

mgr inż. Hanna Sadłowska, prof. dr hab. inż. Andrzej Kocańda
Politechnika Warszawska, Instytut Technologii Materiałowych, Zakład Obróbki Plastycznej, Warszawa

WARUNKI GRANICZNE W PROCESACH ROZPĘCZANIA HYDROMECHANICZNEGO

Streszczenie

Procesy rozpęczania hydromechanicznego są stosunkowo nowymi w technologii obróbki plastycznej w porównaniu z kuciem, prasowaniem czy wyciskaniem. Ich szerokie stosowanie utrudnia niska wydajność produkcji, problemy z uszczelnianiem narzędzi, konieczność użycia zaawansowanych systemów kontrolnych, itp. Skrócenie czasu projektowania procesów i ograniczenie kosztownych prób technologicznych umożliwiają obecnie metody modelowania komputerowego. Otrzymanie dokładnych wyników obliczeń wymaga znajomości odpowiednich właściwości odkształcanych materiałów, parametrów procesów i kryteriów pęknięcia. W artykule przedyskutowano problematykę takich kryteriów i sposób przewidywania wykresu odkształceń granicznych. Przedstawiono także ich zastosowanie w symulacjach komputerowych dwóch procesów – wyrzuszania czaszy i rozpęczania trójnika.

Słowa kluczowe: kryteria pęknięcia, rozpęczanie hydromechaniczne, MES, wykres odkształceń granicznych

1. Wprowadzenie

Rozpęczanie hydromechaniczne jest jedną z bardziej zaawansowanych technologii obróbki plastycznej, która polega na kształtowaniu blachy lub rury ciśnieniem cieczy. Podczas tego typu procesów istnieje możliwość uzyskania kształtów, które byłyby niemożliwe do wykonania konwencjonalnymi technologiami. Rozpęczanie hydromechaniczne jest bardzo przydatne w produkcji jednolitych, lekkich i bardzo dokładnych elementów i jest coraz częściej stosowane w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym [1]. Procesy rozpęczania wprowadzają duże oszczędności produkcyjne, szczególnie jeśli chodzi o koszty oprzyrządowania i eliminację dodatkowych operacji. Zmniejsza się również konieczność wprowadzania skomplikowanych operacji spawania i nitowania, co wpływa na jakość wyrobu.

Procesy rozpęczania hydromechanicznego są szczególnie skomplikowane pod względem stanu naprężeń i odkształceń, dlatego ich zoptymalizowanie wymaga określenia warunków, w których materiał może ulec zniszczeniu. W dzisiejszych czasach szczególnie przydatnym narzędziem

przy projektowaniu procesów mogą być symulacje komputerowe, które pozwalają zrozumieć i przewidzieć zachowanie się odkształcanego materiału [1,2]. Podczas procesów rozpęczania hydromechanicznego najczęściej dochodzi do powstania takich wad jak pęknięcie czy pofałdowanie powierzchni.

2. Kryteria pęknięcia

W związku z tym, że opisywana technologia należy do stosunkowo nowych, nie istnieją ogólne kryteria, którymi można się kierować podczas projektowania tego typu procesów. Istnieją jedynie zalecenia dla szczególnych przypadków, dotyczące konkretnego kształtu, czy użytego materiału. Wyróżnia się jednak szereg kryteriów pęknięcia, mających zastosowania w danych procesach kształtowania blach. Biorąc pod uwagę, że rozpęczanie hydromechaniczne jest złożonym procesem kształtowania blach, nasuwa się potrzeba rozpatrzenia tych kryteriów właśnie pod kątem procesów rozpęczania hydromechanicznego.

Bardzo przydatnym narzędziem przy projektowaniu procesów obróbki plastycznej

nej może być oprogramowanie komputerowe wykorzystujące Metodę Elementów Skończonych (MES). Większość programów tego typu jest w stanie przewidzieć zjawiska typu wyboczenie czy pofałdowanie powierzchni [3]. Problem pojawia się w określeniu momentu utraty stateczności, co w konsekwencji może prowadzić do pęknięcia materiału blachy. Jest to skomplikowane zjawisko, a jego wystąpienie zależy od parametrów procesu (naprężenie, odkształcenie, prędkość odkształcenia itp.) oraz od rodzaju materiału.

