

Modelowanie procesu cięcia elementów pojazdów samochodowych na nożycach krążkowych

Łukasz Bohdal, Leon Kukielka

Streszczenie

W artykule przedstawiono sposób modelowania procesu cięcia elementów pojazdów samochodowych na nożycach krążkowych z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Symulację komputerową przeprowadzono dla przestrzennych stanów naprężeń i odkształceń 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, cięcie na nożycach krążkowych, mapy intensywności naprężeń i odkształceń.

Wstęp

Procesy cięcia takie jak wykrawanie, odcinanie, przebijanie, cięcie na gilotynie lub nożycach krążkowych są niezbędne do wytwarzania części maszyn i urządzeń zarówno w przemyśle motoryzacyjnym jak i elektronicznym czy lotniczym. Symulacje numeryczne są obecnie popularnym narzędziem do badania złożonych zjawisk fizycznych zachodzących podczas tych procesów. Dzięki zastosowaniu techniki komputerowej można skrócić czas oraz ograniczyć koszty badań. Dodatkowo modelować można zjawiska szybkozmienne, których dokładna analiza jest uciążliwa podczas badań eksperymentalnych [1-7].

Stosowanie 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. Konieczne jest wówczas uwzględnienie wpływu zmian geometrycznych (*nieliniowość geometryczna*) oraz złożonych właściwości materiałowych (*nieliniowość fizyczna, materiałowa*). 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.

W literaturze istnieje wiele pozycji związanych z modelowaniem procesów wykrawania, odcinania, tłoczenia, skrawania czy przebijania [8-12]. Znacznie mniej publikacji związanych jest z analizą procesu cięcia na gilotynie [13, 14] i nożycach krążkowych [14]. Proces cięcia na nożycach krążkowych jest szczególnie trudny do zamodelowania. Wynika to m.in. z jego złożonej kinematyki. W celu dokładnej analizy procesu niezbędne jest opracowanie trójwymiarowego modelu komputerowego uwzględniającego m. in. ruch obrotowy nożyc, przesuw arkusza blachy w kierunku poziomym, dużą prędkość cięcia. Obecnie, w dostępnej literaturze brakuje modeli

symulacyjnych procesu cięcia na nożycach krążkowych uwzględniających wszystkie niezbędne zjawiska fizyczne zachodzące podczas kształtowania wyrobów.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie sposobu modelowania procesu cięcia elementów pojazdów samochodowych na nożycach krążkowych z uwzględnieniem nieliniowości procesu oraz wpływu temperatury na naprężenia uplastyczniające materiału. Do opisu zachowania się materiału ciętego zastosowano model konstytutywny Johnsona-Cooka, który opisuje ośrodkę sprężysto-plastyczne z uwzględnieniem warunku plastyczności Hubera-Misesa-Hencky'ego oraz prędkości odkształceń. Opracowany model symulacyjny został zweryfikowany eksperymentalnie z wykorzystaniem technik wizyjnych.

1. Etapy modelowania i analizy procesu cięcia

Modelując proces cięcia wzięto pod uwagę oddziaływanie przedmiotu obrabianego i narzędzia oraz wpływ otoczenia. Modelowanie procesu przy zastosowaniu metod wariacyjnych i elementów skończonych przebiega wg następujących etapów [3-6, 15, 16]:

- 1) Modelowanie fizyczne obiektu rzeczywistego w wyniku, czego uzyskuje się model fizyczny procesu cięcia (zbiór zjawisk i procesów, jakie występują w badanym obiekcie, zbiór założeń i uproszczeń).
- 2) Modelowanie matematyczne modelu fizycznego w wyniku, którego otrzymuje się ciągle, przyrostowe modele matematyczne, to jest: równania konstytutywne, model kontaktu narzędzie – przedmiot, model dynamiczny i warunki jednoznaczności. W wyniku sformułowania wariacyjnego otrzymuje się ponadto dynamiczne równanie ruchu obiektu. Alternatywą jest dyskretyzacja obiektu elementami skończonymi w wyniku, której otrzymuje się dyskretny model fizyczny.

