

# Analiza zjawiska samoistnego wyboczenia wyprasek cienkościennych z tworzyw sztucznych

## Spontaneous buckling of thin-walled injection-molded parts

PRZEMYSŁAW POSZWA  
PAWEŁ BRZEK  
WIKTOR HOFFMANN\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.1.1>

Technologia wtryskiwania tworzyw sztucznych ma bardzo szerokie zastosowanie w przemyśle, zwłaszcza w produkcji opakowań oraz obudów. Omówiono zjawisko samoistnego wyboczenia wyprasek, które występuje przede wszystkim w elementach cienkościennych. Obok podstaw teoretycznych przedstawiono symulacje numeryczne wraz z eksperymentalną walidacją zjawiska.

**SŁOWA KLUCZOWE:** wtryskiwanie, wyboczenie, deformacje

*Injection molding technology has a wide range of industrial applications, especially in packaging and casing production. In this paper the spontaneous buckling of thin-walled injection molded plastic parts was described. Theoretical background along with numerical simulation and experimental validation of this phenomenon were presented.*

**KEYWORDS:** injection molding, buckling, warpage

Tworzywa sztuczne cechują się korzystnym stosunkiem modułu sprężystości do gęstości, dzięki czemu znalazły szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. Technologia formowania wtryskowego pozwala dodatkowo uzyskiwać części o skomplikowanych kształtach oraz cienkich ściankach w jednej operacji, w bardzo krótkim czasie.

Dużą wadą tworzyw sztucznych jest anizotropowy skurcz powstający w trakcie zestalania się w procesie wtryskiwania. Skutkuje on wieloma problemami na etapie wdrażania produkcji, gdyż w przypadku skomplikowanych kształtów bardzo trudno przewidzieć wartości skurczu w poszczególnych kierunkach i tym samym wielkości oraz postaci deformacji. Dopiero zastosowanie zaawansowanych programów symulacyjnych pozwala z dużą dokładnością przewidzieć efekt anizotropowego skurczu, jakim jest finalny kształt wypraski [1].

Efekt skurczu nie jest jedynym źródłem problemów podczas projektowania wyprasek. Oprócz tego bardzo istotnym aspektem są naprężenia resztkowe zamrożone w wyprascie po procesie przetwórczym [2]. Potrafią one wpłynąć na wytrzymałość wypraski oraz mogą wywoływać efekt rzadko rozpatrywany na etapie projektowania i analiz symulacyjnych – a mianowicie zjawisko samoistnego wyboczenia wypraski. Jest on obserwowany jedynie w wypraskach cienkościennych, jednak może powodować znaczące problemy z zachowaniem ich płaskości [3, 4].

W niniejszej pracy omówiono przyczyny i schemat powstawania naprężeń resztkowych oraz ich związek z samoistnym wyboczeniem wyprasek. Rozważania te zilustrowano symulacjami numerycznymi powtryskowego paczienia wyprasek, których wyniki porównano z efektem przeprowadzonego eksperymentu.

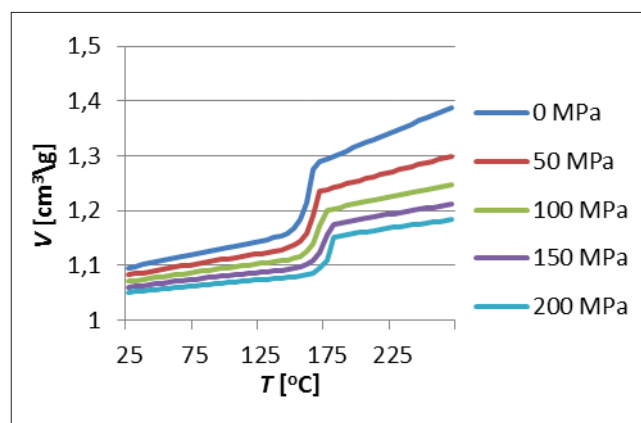
\* Mgr inż. Przemysław Poszwa (przemyslaw.b.poszwa@doctorate.put.poznan.pl), mgr inż. Paweł Brzek (pawel.brzek@put.poznan.pl) – Instytut Technologii Materiałów Politechniki Poznańskiej; mgr inż. Wiktor Hoffmann (wiktor.j.hoffmann@doctorate.put.poznan.pl) – Katedra Techniki Ciepłej Politechniki Poznańskiej

