



## Modelowanie numeryczne procesu wykrawania z uwzględnieniem fazy pęknięcia

STANISŁAW KUT

Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa,  
35-959 Rzeszów, Al. Powstańców Warszawy 8

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono symulację numeryczną procesu wykrawania z uwzględnieniem fazy pęknięcia ciągłego. Początek fazy oraz przebieg jej trajektorii prognozowano w oparciu o tzw. wskaźnik wykorzystania odkształcalności. Opracowano oraz zaimplementowano do programu MSC MARC/Mentat specjalny podprogram, który umożliwił obliczanie wartości wskaźnika wykorzystania odkształcalności. Rozwój pęknięcia modelowano poprzez wykasowywanie w kolejnych krokach deformacji tych elementów, w których została przekroczona krytyczna wartość wymienionego wskaźnika. Symulację przeprowadzono dla próbek wykonanych z blachy stalowej o grubości 3,5 mm, wielkości luzu  $L_j = 0,5$  mm. Otrzymane rezultaty porównano z wynikami badań eksperymentalnych. Zwrócono uwagę na kształt powierzchni przecięcia.

**Słowa kluczowe:** wykrawanie, symulacja MES, dekohezja

**Symbole UKD:** 539.3

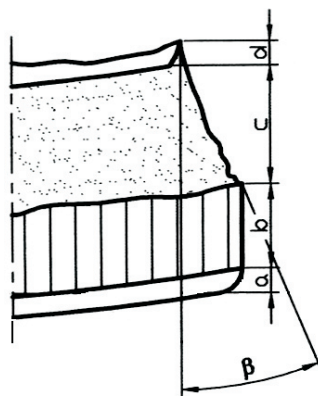
### 1. Wprowadzenie

Proces wykrawania, w odróżnieniu od szeregu innych stosowanych w przeróbce plastycznej, jest szczególnie trudny do opisu matematycznego. O ile bowiem w odniesieniu do większości procesów plastycznego kształtowania na zimno wystarczający jest opis zachowania się materiału w zakresie odkształceń sprężystych oraz plastycznych z uwzględnieniem zjawiska umocnienia i anizotropii, to w przypadku wykrawania istotna jest również znajomość i opis zjawisk zachodzących w fazie pojawiania się dużych odkształceń plastycznych poprzedzających pęknięcie, jego zarodkowanie oraz rozwój. Rozpatrywane zagadnienie nie leży w zakresie klasycznej mechaniki pęknięcia bazującej na rozwoju szczelin, gdyż ta dotyczy głównie

materiałów kruchych oraz wysokowytrzymałych materiałów konstrukcyjnych, natomiast w przypadku materiałów ciągliwych, pękanie poprzedzone jest dużymi odkształceniami plastycznymi. Powstające mikropęknięcia w fazie dużych odkształceń plastycznych w wielu przypadkach mogą być nawet zalecane [1]. W szeregu przypadków zapewnienie odpowiednich warunków w trakcie procesu wykrawania stwarza możliwość wyeliminowania fazy pękania, co zapewnia *plastyczną* utratę spójności materiału wzdłuż grubości elementu wykrawanego. Stworzenie tego rodzaju warunków zapewniają zazwyczaj metody wykrawania dokładnego [2-4].

Ze względu na jakość geometryczną wyrobu (rys. 1), w analizie procesu wykrawania istotne jest określenie początku fazy oraz trajektorii przebiegu pękania. Rozpoczyna się ono, gdy odkształcenia w pobliżu krawędzi stempla i płyty tnącej osiągają pewną wartość graniczną, zwaną również *odkształceniem pękania*. Odkształcenie to nie jest stałą materiałową. Liczne badania [5-7] wykazują, iż pękanie ciągliwe silnie zależy od stanu naprężenia panującego w odkształcanym materiale. Wniosek ten był niezależnie formułowany przez wielu badaczy na drodze doświadczałnej [8-9].

