

# Formowanie pojemników na materiały PCM metodą hydrotechniczną z elastomerem

Forming containers for PCM materials using a hydrotechnical method with an elastomer

PAWEŁ BAŁON  
BARTŁOMIEJ KIEŁBASA  
EDWARD REJMAN  
ROBERT SMUSZ  
JANUSZ SZOSTAK\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.2.20>

Autorzy przedstawili metodę formowania za pomocą ciśnienia oleju, wywierającego nacisk na elastyczny stempel formujący kształt pojemnika na materiał zmienofazowy (PCM). Dzięki zastosowaniu dwóch płyt elastomerowych o twardości 65 i 80 w skali Shore'a otrzymana część ma na środku odwzorowane usztywnienia oraz odpowiednią głębokość misy. Ta metoda nie jest szeroko rozpowszechniona ze względu na konieczność zapewnienia precyzyjnej konstrukcji i tym samym szczelności układu obciążającego formowany wsad. Ze względu na obniżone koszty narzędzia stosuje się ją zwłaszcza w przypadku jednostkowej produkcji części prototypowych lub produkcji małych serii. Autorzy przeprowadzili testy właściwości mechanicznych materiału, numeryczną analizę (MES) wykonalności oraz badania rzeczywiste (warsztatowe) metodą prób i błędów – przez zmiany konstrukcyjne narzędzia. To pozwoliło na osiągnięcie optymalnych parametrów ciągnięcia materiału dla zadanych warunków brzegowych. Dzięki badaniom wyeliminowano znaczące naprężenia i pocienia w gotowych częściach oraz w narożach pojemników na PCM.

**SŁOWA KLUCZOWE:** tłoczenie, formowanie, elastyczny stempel, formowanie gumą

*In this work, the authors present the method of forming by oil exerting pressure on the elastic punch forming the shape of a container for phase change material (PCM). Thanks to the use of two elastomer plates with a hardness of 65 and 80 Shore, the obtained part has mapped stiffeners in the middle and the appropriate depth of the bowl. This method is not widespread due to the precise design ensuring tightness of the load system of the formed blank. By reducing the tool costs, this method is used in particular in the case of unit production of prototype parts or small production series. The authors carried out tests of mechanical properties of the material, numerical analysis of feasibility with the FEM, real (workshop) trials after previous optimization by trial and error through structural changes of the tool. This allowed to obtain the best material drawing parameters for given boundary conditions. The research allowed to eliminate significant stresses and thinning in finished parts and corners of PCM containers.*

**KEYWORDS:** stamping, forming, elastic punch, rubber forming

Procesy tłoczenia narzędziami wykorzystującymi stemple elastomerowe, zwłaszcza gumowe, są stosowane przede wszystkim w produkcji jednostkowej i małoseryjnej. Skomplikowane kształty produkowanych wyrobów wymagają zazwyczaj drogiego i wyspecjalizowanego oprzyrządowania. Zaletą tłoczenia z użyciem elastycznego stempla jest to, że do wykonania wytłoczki na prasie wystarczy sztywna matryca (stalowa lub z innego tworzywa), natomiast rolę stempla pełni przekładka gumowa lub elastomerowa, która dopasowuje się do założonego kształtu. Pozwala to na ograniczenie kosztów narzędziowych o połowę oraz na redukcję czasu wytworzenia elementów kształtujących.

