

Modelowanie procesu wykrawania elementów pojazdów samochodowych

Lukasz Bohdal, Jarosław Chodór, Paweł Kalduński

Streszczenie

W artykule przedstawiono sposób modelowania procesu wykrawania elementów pojazdów samochodowych z wykorzystaniem metody elementów skończonych. 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.

Wstęp

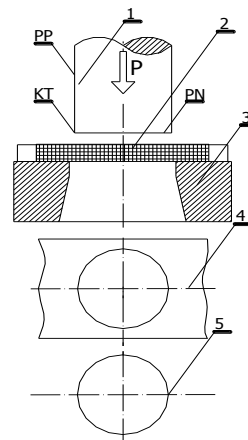
Obecnie, technologia wykonania wielu podzespołów pojazdów samochodowych opiera się na zastosowaniu procesów wykrawania. Bardzo ważnym etapem projektowania tej operacji jest odpowiednie przygotowanie narzędzi i prawidłowy dobór parametrów technologicznych procesu. Analiza eksperymentalna procesu jest zagadnieniem bardzo skomplikowanym, ze względu na występujące w procesie nieliniowości [1, 2]. Dlatego też ekonomiczne metody numeryczne stały się powszechnym narzędziem w procesie poszukiwania dokładnego opisu wpływu parametrów procesu na jakość uzyskanego wyrobu. Pomimo wielu publikacji z zakresu modelowania procesu wykrawania [1, 3, 4] odpowiednie zastosowanie metod matematycznych w odniesieniu do modelowania procesu cięcia jest współczesnym wyzwaniem naukowym. W procesie cięcia intensywność obciążeń jest duża i dlatego problematykę procesu należy rozpatrywać w kategoriach mechaniki nieliniowej [5-7]. Problem polegający na uwzględnieniu nieliniowości geometrycznych fizycznych i materiałowych, zwłaszcza związanych ze zmianami właściwości materiałowych w trakcie procesu jest ciągle otwarty i stwarza poważne trudności w rozwiązywaniu zagadnienia nieliniowej mechaniki.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie sposobu modelowania procesu wykrawania z uwzględnieniem nieliniowości procesu oraz wpływu temperatury na naprężenia uplastyczniające materiału. Wpływ temperatury na deformacje materiału i wartości naprężeń jest szczególnie istotny podczas stosowania zwiększonych prędkości cięcia. W związku z tym do opisu zachowania się materiału ciętego zastosowano model konstytutywny Johnsona-Cooka, który opisuje ośrodki sprężysto-plastyczne z uwzględnieniem warunku plastyczności Hubera-Misesa-Hencky'ego, temperatury oraz prędkości odkształceń.

1. Charakterystyka procesu wykrawania

Podstawową operacją wykrawania jest wycinanie polegające na naruszeniu spójności materiału wzdłuż linii zamkniętej. Oddziaływanie stempla 1 określona siłą P powoduje

koncentrację naprężeń w materiale 2 wzdłuż linii cięcia wyznaczonej przez kształt stempla 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

Do rozwiązania postawionego problemu posłużono się metodą różnic centralnych zwaną także metodą jawnego całkowania (explicit) [8-15]. Należy ona do większej grupy metod bezpośredniego całkowania dynamicznych równań ruchu. Równanie opisujące ruch obiektu na typowym kroku czasowym w uaktualnionym opisie Lagrange'a ma postać:

$$\begin{aligned}
 & [\mathbf{M}] \{\Delta \ddot{\mathbf{r}}\} + [\mathbf{C}_T(\cdot)] \{\Delta \dot{\mathbf{r}}\} + ([\mathbf{K}_T(\cdot)] \\
 & + [\Delta \mathbf{K}_T(\cdot)]) \{\Delta \mathbf{r}\} = \{\Delta \mathbf{R}_T(\cdot)\} + \{\Delta \mathbf{F}(\cdot)\} + \{\mathbf{F}_T(\cdot)\}, \quad (1)
 \end{aligned}$$

gdzie:

$[\mathbf{M}]$ - globalna macierz mas układu w chwili t ,

- [\mathbf{C}_T] - globalna macierz tłumienia układu w chwili t ,
- [\mathbf{K}_T] - globalna macierz sztywności układu w chwili t ,
- [$\Delta\mathbf{K}_T$] - globalna macierz przyrostu sztywności obiektu na kroku,
- { \mathbf{F}_T } - globalny wektor obciążeń wewnętrznych obiektu w chwili t ,
- { $\Delta\mathbf{F}$ } - wektor przyrostu obciążeń wewnętrznych obiektu,
- { $\Delta\mathbf{R}_T$ } - globalny wektor przyrostu obciążeń zewnętrznych obiektu,
- { $\Delta\mathbf{r}$ } - wektor przyrostu przemieszczeń węzłów obiektu,
- { $\Delta\dot{\mathbf{r}}$ } - wektor przyrostu prędkości węzłów obiektu,
- { $\Delta\ddot{\mathbf{r}}$ } - wektor przyrostu przyspieszeń węzłów obiektu.