W chwili obecnej proces wykrawania modelowany jest z powodzeniem na drodze numerycznej w zakresie odkształceń sprężystych oraz plastycznych, do momentu początku pękania [10, 11] zazwyczaj określanego za pomocą jednego z wielu znanych technologicznych kryteriów, np. Cockrofta i Lathama [12], Ricea i Traceya [7], Oyanea [9], Atkinsa [5], Goijaertsa [11] i innych. Jednakże modelowanie to pozwala jedynie określić parametry siłowe procesu oraz wielkość ewentualnej strefy pękania. Nie dostarcza natomiast istotnej informacji dotyczącej kształtu powierzchni przecięcia (rys. 1) decydującej o jakości geometrycznej wyrobu.



Rys. 1. Profil powierzchni przecięcia typowej wykroki: a) zaokrąglenie; b) strefa cięcia plastycznego; c) strefa pękania; d) zadziór;  $\beta$  — kąt pękania

W praktyce pożądanym jest, by proces wykrawania był tak zaprojektowany, aby pozwalał otrzymywać wyroby o z góry założonej jakości oraz kształcie powierzchni przecięcia. Z tego względu konieczne staje się modelowanie również fazy pękania

materiału, gdyż ta ma decydujący wpływ na uzyskaną jakość geometryczną elementu wykrawanego.

## 2. Badania eksperymentalne

Odpowiednie badania eksperymentalne poprzedziły symulację numeryczną, uwarunkowaną znajomością niezbędnych danych wyjściowych do opracowania modelu numerycznego MES oraz jego weryfikacji. Do badań użyto próbek w postaci pasków o szerokości  $\sim 20$  mm wyciętych z blachy stalowej niskowęglowej o grubości 3,5 mm wzdłuż kierunku walcowania. Właściwości mechaniczne materiału badanej blachy (tab. 1) zostały wyznaczone na podstawie statycznej próby rozciągania przeprowadzonej na maszynie wytrzymałościowej UTS 100.

Operację odcinania przeprowadzono za pomocą przyrządu (rys. 2) dla wielkości szczeliny wynoszącej  $L_j = 0,5$  mm. W celu określenia trajektorii pękania dokonano odwzorowania kształtu rzeczywistego profilu powierzchni bocznej wykrojki (rys. 3 b).

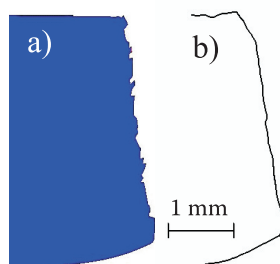
TABELA 1

Właściwości mechaniczne badanego materiału

Grubość $g$ [mm]	Granica plastyczności $Re$ [MPa]	Wytrzymałość $Rm$ [MPa]	Parametry krzywej umocnienia	
			$K$ [MPa]	$n$
3,5	399	447	591	0,072



Rys. 2. Schemat przyrządu do odcinania: 1 — noże tnące; 2 — stempel; 3 — próbka;  $L_j$  — szczelina wykrawania



Rys. 3. Profile powierzchni przecięcia wykrojek uzyskane w wyniku: a) symulacji MES; b) eksperymentu

### 3. Symulacja numeryczna

Model geometryczny do symulacji MES zbudowano na bazie modelu wynikającego z przeprowadzonego eksperymentu. Proces wykrawania modelowano zakładając płaski stan odkształcenia. Jako związek konstytutywny przyjęto sprężysto-plastyczny model materiału z nieliniowym umocnieniem opisany równaniem:

$$\sigma = \begin{cases} E \cdot \varepsilon & (\varepsilon < \sigma_0 / E) \\ K \cdot \varepsilon^n & (\varepsilon \geq \sigma_0 / E) \end{cases} \quad (1)$$

W zakresie odkształceń sprężystych wartości parametrów materiałowych wynosiły:  $E = 210\,000$  MPa,  $\nu = 0,3$ . Parametry krzywej umocnienia zamieszczono w tabeli 1. Do budowy siatki elementów skończonych odkształcalnej blachy zastosowano elementy klasy 4 typu 11 — *plane-strain quadrilateral* [12]. Przyjęto model tarcia opisany prawem Coulomba oraz wartość współczynnika tarcia  $\mu = 0,1$ . Obliczenia przeprowadzono przy pomocy komercyjnego programu MSC MARC/Mentat dla zagadnień nieliniowych, z uwzględnieniem kontaktu. Początek pęknięcia materiału, a następnie jego przebieg modelowano w oparciu o tzw. wskaźnik wykorzystania odkształcalności  $W$  [13]:

$$W = \int_0^{\varepsilon_p} \frac{d\varepsilon}{\varepsilon_p(k)} \leq 1, \quad (2)$$

gdzie:  $\varepsilon$  — odkształcenie zastępcze;  $\varepsilon_p(k)$  — funkcja odkształcalności granicznej.