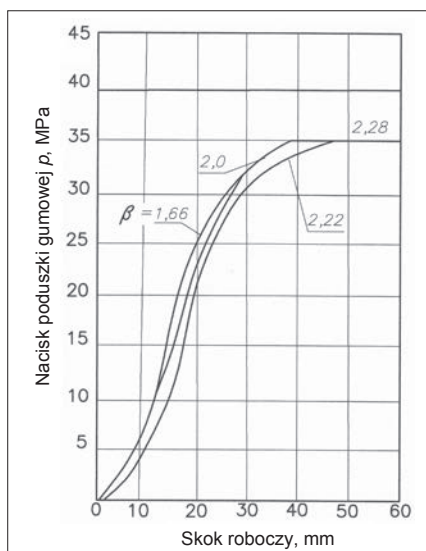
Obróbka plastyczna blach z zastosowaniem stempla elastycznego, zwana także metodą ze stemplem uniwersalnym, daje wiele różnych możliwości formowania. Tłoczniki ze stemplem elastycznym stanowią uzupełnienie metod formowania za pomocą stalowego stempla sztywnego (lub sztywnej matrycy). Materiałem formującym może być guma, elastomer, ciecz (woda lub olej) lub równocześnie elastomer i ciecz formująca. Zastosowanie obróbki plastycznej metodą hydrotechniczną (z równoczesnym wykorzystaniem przepony elastomerowej i oleju) ogranicza się do formowania elementów typu misy, natomiast metoda tłoczenia samym elastomerem nie ma większych ograniczeń. Należy wspomnieć, że elastomer (zwłaszcza guma) może być stosowany jako element pomocniczy w procesie kształtowania innymi metodami, np. jako docisk lub wypełniacz zapobiegający pękaniu blachy i jej fałdowaniu. Podstawową zaletą wszystkich metod formowania elastomerem jest uniezależnienie przebiegu obróbki od tolerancji grubości blachy. Możliwe jest również kształtowanie blachy o zmiennej grubości tzw. metodą *tailored blank* [7].

## Rodzaje i typy stempli elastycznych

Prace własne prowadzone nad tłoczeniem stemplem elastycznym potwierdziły, że guma stosowana jako stempel lub matryca uniwersalna może być naturalna lub syntetyczna. Jej zalecane właściwości wytrzymałościowe są następujące: twardość Shore'a – od 60HA do 95HA, wytrzymałość na rozciąganie – od 6 do 20 MPa, dopuszczalne wydłużenie – od 350 do 650%.

Wielkość nacisków jednostkowych w procesie kształtowania gumą dobiera się w zależności od gatunku materiału, grubości blachy oraz współczynnika odkształcenia (rys. 1). Ta wartość w funkcji odkształcenia zależy również od gatunku i twardości gumy.

\* Dr inż. Paweł Bałon (p.balon@szel-tech.pl) – SZEL-TECH Szeliga Grzegorz, AGH w Krakowie; mgr inż. Bartłomiej Kielbasa (bartek.kielbasa@gmail.com) – SZEL-TECH Szeliga Grzegorz; dr inż. Edward Rejman (erejman@prz.edu.pl), dr inż. Robert Smusz (robsmusz@gmail.com) – Politechnika Rzeszowska; dr inż. Janusz Szostak (szostak@agh.edu.pl) – AGH w Krakowie



Rys. 1. Zależność nacisków jednostkowych gumy przy tłoczeniu stemplem elastycznym w funkcji skoku roboczego stempla (premieszczenia) i współczynnika odkształceń

W przypadku kształtowania części walcowych naciski gumy powinny przyjmować wartości na poziomie od 30 do 60 MPa. Grubość  $H$  gumowej poduszki zależy od grubości kształtowanych przedmiotów  $h$ :

$$H > 50\sqrt{h}$$

Poduszka w postaci elastomeru lub gumy może się składać z kilku pojedynczych warstw, przy czym jej całkowita grubość powinna być mniejsza od 50 mm. Najlepsze efekty tłoczenia gumą uzyskuje się przy formowaniu części spełniających warunek geometryczny:

$$l > 70g$$

gdzie:  $l$  – najmniejsza długość części formowanej,  $g$  – grubość blachy (badania własne).

Formowanie elastomerem stwarza wyjątkowo korzystne warunki płynięcia materiału, zwłaszcza przy głębokim ciągnięciu oraz zastosowaniu matrycy stalowej i elastycznego stempla. Z tego powodu najczęściej wykorzystuje się wklęsłe matryce, w których guma spełnia rolę elastycznego stempla.

