

# Badania symulacyjne i eksperymentalne procesu wykrawania części z blach aluminiowych o zmiennej grubości

JEL: L62. DOI: 10.24136/atest.2019.202.

Data zgłoszenia: 30.07.2019. Data akceptacji: 28.09.2019.

*W artykule przedstawiono algorytm modelowania i analizy oraz wyniki badań symulacyjnych z zastosowaniem MES oraz eksperymentalnych procesu wykrawania części z blach aluminiowych stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym do budowy pojazdów. Uzyskuje się zarówno oszczędność energii oraz obniżenie masy samochodów. Analiza dotyczy wpływu warunków procesu wykrawania na jakość ciętej krawędzi wyrobu. Symulacje komputerowe przeprowadzono dla przestrzennych stanów naprężeń i płaskich stanów 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 wykrawania. Badania symulacyjne przeprowadzono dla różnych grubości blach oraz zmiennych wartości luzu między stemplem a matrycą. Wyniki symulacji zweryfikowano eksperymentalnie. Opracowane aplikacje numeryczne oraz otrzymane wyniki badań mogą być wykorzystane do projektowania i optymalizacji procesu wykrawania.*

**Słowa kluczowe:** modelowanie, wykrawanie, blachy aluminiowe, 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.

Obróbka materiałów metalowych za pomocą cięcia stwarza problemy związane z zapewnieniem: stabilności procesu, dokładności wymiarowo-kształtowej, niewielkich zmian właściwości fizyko-chemicznych w strefie cięcia oraz występujących skłonności do tworzenia narostu na narzędziach [8, 13, 15, 2]. Dla poszczególnych metod cięcia i rodzaju materiału niezbędne jest stosowanie odmiennych parametrów cięcia, które dobrane są często na podstawie metody prób i błędów. Taki stan wymusza konieczność prowadzenia badań, których wyniki pozwolą zoptymalizować projektowany proces technologiczny, a ponadto skrócić cykl projektowania, zmniejszyć koszty produkcji oraz zwiększyć jakość wyrobu.

Celem przeprowadzonych badań jest analiza wpływu warunków procesu wykrawania na jakość ciętej krawędzi wyrobu. Rozważano przypadek procesu wykrawania dla zmiennej grubości blachy aluminiowej oraz zmiennego luzu pomiędzy stemplem a matrycą. W celu realizacji zadania wykorzystano nowoczesne metody symulacji procesu wykrawania z zastosowaniem MES. Wyniki symulacji weryfikowano eksperymentalnie. Uzyskane wyniki badań umożliwiają poznanie zjawisk fizycznych, występujących w strefie cięcia niezbędne do sterowania procesem wykrawania w aspekcie uzyskania wymaganej jakości technologicznej wyrobu.

## 1. Modelowanie procesu wykrawania

Modelując proces wykrawania uwzględniono oddziaływanie przedmiotu obrabianego i narzędzia oraz wpływ warunków wykrawania. 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 wykrawania (zbiór zjawisk i procesów fizycznych, które występują w procesie wykrawania oraz zbiór założeń i uproszczeń).
2. Modelowanie matematyczne modelu fizycznego procesu wykrawania 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 procesu.
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 procesu wykrawania.

## 2. Stosowana metoda rozwiązania

Zgodnie z algorytmem modelowania wg pkt. 1 otrzymuje się równanie opisujące ruch obiektu (stempla i wykrojki) na typowym kroku czasowym w uaktualnionym opisie Lagrange'a:

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

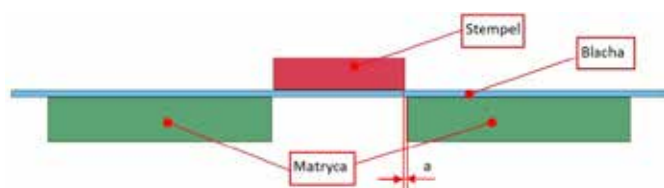
gdzie:

