

## MODELOWANIE I ANALIZA NUMERYCZNA PROCESU CIĘCIA PODZESPOŁÓW WYKONANYCH Z BLACH KAROSERYJNYCH NA GILOTYNIE

### Streszczenie

W artykule przedstawiono numeryczną symulację procesu cięcia elementów podzespołów samochodowych na gilotynie. W tym celu opracowano aplikację 3D w programach Ansys/LS-Dyna i Ls-Prepost do symulacji zjawisk fizycznych zachodzących podczas trwania procesu. Przedstawiono wybrane wyniki rozkładów naprężeń i odkształceń w dowolnej chwili czasowej.

### WSTĘP

Cięcie jest procesem kształtowania przedmiotów polegającym na oddzieleniu jednej części materiału od drugiej [1-3]. Takiemu oddzieleniu towarzyszą duże odkształcenia plastyczne, które doprowadzają do naruszenia spójności materiału. W celu przecięcia materiału w żądanym przekroju, trzeba doprowadzić w tym miejscu do koncentracji naprężeń, zdolnych do pokonania spójności materiału. Taką koncentrację najłatwiej jest uzyskać poprzez wywarcie odpowiedniego nacisku na powierzchnię blachy za pośrednictwem dwu noży. W praktyce przemysłowej taki sposób cięcia znajduje coraz większe zastosowanie gdyż zapewnia on uzyskiwanie wyrobów o dokładności i wysokiej jakości powierzchni przecięcia, bez konieczności stosowania dalszych operacji obróbki wykańczającej.

Należy pamiętać, że jakość wytwarzanych wyrobów i koszt ich produkcji są zaliczane do najważniejszych problemów współczesnej techniki wytwarzania elementów pojazdów samochodowych.

W procesie cięcia nożycami gilotynowymi bardzo ważny jest odpowiedni dobór parametrów takich jak kształt narzędzia, prędkość cięcia, luzy między nożami, współczynniki tarcia. Parametry te mają bardzo duży wpływ na deformację blachy, kształty pęknięć, zużycie narzędzi i jakość powierzchni przecięcia. Badania eksperymentalne procesu cięcia są kosztowne i czasochłonne, dlatego też sięga się po nowoczesne, komputerowe metody rozwiązywania problemów z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

Metoda elementów skończonych stosowana jest do rozwiązywania złożonych problemów inżynierskich, głównie w przypadkach, gdy rozwiązanie metodą analityczną nie jest możliwe, jak w przypadku analizy zjawisk fizycznych występujących w procesach technologicznych. MES związana jest z podziałem kontinuum na małe odpowiednie elementy o skończonych wymiarach i określonej ich liczbie. W celu przeprowadzenia analizy MES zachodzi konieczność stworzenia modelu dyskretnego i symulacyjnego analizowanego obiektu.

W pracy zajęto się analizą procesu cięcia na gilotynie z wykorzystaniem systemów Ansys/LS-Dyna i Ls-Prepost. Opracowane algorytmy i aplikacje komputerowe umożliwiają istotnie rozszerzenie i ulepszenie procesu przez wykorzystanie możliwości, jakie stwarza wprowadzenie metod numerycznych do obliczeń przemieszczeń, odkształceń, naprężeń w przedmiocie kształtowanym. W literaturze istnieje wiele pozycji związanych z modelowaniem procesów wykręcania, odcinania, tłoczenia, skrawania czy przebijania [4-13]. Znacznie mniej publikacji związanych jest z analizą procesu cięcia na gilotynie [11]. Proces cięcia na gilotynie jest szczególnie trudny do zamodelowania. Wynika to m.in. z konieczności budowy modelu 3D uwzględniającego rzeczywiste wymiary noży oraz długość linii cięcia. Jednak takie podejście zwiększa możliwości ingerencji inży-

niery w przebieg procesu projektowania technologii cięcia oraz właściwy dobór parametrów i warunków do obróbki.

### 1. MODELOWANIE 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:

- 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 ciągłe, 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 [3].

