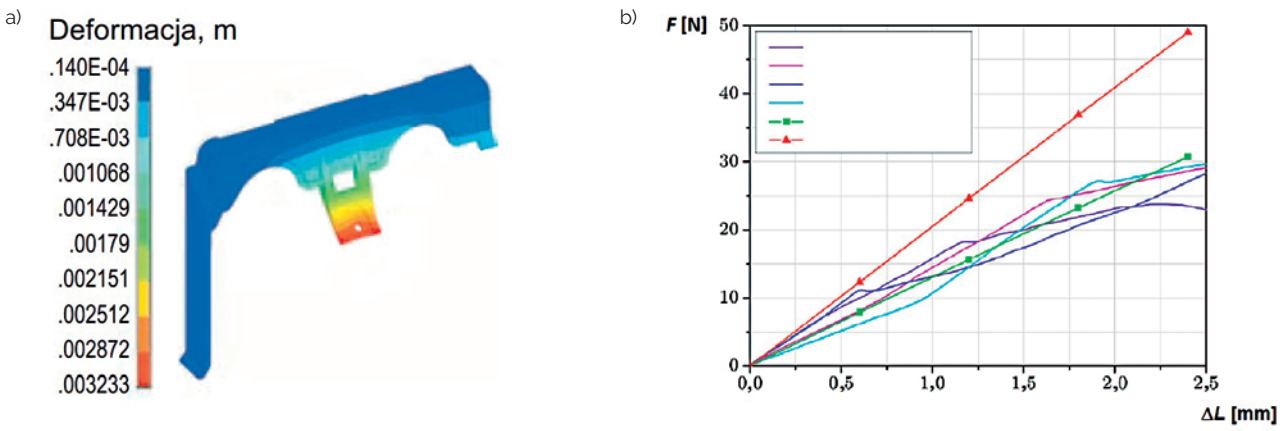
Na podstawie analiz numerycznych (Moldflow, ANSYS) wykazano zasadność stosowania autorskiej metody mapowania anizotropowych danych materiałowych z analizy numerycznej procesu wtrysku w programie Moldflow do analizy wytrzymałościowej w systemie ANSYS. Zaprezentowany algorytm umożliwia uwzględnienie w obliczeniach wytrzymałościowych: wpływu ukierunkowania fazy wzmacniającej, naprężeń resztkowych powstałych w procesie produkcyjnym, skurczu/wypaczenia komponentu, wady wtryskowej w postaci linii łączenia strug (*weld line*).



Rys. 6. *Dystrybucja fazy wzmocnienia wraz ze stopniem jej ukierunkowania*

LITERATURA

1. www.plasticseurope.org. *„Tworzywa sztuczne – fakty 2015: Analiza produkcji, zapotrzebowania oraz odzysku tworzyw sztucznych w Europie"* (dostęp: 13.09.2016 r.).
2. knowledge.autodesk.com (dostęp: 11.09.2016 r.).
3. Oumer A.N., Mamat O. "A review of effects of molding methods, mold thickness and other processing parameters on fiber orientation in polymer composites". *Asian Journal of Scientific Research*. Vol. 6 (2013): pp. 401–410.
4. Vasiliev V.V., Morozov E.V. "Fundamentals of mechanics of solids". *Mechanics and Analysis of Composite Materials*. Holand: Elsevier Science Ltd., 2001.



Rys. 7. *Wyniki strukturalnej analizy numerycznej: a) deformacja zatrzasku, b) przebiegi siły reakcji w funkcji wartości zadanego wymuszenia – zestawienie danych otrzymanych eksperymentalnie (testy 1–4) i numerycznie (MES)*