W literaturze znajduje się szereg kryteriów służących do określenia momentu pęknięcia [4-9]. Według nich, pęknięcie powstaje wtedy, gdy funkcja zależna od naprężeń i odkształceń w danym momencie kształtowania przyjmuje pewną krytyczną wartość. Większość z kryteriów jest oparta na koncentracji odkształceń plastycznych, a niektóre również opisują wpływ ciśnienia hydrostatycznego. Wiadomo bowiem, że rozdzielenie materiału łatwiej następuje przy spadku ciśnienia hydrostatycznego [5-8].

W artykule przytoczono i krótko opisano najczęściej stosowane w literaturze kryteria służące do określenia momentu pęknięcia [10-14], mające postać matematycznej funkcji reprezentującej zachowanie się materiału. Pęknięcie następuje wtedy, gdy ta funkcja osiąga pewną krytyczną wartość C_i . **Cockroft'a i Latham'a** w roku 1968 zaobserwowali, że materiał ma tendencję do pęknięcia w rejonie największych naprężeń rozciągających i w związku z tym zaproponowali następujące kryterium [4]:

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \sigma_{\max} d\bar{\varepsilon} = C_1 \quad (1)$$

gdzie: $\bar{\varepsilon}_f$ jest odkształceniem zastępczym, przy którym następuje pęknięcie, σ_{\max} to maksymalne naprężenie normalne, a $\bar{\varepsilon}$ jest odkształceniem zastępczym.

Brozzo w roku 1972 zaproponował modyfikację kryterium Cockroft'a i Latham'a i wprowadził do funkcji ciśnienie hydrostatyczne σ_H [5]:

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{2\sigma_{\max}}{3(\sigma_{\max} - \sigma_H)} d\bar{\varepsilon} = C_2 \quad (2)$$

Norris w roku 1978, założył, że pęknięcie będzie zależało jedynie od historii naprężenia hydrostatycznego [6]:

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{1}{1 - C_3 \sigma_H} d\bar{\varepsilon} = C_4 \quad (3)$$

Oyane w roku 1980, zaproponował kryterium mówiące o wpływie historii naprężeń hydrostatycznych na powstanie pęknięcia [7]. Kryterium zostało wyznaczone z równań teorii plastyczności dla materiałów porowatych i jest przedstawione w postaci równania:

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \left(1 + C_7 \frac{\sigma_H}{\sigma} \right) d\bar{\varepsilon} = C_8 \quad (4)$$

gdzie $\bar{\sigma}$ jest naprężeniem zastępczym.

Atkins w roku 1981 zmodyfikował kryterium Norris'a dodając do niego zależność od $\alpha = \frac{d\varepsilon_1}{d\varepsilon_2}$, [8]:

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{1 + 1/(2\alpha)}{1 - C_5 \sigma_H} d\bar{\varepsilon} = C_6 \quad (5)$$

gdzie $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – odkształcenia w kierunkach głównych.

Clift w roku 1990 przeprowadził szereg eksperymentów i symulacji opartych na MES dla stopów aluminium, dotyczących płaskiego stanu odkształceń. Wsunął tezę, że ogólne kryterium plastyczności wystarcza do opisu zjawiska pęknięcia blach [9]. Kryterium to można opisać równaniem:

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon} = C_9 \quad (6)$$

W powyżej przedstawionych wzorach opisujących kryteria pęknięcia pojawiają się stałe materiałowe C_1, \dots, C_9 , które są wyznaczone eksperymentalnie z testów dwuosiowego rozciągania dla momentu pęknięcia.

Często można się spotkać z inną formą zapisu kryteriów pęknięcia [15]:

$$1) \text{ jeśli } \int_0^{\bar{\varepsilon}_f} f(\sigma, \bar{\varepsilon}) d\bar{\varepsilon} - C_i < 0 \quad (7)$$

brak pęknięcia,

$$2) \text{ jeśli } \int_0^{\bar{\varepsilon}_f} f(\sigma, \bar{\varepsilon}) d\bar{\varepsilon} - C_i \geq 0 \quad (8)$$

występuje pęknięcie.