Do rozwiązania postawionego problemu posłużono się metodą różnic centralnych zwaną także metodą jawnego całkowania (explicit). 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 [14-17]:

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

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,

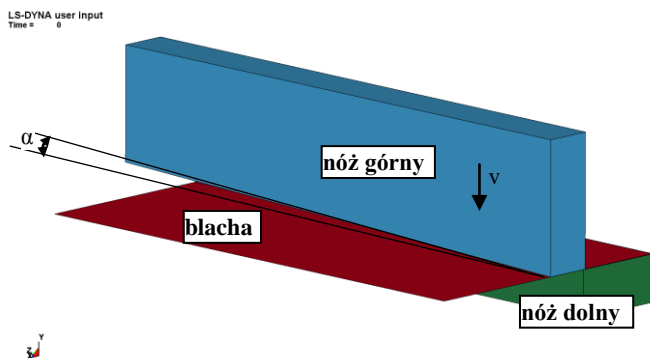
$\{\Delta \mathbf{r}\}$  - wektor przyrostu prędkości węzłów obiektu,

$\{\Delta \mathbf{r}\ddot{\phantom{r}}\}$  - 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  $\Delta t$  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 [18,19]. Oznacza to, że dla każdej chwili można poszukiwać położenia równowagi układu poddanego działaniu sił zewnętrznych, sił bezwładności oraz sił tłumienia, stosując algorytmy analizy statycznej. Koniec każdej chwili czasowej jest jednocześnie początkiem następczej.

## 2. MODEL SYMULACYJNY

Model symulacyjny procesu cięcia opracowany został przy użyciu systemu Ansys/LS-Dyna oraz aplikacji LS-PrePost. Badania numeryczne zrealizowano zgodnie z warunkami początkowo-brzegowymi, odwzorowującymi badania na stanowisku eksperymentalnym. Opracowano trójwymiarowy model numeryczny uwzględniający rzeczywistą kinematykę procesu. Symulacje przeprowadzono dla przestrzennych stanów naprężeń i odkształceń w materiale. Na rysunku 1 przedstawiono model symulacyjny stanowiska badawczego.



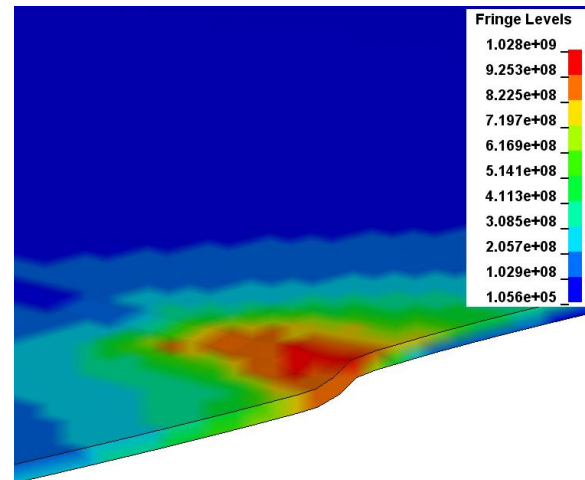
Rys. 1. Model komputerowy procesu

W celu zmniejszenia czasu obliczeń ciętą blachę zdyskretyzowano elementami skończonymi typu SHELL163 z 5 punktami całkowania i formule Belytschko-Tsay. W celu ułatwienia analizy wyników obliczeń, nożom przypisano właściwości materiału idealnie sztywnego (RIGID) i zdyskretyzowano 8 węzłowymi elementami skończonymi typu 3D SOLID164. Analizie poddano arkusz stali DC01 o następujących wymiarach: długość  $l = 500$  mm, szerokość  $h = 140$  mm, grubość  $g = 0,5$  mm.

Symulacje przeprowadzono dla stałej wartości luzu między nożem górnym a dolnym:  $a = 0,04$  mm oraz stałej wartości kąta pochylenia krawędzi tnącej noża górnego  $\alpha = 1^\circ$ . Prędkość cięcia wynosiła  $v = 100$  mm/s. Nożowi dolnemu odebrano translacyjne i rotacyjne stopnie swobody. Poprzez odpowiedni dobór warunków brzegowych zainicjowano pracę dociskacza utrzymującego blachę w odpowiedniej pozycji. W symulacji przyjęto stałe współczynniki tarcia statycznego 0,08 i kinetycznego 0,009. Są to współczynniki tarcia stali po stali ze smarowaniem olejem.