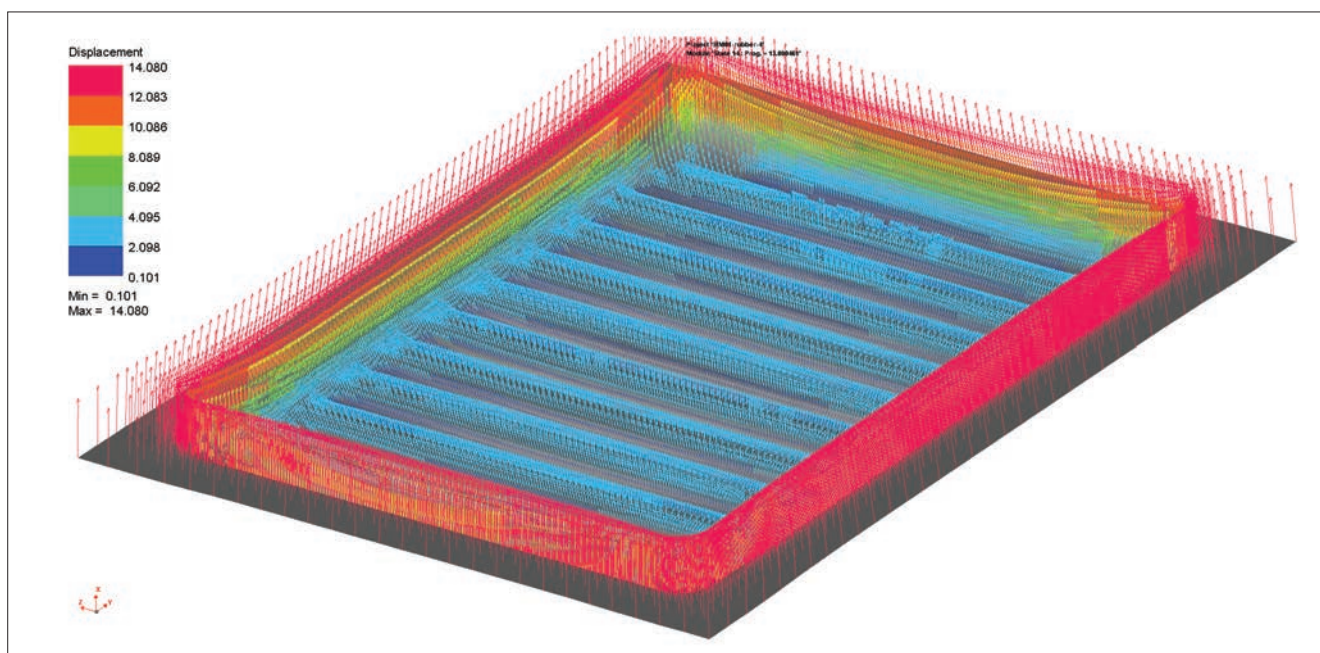
## Modelowanie procesu tłoczenia metodą elementów skończonych

W celu zweryfikowania przedstawionej metody formowania sprawdzono – metodą elementów skończonych (MES) – wartości przemieszczeń dla badanego elementu (rys. 2).

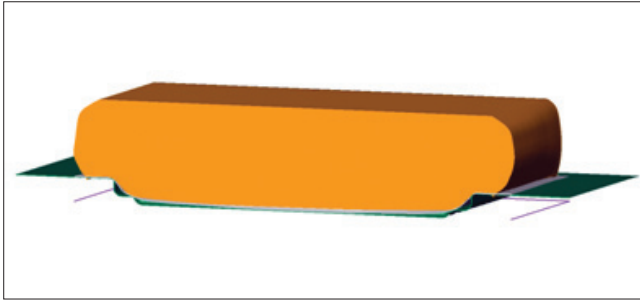
Aby ocenić możliwości wykonania zbiornika metodą z elastycznym stemplem, przeprowadzono symulację tłoczenia z wykorzystaniem MES. Przyjęto model, w którym elastyczne narzędzie wywiera nacisk na sprężysto-plastyczny materiał. Analizę numeryczną przeprowadzono w oprogramowaniu Pam-Stamp 2G [6,9]. Przeanalizowano kilka modeli materiałowych oraz kilkanaście modeli geometrycznych zbiornika. W analizie zastosowano elementy typu powierzchniowego, trzy- i czterowęzłowe, oparte na modelu Belytschki–Tsaya, bazujące na jednorodnej, spójnej i zredukowanej integracji. Poziom zagęszczenia siatki MES dobrano według kryterium minimalnej wartości promienia matrycy lub stempla [2]. Model MES opracowany do formowania elastycznym stemplem pokazano na rys. 3.