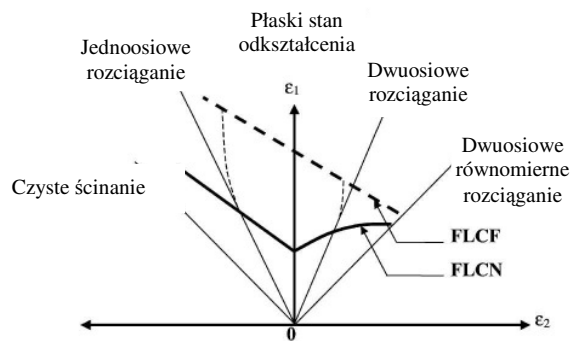
Powyższe kryteria zakładają wpływ historii odkształcenia na wystąpienie pęknięcia i mogą być przydatne również przy projektowaniu procesów rozpęczania hydromechanicznego. W kilku publikacjach graniczne odkształcenia dla materiału blachy wyznaczone z przytoczonych kryteriów zostały porównane z krzywymi odkształceń granicznych uzyskanymi z eksperymentów [12,14].

Krzywa odkształceń granicznych (Forming Limit Curve – FLC) jest graficzną reprezentacją granicznych odkształceń, jakich materiał blachy nie może przekroczyć, aby nie doszło do utraty stateczności prowadzącej do pęknięcia. Istnieje szereg kryteriów opisujących krzywą odkształceń granicznych dla przypadku pęknięcia [4-9].

Istotną sprawą jest rozróżnienie dwóch rodzajów krzywych odkształceń granicznych [10]. Pierwsza z nich (FLCN – Forming Limit Curve at Neck), opisuje graniczne wartości odkształceń w miejscu krytycznej lokalizacji odkształceń (necking), które przedstawione są na wykresie odkształceń głównych (ε_1 i ε_2). Istnieje również krzywa odkształceń granicznych opisująca zjawisko pęknięcia (Forming Limit Curve at Fracture – FLCF). Rys. 1 przedstawia położenie obu krzywych na wykresie odkształceń granicznych FLD. Dla danych odkształceń najpierw występuje utrata stateczności w postaci lokalizacji odkształceń (necking), a następnie pod wpływem dalszych odkształceń powstaje pęknięcie materiału blachy (fracture).

W literaturze związanej z niniejszą tematyką istnieje szereg publikacji skupiających się na sprawdzeniu i weryfikacji kryteriów (1)-(6) przy określaniu momentu pęknięcia [10-15]. Kryteria te mogą w łatwy sposób zostać wprowadzone do oprogramowania komputerowego wykorzystującego MES i służyć jako narzędzie do przewidywania momentu pęknięcia w procesach

kształtowania blach, a także rozpęczania hydromechanicznego.



Rys. 1. Krzywe odkształceń granicznych: FLCN – krzywa odkształceń granicznych dla lokalizacji odkształceń, FLCF – krzywa odkształceń granicznych dla pęknięcia

3. Przewidywanie krzywej odkształceń granicznych

Kryteria przedstawione w rozdziale 2 służą do określenia warunków wystąpienia pęknięcia. Jednak w procesach rozpęczania hydromechanicznego bardziej istotnym zjawiskiem jest wystąpienie utraty stateczności materiału blachy, do którego dochodzi przed pęknięciem.

Autorzy niniejszego artykułu skupiają się na wykorzystaniu oprogramowania komputerowego opartego na MES (MSC.Marc), które jest przydatnym narzędziem przy projektowaniu procesów rozpęczania hydromechanicznego. Aplikacja MSC.Marc ma możliwość wprowadzania krzywej odkształceń granicznych jako kryterium wystąpienia lokalizacji odkształceń [16]. Krzywa ta może być wprowadzona w postaci punktów uzyskanych na drodze eksperymentalnej. Oprogramowanie to oferuje również metodę przewidywania wykresu odkształceń granicznych, opartą jedynie na własnościach materiałowych i kryteriach opisujących plastyczną utratę stateczności opisaną kryteriami Hill'a [17] i Swift'a [18].

Dla elementów powłokowych wprowadzono parametr krzywej odkształceń granicznych (FLP – Forming Limit Parameter), który zdefiniowano jako zależność między największymi odkształceniami głównymi (ε_1) i największymi odkształceniami głównymi z wykresu odkształceń granicznych FLD(ε_1).