### Zmienność objętości tworzywa w funkcji ciśnienia i temperatury

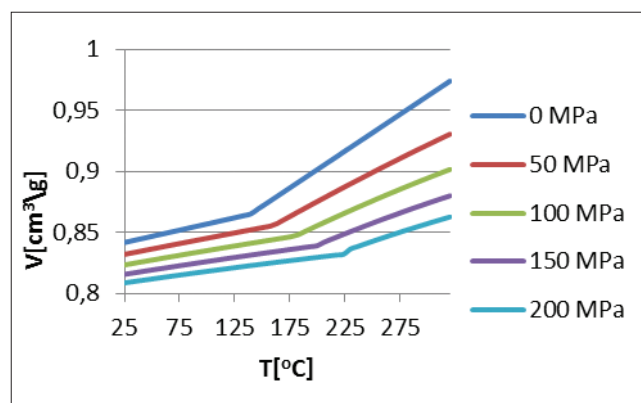
Bezpośrednimi przyczynami skurczu anizotropowego są niska przewodność cieplna polimerów, lepkość oraz duża nieliniowa zmienność objętości w zależności od temperatury i ciśnienia.

Tworzywa sztuczne cechują się zmienną objętością właściwą  $V$  w zależności od warunków (ciśnienia w formie wtryskowej  $P$ , temperatury tworzywa  $T$  po wtrysnięciu do formy). Zależność  $V$  od pozostałych parametrów jest różna dla tworzyw o strukturze częściowo krystalicznej oraz amorficznej. Wykres zależności  $P$ - $V$ - $T$  dla tworzywa częściowo krystalicznego (polipropylenu izotaktycznego Moplen HP500N) przedstawiono na rys. 1, a dla amorficznego (poliwęglanu Makrolon 2405) – na rys. 2.

W zależności od lokalizacji punktu wtrysku, rodzaju przewężki i parametrów nastawnych tworzywo sztuczne w danym miejscu wypraski zastyga przy różnych wartościach ciśnienia panującego wewnątrz formy wtryskowej.

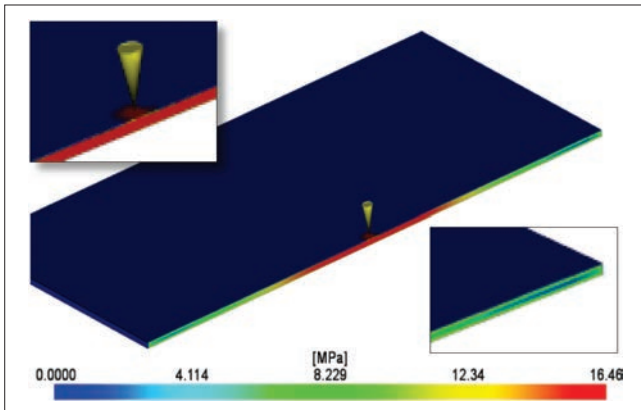


Rys. 1. Zależność  $P$ - $V$ - $T$  dla Moplen HP500N [5]



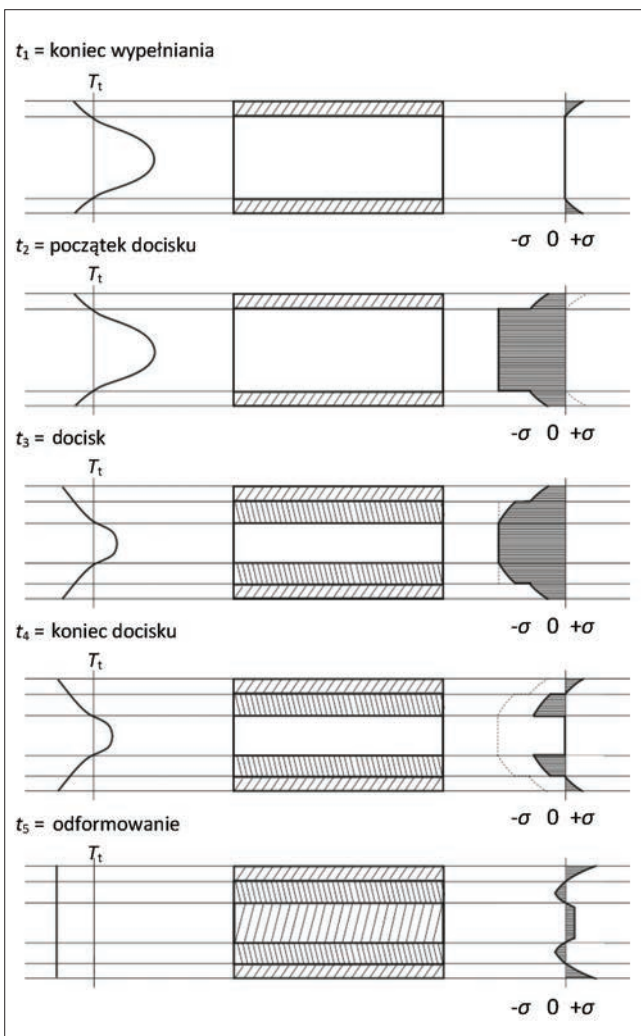
Rys. 2. Zależność  $P$ - $V$ - $T$  dla Makrolon 2405 [6]