3) Aproksymacja ciągłego modelu matematycznego za pomocą metody elementów skończonych (MES) lub modelowanie matematyczne dyskretnego modelu fizycznego, prowadzące do dyskretnych, przyrostowych modeli matematycznych modelu fizycznego [15, 16].

2. Stosowana metoda rozwiązania

Do rozwiązania postawionego problemu posłużono się metodą różnic centralnych zwaną także metodą jawnego całkowania (explicit) [3-6, 17-19]. 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:

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

gdzie:

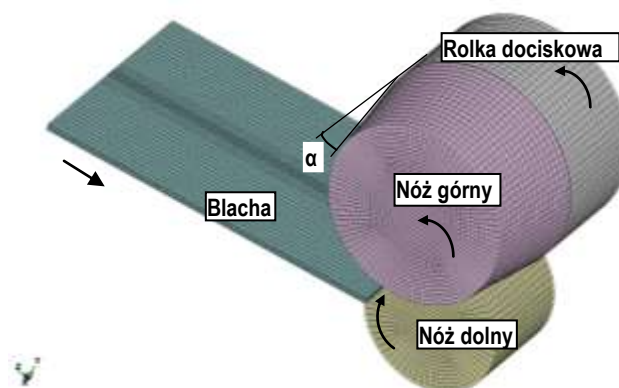
- $[\mathbf{M}]$ - globalna macierz mas układu w chwili t ,
- $[\mathbf{C}_T]$ - globalna macierz tłumienia układu w chwili t ,
- $[\mathbf{K}_T]$ - globalna macierz sztywności układu w chwili t ,
- $[\Delta\mathbf{K}_T]$ - globalna macierz przyrostu sztywności obiektu na kroku,
- $\{\mathbf{F}_T\}$ - 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 następnej [20].

3. Model symulacyjny

Model symulacyjny procesu cięcia na nożycach krążkowych opracowane został przy użyciu Solvera LS-DYNA oraz aplikacji LS-PrePost. Badania numeryczne zrealizowano zgodnie z warunkami początkowo-brzegowymi, odwzorowującymi badania na stanowisku eksperymentalnym opisanym w pracy [17]. Opracowano trójwymiarowy model numeryczny uwzględniający rzeczywistą kinematykę procesu: obroty nożyc i rolki dociskowej, ruch arkusza materiału w kierunku poziomym. Symulacje przeprowadzono dla przestrzennych stanów naprężeń i odkształceń w materiale. Opracowana aplikacja

do modelowania 3D procesu cięcia na nożycach krążkowych umożliwia uwzględnienie w analizach wielu parametrów technologicznych pomijanych w obliczeniach dwuwymiarowych (2D) (płaski stan odkształceń, przestrzenny stan naprężeń) takich jak: długość linii cięcia, wartość kąta pochylenia krawędzi tnącej nożycy górnej (α), wartości promieni nożyc, sposób mocowania arkusza, sposób docisku w zależności od jego długości i szerokości. Możliwe jest analizowanie przyczyn powstawania defektów arkuszy, które są widoczne tylko w symulacjach 3D oraz opracowanie zaleceń dotyczących zapobiegania ich powstawaniu. Możliwa jest analiza zjawisk fizycznych zachodzących podczas i po procesie cięcia w każdym miejscu arkusza, w całym przekroju, co nie jest możliwe podczas modelowania 2D oraz bardzo często podczas badań eksperymentalnych. Umożliwia to analizowanie, m.in. zjawisk zachodzących pod powierzchnią przylegania narzędzia (np.: analiza przemieszczeń i odkształceń materiału, analiza tarcia i poślizgu, nacisków kontaktowych). Na rysunku 1 przedstawiono model dyskretny stanowiska badawczego.