Jest on określony wzorem:

$$FLP = \varepsilon_1 / FLD(\varepsilon_1) \quad (9)$$

Metoda przewidywania krzywej odkształceń granicznych oparta jest na dwóch kryteriach. Pierwsze z nich, kryterium Hill'a [17] opisuje lewą część krzywej ($\varepsilon_1 > 0$, $\varepsilon_2 < 0$) i służy do określenia lokalizacji odkształceń w postaci przewężenia (**local necking**). Kryterium zakłada, że krytyczne odkształcenie ε^* jest zależne od stosunku odkształceń głównych $\rho = \varepsilon_2 / \varepsilon_1$ oraz rodzaju odkształcanego materiału.

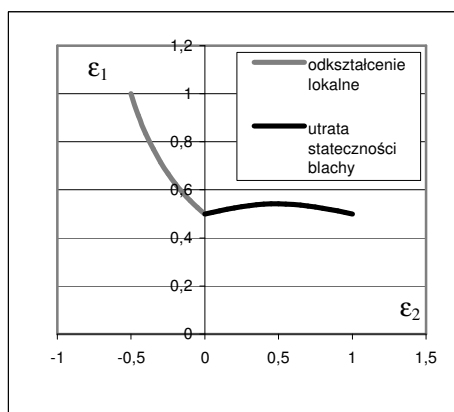
$$\varepsilon^* = \frac{n}{1 + \rho}, \quad \text{dla } \rho < 0 \quad (10)$$

gdzie n jest wykładnikiem krzywej umocnienia.

Kryterium Swift'a [18] opisuje utratę stateczności blachy (**diffuse necking**). Jest to zjawisko, po którego zajściu postępuje dalsze odkształcenie materiału. Zachodzi ono dla stanu dwuosiowego rozciągania ($\varepsilon_1 > 0$, $\varepsilon_2 > 0$) Krytyczne odkształcenia dla tego zjawiska opisane są następującym wzorem:

$$\varepsilon^* = \frac{2n(1 + \rho + \rho^2)}{(1 + \rho)(2\rho^2 - \rho + 2)}, \quad \text{dla } \rho > 0 \quad (11)$$

Na rys. 2 przedstawiono przykład krzywej odkształceń granicznych wyznaczonej z zależności (10) i (11) dla materiału o wykładniku umocnienia $n = 0,25$.



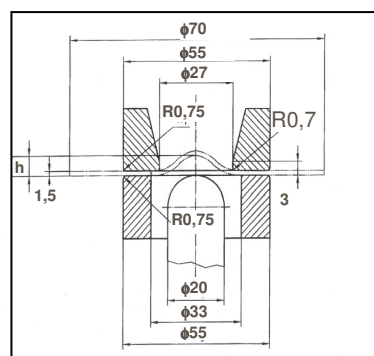
Rys. 2. Przewidywana krzywa odkształceń granicznych dla $n = 0,25$

4. Symulacje komputerowe

Autorzy artykułu przeprowadzili szereg symulacji komputerowych za pomocą oprogramowania MSC.Marc. Potwierdziły one przydatność metody przewidywania wykresu odkształceń granicznych zastosowanej w tej aplikacji, do określenia zagrożonych pęknięciem stref w procesach kształtowania blach, a szczególnie rozpęczenia hydromechanicznego.

4.1. Próba Erichsena

Jednym z modelowanych przy użyciu MSC.Marc procesów był proces rozciągania blachy półkulistym stemplem (próba Erichsena). Ten rodzaj testu został wybrany ze względu na stosunkową łatwość określenia momentu i miejsca lokalizacji odkształceń widocznych jako bruzda.

