

Symulacje deformacji wyprasek z uwzględnieniem utwierdzenia wynikającego z montażu

Deformation simulations of plastic parts with consideration of assembly constraints

PRZEMYSŁAW POSZWA
MAREK SZOSTAK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.12.204>
English version available on: www.mechanik.media.pl

Przedstawiono wpływ montażu na deformację wypraski produkowanej metodą wtryskiwania. Wypraski ulegają deformacji ze względu na nierównomierny skurcz tworzywa. Zjawisko to jest analizowane za pomocą programów do komputerowej symulacji wtrysku. Obliczenia nie uwzględniają zazwyczaj rzeczywistego wykorzystania elementu. Na wybranych przykładach zaprezentowano wpływ montażu na odkształcenia wyprasek. **SŁOWA KLUCZOWE:** wtryskiwanie tworzyw sztucznych, deformacja, montaż

The paper deals with the influence of part assembly on deformation of plastic part produced with injection molding technology. Parts tend to deform because of non-uniform shrinkage, which can be predicted with CAE injection molding software. Calculations usually do not consider the application of the part. In this paper, several examples were used to present the influence of assembly on the shape of the part.

KEYWORDS: injection molding, deformation, assembly

Rozwój przetwórstwa materiałów polimerowych pozwala na produkcję coraz bardziej skomplikowanych, często grubościennych detali. Tendencja ta jest bardzo silna m.in. w branży motoryzacyjnej oraz AGD.

Tworzywa sztuczne cechują się wysokim skurczem przy przechodzeniu z fazy ciekłej do fazy stałej. Powoduje to istotne problemy z dokładnością wymiarową produkowanych wyprasek [1]. Nie byłoby problemu, gdyby w całej objętości wypraski skurcz był jednorodny, jednak w zależności od warunków (przede wszystkim temperatury i ciśnienia) tworzywo zachowuje różną objętość właściwą. Różnice w objętości właściwej w poszczególnych miejscach skutkują nierównomiernym skurczem, będącym podstawą deformacji [2].

Skurcz wypraski podlega kompensacji – produkowane gniazda form wtryskowych są w rzeczywistości nieco większe, aby po skurczeniu się finalny wyrób miał oczekiwane wymiary [3]. Problem jednak polega na tym, że ze względu na nierównomierny skurcz przewidzenie optymalnej kompensacji jest praktycznie niemożliwe, zwłaszcza w przypadku złożonych geometrii, gdzie występuje również duża niejednorodność ścian. Bez programów do symulacji procesu wtryskiwania tworzyw sztucznych nie można optymalnie dobrać wielkości kompensacji wymiarów gniazda formy wtryskowej.

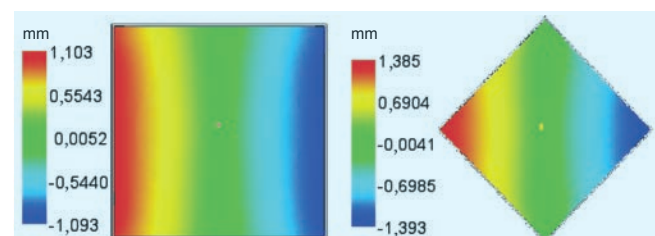
Cechą charakterystyczną branży motoryzacyjnej jest stosowanie elementów o znacznej grubości lub dużym uźebrowaniu i o wąskiej tolerancji wymiarowej zarówno globalnej (ogólna odchyłka kształtu pod względem założonej geometrii), jak i montażowej (odchyłka wymiarów montażowych, np. rozstawu otworów montażowych) [4–6]. Wynika to z tego, że tworzywa sztuczne mają niższą

sztywność, a konstruktorzy oczekują od elementów produkowanych metodą wtryskiwania dokładności niewiele gorszej niż w przypadku wyrobów metalowych [7].

Pomiar deformacji

Pomiar deformacji jest zagadnieniem nietrywialnym. W praktyce przemysłowej ogranicza się do próby analizy rozkładu kolorów na powierzchni wypraski bez uwzględnienia takich aspektów, jak układ współrzędnych wypraski oraz sposób pomiaru wypaczeń.

