

Analiza procesu formowania dennicy hybrydowego urządzenia grzewczego

The analysis of bottom forming process for hybrid heating device

PAWEŁ BAŁON
ANDRZEJ ŚWIĄTONIOWSKI*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.12.575

Prezentowano nietypową metodę formowania dennicy o różnym przeznaczeniu, m.in. do podgrzewaczy wody lub urządzeń ciśnieniowych. Metoda ta pozwoliła na wykonanie dennicy ze stali nierdzewnej w kształcie zgodnym z normą DIN, która określa najbardziej korzystny przekrój poprzeczny dennicy pod względem obciążenia ciśnieniem roboczym. Autorzy sprawdzili słuszność przedstawionej metody w sposób numeryczny i eksperymentalny, wytwarzając narzędzie do produkcji dennicy o zadanej geometrii. Podczas projektowania i produkcji części wystąpiło wiele problemów, zwłaszcza nadmierne fałdowanie blachy w dużym obszarze części. Jak wykazał eksperyment, brak analizy numerycznej oraz dużego doświadczenia w projektowaniu tego typu elementów skutkowało wykonaniem części o znacznym pofałdowaniu, które nie nadawałyby się do zamontowania w zespole z częścią walcową. Wiele narzędziowni stosuje sposób ciągnięcia elementów o powierzchni kulistej poprzez dodatkowe operacje wyoblania lub stopniowania tłoczenia, co znacznie podnosi koszt produkcji części. Autorzy przedstawili i porównali dwie metody formowania przedmiotów o zarysie kulistym i parabolicznym, potwierdzając eksperymentalnie słuszność wyboru metody przewijania blachy z odpowiednią siłą docisku. Zastosowana metoda umożliwia wytwarzanie części w jednej operacji ciągnięcia oraz poprzedzającej operacji wykonania okrągłego wsadu metodą cięcia laserem lub wodą. Ogranicza to koszty wytworzenia oprzyrządowania do jednego narzędzia, które może być umieszczone na dowolnej prasie o sile nacisku powyżej 2000 kN.

SŁOWA KLUCZOWE: formowanie stali, analiza symulacji, MES

In this paper authors present an unusual method of bottom forming for various purposes including water heaters or pressure equipment. This method allowed to make the bottom of stainless steel for a shape according to the DIN standard which determines the most advantageous bottom cross section in terms of working pressure loading. The authors checked validity of the method in a numerical and experimental way generating a tool designed to produce bottoms of specified geometry. Many problems were encountered during design and production of parts, especially concerning excessive sheet wrinkling in a large area of the part. The experiment showed that lack of experience and numerical analysis in design of such elements would cause obtaining high wrinkled parts. As a result, it would make it impossible to assemble them with the cylindrical part. A lot of tool shops use a method of drawing of elements with a spherical surface by additional spinning and stamping grading operations, which highly increases costs of parts production. The authors presented and compared two forming methods for spherical and parabolic

objects, experimentally confirming the validity of selection of the sheet reversing method with adequate pressure force. The applied method produces parts in one drawing operation and in following operation that is based on laser or water cutting to obtain round blank. This reduces the costs of tooling manufacturing for only one tool that can be placed on any hydraulic press with a force of more than 2000 kN.

KEYWORDS: metal forming, simulation analysis, FEM

Opracowanie technologii tłoczenia dennicy zostało poprzedzone wykonaniem numerycznego modelu procesu formowania. Jest to konieczne, ponieważ doświadczenia w zakresie ciągnięcia przedmiotów o kształcie ograniczonym powierzchnią kulistą pokazują, że występuje szereg wciąż nie do końca przewidzianych trudności związanych głównie z niedostatecznym dociskiem na znacznej części powierzchni wsadu. Stąd tendencja do fałdowania się czaszy w całym obszarze części. Aby zapobiec fałdowaniu, konieczne jest stosowanie matrycy i odpowiedniego docisku, zapewniającego rozciąganie materiału w czasie ciągnięcia. Analiza odkształceń i naprężeń w przypadku ciągnięcia przedmiotów kulistych o powierzchniach krzywoliniowych w tłocznikach z progami ciągowymi lub metodą przewijania wskazuje też, że ciągnięcie to różni się zasadniczo od ciągnięcia walcowych przedmiotów, ponieważ zastosowanie progów ciągowych powoduje silne rozciąganie materiału w kierunku promieniowym i znaczne zmniejszenie odkształcenia ściskającego w kierunku stycznym. Regulując siłę docisku i stopień hamowania przesuwu materiału pod dociskaczem, można otrzymać zamiast ściskania rozciąganie, co zapobiega powstawaniu fałdowania. Jednak jednocześnie zwiększa się opór odkształcenia kołnierza i rosną promieniowe naprężenia rozciągające w zasadniczym pod względem pęknięcia przekroju poprzecznym.