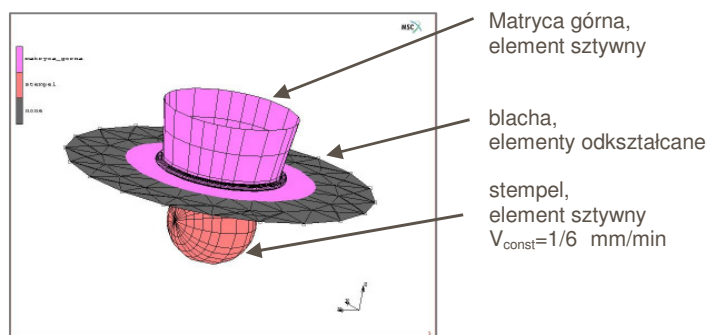


Rys. 3. Schemat próby Erichsena

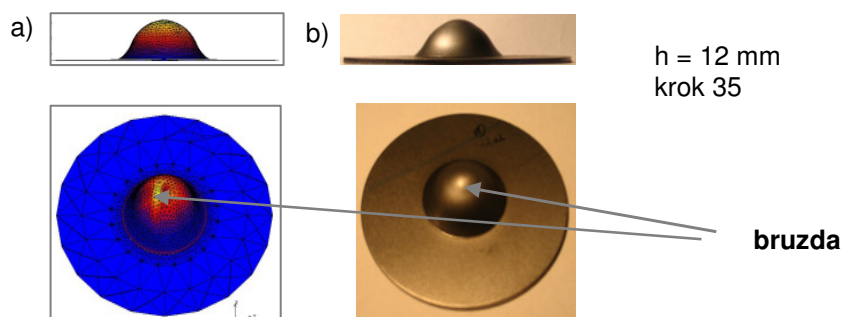
Proces przeprowadzono dla niskowęglowej blachy o grubości 1,5 mm (tab. 1) zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 3. Eksperyment przeprowadzono do momentu, w którym zaobserwowano wystąpienie bruzdy.

Tablica 1
Własności materiału użytego w próbie Erichsena

Stal	Moduł Younga [MPa]	Wsp. Poissona	$R_{0,2}$ [MPa]	n	C [MPa]	Wsp. anizotropii normalnej
0,1%C	202000	0,25	294,5	0,196	668,3	1,31



Rys. 4. Model komputerowy próby Erichsena



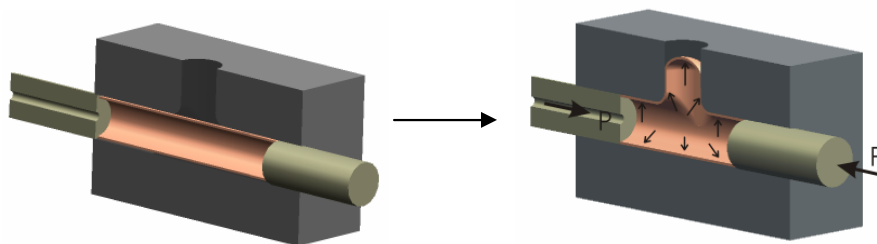
Rys. 5. Porównanie wyników symulacji komputerowej a) i wyników z doświadczenia b)

W modelu materiału zastosowano trójwymiarowe elementy typu membrane/shell, którym nadano grubość 1.5 mm, tak jak to miało miejsce w doświadczeniu. Kontakt pomiędzy elementami zdefiniowano przy pomocy modelu Coulomba, ustalając współczynnik tarcia $\mu = 0,2$. Model komputerowy przedstawiono na rys. 4.

Na rys. 5 przedstawiono porównanie wyników doświadczeń z wynikami uzyskanymi w symulacji komputerowej, dla wysokości czaszy równej 12 mm, czyli w momencie zaobserwowania podczas doświadczenia bruzdy na powierzchni blachy.

Jak już wspomniano powyżej, oprogramowanie MSC.Marc dysponuje metodą przewidywania krzywej odkształceń granicznych (opisanej równaniami (10) i (11)), którą zastosowano w opisywanej symulacji. Wyniki symulacji komputerowej nie zgadzają się w pełni z rezultatami otrzymanymi w doświadczeniu. Według zastosowanych kryteriów bruzda powstaje już w 27 kroku

obliczeń, który odpowiada wysokości czaszy równej 10 mm, a nie 12 mm, jak to miało miejsce w eksperymencie. Niezgodność ta może być spowodowana subiektywnym charakterem określania momentu wystąpienia bruzdy w próbie doświadczalnej. W rzeczywistości moment lokalizacji odkształceń w postaci bruzdy może nastąpić wcześniej, zanim obserwator zareaguje. Podsumowując, moment lokalizacji odkształceń jest obserwowany wcześniej w symulacji komputerowej w porównaniu z doświadczeniami. Bezpieczniejsze jest więc stosowanie modelowania komputerowego do przewidywania momentu utraty stateczności, co pozwoli uniknąć odkształceń prowadzących do wystąpienia pęknięcia materiału blachy.