- [M] – globalna macierz mas układu w chwili t,
- [C] – globalna macierz tłumienia układu w chwili t,
- [K] – globalna macierz sztywności układu w chwili t,
- [ΔK] – globalna macierz przyrostu sztywności obiektu na kroku,
- {F} – globalny wektor obciążeń wewnętrznych obiektu w chwili t,
- {ΔF} – wektor przyrostu obciążeń wewnętrznych obiektu,
- {ΔR} – globalny wektor przyrostu obciążeń zewnętrznych obiektu,
- {Δr} – wektor przyrostu przemieszczeń węzłów obiektu,
- {Δṙ} – wektor przyrostu prędkości węzłów obiektu,
- {Δṙ̄} – 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  $\{\Delta\mathbf{r}\}$ ,  $\{\Delta\dot{\mathbf{r}}\}$ ,  $\{\Delta\ddot{\mathbf{r}}\}$ , 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. Oznacza to, że dla każdej chwili można poszukiwać położenia równowagi układu



Rys. 1. Narzędzia tnące wykorzystane do procesu wykrawiania



Rys. 2. Model symulacyjny procesu

poddanego działaniu sił zewnętrznych, sił bezwładności oraz sił tłumienia, stosując algorytmy analizy statycznej. Koniec każdej chwili czasowej jest jednocześnie początkiem następczej [6, 7, 12, 3].

Do rozwiązania równania (1) zastosowano metodę różnic centralnych, zwaną także metodą jawnego całkowania (explicit) [2, 11, 6, 7, 9, 10, 1, 12, 3]. Należy ona do większej grupy metod bezpośredniego całkowania dynamicznych równań ruchu.

### 3. Model symulacyjny

Symulacje numeryczne wykonano za pomocą programu LS-Prepost z uwzględnieniem rzeczywistej geometrii narzędzi tnących (rys. 1) i parametrów technologicznych procesu, dla przestrzennego stanu naprężenia i płaskiego stanu odkształcenia.

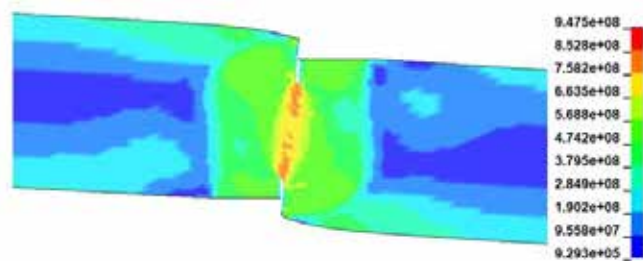
Model symulacyjny przedstawiono na rysunku 2.

Symulacje przeprowadzono dla blach o grubościach  $g = 1$  mm oraz  $g = 2$  mm. Luz między stempelnią a matrycą był zmienny dla każdej symulacji i kształtował się w przedziale wartości  $a = 0,1-0,35$  mm. Obiekt dyskretyzowano elementem skończonym 2D typ SOLID164. Prawidłowe zamodelowanie procesu pęknięcia materiału wymagało bardzo precyzyjnego podziału modelu blachy na elementy skończone, który składał się z 21 000 elementów. Do opisu charakterystyk materiałowych wykrawianych blach zastosowano równanie konstytutywne Cowper'a-Symonds'a, które pozwala określać zależność naprężeń uplastyczniających od odkształceń plastycznych, z uwzględnieniem pęknięcia (zniszczenia) materiału [4].

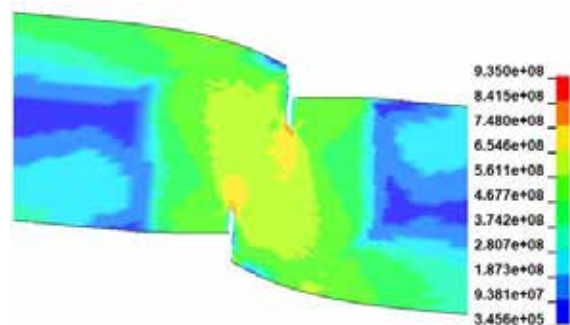
### 4. Wyniki symulacji

Na rysunkach 3-5 przedstawiono przykładowe wyniki symulacji w postaci map naprężeń zastępczych podczas fazy pęknięcia materiału oraz widok powierzchni przecięcia wyrobów dla blachy o grubości  $g = 1$  mm.