Opracowanie założeń procesu tłoczenia dennicy

W przypadku ciągnięcia przedmiotów ograniczonych powierzchnią kulistą współczynnik ciągnięcia jest stały i dla dowolnej średnicy wynosi $m = 0,71$. Tym samym nie określa on możliwości ciągnięcia oraz jakości wyrobu, na którą to jakoś decydujący wpływ ma względna grubość materiału wejściowego. Najogólniej rzecz ujmując, im mniejsza wartość współczynnika grubości blachy do średnicy geometrii kulistej, tym łatwiej powstają fałdy i tym trudniejszy jest proces ciągnięcia [9].

Jeśli współczynnik grubości blachy do średnicy czaszy kulistej jest mniejszy od 0,5, w produkcji seryjnej stosuje się sposób ciągnięcia wielowarstwowego lub też przewijania. Do tłoczenia przedmiotów cienkościennych o kształcie kulistym, zarysie parabolicznym i stosunkowo dużym wymiarze średnicy stosuje się ciągnięcie bez dociskacza, lecz z podwójnym przeginaniem półwyrobu [10].

* Mgr inż. Paweł Bałon (p.balon@szel-tech.pl) – SZEL-TECH Szeliga Grzegorz, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie; prof. dr hab. inż. Andrzej Świątoniowski (swiatoni@imir.agh.edu.pl) – Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie

Sposób wykonywania przedmiotów o zarysie kulistym i parabolicznym za pomocą ciągnięcia półwyrobu o zarysie stopniowym, a następnie tłoczenia przedmiotu o wymaganym kształcie nie jest zalecany ze względu na dużą liczbę wad (nierówności, pofałdowań, śladów stopni). W wielu przypadkach w celu usunięcia wad stosuje się dodatkowe operacje na wyoblarkach, co podnosi koszt wytworzenia.

W przypadku ciągnięcia elementów ograniczonych powierzchnią kulistą można zdecydować się na wybór materiału wsadowego charakteryzującego się ograniczoną plastycznością. Podwyższona plastyczność jest pożądana jedynie w przypadku metali mających jednocześnie wysokie własności wytrzymałościowe. Wyżarzanie materiału wejściowego lub wyżarzanie międzyoperacyjne pogarsza z reguły warunki ciągnięcia podczas formowania dennicy zbiorników o kształcie kulistym.

Standardowo dennice wytwarza się w sposób przedstawiony na rys. 2b, z wykorzystaniem klasycznego układu stempla matrycy i docisku. Ta metoda odpowiada obecnemu stanowi wiedzy na temat formatowania z użyciem docisku w operacji ciągnącej powierzchnię czaszy. Wiele firm wytwarza wytłoczki dennic metodą klasyczną ze stali węglowej, ale nie stopowej z dużą zawartością chromu. Metoda ta wymaga dużej siły nacisku, by wyeliminować ewentualne fałdy.

Model materiałowy

Przedmiotem badań była blacha ze stali stopowej z dodatkiem chromu DIN 1.4541 o grubości $g_0 = 2,5$ mm, o składzie podanym w tabelicy. Skład materiału został potwierdzony na spektrometrze i przedstawiony w [7, 8].