Rys. 6. Schemat procesu rozpęczenia trójnika

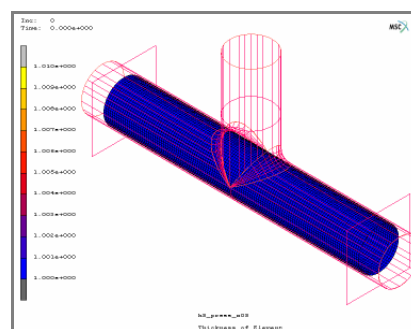
4.2. Rozpęczenie trójnika

Rozpęczenie hydromechaniczne jest stosunkowo nową technologią w porównaniu do konwencjonalnych procesów obróbki plastycznej. Obecnie jest coraz szerzej stosowane, szczególnie w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym, ze względu na wzrost wymagań dotyczących dokładności i wytrzymałości produkowanych elementów. Aby zminimalizować czas projektowania tego typu procesów, konieczne jest stosowanie symulacji komputerowych opartych na MES przed przystąpieniem do produkcji gotowego wyrobu.

Jednym z typowych procesów rozpęczenia hydromechanicznego jest kształtowanie trójnika. Przeprowadzono symulację komputerową tego procesu, wykorzystując oprogramowanie MSC.Marc. Proces rozpęczenia trójnika polega na umieszczeniu rury w matrycy i rozpęczeniu jej ciśnieniem wewnętrznym p przy użyciu dodatkowej siły spęczającej F . Schemat procesu przedstawiono na rys. 6.

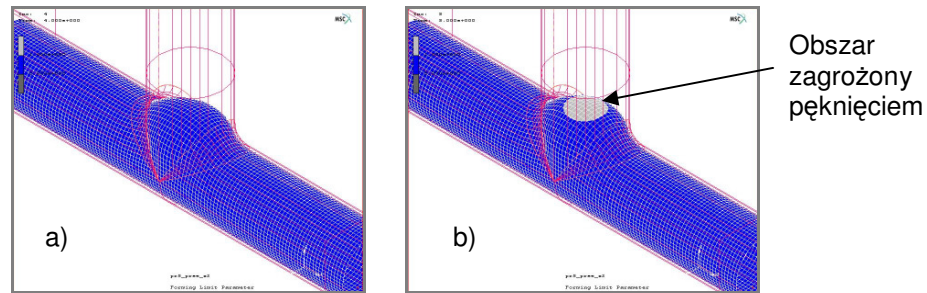
Jako materiał kształtowany zastosowano rurę ze stali niskowęglowej, o średnicy początkowej 20 mm i grubości ścianki 1 mm. Użyto trójwymiarowych elementów typu membrane/shell, natomiast matryca i stemple zostały zamodelowane jako elementy sztywne i nieodkształcalne (rys. 7).

Materiał rury został poddany ciśnieniu wewnętrznemu oraz sile spęczającej przyłożonej do krawędzi rury poprzez przesuwające się stemple. Kontakt pomiędzy materiałem i narzędziami zdefiniowano przy pomocy modelu Coulomba i zastosowano współczynnik tarcia równy 0,15.



Rys. 7. Model komputerowy procesu rozpęczenia trójnika

Oprogramowanie MSC.Marc jest doskonałym narzędziem do modelowania tak skomplikowanych procesów jak rozpęczenie hydromechaniczne [12]. Dzięki procedurze przewidywania wykresu odkształceń granicznych opisanej kryteriami (10) i (11), jest również możliwe określenie niebezpiecznych rejonów, w których może dojść do pęknięcia (rys. 8). Podobnie jak w przypadku wcześniej opisanego próby Erichsena, możliwa jest obserwacja momentu i miejsca wystąpienia lokalizacji odkształceń. Jest to bardzo pomocne przy projektowaniu tego typu procesów i prawidłowym doborze parametrów kształtowania, np. ciśnienia rozpęczającego i siły spęczającej.



Rys. 8. Kształt rozpęczanej rury przed a) i po wystąpieniu utraty stateczności b)

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono najczęściej stosowane kryteria pęknięcia, przydatne przy przewidywaniu wad w procesach kształtowania blach i rozpęczania hydromechanicznego. Wiele publikacji [11,12,14] wskazuje, że trudno jest wybrać najlepsze z nich. Jednakże porównanie wyników symulacji komputerowych i wyników doświadczeń wskazuje, że kryteria Cockroft'a i Latham'a oraz Oyane'a lepiej od pozostałych przewidują moment wystąpienia pęknięcia.