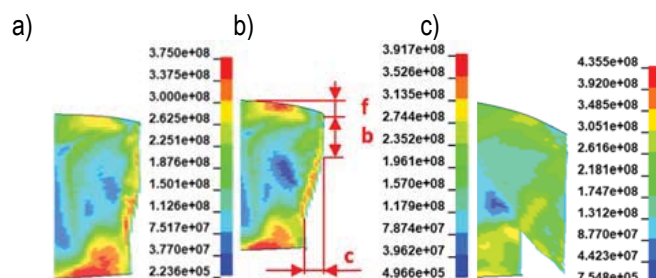
Wyniki badań symulacyjnych wskazują, że dla luzów powyżej wartości  $a = 0,16$  mm pęknięcie ma kształt litery S. Poniżej tej wartości zbliżona jest do linii prostej. Zastosowanie wartości  $a = 0,16$  mm i mniejszych umożliwiłoby uzyskanie prostopadłej powierzchni ścinania oraz znacznej szerokości strefy cięcia  $b$  (gładkiej) (rys. 3 oraz 5a i b). Należy jednak pamiętać, że stosowanie luzów zbliżonych do zera przyczynia się do znacznego zwiększenia sił cięcia, a więc prowadzi do szybszego tępienia się krawędzi tnących stempla i matrycy [14, 16]. Zastosowanie większych luzów powyżej  $a = 0,16$  mm ze względu na pęknięcie ułatwia powstawanie pęknięć i rozdzielanie wyciętych elementów blach prowadzi jednak do znacznego pochylecia powierzchni przecięcia i wzrostu odchyłki prostopadłości  $c$ , co w wielu przypadkach jest niepożądane (rys. 4, 5c). Zastosowanie wartości luzu  $a = 0,26$  mm oraz większych spowodowało uszkodzenie powierzchni przecięcia wyrobu (rys. 5c). Na rysunku 6 przedstawiono wpływ



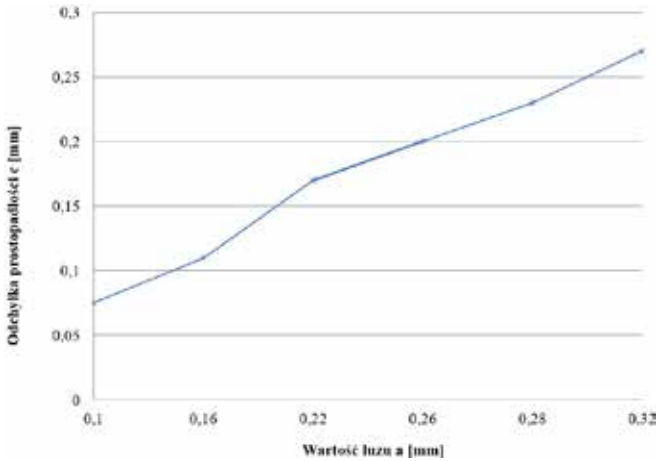
Rys. 3. Mapa naprężeń zastępczych według hipotezy HMM podczas fazy pęknięcia dla  $g = 1$  mm,  $a = 0,1$  mm



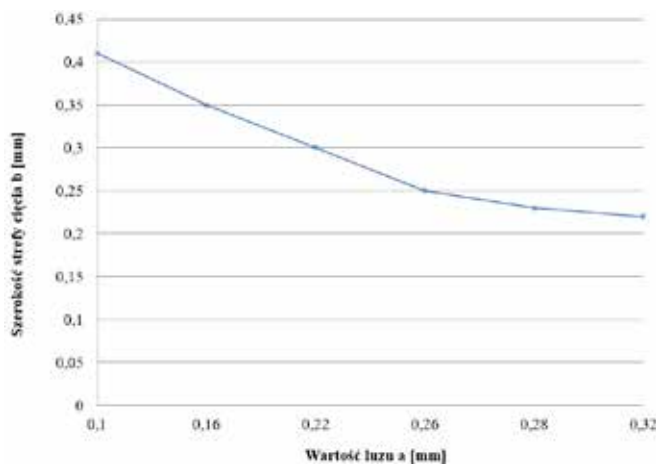
Rys. 4. Mapa naprężeń zastępczych według hipotezy HMM podczas fazy pęknięcia dla  $g = 1$  mm,  $a = 0,26$  mm



