

Modelowanie procesu wykrawania elementów pojazdów samochodowych za pomocą metody cząstek hydrodynamicznych

Łukasz Bohdal, Leon Kukielka, Szymon Gontarz, Katarzyna Gotowała

Streszczenie

W artykule przedstawiono sposób modelowania procesu wykrawania elementów pojazdów samochodowych z wykorzystaniem metody cząstek hydrodynamicznych (SPH). Symulację komputerową opracowano z wykorzystaniem Solvera LS-DYNA oraz aplikacji LS-PrePost. Otrzymano mapy intensywności naprężeń i odkształceń dla dowolnej chwili czasowej z uwzględnieniem nieliniowości występujących w procesie. Przedstawiono wybrane wyniki analizy numerycznej, które mogą być wykorzystane do projektowania procesu i jego optymalizacji.

Słowa kluczowe: modelowanie, wykrawanie, mapy intensywności naprężeń i odkształceń, SPH.

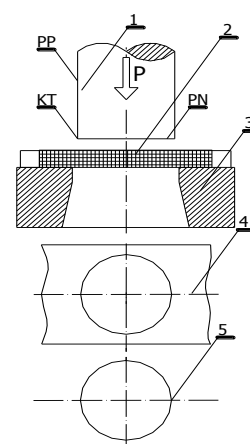
Wstęp

W obecnej chwili technologia wykonania wielu podzespołów pojazdów samochodowych opiera się na zastosowaniu procesów wykrawania. Bardzo ważnym etapem projektowania tej operacji jest odpowiednie przygotowanie narzędzi i prawidłowy dobór parametrów technologicznych procesu. Analiza eksperymentalna procesu jest zagadnieniem bardzo skomplikowanym, ze względu na występujące w procesie nieliniowości [1, 2]. Na obecną chwilę ekonomiczne metody numeryczne stały się powszechnym narzędziem w poszukiwaniu dokładnego opisu wpływu parametrów procesów technologicznych na jakość uzyskanego wyrobu [4-9]. Pomimo wielu publikacji z zakresu modelowania procesu wykrawania [2, 3] odpowiednie zastosowanie metod matematycznych w odniesieniu do modelowania procesu cięcia jest współczesnym wyzwaniem naukowym. Dostępna literatura z zakresu modelowania procesu wykrawania skupia się na wykorzystaniu metody elementów skończonych do analizy tego procesu.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie nowego sposobu modelowania procesu wykrawania z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej oraz z zastosowaniem metody bezsiatkowej SPH (ang. smoothed particle hydrodynamics).

1. Charakterystyka procesu wykrawania

Podstawową operacją wykrawania jest wycinanie polegające na naruszeniu spójności materiału wzdłuż linii zamkniętej. Oddziaływanie stempła 1 określona siłą P powoduje koncentrację naprężeń w materiale 2 wzdłuż linii cięcia wyznaczonej przez kształt stempła i matrycy 3, której skutkiem jest przekroczenie sił spójności materiału i odpadnięcie wyrobu 5 z pozostawieniem odpadu 4 (rys. 1).



Rys. 1. Schemat procesu wykrawania

2. Stosowana metoda rozwiązania

Metoda SPH została opracowana w celu uniknięcia znacznego pogorszenia jakości siatki elementów skończonych podczas silnych deformacji. Badany obszar jest tu opisany za pomocą zbioru cząstek, które mają przypisane określone własności i oddziałują na siebie. Ich wzajemne oddziaływanie opisane jest za pomocą funkcji wygładzającej opisującej parametry stanu, występujące w danej cząsteczce:

$$f(x) = \int_{\Omega} f(x') \delta(x - x') dx' \quad (1)$$

gdzie: $f(x)$ - szukana wartość funkcji w danym punkcie x , Ω - badany obszar, $f(x')$ wartość funkcji w punktach innych niż x , δ - delta Diraca.

Z powodu występowania w równaniu funkcji delta Diraca, która nie jest ciągła i nie jest różniczkowalna konieczne jest zamienienie funkcji δ na funkcję W , wygładzającą tę ostatnią (stąd nazwa funkcji W – funkcja wygładzająca), wprowadzając dodatkową zależność od zmiennej h , która jest skończoną odległością od rozpatrywanej cząsteczki. Zamiana funkcji δ na funkcję W nazywana jest aproksymacją jądra (ang: kernel approximation).