TABLICA. Skład stopowy stali DIN 1.4541

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe
%									
0,041	0,480	1,290	0,013	0,010	17,155	0,100	8,495	0,113	72,305

Przeprowadzono próbę walcowania w celu doświadczalnego sprawdzenia krzywej umocnienia, którą otrzymano w wyniku testów wykonanych na maszynie wytrzymałościowej w klasycznej jednoosiowej próbie rozciągania, a następnie aproksymacji wyników według hipotezy Krupkowskiego. Nie korzystano z bazy materiałowej Pam-Stamp, ponieważ materiał testowany różnił się w zależności od dostawcy i partii wytopu stali.

Operacja wyłaczania dennicy jest prowadzona na zimno, stąd odkształcenie materiału powstające w kolejnych jej fazach prowadzi – poprzez dyslokacje w układzie sieci krystalicznej – do umocnienia materiału wsadowego. Zjawisko to musi zostać uwzględnione przy ustalaniu parametrów procesu. W analizie makroskopowej nieliniowe relacje pomiędzy naprężeniem σ a odkształceniem φ opisuje krzywa umocnienia metalu, której postać zależy od przyjętego modelu umocnienia – izotropowego lub kinematycznego.

Jakkolwiek model kinematyczny lepiej oddaje fizyczny aspekt procesu, to jednak w rozpatrywanym przypadku wyłaczania, w którym obciążenie wzrasta w sposób ciągły do wartości maksymalnej i nie trzeba uwzględniać histerezy naprężeń, wystarczającą dokładność zapewnia znacznie prostszy model izotropowy [2].

Materiał nieliniowy z izotropowym umocnieniem jest zdefiniowany przez wartość $R_{p0,2}$ (granica plastyczności dla 0,2%) oraz wartość R_m (granica wytrzymałości), przy czym odcinek pomiędzy $R_{p0,2}$ a R_m jest zdefiniowany

przez tangens kąta nachylenia krzywej α . Zmiana macierzy sztywności ma miejsce jednorazowo, gdy wartości odkształcenie/naprężenie nie przekraczają wartości określonej przez $R_{p0,2}$, oraz powyżej tej wartości – każdorazowo przy kolejnych iteracjach.

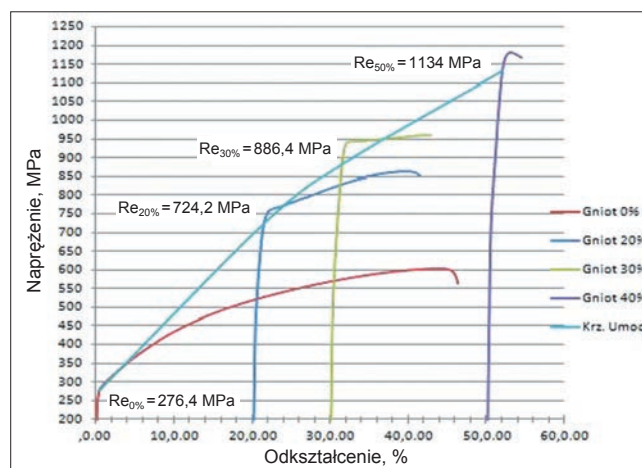
Krzywa umocnienia materiału wyznaczona z ekstrapolacją według metody Krupkowskiego:

$$\sigma_w = K \cdot (\varphi + \varphi_0)^n \quad (1)$$

gdzie: wykładnik umocnienia odkształceniowego $n = 0,31500$; naprężenie uwzględniające model umocnienia $\sigma_w = 0,00055$; stała materiałowa $K = 2442,194$; φ_0 – odkształcenie plastyczne; φ – odkształcenie

Badanie wpływu procesu plastycznego odkształcenia na umocnienie stali DIN 1.4541 przeprowadzono podczas walcowania próbek płaskich na walcach laboratoryjnej duo $\Phi 200$.

Zestaw próbek o trzech różnych szerokościach został wycięty z arkusza blachy o grubości $g = 2,5$ mm, w kierunku zgodnym z kierunkiem walcowania (rys. 1).