W operacji formowania – zarówno dla zamykania, jak i tłoczenia – była aktywowana funkcja dopasowania poziomu zagęszczenia siatki do aktualnego lokalnego stopnia deformacji materiału [1]. W praktyce zapewnia to oszczędność czasu, a jednocześnie niezbędną dokładność obliczeń dzięki przewidywaniu odkształcenia wywołanego ruchem stempla.

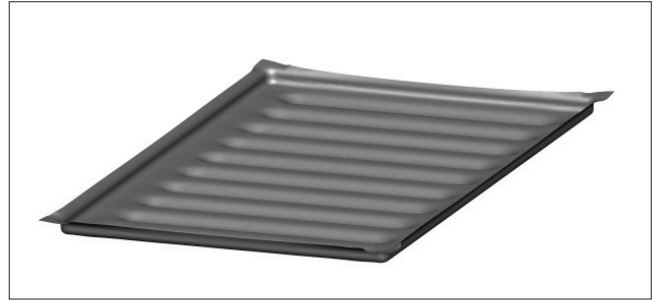
Podstawową trudnością symulacji numerycznej MES było wprowadzenie modelu materiałowego elastomeru, z którego wykonano stempel. Przyjęte założenie, dotyczące zakresu modułu Younga i liczby Poissona, pozwoliło na zbudowanie modelu o charakterystyce liniowej, co jednak okazało się zbyt dużym uproszczeniem. Aby dokładniej opisać analizowany proces, wykorzystano model Mooney–Rivlin solid, w którym stałe materiałowe są określane przez dopasowanie przewidywanych naprężeń do równań z danych eksperymentalnych. Zalecanymi testami materiałowymi są: jednoosiowe rozciąganie i ściskanie, ścinanie oraz kompresja płaszczyzna [5].



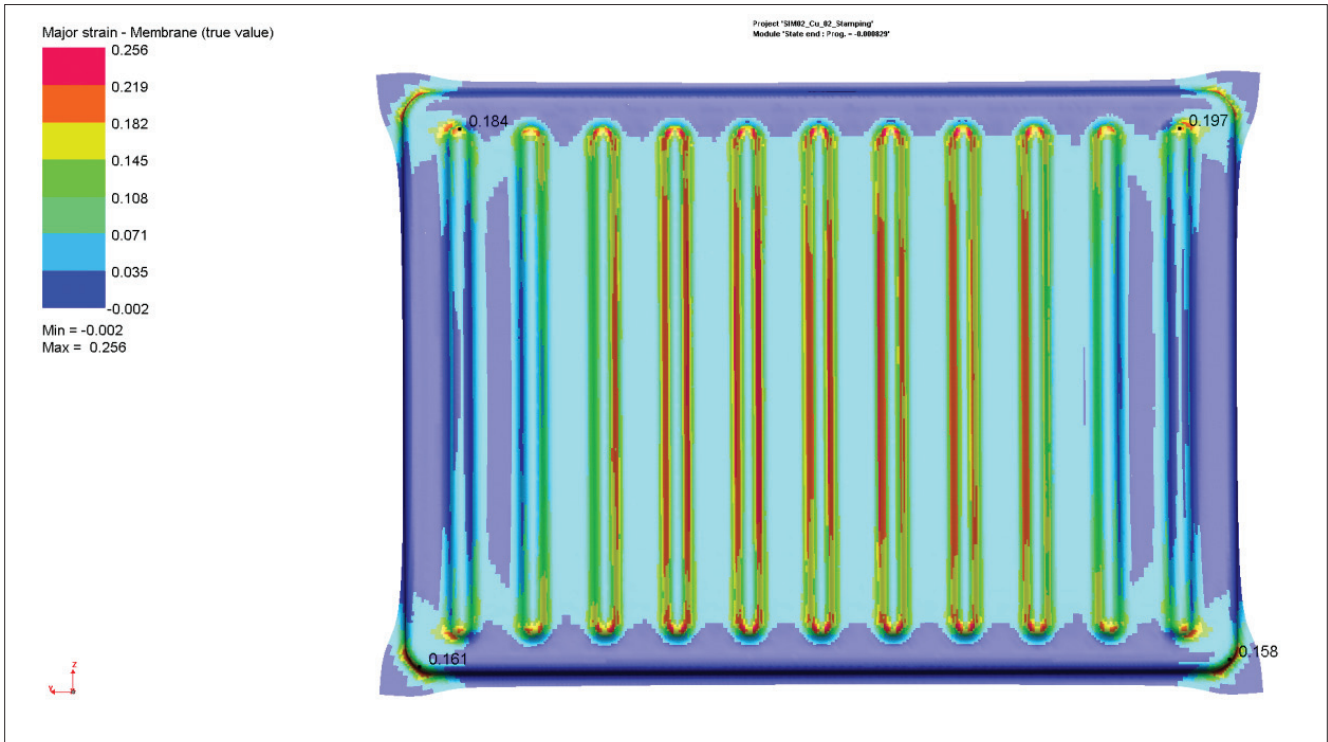
Rys. 2. Wartości przemieszczeń wyznaczone MES (wektorową)