Rys. 1. Model dyskretny obiektu

Prawidłowe zamodelowanie procesu pęknięcia materiału wymagało precyzyjnego podziału arkusza na elementy skończone, który składał się z 320000 elementów. Prędkość cięcia wynosiła $v = 500 \text{ mm/s}$, wartość kąta pochylenia krawędzi tnącej nożycy górnej $\alpha = 7^\circ$. Długość linii cięcia $l = 50 \text{ mm}$. Grubość ciętego arkusza $g = 1,5 \text{ mm}$. 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. W literaturze [22, 23] zaprezentowano funkcjonały, które pozwalają na określenie odkształceń plastycznych, które uznajemy za krytyczne, tj. których osiągnięcie możemy interpretować jako początek pęknięcia. Ponadto model uwzględnia także wpływ prędkości odkształceń oraz temperatury na wartości naprężeń uplastyczniających według zależności:

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

gdzie: σ_p - naprężenia uplastyczniające, ϵ_{eff}^p - efektywne odkształcenie plastyczne, $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_{\text{eff}}^p / \dot{\epsilon}_0$ - prędkość odkształceń

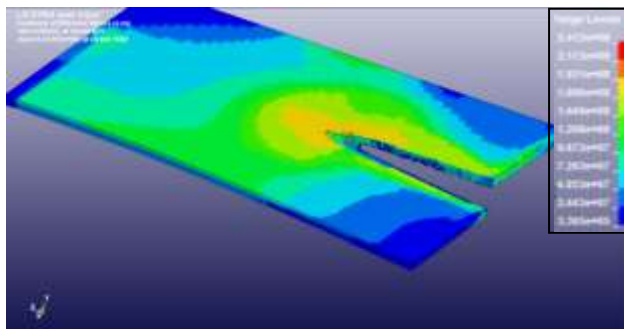
plastycznych, T - temperatura materiału ciętego, T_{ot} - temperatura odniesienia, T_{top} - temperatura topnienia materiału ciętego, A, B, C, m, n - współczynniki zależne od własności materiału. Dla stopu aluminium AA6111-T4 z którego wykonuje się panele karoseryjne: $A = 324,1$ [MPa], $B = 113,8$ [MPa], $C = 0,002$ [-], $m = 1,34$ [-], $n = 0,42$ [-] [23]. 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 $\bar{\epsilon}_{eff}^{pl}$:

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

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

4. Wyniki analizy

W celu poprawnego zilustrowania uzyskanych wyników przedstawiono je w formie obrazów prezentujących rozkłady: naprężeń zastępczych Hubera–Misesa–Hencky'ego, przemieszczeń, prędkości odkształceń w różnych krokach czasowych. Na rysunku 2 przedstawiono wyniki naprężeń zastępczych HMM. Największe wartości naprężeń wystąpiły w strefie kontaktu nożyc z materiałem ciętym i wynosiły około 240 MPa. Na rysunku 3 przedstawiono mapy przemieszczeń poszczególnych fragmentów ciętego arkusza po osi y. Wartości maksymalnych przemieszczeń wystąpiły w przedniej części arkusza odciętego.

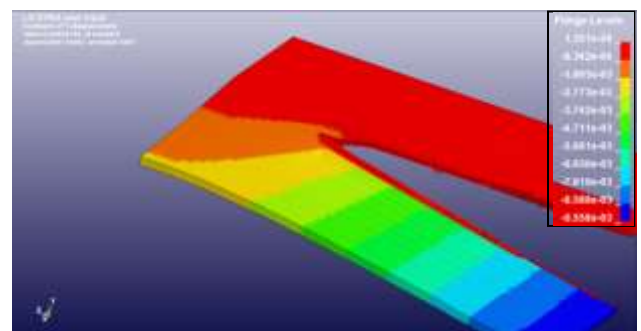


Rys. 2. Mapy naprężeń HMM [Pa] po pokonaniu drogi przez nożyce wynoszącej $a = 20$ mm