Układ współrzędnych wypraski jest podstawowym problemem w przypadku elementów dla branży motoryzacyjnej, które są zorientowane w układzie współrzędnych całego pojazdu. Nieodpowiednie zorientowanie części może skutkować błędnym wynikiem analizy. Jest to istotne zwłaszcza przy wąskich tolerancjach, gdzie pewna niezgodność między orientacją osi powoduje, że wyznaczona deformacja będzie akceptowalna, choć w rzeczywistości wyjdzie poza dopuszczalny zakres (dla danych warunków przetwórstwa). Efekt ten został zaprezentowany na rys. 1, gdzie tę samą część obrócono o 45° i dokonano pomiaru wzdłuż osi pokrywającej się początkowo z jednym z boków.



Rys. 1. Pomiar deformacji wypraski metodą najlepszego dopasowania dla dwóch różnych ustawień układu współrzędnych

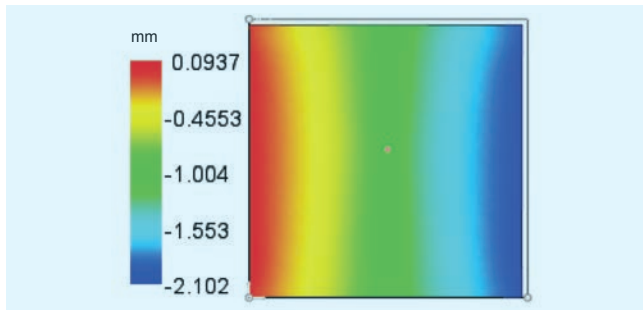
Kolejnym aspektem jest sposób pomiaru wypaczeń. Domyślnie programy symulacyjne (np. Autodesk Moldflow) wykorzystują metodę najlepszego dopasowania (*best fit*) jako podstawową podczas analizy paczenia. Polega ona na takim dobraniu ułożenia wypraski, aby średnia różnica między położeniem bazowym (według modelu CAD) a uzyskanym (zdeformowaną wypraską) była jak najmniejsza. W przypadku płaskiej kwadratowej płyty zaprezentowanej na rys. 1 wymiar zmienił się o 1,1 mm oraz o -1,1 mm. Dla prostej wypraski można wykonać proste przeliczenie, żeby uzyskać rzeczywistą zmianę danego wymiaru liniowego. Nie jest to możliwe dla bardziej skomplikowanych wyprasek.

Oprócz metody najlepszego dopasowania wykorzystuje się konkretne płaszczyzny pomiarowe ustalone za pomocą tzw. kotwic (*anchors*). W miejscu umocowania pierwszej kotwicy dochodzi do utwierdzenia modelu bazowego oraz zdeformowanej wypraski. Wprowadzenie dodatkowych dwóch punktów pozwala na ustalenie płaszczyzny, względem której będą mierzone deformacje. Jest to bardzo

* Mgr inż. Przemysław Poszwa (przemyslaw.b.poszwa@doctorate.put.poznan.pl), dr hab. inż. Marek Szostak (marek.szostak@put.poznan.pl) – Instytut Technologii Materiałów Politechniki Poznańskiej

istotne, gdyż w większości przypadków dopiero prawidłowe zdefiniowanie płaszczyzn pomiarowych pozwala przeanalizować postać deformacji wyprasek.

Na rys. 2 zaprezentowano płytę z rys. 1. Początek układu umieszczono w jednym z narożników. Wartość ujemna pomiaru wynika z tego, że na skutek skurczu wypraska uległa zmniejszeniu.



Rys. 2. Pomiar deformacji z wykorzystaniem kotwic

Oprogramowanie do symulacji wtrysku pozwala również dobrać optymalną kompensację gniazda formującego. Na podstawie tej analizy uzyskuje się informację, o ile powinno zostać przeskalowane gniazdo w poszczególnych kierunkach, aby uzyskać minimalne odkształcenia mierzone metodą najlepszego dopasowania. W sytuacji zaprezentowanej na rys. 1 wielkość kompensacji wynosiła odpowiednio: 1,964% (wzdłuż boku poziomego); 1,962% (wzdłuż boku pionowego) i 1,904% (na grubości) w wariancie lewym oraz odpowiednio: 2,126%; 2,145% (wzdłuż boków) i 1,904% (na grubości) w wariancie prawym. W praktyce przemysłowej stosuje się kompensację izotropową, jednak niepoprawne odczytanie wartości kompensacji (przy złej orientacji układu współrzędnych) będzie rzutować na finalny wyrób.