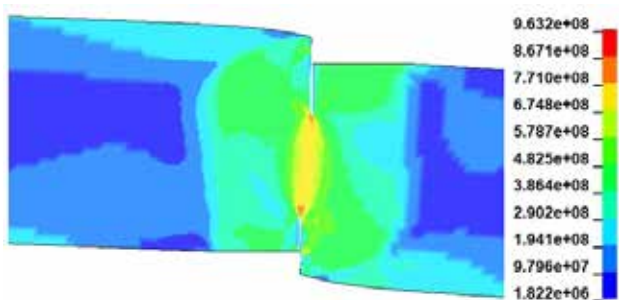
Rys. 5. Mapy naprężeń zastępczych według hipotezy HMM po całkowitym rozdzieleniu dla  $g = 1$  mm: a)  $a = 0,1$  mm, b)  $a = 0,16$  mm, c)  $a = 0,26$  mm



Rys. 6. Wpływ wartości luzu na odchyłkę prostopadłości wyrobu dla  $g=1$  mm



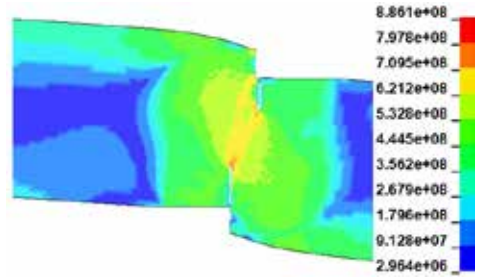
Rys. 7. Wpływ wartości luzu na szerokość strefy cięcia na powierzchni przecięcia dla  $g=1$  mm



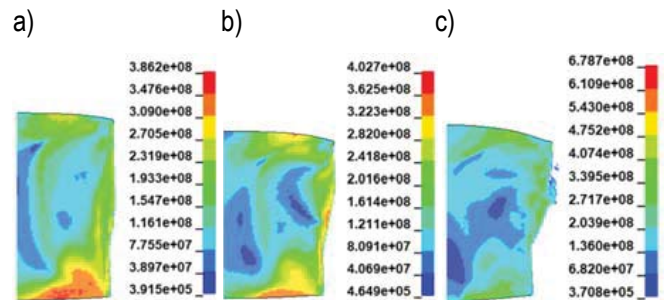
Rys. 8. Mapa naprężeń zastępczych według hipotezy HMM podczas fazy pęknięcia dla  $g = 2$  mm,  $a = 0,1$  mm

wartości luzu na odchyłkę prostopadłości. Wartość odchyłki prostopadłości zwiększa się wraz ze wzrostem wartości luzu. Na rysunku 7 przedstawiono wpływ wartości luzu na szerokość strefy cięcia na powierzchni przecięcia. Wraz ze wzrostem luzu szerokość strefy cięcia maleje.

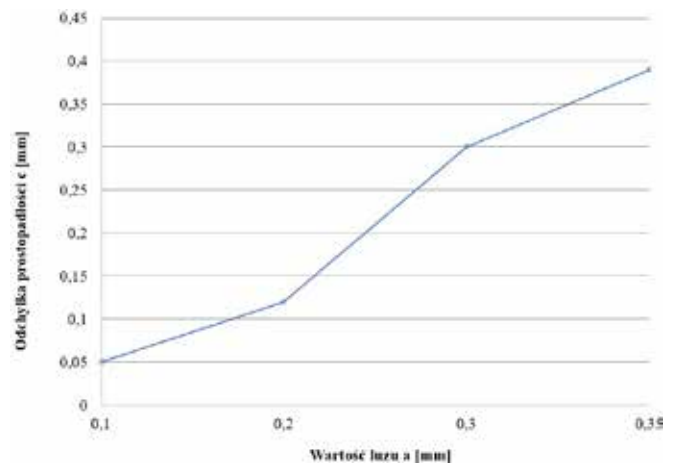
Na rysunkach 8–10 przedstawiono przykładowe wyniki symulacji w postaci map naprężeń zastępczych według hipotezy HMM podczas fazy pęknięcia materiału oraz widok powierzchni przecięcia wyrobów dla blachy o grubości  $g = 2$  mm.