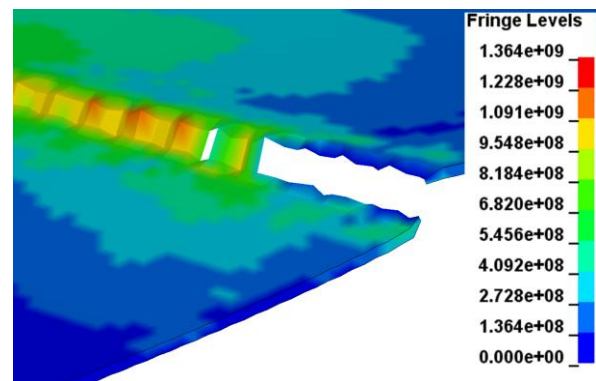
## 3. WYNIKI SYMULACJI

W procesie cięcia na gilotynie wskutek nacisku noża górnego na powierzchnię blachy powstaje moment zginający, który powoduje wstępne wybrzuszenie blachy (rys. 2).

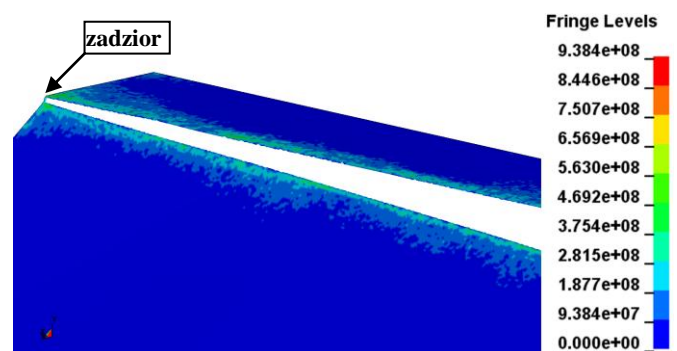


Rys. 2. Rozkład naprężeń zredukowanych w początkowej fazie procesu [Pa]

Wygięcie materiału towarzyszące procesowi powoduje zmniejszenie powierzchni styku noży z materiałem. Na zmniejszonej w ten sposób powierzchni styku panują duże naciski powodujące plastyczne odkształcenie i płynięcie materiału. Występuje koncentracja naprężeń w pobliżu krawędzi tnących, wywołując znaczne naprężenia ściskające w ciętym materiale. Przy dalszym zagłębianiu narzędzia, powstają pęknięcia rozdzielcze materiału (rys. 3).

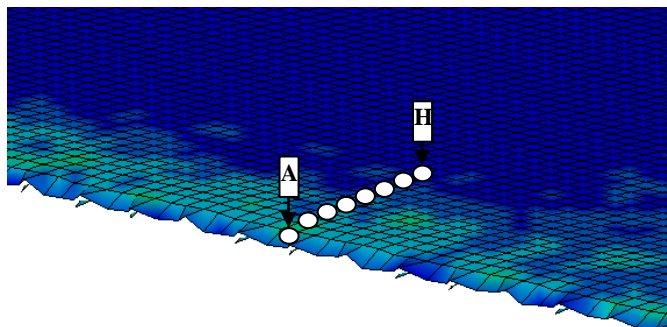


Rys. 3. Rozkład naprężeń zredukowanych w fazie pęknięcia materiału [Pa]

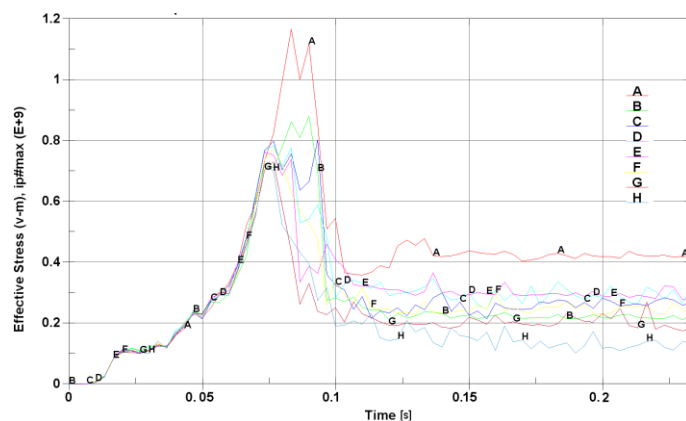


Rys. 4. Rozkład naprężeń zredukowanych w końcowej fazie procesu [Pa]