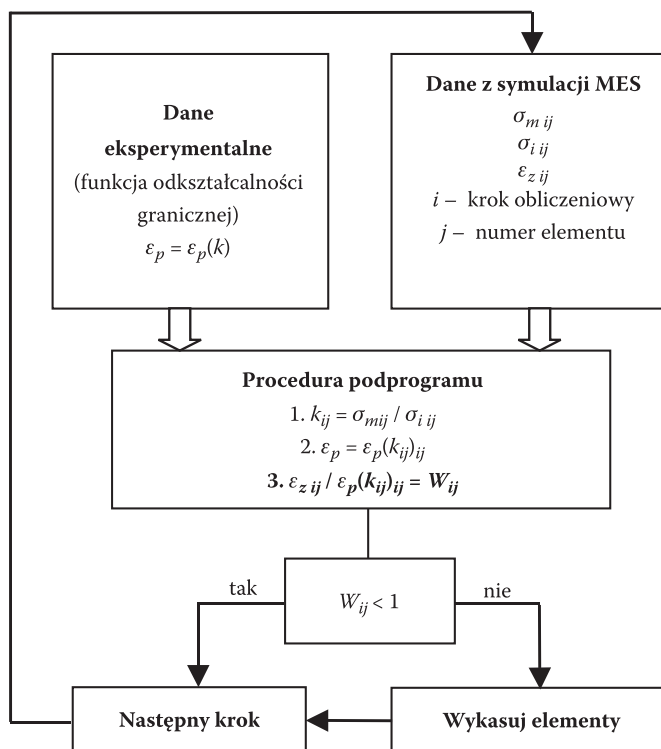
Wskaźnik ten stanowi istotny parametr technologiczny, informujący o stopniu wykorzystania odkształcenia w poszczególnych obszarach kształtowanego materiału. Standardowo systemy obliczeniowe nie uwzględniają tego wskaźnika, dlatego posługiwanie się nim wiązało się z koniecznością opracowania specjalnej procedury obliczeniowej w formie podprogramu.

Praktyczne wykorzystanie wskaźnika  $W$  wymaga znajomości funkcji odkształcalności granicznej  $\varepsilon_p = f(k)$ , gdzie  $k$  jest wskaźnikiem stanu naprężenia definiowanym jako iloraz naprężenia średniego i intensywności naprężenia. Funkcję odkształcalności granicznej można wyznaczyć eksperymentalnie, wykonując testy materiałowe dla różnych przypadków stanów naprężeń [14, 15]. W rozważanym przypadku funkcję tę sformułowano w postaci:

$$\varepsilon_p(k) = -14,39k^3 + 21,91k^2 - 9,86k + 2,021. \tag{3}$$

W technologicznych procesach kształtowania, w których pęknięcie poprzedzone jest dużymi odkształceniami plastycznymi, wskaźnik  $W$  może również pełnić rolę kryterium powstania złomu rozdzielczego, a więc tzw. kryterium pęknięcia. Przyjmuje się, że pęknięcie rozpocznie się wówczas, kiedy wartość wskaźnika  $W \geq 1$ . Wówczas to elementy, w których wskaźnik osiągnie krytyczną wartość zostają w kolejnych krokach obliczeniowych usuwane.

Modelowanie fazy pęknięcia odbywa się według zaproponowanego algorytmu (rys. 4). Do podprogramu pobierane są dane wejściowe eksperymentalne w po-