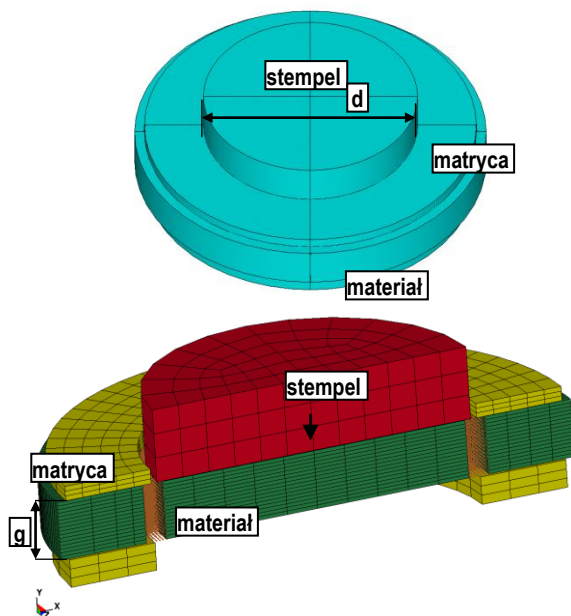
Po procesie dyskretyzacji badanego obszaru/przestrzeni Ω skończoną liczbę cząsteczek równanie aproksymacji jądra można zapisać:

$$\langle f \rangle (x) = \sum_{q=1}^N \frac{m_q}{\rho_q} f(x_q) W(x - x_q, h) \Delta q, \quad (2)$$

gdzie: m - masa cząsteczki, ρ - gęstość cząsteczki, N - liczba cząstek znajdujących się w obrębie nośnika funkcji wygładzającej.

3. Model symulacyjny

Model symulacyjny procesu wykrawania opracowane został przy użyciu Solvera LS-DYNA oraz aplikacji LS-PrePost. Symulacje przeprowadzono dla przestrzennych stanów naprężeń i odkształceń w materiale. Średnica stempla wynosiła $d = 22$ [mm], grubość wykrawanej blachy $g = 4$ [mm] (rys. 2). Prędkość narzędzia tnącego $v = 50$ [mm/s]. Przyjęto, że matryca i stempel są ciałami nieodkształcalnymi $E \rightarrow \infty$.



Rys. 2. Model symulacyjny

Ze względu na złożoność problemu i dużą czasochłonność obliczeń zastosowano podejście uwzględniające dwie metody: SPH oraz MES. Obszary materiału o silnych nieliniowościach zostały dyskretyzowane metodą SPH, pozostałe obszary natomiast MES (rys. 2).

Modelowanie procesu cięcia nieodłącznie związane jest z koniecznością zdefiniowania momentu i warunków pęknięcia

materiału. Zastosowane równanie konstytutywne Johnsona-Cooke'a pozwala określać zależność naprężeń uplastyczniających od odkształceń plastycznych, z uwzględnieniem pęknięcia (zniszczenia) materiału [4, 5]. Model uwzględnia także wpływ prędkości odkształceń oraz temperatury na wartości naprężeń uplastyczniających według zależności:

$$\sigma_p = \left[A + B(\epsilon_{eff}^p)^n \right] \left(1 + C \ln(\dot{\epsilon}) \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_{ot}}{T_{top} - T_{ot}} \right)^m \right] \quad (3)$$