Rys. 3. Model MES dla formowania części zbiornika elastycznym stemplem



Rys. 4. Model paneli zbiornika uzyskany w wyniku symulacji formowania metodą elementów skończonych



Rys. 5. Główne odkształcenia – badany element

W celu wybrania materiału na narzędzie przeprowadzono próby ściskania stempli elastomerowych wykonanych z dostępnego materiału komercyjnego o różnej grubości i twardości w skali Shore'a: 70HA, 80HA, 90HA. Ostatecznie zdecydowano się na płytę elastomerową o twardości 80HA. Drogą symulacji numerycznej potwierdzono możliwość kształtowania części wybraną metodą (rys. 4) [10].

Otrzymano również mapę naprężeń powstałych w procesie tłoczenia. Maksymalna wartość naprężeń wynosi 800 MPa. Na rys. 5 przedstawiono natomiast główne odkształcenia, uzyskane na etapie symulacji.

Istnieje kilka sposobów formowania za pomocą elastycznego stempla. Jednym z nich jest tłoczenie w dwóch skokach suwaka, tj. najpierw tłoczenie samą płytą elastomerową (niepełne tłoczenie wstępne), a następnie tłoczenie poprzez dołożenie dodatkowej elastycznej płyty na półwyrób w celu uzyskania ostatecznego kształtu. Podział formowania na etapy pozwala na zwiększenie trwałości narzędzia. Zwykle do procesu formowania wykończeniowego wykorzystuje się przekładki gumowe lub elastomerowe o twardości 40÷50 wg Shore'a. Trwałość takich elementów elastycznych kształtuje się na poziomie 2000÷5000 sztuk.