Na rys. 3 pokazano wartość ciśnienia, przy którym zastygał dany obszar wypraski tworzywa. Wpływa to bezpośrednio na sposób formowania się naprężeń resztkowych indukowanych termicznie.



Rys. 3. Rozkład ciśnienia w próbce, przy którym zastyga dany obszar wypraski (przekrój)

Zasadniczo wyróżnia się naprężenia resztkowe indukowane płynięciem oraz termiczne (w materiałach nienapełnionych te pierwsze są zazwyczaj pomijane, gdyż są o rząd wielkości niższe niż te drugie). Powstawanie termicznych naprężeń resztkowych można podzielić na pięć etapów, przedstawionych na rys. 4.



Rys. 4. Proces powstawania naprężeń resztkowych indukowanych termicznie [7]

Po lewej stronie pokazano rozkład temperatury w środku warstwy zastygłego tworzywa, a po prawej – rozkład naprężeń w poszczególnych fazach zamrażania wypraski, czyli:

- $t = t_0$  – w całej objętości występuje równomierna temperatura oraz brak naprężeń;
- $t = t_1$  – przy zerowym ciśnieniu została się wierzchnia warstwa wypraski, której objętość jest mniejsza od objętości tworzywa w stanie ciekłym; występuje naprężenie rozciągające o niewielkiej wartości;
- $t = t_2$  – przyłożone zostaje ciśnienie docisku  $p_h$  wywołujące naprężenia ściskające. W ciekłym tworzywie są one równe  $\sigma = -p_h$ , a w zestalonej warstwie wierzchniej  $\Delta\sigma = \nu p_h / (1 - \nu)$ , gdzie  $\nu$  to liczba Poissona;
- $t = t_3$  – ciśnienie docisku jest stałe, pewna warstwa tworzywa ulega zestaleniu, jej skurcz jest ograniczony przez panujące w gnieździe ciśnienie (rys. 1 i 2), co zmniejsza naprężenia ściskające;
- $t = t_4$  – faza docisku ulega zakończeniu, ciśnienie docisku jest równe 0, naprężenia przesuwały się o  $\Delta\sigma$ ;
- $t = t_5$  – detal jest usunięty z formy, dalsze chłodzenie powoduje powstanie naprężeń rozciągających, gdyż przy braku ciśnienia proces przebiega jak przy swobodnym chłodzeniu [7].

W trakcie ostatniej fazy następuje budowanie naprężeń rozciągających, które mają zrównoważyć naprężenia ściskające. Ze względu na przewagę naprężeń ściskających należy uwzględnić w rozważaniach możliwość wystąpienia zjawiska wyboczenia w przypadku wyprasek cienkościennych.

### Zjawisko wyboczenia

Zjawisko wyboczenia występujące w konstrukcjach cienkościennych ma związek z teorią bifurkacji. W przypadku obciążenia elementu siłami ściskającymi obserwuje się skrócenie tego elementu. Gdy przyłożone siły są znaczące, może się okazać, że zamiast skrócenia w badanym elemencie wystąpi jego pozaosiowe wygięcie.

Poniżej pewnej wielkości obciążenia (tzw. siły krytycznej) występuje tylko jedna możliwa postać deformacji. Powyżej tej wartości okazuje się, że powstają dwie równoważne postacie deformacji (występuje bifurkacja), przy czym postać czystego ściskania jest niestabilna.

Przykładem takiego zjawiska jest osiowo ściskana linka, która przy obciążeniu o pewnej wartości ma tendencję do wyginania się w łuk [8].

Ponieważ nie ma znaczenia, czy stan naprężeń występujący w badanym elemencie jest wynikiem sił zewnętrznych, czy „zamrożonych” naprężeń resztkowych, zjawisko utraty stateczności (wyboczenia lub zwichrowania) może zająć jakoby samoistnie (bez sił zewnętrznych) w wyprasce po jej usunięciu z formy. Z przedstawionego opisu zjawiska wyboczenia wynika, że dotyczy ono konstrukcji cienkościennych. To oznacza, że wspomniane zjawisko będzie występować jedynie w przypadku wyprasek cienkościennych.