Innym sposobem analizy deformacji wyprasek jest pomiar położenia poszczególnych punktów charakterystycznych (np. środków otworów montażowych, punktów znajdujących się na krawędziach). W przypadku tego typu wielkości korzystniejszym rozwiązaniem jest pomiar danego wymiaru po deformacji dla różnych kompensacji. Wiedząc, że położenie poszczególnych punktów może ulegać przemieszczeniu ze względu na nierównomierny skurcz, należy sprawdzić ich położenie dla różnych kompensacji, tak aby wybrać wielkość kompensacji, dla której wszystkie otwory spełniają tolerancje.

Montaż a analiza deformacji

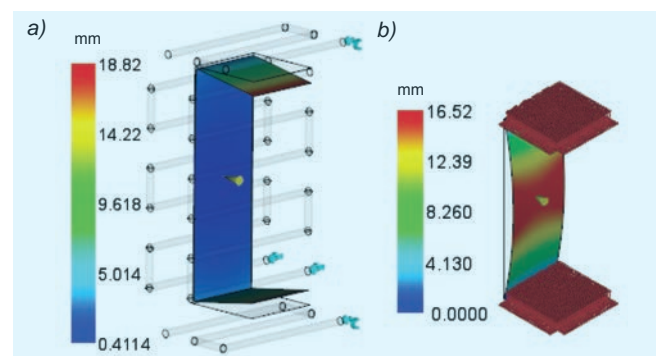
W niniejszej pracy zdecydowano się omówić wpływ montażu na deformację wyprasek. Wiele elementów z tworzyw sztucznych, zwłaszcza tych o skomplikowanej geometrii, jest montowanych w różnego rodzaju urządzeniach (AGD, samochodach). Oczekuje się od nich nie tylko łatwości montażu, ale również spełniania odpowiednich tolerancji dotyczących kształtu.

Proces montażu powoduje dodatkowe deformacje części. Deformacje te powstają na skutek utwardzenia wypraski w poszczególnych miejscach (np. otworach). Jeśli utwardzenie występuje w więcej niż jednym miejscu, nie da się uzyskać informacji na temat rzeczywistej deformacji za pomocą wspomnianych narzędzi, ponieważ są one jedynie w stanie umocować kotwicę w miejscu utwardzenia. Podobnie nie da się określić zmiany wymiarów liniowych – może się okazać, że po zamocowaniu wypraski w dwóch miejscach, trzecie miejsce będzie niemożliwe do utwardzenia.

Poniżej zaprezentowano wyniki symulacji przeprowadzonych w programie Autodesk Moldflow Insight 2017 dla trzech elementów:

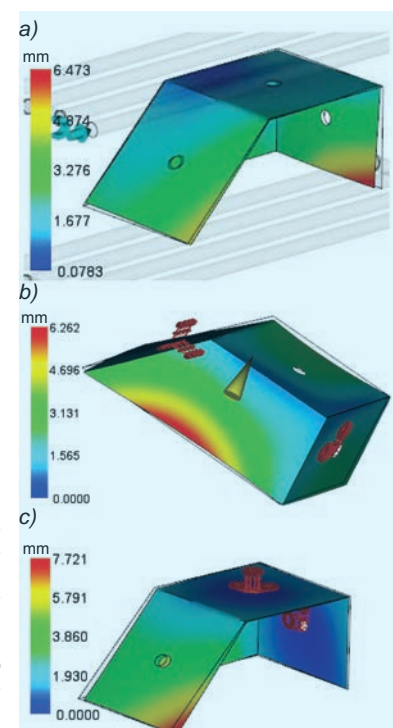
- wypraski w kształcie litery C (*P1*),
- wypraski z trzema otworami (*P2*),
- elementu wnętrza samochodu (*P3*).

Pierwsze dwie kształtki były symulowane z wykorzystaniem siatki typu *midplane* (powierzchniowej, o grubości 5 mm), a ostatnia – siatki 3D. Do obliczeń wykorzystano tworzywo Moplen HP500N. W przypadku *P1* i *P2* zaprojektowano uproszczony układ chłodzenia o niskiej wydajności, aby uzyskać znaczące deformacje. Analiza *P3* nie uwzględniała wpływu układu chłodzenia na deformacje (założono stałą temperaturę na powierzchni całego gniazda formującego).