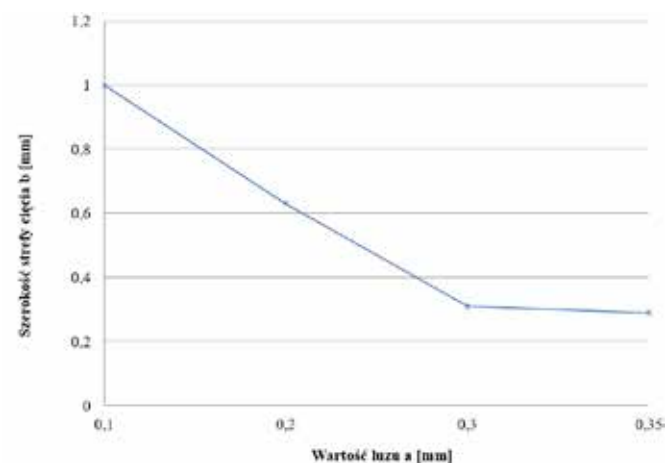
Rys. 9. Mapa naprężeń zastępczych według hipotezy HMM podczas fazy pęknięcia dla  $g = 2$  mm,  $a = 0,3$  mm



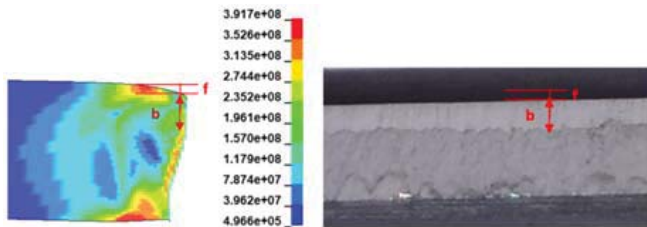
Rys. 10. Mapy naprężeń zastępczych według hipotezy HMM po całkowitym rozdzieleniu dla  $g = 2$  mm: a)  $a = 0,1$  mm, b)  $a = 0,2$  mm, c)  $a = 0,35$  mm



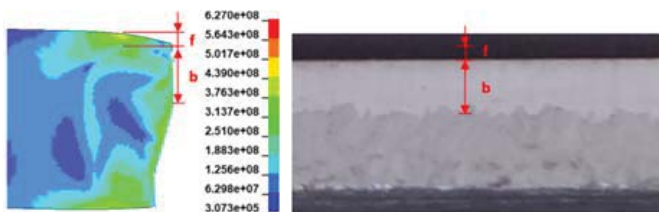
Rys. 11. Wpływ wartości luzu na odchyłkę prostopadłości wyrobu dla  $g = 2$  mm



Rys. 12. Wpływ wartości luzu na szerokość strefy cięcia na powierzchni przecięcia dla  $g = 2$  mm



Rys. 13. Widok powierzchni przecięcia dla  $g = 1 \text{ mm}$  oraz  $a = 0,16 \text{ mm}$ : a) symulacja MES, b) eksperyment



Rys. 14. Widok powierzchni przecięcia dla  $g = 2 \text{ mm}$  oraz  $a = 0,25 \text{ mm}$ : a) symulacja MES, b) eksperyment

Na rysunku 11 przedstawiono wpływ wartości luzu na odchyłkę prostopadłości. Wartość odchyłki prostopadłości zwiększa się wraz ze wzrostem wartości luzu. Szczególnie znaczący wzrost następuje dla luzów powyżej  $a = 0,2 \text{ mm}$ . Na rysunku 12 przedstawiono wpływ wartości luzu na szerokość strefy cięcia na powierzchni przecięcia. Wraz ze wzrostem luzu szerokość strefy cięcia maleje.