Równanie (1) jest całkowane względem czasu metodą krok po kroku i ponadto nie jest przed tą operacją przekształcane. Jeśli założy się, że przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia układu są znane na początku w chwili $\tau = t_0$ i równe odpowiednio $\{\mathbf{r}_0\}$, $\{\dot{\mathbf{r}}_0\}$, $\{\ddot{\mathbf{r}}_0\}$, wtedy dzieli się cały przedział na części o długości Δt i w każdym z kroków szuka się rozwiązania dla równania (1). Czyli równanie to ma być spełnione tylko w wybranych chwilach czasowych, a nie w całym badanym przedziale. Oznacza to, że dla każdej chwili można poszukiwać położeń równowagi układu poddanego działaniu sił zewnętrznych, sił bezwładności oraz sił tłumienia, stosując algorytmy analizy statycznej. Koniec każdej chwili czasowej jest jednocześnie początkiem następczej [16, 17].

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 płaskich stanów odkształceń w materiale. Analizie poddano element o wymiarach gabarytowych 42x5 [mm] umieszczony w matrycy. Średnica stempla wynosiła $d = 20$ [mm], grubość wykrawanej blachy $g = 5$ [mm] (rys. 2). Prędkość narzędzia tnącego $v = 5$ [m/s]. Przyjęto, że matryca i stempel są ciałami nieodkształcalnymi $E \rightarrow \infty$. W modelowaniu procesów cięcia bardzo ważne jest, aby siatka elementów skończonych była dostatecznie gęsta, zwłaszcza w obszarach występowania silnych nieliniowości gdyż będzie to rzutować na późniejsze wyniki obliczeń. W rozpatrywanym przypadku przeprowadzona analiza wrażliwości układu na zmiany kształtu i liczby elementów skończonych wykazała, że najlepsze rezultaty otrzymuje się stosując siatkę regularną o polach kwadratowych lub prostokątnych (cięty materiał, matryca). Optymalna liczba elementów skończonych ciętego elementu wynosiła 45284.

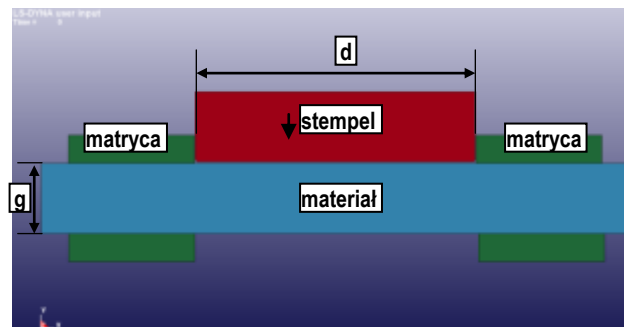
Modelowanie procesu cięcia nieodłącznie związane jest z koniecznością zdefiniowania momentu i warunków pęknięcia materiału. Zastosowane równanie konstytutywne Johnsona-Cooke'a pozwala określać zależność naprężeń uplastyczniających od odkształceń plastycznych, z uwzględnieniem pęknięcia (zniszczenia) materiału.

Model uwzględnia także wpływ prędkości odkształceń oraz temperatury na wartości naprężeń uplastyczniających według zależności:

$$\sigma_p = \left[A + B(\epsilon_{\text{eff}}^p)^n \right] \left(1 + C \ln(\dot{\epsilon}) \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_{\text{ot}}}{T_{\text{top}} - T_{\text{ot}}} \right)^m \right] \quad (2)$$

gdzie: σ_p - naprężenia uplastyczniające, ϵ_{eff}^p - efektywne

odkształcenie plastyczne, $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_{\text{eff}}^p / \dot{\epsilon}_0$ - 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.