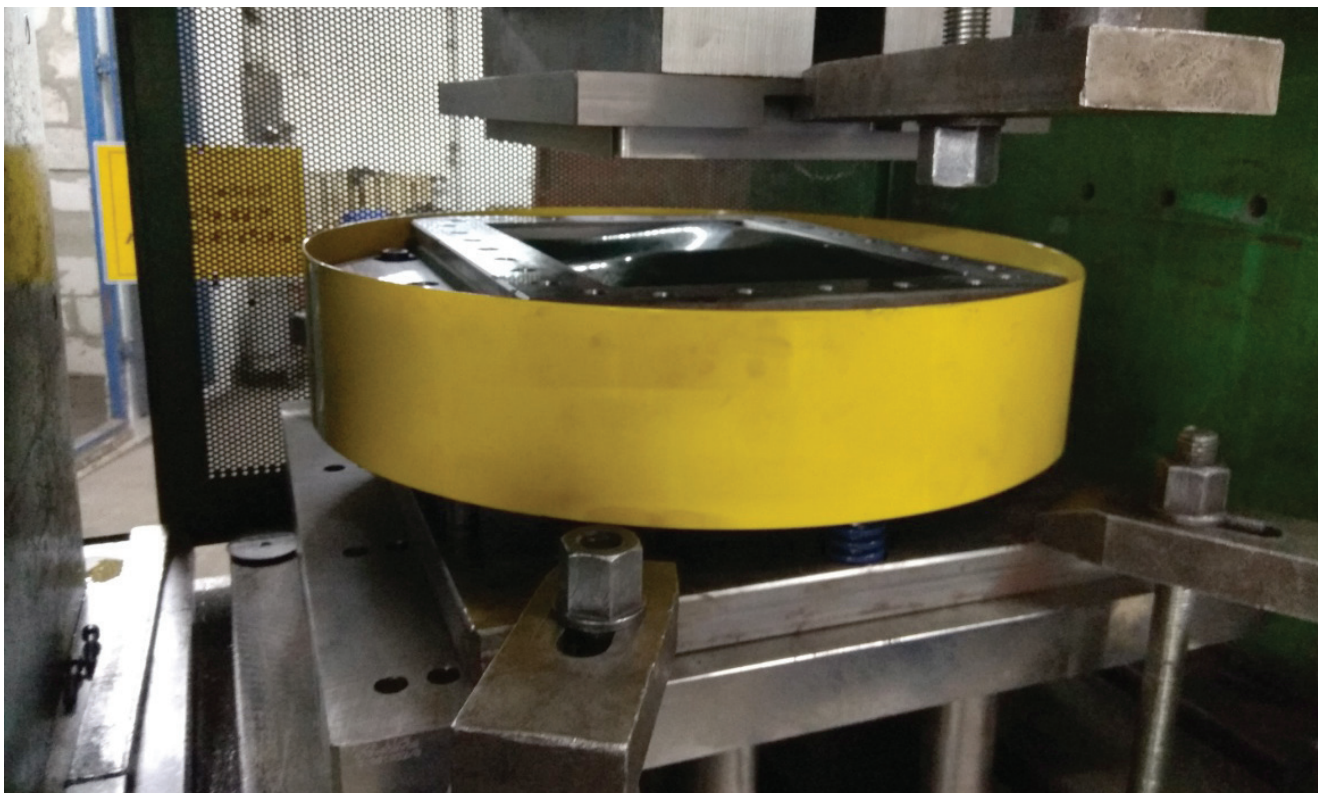
Ograniczeniem w stosowaniu metody formowania elastycznym stemplem jest kształtowanie krzywizn o małych

promieniach – ze względu na duże skupienie nacisków powierzchniowych w ściśle określonych małych obszarach. W takim przypadku uzyskanie wymaganej geometrii wymaga wprowadzenia operacji wykończeniowej (kalibrującej) części.

### Praktyczne próby tłoczenia

W celu weryfikacji wyników uzyskanych w symulacji komputerowej przeprowadzono praktyczne próby tłoczenia paneli zbiornika. Użyto półfabrykatów ze stali 1.4301 o grubości  $g = 0,5$  mm [3,4]. Zaprojektowano i wykonano tłocznik pokazany na rys. 6.

Wytworzony model pokazano na rys. 7. W procesie tłoczenia elastycznym stemplem otrzymano wyrób o geometrii dobrze odtwarzającej założony model CAD. Uzyskano dokładne wymiary i kształt przetłoczeń. Wystąpiły sfałdowania blachy na swobodnych powierzchniach poza obrysem przedmiotu [8]. Przeprowadzone próby wykazały, że występowanie fałd można ograniczyć przez zastosowanie półfabrykatów o wymiarach odpowiednio powiększonych w stosunku do wymiarów wyrobu oraz wykonanie ścież naroży półfabrykatu. W wyniku procesu tłoczenia otrzymano wyrób o zadowalającym stanie powierzchni.