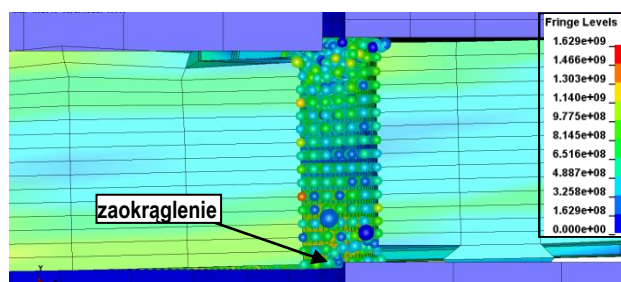
gdzie: σ_p - naprężenia uplastyczniające, ϵ_{eff}^p - efektywne odkształcenie plastyczne, $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_{eff}^p / \dot{\epsilon}_0$ - prędkość odkształceń plastycznych, T - temperatura materiału ciętego, T_{ot} - temperatura odniesienia, T_{top} - temperatura topnienia materiału ciętego, A, B, C, m, n - współczynniki zależne od własności materiału. Wartości liczbowe współczynników A, B, C, m, n dla materiału ciętego zaczerpnięto z literatury [10]. Dla stopu aluminium AA6111-T4 z którego wykonuje się panele karoseryjne: $A = 324,1$ [MPa], $B = 113,8$ [MPa], $C = 0,002$ [-], $m = 1,34$ [-], $n = 0,42$ [-]. W celu uwzględnienia procesu utraty spójności materiału wykorzystano rozszerzony model kumulacji uszkodzeń, który uwzględnia trójosiowy stan naprężeń w materiale, wpływ prędkości odkształceń oraz temperatury na tzw. ekwiwalentną wielkość plastycznego odkształcenia niszczącego $\bar{\epsilon}_{eff}^{pl}$:

$$\bar{\epsilon}_{eff}^{pl} = \left[D_1 + D_2 \exp\left(D_3 \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \right) \right] \left[1 + D_4 \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\bar{\dot{\epsilon}}} \right) \right] \left(1 + D_5 \hat{T} \right), \quad (4)$$

gdzie: $D_1 + D_5$ - stałe materiałowe, σ_m - naprężenie średnie. Dla stopu aluminium AA6111-T4: $D_1 = -0,77$; $D_2 = 1,45$; $D_3 = -0,47$; $D_4 = 0$; $D_5 = 1,6$.

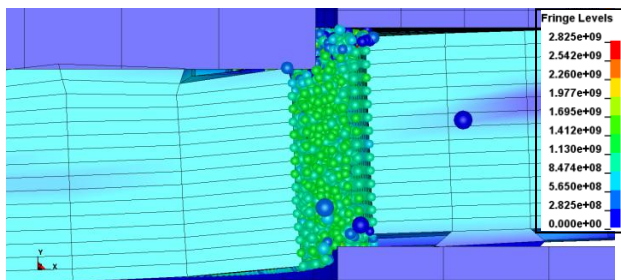
4. Wyniki analizy

Na rysunkach 3-7 przedstawiono rozkłady naprężeń zastępczych Hubera - Misesa w różnych fazach procesu cięcia. W początkowej fazie procesu największe wartości naprężeń występowały w strefie kontaktu stempla i matrycy z materiałem ciętym (rys. 3). Bezpośrednio w sąsiedztwie krawędzi tnących stempla i matrycy można zaobserwować charakterystycznie zaburzone układy cząstek SPH.



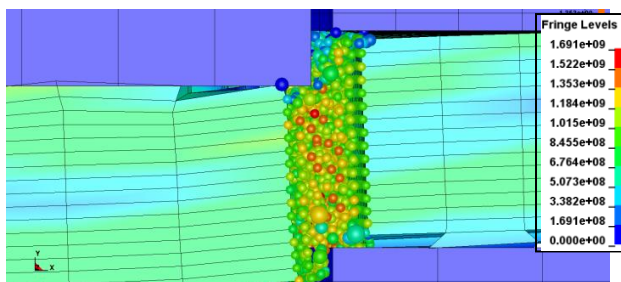
Rys. 3. Mapy naprężeń HMH w fazie odkształceń sprężysto-plastycznych [Pa]

Na powierzchni przecięcia tworzy się zaokrąglenie. W fazie plastycznego płynięcia maksymalne naprężenia koncentrowały się już na całej grubości materiału (rys. 4). W strefie kontaktu stempla i matrycy z materiałem występowały także bardzo duże odkształcenia. Bezpośrednio przed rozpoczęciem fazy pęknięcia nastąpił gwałtowny wzrost naprężeń w przekroju ciętego materiału (rys. 5).