Rys. 1. Wykres krzywej umocnienia badanej stali

Próbki walcowano w kilku przepustach z prędkością 0,5 m/s, aż do uzyskania całkowitego zgniotu φ_{HOi} o wartości 20%, 30% i 40%.

$$\varphi_{HOi} = \frac{h_0 - h_1}{h_0} * 100\% \quad (2)$$

gdzie: h_0, h_1 – grubości próbki przed odkształceniem i po nim.

Model MES

Model procesu kształtowania dennicy powstał z wykorzystaniem metody elementów skończonych i jest układem, w którym twardym narzędziem wywiera nacisk na sprężysto-plastyczny materiał. Analizy numeryczne różnych typów kalkulacji wykonano w oprogramowaniu Pam-Stamp 2G. Przeanalizowano wiele modeli materiałowych oraz wykonano kilkanaście prób numerycznych. Użyto elementów typu powierzchniowego trzy- i cztero-węzłowych, opartych na modelu Belytschko–Tsay, bazujących na jednorodnej, spójnej i zredukowanej integracji. Stopień zagęszczenia siatki metody elementów skończonych bazuje na kryterium minimalnej wartości promienia matrycy lub stempla. Liczba elementów została oparta na kryterium minimalnej wartości promienia $r = 4$ mm. Ustaliło to stopień zagęszczenia siatki na poziomie 4,

minimalny rozmiar elementu 1,3125 mm, podczas gdy minimalny wymiar początkowy elementu siatki dla krążka wsadu o średnicy $\varnothing 556$ mm wynosi 10,37 mm. Wsad potraktowano jako środkową warstwę bez grubości. Kontakt pomiędzy narzędziem a przygotówką został przyjęty jako automatyczny. To znaczy, że solver dopasowuje typ kontaktu do korespondujących warunków i bazuje na metodzie współczynnika tarcia pomiędzy współpracującymi powierzchniami. Model tarcia opisano jako dwuliniowy model Coulomba o stałej wartości $\mu = 0,11$.

Matryca formująca zawiera 256819 elementów oraz 63763 węzły, natomiast sam wsad początkowo zawierał 11121 elementów i odpowiednio 2804 węzłów, tak że na końcowym etapie procesu osiągnął wartość ok. 46133 elementów i 11486 węzłów, w tym 576 trzywęzłowych oraz 10763 czterowęzłowych.

Proces był prowadzony na zimno, stąd konieczność uwzględnienia zjawiska umacniania się materiału [1, 2].

Operacja formowania – zarówno dla zamykania, jak i tłoczenia – miała aktywowaną funkcję dopasowania poziomu zagęszczenia siatki do lokalnego stopnia deformacji materiału. W praktyce pozwala zaoszczędzić czas z zachowaniem niezbędnej dokładności obliczeń poprzez przewidywanie odkształcenia w wyniku ruchu stempla.

Określenie współczynnika anizotropii normalnej R

Współczynnik anizotropii normalnej R według Lankforda jest definiowany jako stosunek przyrostów odkształceń poprzecznych podczas jednoosiowego rozciągania.

Przyporządkowując kierunkom głównym indeksy: 1 – kierunek walcowania, 2 – kierunek do niego prostopadły w płaszczyźnie blachy, 3 – kierunek normalny do powierzchni blachy, oraz oznaczając przez $d_{e_{ij}}$ składowe tensora przyrostu odkształcenia plastycznego, współczynnik R dla próbki wyciętej pod kątem α do kierunku walcowania można wyrazić w postaci ilorazu:

$$R_{\alpha} = \frac{d_{e_{22}}}{d_{e_{33}}} \quad (3)$$

i odpowiednio:

$$R_0 = \frac{d_{e_{22}}}{d_{e_{33}}} \text{ oraz } R_{90} = \frac{d_{e_{11}}}{d_{e_{33}}} \quad (4)$$

W praktyce przy wyznaczaniu współczynników anizotropii zamiast przyrostów $d_{e_{ij}}$ można się posłużyć końcowymi wartościami odkształceń rzeczywistych, tak że ostatecznie:

$$R_{\alpha} = \frac{\ln \frac{b_1}{b_0}}{\ln \frac{g_1}{g_0}} \quad (5)$$

gdzie: b_0, b_1 – szerokości próbek przed odkształceniem i po nim; g_0, g_1 – grubości próbek przed odkształceniem i po nim.