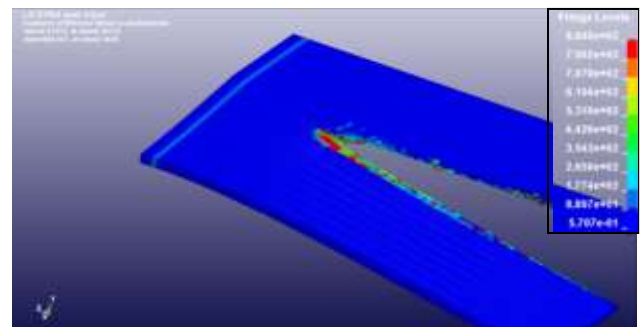
Zastosowany w symulacji model konstytutywny Johnsona Cook'a umożliwia analizę prędkości odkształceń w dowolnym miejscu ciętego materiału (rys. 4). Największe prędkości odkształceń zachodzą w miejscu rozdzielania materiału.

Opracowany model procesu cięcia nożycami krążkowymi został poddany weryfikacji doświadczalnej, gdzie porównywano proces deformacji i pęknięcia materiału w różnych fazach procesu. Do badań doświadczalnych wykorzystano kamerę, która rejestrowała przebieg procesu. Pomimo niewielkiej prędkości zapisu danych (10 klatek na sekundę) udało się zarejestrować najważniejsze fazy procesu. Analizy uzyskanych

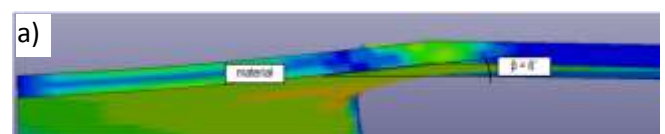
obrazów dokonano programem graficznym ImageJ. Na rysunku 5 przedstawiono fazę tworzenia się zagięcia krawędzi arkusza. Rysunek 6 przedstawia natomiast moment całkowitego rozdzielania materiału i odpadnięcie części odciętej. Wyniki modelowania i eksperymentu wykazują znaczące podobieństwa zarówno w analizie deformacji ciętego arkusza jak i jakości powierzchni przecięcia co pozwala przypuszczać, że opracowana metoda badań będzie mogła być stosowana do analizy procesu cięcia arkuszy blach na nożycach krążkowych.



Rys. 3. Mapy przemieszczeń po osi Y [m] po pokonaniu drogi przez nożyce wynoszącej $a = 37$ mm



Rys. 4. Mapy prędkości odkształceń [1/s] po pokonaniu drogi przez nożyce wynoszącej $a = 37$ mm

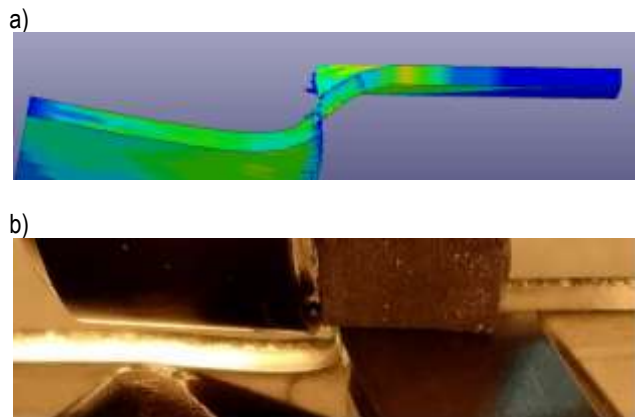


Rys. 5. Porównanie wyników symulacji z eksperymentem w końcowej fazie procesu: a) symulacja, b) eksperyment ($a = 40$ mm)

5. Wnioski

Zwiększenie jakości technologicznej wyrobów w przemyśle motoryzacyjnym powoduje konieczność zwiększenia dokładności modelowania i analizy zjawisk fizycznych

towarzyszących procesowi obróbki materiałów stosowanych do produkcji pojazdów.