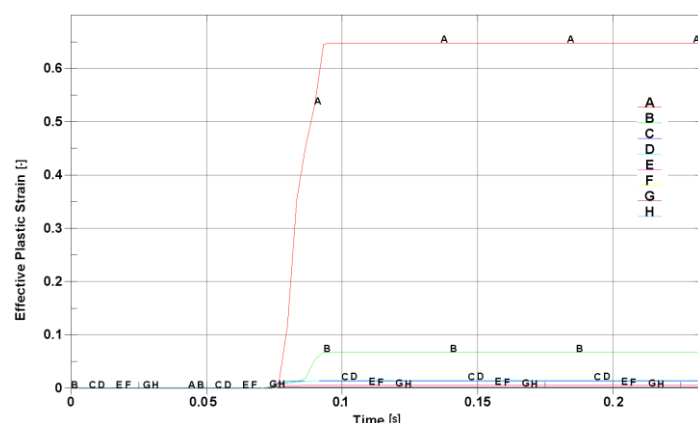
W końcowej fazie procesu można zaobserwować gwałtowny wzrost momentu gnącego, który spowodował wybrzuszenie arkusza i jego zaokrąglenie (rys. 4). W tej fazie materiał może ulec całkowitemu rozdzieleniu wskutek nacisku noży lub rozerwaniu bezpośrednio przed oddziaływaniem noży. Świadczy o tym utworzony nieregularny zadziór na powierzchni przecięcia na końcu linii cięcia (rys. 4). Zdefiniowaną ścieżkę odczytu wyników naprężeń w głąb materiału ciętego przedstawiono na rysunku 5, zaś rozkład naprężeń wewnątrz materiału dla analizowanego procesu przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 5. Zdefiniowana ścieżka odczytu naprężeń zredukowanych w głąb materiału



Rys. 6. Rozkład naprężeń zredukowanych w funkcji czasu symulacji



Rys. 7. Rozkład odkształceń zredukowanych w funkcji czasu symulacji

W procesach cięcia oprócz struktury geometrycznej powierzchni przecięcia bardzo ważne jest również określenie szerokości strefy cięcia po procesie. Można tego dokonać np.: poprzez pomiar odkształceń i naprężeń na powierzchni wyrobu (rys. 6 i 7). Z rysunków 6 i 7 wynika, że wraz z oddalaniem się od krawędzi wyrobu wartości naprężeń i odkształceń maleją. Największe wartości odkształceń

zastępczych występowały na powierzchni przecięcia i wynosiły 0,65. W miarę oddalania się od powierzchni przecięcia wartości odkształceń malały.

## PODSUMOWANIE

Proces cięcia blach jest nieliniowym zagadnieniem brzegowym mechaniki ciała stałego. Analityczne rozwiązanie problemu, czyli określenie stanów przemieszczeń, odkształceń, naprężeń, nacisków, sił tarcia itd., w dowolnej chwili realizacji procesu jest niemożliwe. Możliwe jest natomiast rozwiązanie numeryczne z zastosowaniem metody elementów skończonych oraz nowoczesnych metod modelowania (badań symulacyjnych). Przedstawiony w artykule model MES cięcia na gilotynie ujmuje większość głównych zjawisk towarzyszących procesowi. Dzięki czemu możliwe było zaimplementowanie rzeczywistych wymiarów ciętej blachy i znaczne skrócenie czasu obliczeń. Należy jednak pamiętać, że analiza numeryczna wielokrotnie nieliniowych zagadnień kontaktowych wiąże się z koniecznością rozwiązywania wielu problemów dotyczących ograniczeń metod obliczeniowych, modelowania materiałowego, zagadnień kontaktowych oraz złożonych obciążeń dynamicznych. Konieczna jest również właściwa weryfikacja modeli numerycznych oraz uzyskiwanych wyników, gdyż dopiero odpowiednie połączenie wiedzy z zakresu dynamiki i badań doświadczalnych pozwala na zapewnienie wiarygodności rezultatów.