Rys. 3. Deformacja wypraski *P1* na skutek nierównomiernego skurczu: a) bez utwardzenia z zaznaczonym układem chłodzenia, b) z utwardzeniem na bocznych ściankach

Analiza kształtki *P1* (rys. 3) pokazuje, że przy braku usztywnienia pojawiają się relatywnie duże odkształcenia (sam detal ma 300 mm długości). Zamocowanie detalu powoduje (ze względu na dużą sztywność samego naroża) wygięcie centralnej części w łuk. W przykładzie wystąpiły duże odkształcenia, jednak nawet przy 10-krotnie mniejszych odkształceniach ugięcie na poziomie 1 mm byłoby widoczne w przypadku zamontowania części. Uwzględnienie montażu w analizie pozwala przewidzieć ewentualne problemy ze spasowaniem miejsc łączenia części.



Rys. 4. Deformacja wypraski *P2* na skutek nierównomiernego skurczu: a) bez utwardzenia, b) z utwardzeniem na ścianie pochyłej i pionowej, c) z utwardzeniem na ścianie poziomej i pionowej. Na rys. 4a zaprezentowano geometrię układu chłodzenia, a na rys. 4b – położenie punktu wtrysku

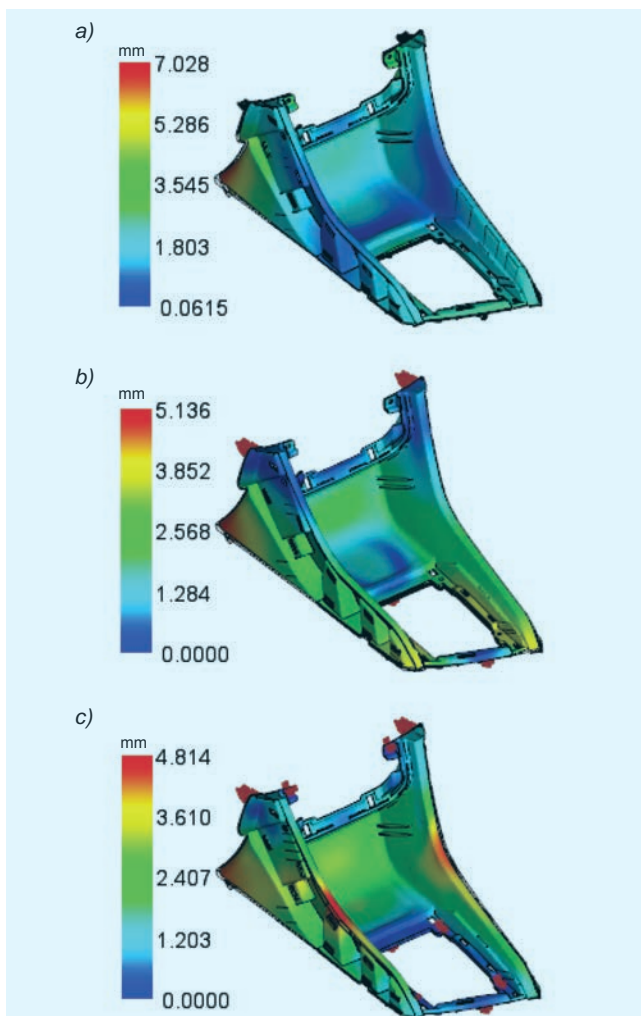
TABLICA. Przesunięcie nieutwierdzonego otworu na skutek nierównomiernego skurczu wypraski P2, w mm

Lokalizacja badanego otworu	Brak kompensacji	Kompensacja automatyczna
P2.1 – pozioma ściana	1,16	0,87
P2.2 – pozioma ściana	2,94	2,39
P2.2 – pochylona ściana	2,30	1,11
P2.3 – pochylona ściana	3,65	1,71

Wypraska P2 (rys. 4) to element z trzema otworami. Zmiana ich położenia była badana w zależności od umieszczenia kotwic. W pierwszym wariantcie wypraski nie były stosowane kotwice (P2.1), w drugim kotwice zostały umieszczone na ścianie pionowej oraz pochylonej (P2.2), a w trzecim – na ścianie pionowej i poziomej (P2.3).

W tabelicy zestawiono przesunięcia nieutwierdzonego otworu w zależności od mocowania. Aby zmniejszyć deformację, w poszczególnych wariantach wykorzystano automatyczną kompensację. Na podstawie tabeli stwierdzono, że sposób (kolejność) montażu ma wpływ na wielkość odchyłek kształtu, które w analizowanych przypadkach są większe niż w przypadku wypraski swobodnej. Może to uniemożliwić prawidłowy montaż części ze względu na zbyt duże przesunięcie otworu lub elementu mocującego.