Rys. 2. Model symulacyjny

Wartości liczbowe współczynników A, B, C, m, n dla materiału ciętego zaczerpnięto z literatury [18]. 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 $\bar{\epsilon}_{\text{eff}}^{\text{pl}}$:

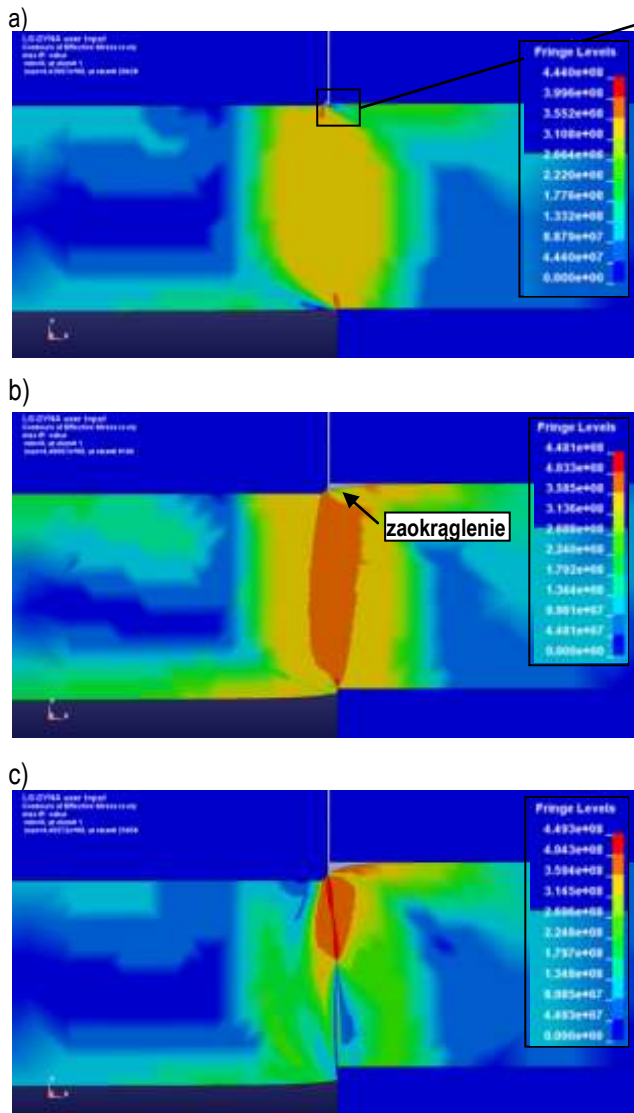
$$\bar{\epsilon}_{\text{eff}}^{\text{pl}} = \left[D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \right) \right] \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 + D_5 \hat{T} \right] \quad (3)$$

gdzie: $D_1 \div D_5$ - 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 rysunku 3 przedstawiono rozkłady naprężeń zastępczych HMM. W początkowej fazie procesu największe wartości naprężeń występowały w strefie kontaktu stempla i matrycy z materiałem ciętym i wynosiły około 440 MPa. W fazie plastycznego płynięcia maksymalne naprężenia koncentrowały się już na całej grubości materiału aż do początku pęknięcia. Pęknięcie materiału rozpoczęło się od dolnej części matrycy doprowadzając do całkowitego rozdzielenia.

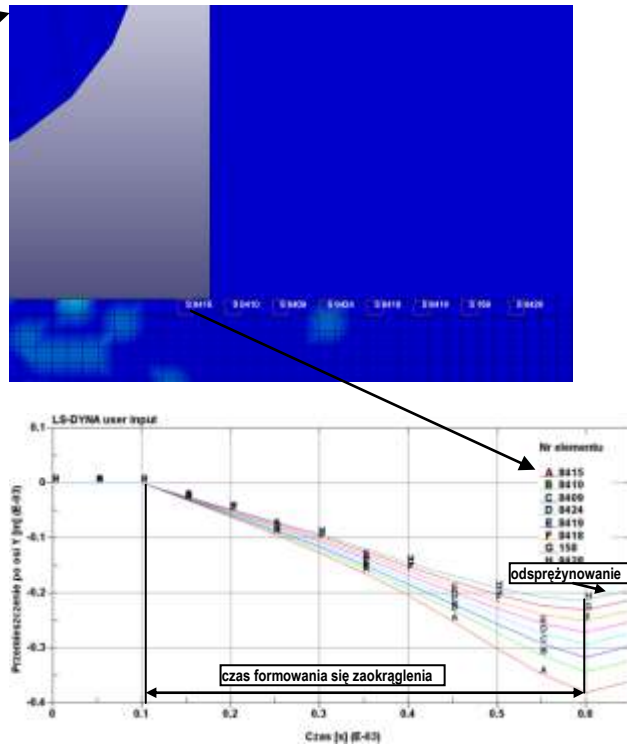
W procesie wykrawania analiza doświadczalna poszczególnych faz procesu cięcia pozwala uzyskiwać informacje o momencie powstawania charakterystycznych cech powierzchni przecięcia a także wad wyrobów. Na rysunku 4 zaprezentowano sposób analizy powstawania zaokrąglenia na powierzchni przecięcia. Zaokrąglenie jest jedną ze stref powstałą na skutek działania momentu gnącego. Strefa ta wchodzi w skład przelomu poślizgowego na powierzchni przecięcia. Na podstawie wykresu przemieszczeń charakterystycznych punktów na powierzchni materiału możliwa jest obserwacja tworzenia się zaokrąglenia oraz odsprężynowania materiału (rys. 4).