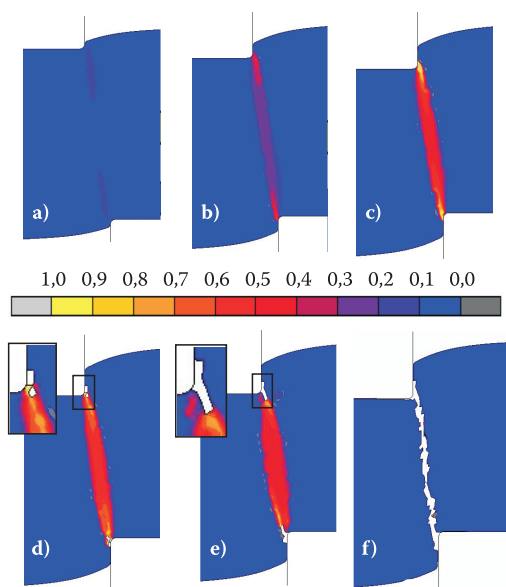


Rys. 4. Algorytm stosowany do modelowania fazy pęknięcia

staci funkcji odkształcalności granicznej oraz w każdym kroku obliczeniowym dla każdego elementu dane z programu obliczeniowego w postaci:  $\sigma_m$  — naprężenie średnie,  $\sigma_i$  — intensywność naprężenia,  $\varepsilon_z$  — odkształcenie zastępcze. Następnie podprogram oblicza wartość wskaźnika stanu naprężenia  $k$  oraz wielkość granicznego odkształcenia pęknięcia  $\varepsilon_p$  dla obliczonego wskaźnika  $k$ . Na podstawie tych danych obliczany jest wskaźnik  $W$ , na podstawie którego podejmowana jest decyzja o przejściu do następnego kroku obliczeniowego lub o usunięciu elementów, a następnie przejściu do następnego kroku obliczeniowego.

#### 4. Wyniki badań

Na rysunku 5 przedstawiono rozkład wskaźnika wykorzystania odkształcalności  $W$  na poszczególnych etapach zagłębienia stempla w materiał. W odróżnieniu od typowych symulacji w tym przypadku oprócz sprężystej i plastycznej deformacji materiału odkształcanego w prezentacji wyników możemy obserwować również początek oraz przebieg pęknięcia do momentu rozdzielenia materiału. Pozwala to prognozować jakość geometryczną elementu wykrawanego. W miarę zagłębienia stempla w materiał (rys. 5a, b, c) w obszarze pomiędzy krawędziami tnącymi narzędzi, gdzie



Rys. 5. Rozkład wskaźnika wykorzystania odkształcalności  $W$  oraz przebieg pęknięcia na poszczególnych etapach zagłębienia stempla  $h$ : a)  $h = 0,38$  mm; b)  $h = 0,62$  mm; c)  $h = 0,83$  mm; d)  $h = 0,95$  mm — początek pęknięcia; e) rozwój pęknięcia; f) rozdzielenie

występują największe odkształcenia plastyczne zwiększa się wartość wskaźnika  $W$ , przy czym największe wartości osiąga on w pobliżu krawędzi tnących narzędzi. Przy zagłębieniu stempla  $h = 0,95$  mm (rys. 5d) wskaźnik  $W$  osiąga maksymalną dopuszczalną wartość w pobliżu krawędzi tnących narzędzi. Wówczas to, od powierzchni natarcia pojawia się szczelina i rozpoczyna proces pęknięcia. To, że pęknięcie inicjowane jest przy krawędzi na powierzchni natarcia, spowodowane jest tym, iż na powierzchni przyłożenia występują znacznie większe naciski. W efekcie siła tarcia na powierzchni przyłożenia jest znacząco większa niż na powierzchni natarcia, co decyduje o lokalizacji powstania pęknięcia. Dalsze zagłębienie stempla (rys. 5e) powoduje rozwój szczeliny w kierunku, w którym wskaźnik  $W$  osiąga największe wartości, a pęknięcie rozwija się do momentu rozdzielenia materiału (rys. 5f).

Na podstawie przeprowadzonej symulacji można oszacować wielkość poszczególnych stref na powierzchni przecięcia, wyznaczyć strzałkę ugięcia, kąt pęknięcia oraz inne parametry geometryczne, wpływające na jakość uzyskanego wyrobu. Porównując kształt profilu wykrojki uzyskanej w symulacji MES (rys. 3a) z profilem rzeczywistym wyznaczonym eksperymentalnie (rys. 3b), można stwierdzić wyraźną zbieżność, co stanowi argument przemawiający za wykorzystywaniem zaproponowanego modelowania w praktyce inżynierskiej.