Zastosowanie kompensacji zmniejsza co prawda deformację, jednak wartość kompensacji znacząco się różni w zależności od sposobu zamocowania wypraski



Rys. 5. Deformacja wypraski P3 na skutek nierównomiernego skurczu: a) bez utwierdzenia, b) z utwierdzeniem w elementach mocujących, c) z utwierdzeniem na elementach mocujących oraz w otworach

(taki sam efekt zaobserwowano w przypadku elementu P3). Z tego powodu przy wąskich tolerancjach wymiarowych i dużej liczbie tolerowanych wymiarów istotne jest uwzględnienie wpływu montażu na te tolerancje.

Kształtka P3 (rys. 5) stanowi element wnętrza samochodu. Jest to wypraska grubościenna z dużą liczbą utwierdzeń. Największe deformacje pojawiają się przy braku utwierdzenia i występują przede wszystkim w tylnej, mało widocznej części. Praktycznie zerowe odkształcenia są obserwowane z kolei w centralnej, najbardziej widocznej części (są to analizy z wykorzystaniem metody *best fit*). Wprowadzenie utwierdzeń (rys. 5b) spowodowało wystąpienie znaczących deformacji w obszarze pionowych krawędzi, co może utrudniać spasowanie wnętrza samochodu. Dodatkowe utwierdzenie w miejscach otworów powoduje (rys. 5c), że największe odkształcenia wystąpią w miejscach najbardziej widocznych i również uniemożliwią prawidłowe spasowanie części wnętrza samochodu. Redukcja deformacji byłaby możliwa poprzez lokalne zmniejszenie sztywności wypraski lub zmianę sposobu montażu, aby w jego trakcie nie dochodziło do tak znaczących deformacji.

Podsumowanie

Montaż części jest zagadnieniem pomijanym w powtryskowej analizie deformacji wypraski. Ma on jednak kluczowe znaczenie na etapie rzeczywistego zastosowania danej części. W przypadku skomplikowanych elementów niemożliwe jest przewidzenie zmian kształtu na skutek nierównomiernego skurczu, nie mówiąc o wpływie utwierdzenia.

Wykazano, że utwierdzenie wypraski w dwóch miejscach może spowodować duże trudności z utwierdzeniem w kolejnych miejscach. Montaż może również negatywnie wpłynąć na pasowanie części obudów, które muszą się pokrywać na pewnej długości.

Rola montażu powinna być brana pod uwagę w analizach, w których obserwuje się względnie duże deformacje wyprasek. Zły dobór miejsc montażu może powodować nadmierną deformację wypraski w kluczowych regionach i prowadzić do trudności z zamocowaniem części lub pasowaniem obudów, zwłaszcza przy wąskiej tolerancji.

Rozwiązaniem problemu jest również zmniejszenie sztywności wypraski, tak aby odkształcenie jednej części wypraski nie powodowało odkształcenia drugiej części. W przypadku P1 zmniejszenie sztywności krawędzi, np. poprzez podcięcie, spowodowałoby zdecydowanie mniejsze ugięcie części centralnej.

LITERATURA

- Greener J., Wimberger-Friedl R. „Precision Injection Molding – Process, Materials, and Applications”. Munich: Hanser Publishers, 2006.
- Autodesk Inc. „Autodesk Moldflow Insight”. San Rafael, CA. 94903, USA, 2017.
- Fisher J.M. „Handbook of molded part shrinkage and warpage.” Norwich, USA: Plastic Design Library, William Andrew Inc. 2003.
- Sharma H., Janiwarad R., Heerkens R., Uikey D., Terragni M., Kulkarni A. „Automotive glazing – Polymeric systems providing enhanced design freedom and functionality”. *Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers*. 2016, s. 171–179.
- Sethuraman K., Palanisamy K. „Material characterization of injection molded thermoplastic materials for finite element analysis – practical challenges”. *2013 International Conference on Smart Structures & Systems*. Chennai, India, 2013, s. 47–52.
- Meng Z., Guo W., Wei X. „Comparative analysis of automotive interior trim materials based on Moldflow”. *Applied Mechanics and Materials*. 117–119 (2012): s. 1496–1500: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.117-119.1496.
- Zawistowski H. „Racjonalność tolerancji wymiarów i pasowań w dokumentacji wyrobów wtryskiwanych”. *Mechanik*. 85, 4 (2012): s. 330–335.