Anizotropię normalną wyznaczono na podstawie pomiarów przeprowadzonych w trakcie próby jednoosiowego rozciągania na maszynie wytrzymałościowej ZWICK Z250. Przyjęto prędkość rozciągania 20 mm/min. Odpowiada ona przewidywanym parametrom procesu kształtowania dennicy urządzenia. Temperatura pomiaru wynosiła 20°C. Znormalizowane próbki zostały wycięte z arkusza blachy z materiału 1.4541, w trzech reprezentatywnych kierunkach: zgodnym z kierunkiem walcowania, poprzecznym do kierunku walcowania oraz pod kątem 45° do kierunku walcowania.

Pomiary odkształceń próbek podczas ich jednoosiowego rozciągania posłużyły do wyznaczenia współczynnika

anizotropii normalnej R . Średnią wartość obliczono z zależności:

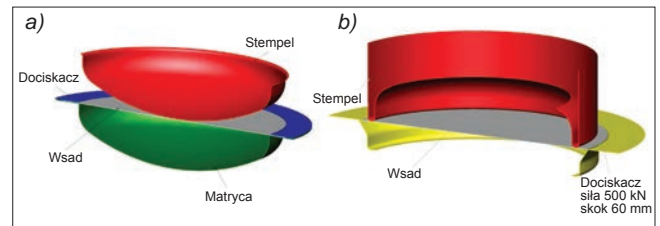
$$R_{sr} = \frac{1}{4}(R_0 + 2R_{45} + R_{90}) \quad (6)$$

gdzie: R_0, R_{45}, R_{90} – wartości współczynnika anizotropii normalnej odpowiednio dla kierunku zgodnego z kierunkiem walcowania, skierowanego pod kątem 45° oraz poprzecznie do kierunku walcowania. Wartość średnia anizotropii normalnej w arkuszu blachy ze stali DIN 1.4541 wynosi $R_{sr} = 0,9832$ [7, 8].

Wyniki badań numerycznych i eksperymentalnych

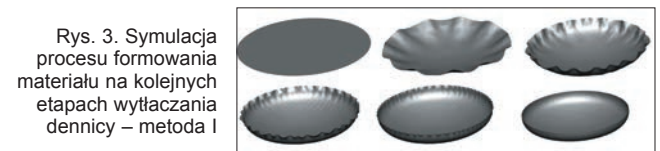
Przedstawiono dwie metody tłoczenia dennicy ciśnieniowej o zadanej geometrii zgodnej z normą DIN-28013. W obu metodach wykorzystuje się matrycę, stempel i dociskacz, lecz o odmiennej geometrii – pokazanej na rys. 2a i b.

W przypadku ciągnięcia przedmiotów o kształcie kulistym współczynnik ciągnięcia jest stały i dla dowolnej średnicy równy $m = 0,71$. Pomimo to ciągnięcie geometrii kulistej jest trudne, ponieważ znaczna część powierzchni półwyrobu jest niedociśnięta i łatwo powstają fałdy. Aby temu zapobiec, konieczne jest stosowanie matrycy i docisku zapewniającego rozciąganie materiału w czasie ciągnięcia.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny narzędzia 3D dla: a) metody I; b) metody II

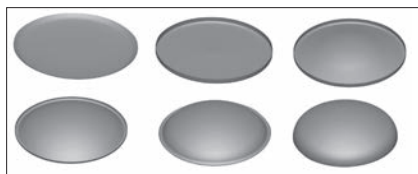
Współczynnik ciągnięcia geometrii kulistej jest wielkością stałą i nie określa możliwości ciągnięcia – jest ona wyznaczana przez wykres FLD (*forming limit diagram* – rys. 6 i 7). Względna grubość materiału wejściowego ma decydujący wpływ na jakość ciągniętych przedmiotów. Im mniejsza wartość współczynnika grubości blachy do średnicy geometrii kulistej, tym łatwiej powstają fałdy i tym trudniejszy jest proces ciągnięcia z narastającą siłą.