Zaprezentowano również metodę przewidywania wykresu odkształceń granicznych przy użyciu oprogramowania MSC.Marc i jej wykorzystanie przy modelowaniu dwóch różnych procesów. Wyniki modelowania próby Erichsena zostały porównane z wynikami doświadczeń, co pozwoliło potwierdzić przydatność użytej metody do przewidywania momentu i miejsca utraty stateczności.

Literatura

1. Y.C.Chang, L.P.Lei, B.S.Kang. Finite element analysis of hydroforming process for sheet metal, *Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and Applications* 2001.
2. M. Koc, T.Allen, S.Jiratheranat, T.Altan, The use of FEA and design of experiments to establish design guidelines for simple hydroformed parts. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 40 (2000) 2249-2266.
3. P.Ray, B.J. Mac Donald. Determination of the optimal path for tube hydroforming processes using fuzzy load control algorithm and finite element analysis. *Finite Elements in Analysis and Design* 41(2004) 173 – 192
4. Cockroft MG, Latham DJ. A simple criterion for fracture for ductile-fracture of metals. *National Engineering Laboratory, Report No.240,1966.*
5. P. Brozzo, B. Deluca, R. Rendina. *Proceedings of the Seventh Biennial Conference of the International Deep Drawing Research Group, 1972.*
6. D. Norris, J. Reaugh, B. Moran, D. Quinones, A plastic strain mean-stress criterion for ductile fracture, *Journal of Engineering and Material Technology* 100 (1978) 279–286
7. M. Oyane, T. Sato, K. Okimoto, S. Shima, *Criteria for ductile fracture and their applications, Journal of Mechanics and Work Technology* 4 (1980) 65–81.
8. Atkins, Possible explanation for the unexpected departure in hydrostatic tension-fracture strain relations, *Material Science Feb. (1981) 81.*
9. S. Clift, P. Hartley, C. Sturgess, G. Row, *Fracture prediction in plastic deformation processes, International Journal of Mechanical Science* 32 (1990) 1–17.
10. Heung Nam Han, Keun-Kwan Kim. A ductile fracture criterion in sheet metal forming processes. *Journal of Material Processing Technology* 142 (2003) 231-238
11. H. Takuda, T. Kanie, E. Isogai, T. Yoshida. Application of ductile fracture criteria to prediction of forming limit of high-strength steel sheets. *Steel Greeps* 2 (2004) Suppl. Metal Forming 2004

12. A.S. Wifi , A. Abdel-Hamid, N. El-Abbasi. Computer-aided evaluation of workability in bulk forming processes. *Journal of Materials Processing Technology* 77 (1998) 285–293
13. Jeong Kim, Sung-Jong Kang, Beom-Soo Kang. A prediction of bursting failure in tube hydroforming processes based on ductile fracture criterion. *International Journal of Advance Manufacturing Technology* (2003)22:357 – 362
14. H. Takuda , K. Mori, N. Takakura, K. Yamaguchi. Finite element analysis of limit strains in biaxial stretching of sheet metals allowing for ductile fracture. *International Journal of Mechanical Sciences* 42 (2000) 785}798
15. Ridha Hambli, Marian Reszka. Fracture criteria identification using an inverse technique method and blanking experiment. *International Journal of Mechanical Sciences* 44 (2002)1349–1361
16. MSC Marc & Mentat 2004 Theory Manual.
17. Hill R. On discontinuous plastic states, with special reference to localized necking in thin sheets. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 1952;1:19 – 30.
18. Swift H.W. Plastic Instability under plane stress. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 1952; 1:1 – 18.

DISCUSSION OF FAILURE CRITERIA USED IN FINITE ELEMENT ANALYSIS OF HYDROFORMING

Abstract

The hydroforming processes are relatively new forming technologies as comparing to forging, stamping, extrusion. They cause some problems related with lower reliability, as well as production rate, highly-demanded control system, oil sealing problem, etc. In order to reduce process development time, it is indispensable to conduct computer simulation before detailed design and costly prototyping stages. To ensure accurate simulation results, proper material properties, process parameters and failure criteria must be known.

Some criteria for ductile fracture and the prediction of forming limit diagram (FLD) are discussed and the results of two computer simulations with FLD predicting are presented in this paper.

Key words: failure criteria, hydroforming, sheet metal forming, FEA, FLD