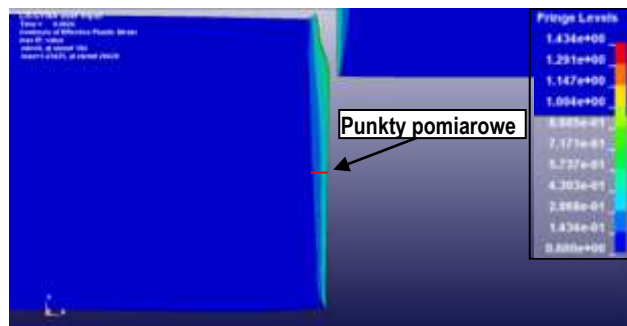
Rys. 3. Mapy naprężeń HMH w różnych fazach procesu [Pa]

Na rysunku 5 przedstawiono rozkłady odkształceń zastępczych HMH 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. Szerokość strefy cięcia ma szczególnie istotne znaczenie podczas wykrawania elementów z blach elektrotechnicznych gdzie wpływa na właściwości magnetyczne tych materiałów.

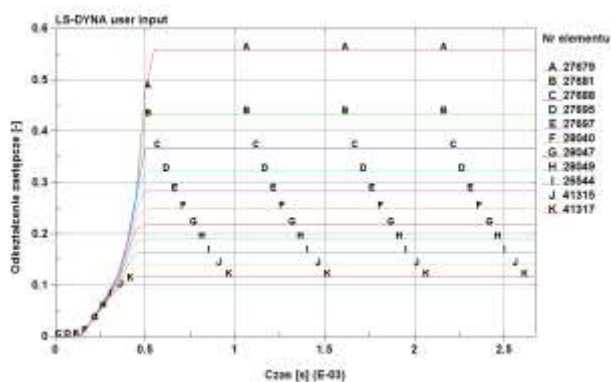
Z rysunku 6 wynika, że wraz z oddalaniem się od krawędzi wyrobu wartości odkształceń maleją. Największe wartości odkształceń zastępczych występowały na powierzchni przecięcia i wynosiły 0,56. W miarę oddalania się od powierzchni przecięcia wartości odkształceń malały i w odległości 0,2 mm od krawędzi wynosiły około 0,1.



Rys. 4. Wykres przemieszczeń charakterystycznych punktów wchodzących w skład zaokrąglenia

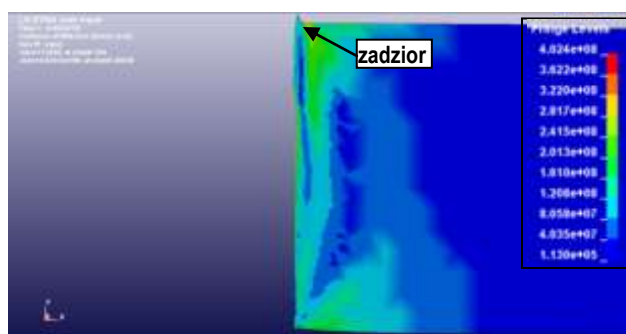


Rys. 5. Rozkład intensywności odkształceń zastępczych [-]



Rys. 6. Wartości odkształceń zastępczych na powierzchni wyrobu

W przemyśle motoryzacyjnym głównym problemem powodującym znaczne obniżenie jakości wyrobu jest występowanie zadziorów na powierzchni przecięcia. Dla przyjętych parametrów technologicznych procesu wykrawania wysokość uzyskanego zadzioru była niewielka i wynosiła $h_z = 0,15$ mm.



Rys. 7. Rozkład intensywności naprężeń zastępczych z widocznym niewielkim zadziorem na powierzchni przecięcia [Pa]

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 pękanie, jego zarodkowanie oraz rozwój.