Rys. 3. Symulacja procesu formowania materiału na kolejnych etapach wytłaczania dennicy – metoda I

Metoda I (rys. 2a) opiera się na klasycznym ciągnięciu części czaszy za pomocą stempla oraz docisku o sile przekraczającej 1000 kN [6]. To generuje stosunkowo duże zapotrzebowanie na siłę docisku oraz pojawienie się utraty stateczności poprzecznej w postaci pofalowania na znacznej części powierzchni (rys. 3). Duża siła docisku podnosi koszty wytworzenia narzędzia, ale przede wszystkim nie zapewnia w tym przypadku odpowiedniej jakości powierzchni. Sposób wykonania przedmiotów o zarysie kulistym i parabolicznym za pomocą ciągnięcia półwyrobu o zarysie stopniowym, a następnie tłoczenia przedmiotu o wymaganym kształcie nie jest zalecany ze względu na dużą liczbę wad (nierówności, pofałdowań, śladów stopni) [11]. Dennice do urządzeń ciśnieniowych lub urządzeń do akumulacji ciepła bardzo często nie mają dodatkowej

osłony, zatem wygląd zewnętrzny nie powinien nosić śladów ewentualnej utraty stateczności. Ponadto defekt w postaci fałdowania utrudnia operację łączenia dennicy z częścią walcową, zwłaszcza w przypadku spawania TIG na ramieniu zautomatyzowanego manipulatora. Często w celu usunięcia wad stosuje się dodatkowe operacje na wyoblarkach, co podwyższa koszt wytwarzania.



Rys. 4. Symulacja procesu formowania materiału na kolejnych etapach wyłoczenia dennicy – metoda II

Metoda II (rys. 2b) łączy dwa rodzaje formowania: wyoblanie oraz ciągnięcie materiału na odpowiednią głębokość [4]. Tu również wykorzystuje się stempel, matrycę i docisk, ale w odmiennej konfiguracji. Na pierwszym etapie blacha jest przetłaczana w jedną stronę (rys. 4), tak by na drugim etapie przewinąć ją w przeciwną stronę za pomocą stempla, przy znacznym udziale docisku, który naciąga blachę, aby wyeliminować fałdy od początku do końca procesu formowania [3, 5].



Rys. 5. Część po próbach na prasie hydraulicznej 10000 kN

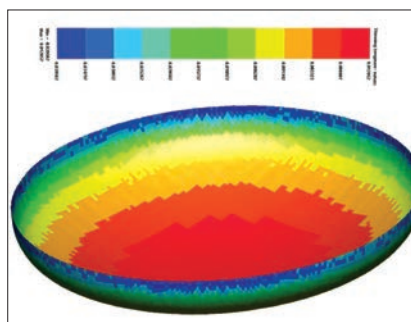
Przeprowadzone obliczenia pozwoliły na określenie przebiegu odkształcenia na kolejnych etapach formowania dennicy w procesie symulacji oraz na wyznaczenie stanu naprężenia w wyłoczu zgodnie z hipotezą Hubera–Misesa–Hencky'ego.

Analizie poddano również pocienienie ścianki dennicy w trakcie procesu (rys. 6 i 7). Wykonano próby oraz wyprodukowano ponad 100 szt. dennic na prasie do prób o maksymalnej sile docisku 10000 kN (rys. 5).

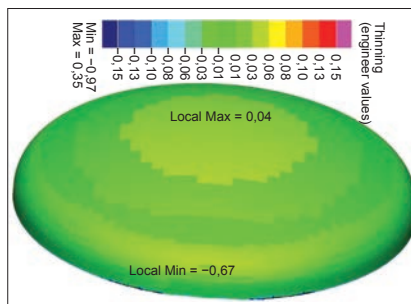
Podsumowanie i wnioski

Analizy numeryczne pokazały, że metoda I generuje stosunkowo duże fałdowanie, zwłaszcza na obrzeżach czaszy. Poprzez regulację siły docisku można uzyskać lokalnie w pewnym zakresie rozciąganie zamiast ściskania, dzięki czemu eliminuje się możliwość powstawania fałd. W kolejnych iteracyjnych próbach, gdy zwiększano siłę docisku, nie uzyskano prawidłowego rezultatu, a więc siła docisku powyżej 1500 kN była niewystarczająca. Świadczy to o pojawianiu się dużych naprężeń podczas formowania, gdzie występuje silne rozciąganie materiału w kierunku promieniowym i znaczne zmniejszenie odkształcenia ściskającego w kierunku stycznym, co generuje lokalną utratę stateczności.