### Opis eksperymentu

W programie Autodesk Moldflow Insight 2018 przeprowadzono badania symulacyjne wraz z walidacją w postaci eksperymentu, obrazujące zjawisko samoistnego wyboczenia cienkościennych wyprasek z tworzyw sztucznych. Walidację przeprowadzono na wtryskarce Engel ES 90/20 HLS. Badano wypraskę o grubości 1,2 mm i wymiarach  $100 \times 100$  mm (w przypadku formy wtryskowej wykorzystano wkładkę aluminiową, aby zredukować grubość gniazda

z 4 mm do założonej grubości). Proces wtryskiwania realizowano dla polipropylenu izotaktycznego Moplen HP500N przy następujących parametrach nastawnych:

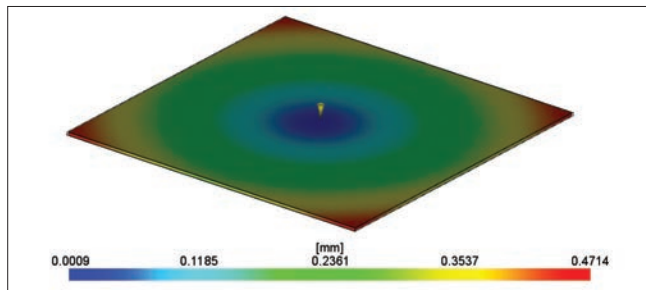
- prędkości wtrysku:  $42 \text{ cm}^3/\text{s}$ ,
- czasie docisku: 0,5 s,
- maksymalnym ciśnieniu wtrysku: 1800 bar,
- ciśnieniu docisku: 300 bar,
- temperaturze tworzywa:  $220^\circ\text{C}$ ,
- temperaturze formy:  $35^\circ\text{C}$ ,
- czasie chłodzenia: 2 s.

Forma wtryskowa była chłodzona poprzez symetryczny rozmieszczony układ w kształcie litery „U” o rozstawie kanałów 50 mm i średnicy kanałów równej 10 mm (temperatura wody wynosiła  $20^\circ\text{C}$ ). Kanały chłodzące były odsunięte od gniazda odpowiednio o 16,25 mm (płyta ruchoma formy) oraz 14 mm (płyta nieruchoma formy). W przypadku symulacji numerycznych założono idealny odbiór ciepła z formy przy stałej temperaturze  $25^\circ\text{C}$ .

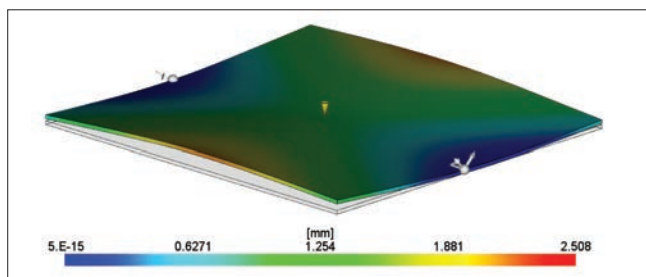
## Wyniki

Symulacje obejmowały analizy deformacji wypraski z uwzględnieniem teorii małych i dużych odkształceń (w zakresie teorii małych odkształceń nie można w tym wypadku przewidzieć postaci wyboczeniowej wypraski).

Na rys. 5 przedstawiono deformację wypraski w ujęciu małych odkształceń, gdzie można zaobserwować jedynie skurcz wypraski w płaszczyźnie. Można go całkowicie skompensować poprzez przeskalowanie gniazda formującego o 0,66%. Po takim przeskalowaniu deformacja wypraski jest mniejsza niż 0,03 mm. Na rys. 6 z kolei przedstawiono postać deformacji, która uwzględnia możliwość pojawienia się wyboczenia.