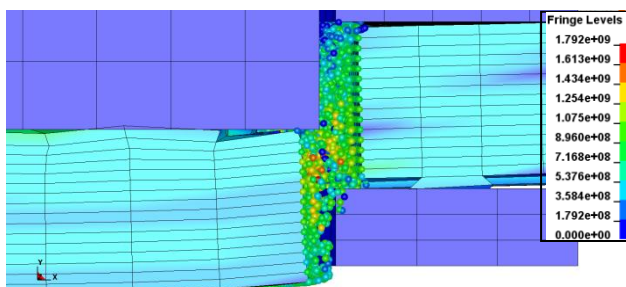


Rys. 4. Mapy naprężeń HMM w fazie plastycznego płynięcia [Pa]

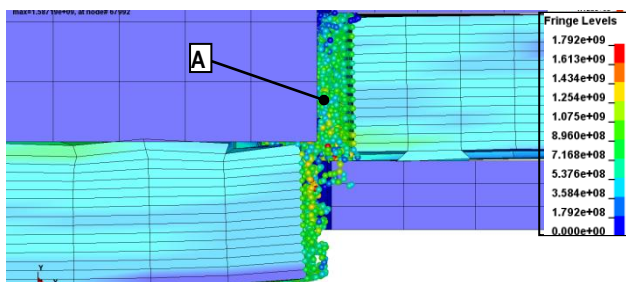
W kolejnych fazach nastąpiło rozdzielanie materiału (rys. 6 i 7). Maksymalne naprężenia występowały już tylko w pojedynczych cząstkach SPH.



Rys. 5. Mapy naprężeń HMM w fazie plastycznego płynięcia (kolejny etap) [Pa]

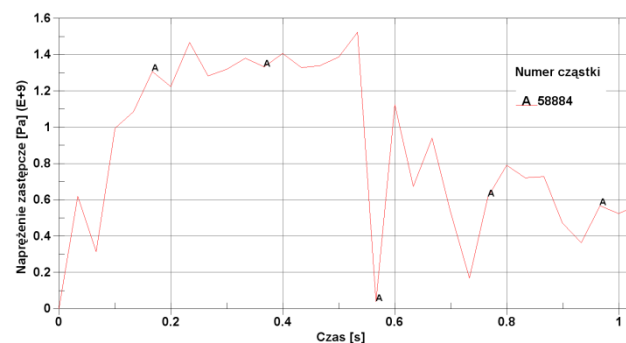


Rys. 6. Mapy naprężeń HMM w fazie pęknięcia [Pa]



Rys. 7. Mapy naprężeń HMM w fazie pęknięcia (etap końcowy) [Pa]

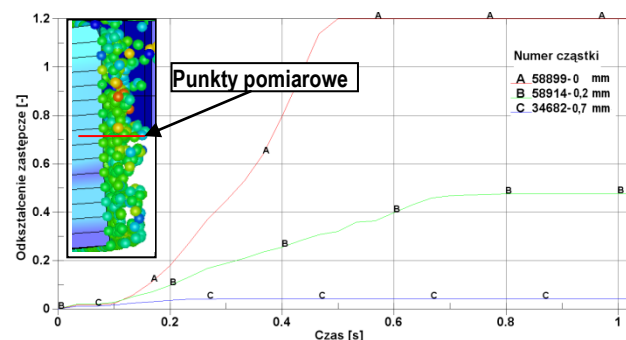
W procesie wykrawania analiza doświadczalna poszczególnych faz procesu cięcia pozwala uzyskiwać informacje o momencie powstawania charakterystycznych cech powierzchni przecięcia a także wad wyrobów. Na rysunku 8 zaprezentowano sposób analizy wartości naprężeń w czasie trwania procesu w wybranej cząsteczce SPH.



Rys. 8. Analiza wartości naprężeń w wybranej cząsteczce SPH

Na wykresie można zaobserwować wzrost naprężeń do momentu umocnienia się materiału. Następnie nastąpiła stabilizacja wartości naprężeń, aż do momentu naruszenia spójności materiału. W tym momencie nastąpił gwałtowny spadek ich wartości, a następnie ponowna stabilizacja.

Na rysunku 9 przedstawiono wartości odkształceń zastępczych Hubera – Misesa w wyrobie. W procesach wykrawania oprócz struktury geometrycznej powierzchni przecięcia bardzo ważne jest również określenie szerokości strefy cięcia po procesie. Można tego dokonać np.: poprzez pomiar odkształceń na powierzchni wyrobu.