## BIBLIOGRAFIA

- Bohdal Ł., Kukielka L.: *Optimization of the dynamic blanking process*. PAMM 7, s. 4030043-4030044, (2007).
- Bohdal L., Kukielka L., Kukielka K., Kulakowska A., Malag L., Patyk R. (2014), *Three Dimensional Finite Element Simulation of Sheet Metal Blanking Process*. Applied Mechanics and Materials, vol. 474, pp. 430-435.
- Bohdal Ł., Walczak P. (2015), *Eco-modeling of metal sheet cutting with disc shears*. Annual Set The Environment Protection 2013, vol. 15, pp. 863-872.
- Chodór J., Kukielka L.: *Numerical analysis of chip formation during machining for different value of failure strain*. PAMM 7 (1) s. 4030031-4030032, (2007).
- Chodor J., Kaldunski P. (2014), *Experimental researches of influence of sliding burnishing technological conditions for surface roughness of 41Cr4 steel product*, IBEN, Gorzów Wielkopolski
- Chodor J., Kukielka L. (2008), *Numerical analysis of micromachining of C45 steel with single abrasive grain*. GAMM 79th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics, 31 March – 4 April, Bremen, Germany.
- Chodor J., Kukielka L. (2008), *Numerical analysis of chip formation during machining for different value of failure strain*. Journal PAMM, Volume 7, Issue 1, 4030031-4030032.
- Chodor J., Kukielka L. (2014), *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, vol. 474, pp. 339-344.
- Chodor J., Zurawski L. (2015), *Researches of chip shape and its swage factor and shortening factor in partial symmetric face milling process and simulation of the process using FEM*, Mechanic, 03.
- Chodor J., Kukielka L. (2012), *Behaviour of elasto/visco-plastic workpiece material during machining*, Journal of Machine Engineering, Vol. 12, No. 4.

11. Kaczmarczyk J, Gąsiorek D, Mężyk A.: *Analiza numeryczna przyczyn powstawania defektów w ustalonym procesie cięcia płyt na gilotynach*. Modelowanie Inżynierskie 34 s. 61-66, (2007).
12. Kaldunski 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).
13. Kaldunski P., Chodor J. (2014), *Numerical analysis of the deep drawing proces by finite element method for anisotropic model of object*, IBEN, Gorzów Wielkopolski.
14. Kukielka L., Kukielka K., Kulakowska A., Patyk R., Malag L., Bohdal L. (2014), *Incremental Modelling and Numerical Solution of the Contact Problem between Movable Elastic and Elastic/Visco-Plastic Bodies and Application in the Technological Processes*. Applied Mechanics and Materials, vol. 474, pp. 159-165.
15. Kukielka L., Szczepanska M., Chodor J. (2009), *Discrete modeling and numerical analysis of the single grain cutting process using finite element method*, Faculty of Mechanical IBM, Monograph, Radom, 110-119.
16. Kukielka K., Kukielka L., Bohdal L., Kulakowska A., Malag L., Patyk R. (2014), *3D Numerical Analysis the State of Elastic/Visco-Plastic Strain in the External Round Thread Rolled on Cold*. Applied Mechanics and Materials 2014, vol. 474, pp. 436-441.
17. Kulakowska A., Kukielka L., Kukielka K., Patyk R., Malag L., Bohdal L. (2014), *Possibility of Steering of Product Surface Layers Properties in Burnishing Rolling Process*. Applied Mechanics and Materials, vol. 474, pp. 442-447.
18. Malag L., Kukielka L., Kukielka K., Kulakowska A., Bohdal L., Patyk R. (2014), *Problems Determining of the Mechanical Properties of Metallic Materials from the Tensile Test in the Aspect of Numerical Calculations of the Technological Processes*. Applied Mechanics and Materials, vol. 474, pp. 454-459.
19. Patyk R., Kukielka L., Kukielka K., Kulakowska A., Malag L., Bohdal L. (2014), *Numerical Study of the Influence of Surface Regular Asperities Prepared in Previous Treatment by Embossing Process on the Object Surface Layer State after Burnishing*. Applied Mechanics and Materials, vol. 474, pp. 448-453.

## MODELLING AND NUMERICAL ANALYSIS OF CAR COMPONENTS GUILLOTINING PROCESS

### *Abstract*

*Paper presents the numerical analysis of guillotining process of car components. An 3D application in Ansys/LS-Dyna and Ls-Prepost programs is created. The stress and strains distributions at any moment of time is presented.*

### Autorzy:

dr inż. **Łukasz Bohdal** – Politechnika Koszalińska  
dr inż. **Agnieszka Kulakowska** – Politechnika Koszalińska  
dr inż. **Jarosław Chodór** – Politechnika Koszalińska  
dr inż. **Paweł Kaldunski** – Politechnika Koszalińska