Opracowane algorytmy i symulacje uwzględniające m.in. wpływ temperatury na wartości naprężeń uplastyczniających stwarzają nowe możliwości odnośnie przewidywania jakości geometrycznej elementu wykrawanego. Pozwalają lepiej poznać zjawiska fizyczne występujące w procesie cięcia oraz ich wpływ na jakość wyrobu i energochłonność procesu.

Uzyskane wyniki mogą być podstawą do opracowania wytycznych doboru warunków cięcia, ze względu na wymaganą jakość technologiczną wyrobu.

Bibliografia

1. Świtło S, Czyżewski P.: *An experimental and numerical study of material deformation of a blanking process*. Computer Methods in Materials Science 13 (2), pp. 333-338, (2013).
2. 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, pp. 391-400, (2006).
3. Taupin E, Breitling J, Wu W, Altan T.: *Material fracture and burr formation in blanking results of FEM simulations and comparison with experiments*. Journal of Materials Processing Technology 59, pp. 68-78 (1996).
4. Zhou Q, Wierzbicki T.: *A Tension Zone Model of Blanking and Tearing of Ductile Metal Plate*. International Journal of Mechanical Sciences 38 (3), pp. 303-324, (1996)
5. Bohdal Ł, Kukielka L.: *Modelowanie i analiza numeryczna procesu cięcia blach nożami krążkowymi z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej*. Mechanik nr. 8-9, s. 712-716, (2011).
6. Bohdal Ł, Kukielka L.: *Analiza numeryczna procesu cięcia blach karoseryjnych klinowym narzędziem niesymetrycznym*. XII Śląskie Forum Motoryzacji, s. 29-34, (2009).
7. Bohdal Ł, Kukielka L.: *Optimization of the dynamic blanking process*. PAMM 7, pp. 4030043-4030044, (2007).
8. Chodór J, Kukielka L.: *Numerical analysis of chip formation during machining for different value of failure strain*. PAMM 7 (1), pp. 4030031-4030032, (2007).
9. Chodór J, Kukielka L.: *Numerical analysis of micromachining of C45 steel by single abrasive grain*. PAMM 8 (1), pp. 10715-10716, (2008).
10. Patyk R., Kukielka L., Kukielka K., Kułakowska A., Szczepanik K. 2011. *Analiza ubytku właściwości użytkowych noży pielnika aktywnego*. Inżynieria Rolnicza. Nr 5 (130), (2011), s. 223-229
11. Kukielka L., Kułakowska A., Patyk R.: *Numerical Modeling and Simulation of the Movable Contact Tool-Worpiece and Application in Technological Processes*. Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics, vol. 8, no 3, 2010, pp. 36-41, <http://www.iiisci.org/journal/sci/FullText.asp?var=&id=GM2111LP>, ISSN: 1690-4524.
12. Kukielka L., Geleta K., Kukielka K.: *Modelling and Analysis of Nonlinear Physical Phenomena in the Burnishing Rolling Operation with Electrical Current*. STEEL RESEARCH INTERNATIONAL - Metal Forming 2012, Publishing Company Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, pp. 1379-1382.
13. Kukielka L., Geleta K., Kukielka K.: *Modelling of Initial and Boundary Problems with Geometrical and Physical Nonlinearity and its Application in Burnishing Processes*. STEEL RESEARCH INTERNATIONAL - Metal Forming 2012, Publishing Company Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, pp. 1375-1378.
14. Kukielka K.: *Numerical simulations of deformation and stress in the cold rolled thread*. Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji, Vol. 31, Nr 1, Politechnika Poznańska, 2011, pp. 57-66, ISSN 1233-9709.
15. Kukielka K.: *Modelling the external thread rolling process using finite element method*. Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji, Vol. 31, Nr 3, Politechnika Poznańska, 2011, pp. 49-58, ISSN 1233-9709.
16. 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) pp. 4010045-4010046, (2007).
17. Kałduński P, Kukielka L.: *The sensitivity analysis of the drawpiece response on the finite element shape parameter*. PAMM 8 (1), pp. 10725-10726, (2008).
18. 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

Abstract

The paper presents the modeling of the blanking process of the car elements using Finite Element Method. 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 it's optimization.

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

Autorzy:

Dr inż. **Łukasz Bohdal** – Politechnika Koszalińska

Dr inż. **Jarosław Chodór** – Politechnika Koszalińska

Dr inż. **Paweł Kałduński** – Politechnika Koszalińska