Rys. 6. Tłocznik do formowania części narzędziem elastomerowym – widok tłocznika na prasie hydraulicznej



Rys. 7. Panel zbiornika wytworzony metodą formowania elastycznym stemplem

## Wnioski

Metoda formowania wyrobów stemplem stalowym jest bardziej korzystna w porównaniu z formowaniem stemplem elastycznym ze względu na trwałość narzędzia oraz zastosowanie dużego docisku materiału, dzięki czemu można uniknąć sfałdowań materiału na krawędziach kształtowanych przedmiotów. Formowanie stemplem stalowym jest jednak znacznie droższe, ponieważ narzędzie jest bardziej skomplikowane i zachodzi konieczność stosowania sprężyn gazowych, co znacząco podnosi koszt narzędzia (o ok. 50% w stosunku do narzędzia ze stemplem elastomerowym).

Metoda formowania za pomocą stempla gumowego jest mniej wydajna i charakteryzuje się mniejszą trwałością narzędzia, które musi być częściej wymieniane. W tej metodzie proces projektowania narzędzia jest jednak prostszy i krótszy, co obniża koszty jej wdrażania. Jak wykazało to poprzez analizy numeryczne oraz badania praktyczne,

formowanie elastomerem zapewnia właściwy sposób kształtowania wytłoczki, zatem na etapie prototypu lub produkcji małej serii ta metoda jest zasadniczo bardziej opłacalna i gwarantuje dobry kształt wyrobu.

Porównując metody formowania sztywną matrycą i stemplem elastycznym, należy zaznaczyć, że w drugiej metodzie można uzyskać znacznie większy współczynnik odkształceń. Przeprowadzone badania wykazały, że – uwzględniając wielkość formowanej części, grubość blachy oraz materiał (stal chromo-niklowa) – zachodzi konieczność stosowania prasy ze stosunkowo dużym naciskiem, tj. powyżej 2000 kN. Zbyt małe dociski gumy powodują lokalne fałdowanie się blachy. Miejsca krzyżowania się rowków usztywniających mogą być obszarem znaczącego osłabienia materiału.

## LITERATURA

1. Wagoner R.H., Chenot J.L. "Metal Forming Analysis". 2011, s. 177–198.
2. Bałon P., Świątoniowski A., Szostak J. "Improved method of springback compensation in metal forming analysis". *Strength of Materials*. 48, 4 (2016): s. 540–550.
3. Troive L., Bałon P., Świątoniowski A., Mueller T., Kielbasa B. "Springback compensation for a vehicle's steel body panel". *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 31, 2 (2018): s. 152–163.
4. Bałon P., Świątoniowski A., Kielbasa B. "The analysis of bottom forming process for hybrid heating device". *ESAFORM 2017: Proceedings of the 20<sup>th</sup>. International ESAFORM Conference on Material Forming*. T. 1896 (2017).
5. Wie H., Chen W., Gao L. "Springback Investigation on Sheet Metal Incremental Formed Parts". 2011.
6. Seki N. "Successfully controls springback in thin Ultra-High Strength Steel stamping parts using PAM-STAMP 2G". TOA Industries (2011).
7. Wagoner R.H., Wang J.F., Li M. "Volume 14B: Metalworking: Sheet Forming". *ASM Handbook*. The Ohio State University, 2006.
8. Li H., Li G.S.G., Gong Z., Liu D., Li Q. "On twist springback in advanced high-strength steels". *Materials and Design*. 32 (2011).
9. ESI Group PAM-STAMP 2G 2011. "User's Guide". France, 2011.
10. Abdullah A.B., Sapuan S.M., Samad Z., Aziz N.A. "A comprehensive review of experimental approaches used in the measurement of springback". *Advances in Natural and Applied Sciences*. 6, 2 (2012): s. 195–205.