Rys. 9. Wartości odkształceń zastępczych na powierzchni przecięcia wyrobu z oznaczonym dystansem od krawędzi [-]

Szerokość strefy cięcia ma szczególnie istotne znaczenie podczas wykrawania elementów z blach elektrotechnicznych gdzie wpływa na właściwości magnetyczne tych materiałów. Z rysunku 9 wynika, że wraz z oddalaniem się od krawędzi wyrobu wartości odkształceń maleją. Największe wartości odkształceń zastępczych występowały na powierzchni przecięcia i wynosiły 1,2.

5. Wnioski

Proces wykrawania, w odróżnieniu od innych stosowanych w obróbce plastycznej jest szczególnie trudny do opisu matematycznego. W przypadku wykrawania istotna jest znajomość i opis zjawisk zachodzących w fazie pojawiania się dużych odkształceń plastycznych poprzedzających pęknięcie, jego zarodkowanie oraz rozwój. W pracy przedstawiono nowe podejście do modelowania procesu wykrawania blach karoseryjnych umożliwiające dokładniejszy opis pola deformacji w obszarze kontaktu narzędzi z przedmiotem wykrawanym. Opracowane modele umożliwiają prowadzenie dalszych badań ukierunkowanych na poszukiwanie optymalnych parametrów do realizacji procesu wykrawania.

Bibliografia

1. Bohdal Ł., Kukielka L.: *The effect of selected material parameters on the stress and strain states in the process of cutting a sheet plate with circular cutters*. TASK Quarterly, vol. 10, no. 4, s. 391-400, (2006).
2. Zhou Q, Wierzbicki T.: *A Tension Zone Model of Blanking and Tearing of Ductile Metal Plate*. International Journal of Mechanical Sciences 38 (3), s. 303-324, (1996)
3. Bohdal Ł., Kukielka L.: *Optimization of the dynamic blanking process*. PAMM 7, s. 4030043-4030044, (2007).
4. Chodór J, Kukielka L.: *Numerical analysis of chip formation during machining for different value of failure strain*. PAMM 7 (1) s. 4030031-4030032, (2007).
5. Chodór J, Kukielka L.: *Numerical analysis of micromachining of C45 steel by single abrasive grain*. PAMM 8 (1) s. 10715-10716, (2008).
6. Patyk R., Kukielka L., Kukielka K., Kulakowska A., Szczepanik K. 2011. *Analiza ubytku właściwości użytkowych noży pielnika aktywnego*. Inżynieria Rolnicza. Nr 5 (130), (2011), s. 223-229
7. Kukielka L., Kulakowska A., Patyk R.: *Numerical Modeling and Simulation of the Movable Contact Tool-Workpiece and Application in Technological Processes*, The 5th International Symposium on Management, Engineering and Informatics: MEI 2009, The 13th Multi-conference on Systemics, Cybernetics and Informatics: WMSCI 2009, July 10th - 13th, 2009 Orlando, Florida, USA
8. Kałduński P, Kukielka L.: *The numerical analysis of the influence of the blankholder force and the friction coefficient on the value of the drawing force*. PAMM 7 (1) s. 4010045-4010046, (2007).
9. Kałduński P, Kukielka L.: *The sensitivity analysis of the drawpiece response on the finite element shape parameter*. PAMM 8 (1) s. 10725-10726, (2008).
10. Schwer L. E.: *Aluminum plate perforation: A comparative case study using Lagrange with erosion, multi-material ALE, and Smooth Particle Hydrodynamics*. 7th European LS-DYNA Conference (2009).

Modelling of the car elements blanking process using Smoothed Particle Hydrodynamics

Abstract

The paper presents the modeling of the blanking process of the car elements using Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). Numerical analysis was performed in LS-DYNA solver and LS-PrePost application regarding process nonlinearities. Obtained maps of stresses, strains, displacement at any moment of time can be used to design of the process and its optimization.

Key words: modelling, blanking, maps of stresses and strains intensity, SPH.

Autorzy:

Dr inż. **Łukasz Bohdal** – Politechnika Koszalińska
 Prof. dr hab. inż. **Leon Kukielka** – Politechnika Koszalińska
 Dr inż. **Szymon Gontarz** – Politechnika Warszawska
 Mgr inż. **Katarzyna Gotowała** – Politechnika Koszalińska