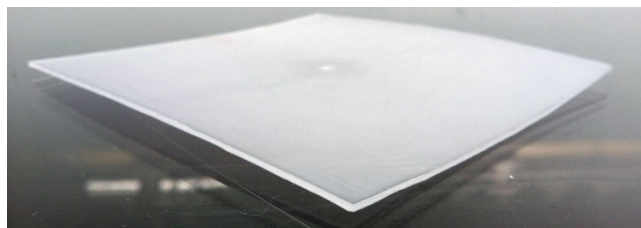


Rys. 5. Deformacja wypraski wyznaczona za pomocą teorii małych odkształceń. Odkształcenie pozapłaszczyznowe na poziomie błędu numerycznego



Rys. 6. Deformacja wypraski wyznaczona za pomocą teorii dużych odkształceń. Wielkość deformacji na rysunku została przeskalowana (współczynnik skali = 2)

Jak widać, dla zadanej grubości wypraski maksymalne pozapłaszczyznowe ugięcie wynosi ok. 2,5 mm. W celu walidacji zrealizowano proces wtryskiwania z takimi samymi parametrami nastawnymi. Postać samoistnego wyboczenia rzeczywistej wypraski zaprezentowano na rys. 7. Zmierzono maksymalne ugięcie, które wyniosło ok. 3,9 mm.



Rys. 7. Deformacja rzeczywistej wypraski uzyskanej w ramach procesu wtryskiwania

Badania eksperymentalne pozwoliły zaobserwować zjawisko samoistnego wyboczenia. Wtrzyśnięte wypraski cechowały się taką samą postacią deformacji jak w przypadku symulacji, lecz wartość deformacji była większa – co wynika z zastosowania formy aluminiowej wkładki zmniejszającej grubość wypraski, która spowodowała niesymetryczny odbiór ciepła (większa przewodność cieplna niż w przypadku stali). Niesymetryczny odbiór ciepła stanowił źródło dodatkowego zaburzenia zmniejszającego stabilność wypraski (w zagadnieniach dotyczących wyboczeń mówi się o imperfekcjach). Potwierdzeniem wystąpienia efektu wyboczenia było uzyskanie w badaniach eksperymentalnych dwóch równoważnych postaci wyboczeniowych (ze względu na symetrię wypraski), tj. próbka przybrała obie postaci, które można uzyskać poprzez obrócenie wypraski o kąt  $90^\circ$  (stwierdzono to na podstawie śladów pozostawianych przez powierzchnię gniazda formującego).

## Podsumowanie

W niniejszej pracy powiązано występowanie naprężeń resztkowych w wypraskach otrzymywanych metodą wtryskiwania tworzyw sztucznych ze zjawiskiem wyboczenia elementów cienkościennych.

Zjawisko samoistnego wyboczenia wyprasek cienkościennych jest efektem zazwyczaj pomijanym w przypadku wyprasek z tworzyw sztucznych, często mylnie utożsamianym z problemami związanymi z niejednorodnym chłodzeniem (niejednorodne chłodzenie potrafi potęgować ten efekt jako imperfekcja zmniejszająca stabilność elementu).

Efekt ten może przysporzyć sporych kłopotów, gdyż wypraski, które w konwencjonalnej analizie deformacji powinny być płaskie, wcale takie nie są. Można tego uniknąć poprzez optymalizację parametrów nastawnych procesu wtryskiwania oraz zmianę geometrii wypraski: zwiększenie sztywności wypraski zarówno za pomocą zmiany jej geometrii (dodania uźebrowania), jak i zwiększenia grubości ścianki.

## LITERATURA

1. Poszwa P., Szostak M. „Symulacja deformacji wyprasek z uwzględnieniem utwierdzenia wynikającego z montażu”. *Mechanik*. 12 (2017): s. 1190–1192.
2. Zawistowski H., Frenkler D. „Konstrukcja form wtryskowych do tworzyw termoplastycznych”. Warszawa: Wydawnictwo Poradników i Książek Technicznych, 2003.
3. Fan Z., Yu H., Xu J., Astbury D. „Buckling prediction in 3D warpage simulation of injection molded plastics”. *ANTEC 2013: 71<sup>th</sup> Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers*, 2013.
4. Fan Z., Astbury D., Wang H., Friedl C. „Geometric nonlinearity in 3D warpage simulation of injection molded plastics”. *ANTEC 2011: 69<sup>th</sup> Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers*, 2011.
5. Wang J. „PVT Properties of polymers for injection molding”. *Some Critical Issues for Injection Molding*. InTech, 2012.
6. Autodesk Inc. Autodesk Moldflow Insight, San Rafael, CA. 94903, USA, 2017.
7. Guevara-Morales A., Figueroa-Lopez U. „Residual stresses in injection molded products”. *Journal of Material Science*. 49, 13 (2014): s. 4399–4415.
8. Bloom F., Coffin D. „Handbook of Thin Plate Buckling and Postbuckling”. London: Chapman and Hall/CRC, 2000.