## 5. Wnioski

1. Wskaźnik wykorzystania odkształcalności stanowi bardzo istotny parametr technologiczny. Może on równocześnie spełniać rolę kryterium pęknięcia ciągłego, co wykazano w niniejszej pracy. Możliwość jego stosowania w komercyjnym programie MES wymaga opracowania adekwatnego podprogramu oraz znajomości przebiegu funkcji odkształcalności granicznej.
2. Możliwość modelowania w procesie wykrawania fazy pęknięcia materiału stwarza nowe możliwości odnośnie przewidywania jakości geometrycznej elementu wykrawanego.
3. Przedstawiony sposób modelowania z wykorzystaniem wskaźnika odkształcalności granicznej może być z powodzeniem stosowany w innych procesach przeróbki plastycznej.

Artykuł wpłynął do redakcji 11.04.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w czerwcu 2008 r.

## LITERATURA

- [1] F. GROSMAN, *Charakterystyki technologicznej plastyczności materiałów stan aktualny a oczekiwania*, Rudy Metale, R48, 10-11, 2003, 446-468.

- [2] S. KUT, *Wpływ wybranych parametrów na jakość wyrobów w procesie wykrawania dokładnego*, OWPRz, Rzeszów, 2006.
- [3] J. GRONOSTAJSKI, A. MATUSZAK, *Sposoby dokładnego wykrawania z blach*, Mechanik, 9, 1971, 493-496.
- [4] S. KUT, *Sposób wykrawania ze wstępnym wygięciem półwyrobu*, Rudy Metale, R49, 3, 2004, 127-130.
- [5] A. ATKINS, *Fracture in forming*, J. Mat. Proc. Techn., 56, 1996, 609-618.
- [6] F. McCLINTOCK, *A criterion of ductile fracture by the growth of holes*, J. Applied Mechanics, 35, 1968, 363-371.
- [7] J. RICE, D. TRECEY, *On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields*, J. Mech. Phys. Solids, 17, 1969, 201-217.
- [8] D. NORRIS, J. REAUGH, B. MORAN, D. QUINONES, *A plastic-strain, mean-stress criterion for ductile fracture*, J. Eng. Materials and Technology, 100, 1978, 279-286.
- [9] M. OYANE, T. SATO, K. OKIMOTO, S. SHIMA, *Criteria for ductile fracture and their applications*, Journal Mechanical Working Technology, 4, 1980, 65-81.
- [10] R. HAMBI, M. RESZKA, *Fracture criteria identification using an inverse technique method and blanking experiment*, Int. J. Mech. Sci., 44, 2002, 1349-1361.
- [11] A. GOIJAERTS, L. GOVAERT, F. BAAIJENS, *Evaluation of ductile fracture models for different metals in blanking*, J. Mat. Proc. Techn., 110, 2001, 312-323.
- [12] M. COCKROFT, D. LATHAM, *A simple criterion for fracture for ductile-fracture of metals*, National Engineering Laboratory, Raport no. 240, 1966.
- [13] F. GROSMAN, M. TKOCZ, *Koncepcja zastosowania funkcji odkształcalności granicznej do prognozowania utraty spójności*, Mat. konf. Forming 2003, Podlesie k/Kroczyz, 2003, 63-68.
- [14] F. GROSMAN, *Funkcja odkształcalności granicznej*, Obróbka plastyczna 4, 1976, 197-202.
- [15] Y. BAO, T. WIERZBICKI, *On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space*, Int. J. of Mech. Sciences, 46, 2004, 81-98.

S. KUT

### FEM modelling of ductile fracture phase in blanking process

**Abstract.** This paper presents numerical simulation of a blanking process including a ductile fracture phase. The beginning of ductile fracture phase and its trajectory has been predicted using the formability utilization indicator. The specialized subroutine for MSC Marc Mentat software has been developed and implemented to calculate the formability utilization indicator. The fracture progress has been modelled by step-by-step deleting the segments, where the formability utilization indicator's critical value has been exceeded. FEM simulation has been performed for the samples made of sheet steel (thickness 3.5 mm) for clearance  $L_j = 0.5$  mm. The simulation results have been compared with experimental ones. The cross-cut section has been carefully checked.

**Keywords:** blanking, FEM simulation, decohesion

**Universal Decimal Classification:** 539.3