Zastosowanie metody II w postaci przewijania pozwoliło na naciągnięcie blachy w obszarze matrycy; dwukierunkowe przewijanie z odpowiednią siłą docisku, nieprzekraczającą 250 kN, zapewniło wystarczający docisk, by całkowicie wyeliminować fałdy. Ponadto część charakteryzuje się małą zmianą grubości, a pocienienie nie przekracza 10%, co gwarantuje brak pęknięcia. Co więcej, po



Rys. 6. Rozkład procentowego pocienienia ścianki dennicy – metoda I



Rys. 7. Rozkład procentowego pocienienia ścianki dennicy – metoda II

procesie formowania krawędź części pozostaje równa na całym obwodzie, co ułatwia proces montażu poprzez spawanie TIG oraz eliminuje dodatkową operację cięcia wyplwki wsadu.

Badania eksperymentalne przeprowadzono na prasie podwójnego działania o maksymalnej sile nacisku 10000 kN. Ponieważ dennica dzięki specjalnej konstrukcji (wprowadzonym elementom sprężyn gazowych) nie wymaga prasy podwójnego działania, może również być wykonywana na innych uniwersalnych prasach. Prędkość posuwu stempla wynosi 0,1 m/s. Modele dyskretne zbudowano tak, aby jak najbardziej dopasować model analizy numerycznej do rzeczywistości, tj. uzyskać dużą dokładność obliczeń numerycznych. Model materiałowy, mimo że w bibliotece oprogramowania MES znajdowały się odpowiednie dane, został zweryfikowany i stworzony ponownie według eksperymentalnych badań dla konkretnej partii wytopu stali, z której wykonano 100 prototypowych części. Warto dodać, że dane materiałowe z biblioteki oprogramowania nie były tak dokładne jak dane otrzymane w wyniku eksperymentu. Miało to istotny wpływ na stworzenie modelu dyskretnego odpowiadającego weryfikacji eksperymentalnej.

LITERATURA

1. Bathe K.J. „Finite element procedures”. New Jersey, US: Prentice Hall Inc. Engelwood Cliffs, 1996.
2. Björkman G., Klarbring A. “Shakedown and residual stresses in frictional systems”. 2nd International Conference of Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems. Ringstone Rhode Island: University of Waterloo Press, 1986.
3. Wilson F.W. “Die Design Handbook”. London, 1955.
4. Sińczak J. „Procesy przeróbki plastycznej – Ćwiczenia laboratoryjne”. Kraków, 2001.
5. Romanowski W.P. „Tłoczenie na zimno”. Warszawa: WNT 1959.
6. Marciniak Z., Duncan J.L., Hu S.J. “Mechanics of Sheet Metal Forming”. Second ed., 2005: pp. 82–106.
7. Bergstrom U., Bronnestam M., Gustafsson L., Ingvarsson L., Setter B. “Sheet Steel Handbook – Design and fabrication in high strength steel”. Borlänge, Sweden: SSAB, Tunplint, 1996, pp. 5:12–5:27.
8. Lundh H., Bustad P.A., Carlsson B., Engberg G., Gustafsson L., Lidgren R. “Sheet metal forming”. Goteborg, Sweden: SSAB, Tunplint, 1998, pp. 2:1, 2:2, 4:3, 4:4, 4:10, 4:17, 5:14.
9. Wagoner R.H., Chenot J.-L. “Metal Forming Analysis”. 2011, p. 177–198.
10. Wagoner R.H., Chenot J.-L. “Fundamentals of Metal Forming”. First edition, 1996.
11. Wagoner R.H., Wang J.F., Li M. “Metalworking: Sheet Forming”. ASM Handbook. The Ohio State University. Vol. 14B (2006). ■