Rys. 6. Porównanie wyników symulacji z eksperymentem po całkowitym rozdzielaniu: a) symulacja, b) eksperyment (zielona linia przerywana oznacza kontur zadzioru)

Opracowane symulacje dla przestrzennych stanów naprężeń i odkształceń (3D) z uwzględnieniem wpływu temperatury na wartości naprężeń uplastyczniających 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.

W dalszych pracach planuje się zastosowanie kamer o większych możliwościach i specjalistycznego oprogramowania do pomiaru przemieszczeń i odkształceń w strefie cięcia. Wyniki te pozwolą na jeszcze dokładniejszą walidację modelu MES.

Bibliografia

1. Patyk R., Kukielka L., Kukielka K., Kułakowska A., Szczepaniak K. 2011. *Analiza ubytku właściwości użytkowych noży pielnika aktywnego*. Inżynieria Rolnicza. Nr 5 (130), (2011), s. 223-229
2. 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=GM211LP>, ISSN: 1690-4524.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Chodór J, Kukielka L.: *Numerical analysis of chip formation during machining for different value of failure strain*. *PAMM 7 (1)* s. 4030031-4030032, (2007).
8. Chodór J, Kukielka L.: *Numerical analysis of micromachining of C45 steel by single abrasive grain*. *PAMM 8 (1)* s. 10715-10716 (2008).
9. Chodór J, Kukielka L.: *Using nonlinear contact mechanics in process of tool edge movement on deformable body to analysis of cutting and sliding burnishing processes*. *Applied Mechanics and Materials 474*, s. 339-344, (2014).
10. 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).
11. Kałduński P, Kukielka L.: *The sensitivity analysis of the drawpiece response on the finite element shape parameter*. *PAMM 8 (1)* s. 10725-10726, (2008).
12. Hambli R.: *Comparison between Lemaitre and Gurson damage models in crack growth simulation during blanking process*. *International Journal of Mechanical Sciences 43*, pp. 2769-2790, (2001).
13. Saanouni K, Belamri N, Autesserre P.: *Finite element simulation of 3D sheet metal guillotining using advanced fully coupled elastoplastic-damage constitutive equations*. *Finite Elements in Analysis and Design 46*, pp. 535-550, (2010).
14. Wisselink H. *Analysis of guillotining and slitting, finite element simulations*. Ph.D - Thesis, University of Twente, The Netherlands, 2000.
15. 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).
16. 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).
17. Kułakowska A., Kukielka L., Patyk R.: *Numerical analysis and experimental researches of burnishing rolling process of workpieces with real surface*, 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
18. Bohdal Ł, Kukielka L.: *Analiza numeryczna procesu cięcia blach karoseryjnych klinowym narzędziem niesymetrycznym*. XII Śląskie Forum Motoryzacji, s. 29-34, (2009).
19. Bohdal Ł, Kukielka L.: *Optimization of the dynamic blanking process*. *PAMM 7*, s. 4030043-4030044, (2007).
20. Kałduński P, Kukielka L.: *Numerical analysis and simulation of drawpiece forming process by finite element method*. *Applied Mechanics and Materials 474*, s. 153-158, (2014).
21. Bohdal Ł, Walczak P.: *Eco-modeling of metal sheet cutting with disc shears*, *Annual Set The Environment Protection 15*, pp. 863-872, (2013).
22. Kosmol J, Mieszczak W.: *Zastosowanie metody elementów skończonych do modelowania procesu wiercenia*. *Modelowanie Inżynierskie 37*, s. 169-176, (2009).
23. 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 shear slitting process

Abstract

The paper presents the modeling of the shear slitting process of the car elements using Finite Element Method. Numerical analysis was performed for the spatial states of stresses and strains 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 for design of the process and it's optimization.

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

Autorzy:

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

Prof. dr hab. inż. **Leon Kukielka** – Politechnika Koszalińska