Badania eksperymentalne przeprowadzone dla poszczególnych nastaw wartości luzów między stemplem a matrycą z wykorzystaniem narzędzi tnących przedstawionych na rysunku 1 wykazały zgodność wyników symulacji z eksperymentem na poziomie około 90%. Analizie porównawczej poddano wartości stref na powierzchni przecięcia. Szerokości stref zostały zmierzone za pomocą mikroskopu pomiarowego ND 1300 Quadra-Chek. Na rysunkach 13 i 14 przedstawiono porównanie wyników symulacji MES z wynikami eksperymentu na podstawie analiz szerokości stref na powierzchni przecięcia.

### Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono algorytm modelowania i symulacji procesu wykrawania wyrobów z blach aluminiowych o różnej grubości. Opracowane aplikacje numeryczne pozwalają określić stany przemieszczeń, odkształceń i naprężeń dla głównego parametru technologicznego procesu wykrawania jakim jest luz między stemplem a matrycą oraz określić wpływ na wybrane cechy uzyskanych wyrobów.

Z pracy wynikają następujące wnioski:

1. Przeprowadzone badania wykazały istotny wpływ luzu na kształtowanie się powierzchni przecięcia i jej charakterystycznych stref. Konieczne jest precyzyjne dobieranie wartości luzu w zależności od grubości wykrawanego materiału.
2. Dla analizowanych przypadków luz powinien mieścić się w zakresie  $a = 0,1-0,16 \text{ mm}$  dla  $g = 1 \text{ mm}$  oraz  $a = 0,1-0,25$  dla  $g = 2 \text{ mm}$ . Zakres ten zapewnia uzyskiwanie wyrobów o wysokiej jakości technologicznej, pozbawionych wad.
3. Uzyskane wyniki umożliwiają optymalizację procesu wykrawania oraz sterowanie procesem tak, aby otrzymać wyroby o wymaganej jakości technologicznej.

### Podziękowania

Autorzy pragną podziękować kierownictwu firmy EMET Sp. z o.o. ze Szczecinka za udostępnienie narzędzi i stanowisk badawczych oraz za pomoc w przygotowaniu artykułu.

### Bibliografia:

1. Bohdal Ł, Kukielka L., Modelowanie i analiza numeryczna procesu cięcia blach nożami krążkowymi z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej, „Mechanik” 2011, nr 8-9, s. 712-716.
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 2006, vol. 10, No. 4, pp. 391-400.
3. Bohdal Ł, Walczak P., Eco-modeling of metal sheet cutting with disc shears, Annual Set The Environment Protection 2013, 15, pp. 863-872.
4. Bohdal Ł, Gotowała K., Using of high speed blanking process in the aspect of car elements forming, „Autobusy - Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe” 2014, nr 6.
5. Bohdal Ł, Kukielka L., Modelowanie procesu cięcia elementów pojazdów samochodowych na nożycach krążkowych, „Autobusy - Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe” 2014, nr 6.
6. Chodór J, Kukielka L., Numerical analysis of chip formation during machining for different value of failure strain, PAMM 7 (1) s. 4030031-4030032, (2007).
7. 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 2014, 474, s. 339-344.
8. Hambl R., Comparison between Lemaitre and Gurson damage models in crack growth simulation during blanking process, „International Journal of Mechanical Sciences” 2001, 43, s. 2769-2790.
9. [http://www.cmms.agh.edu.pl/repo\\_file.php?f\\_id=450](http://www.cmms.agh.edu.pl/repo_file.php?f_id=450)
10. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pamm.200700832>
11. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/pamm.200701059>
12. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/pamm.200810725>
13. [https://www.researchgate.net/publication/260158328\\_Eco-modeling\\_of\\_metal\\_sheet\\_cutting\\_with\\_disc\\_shears](https://www.researchgate.net/publication/260158328_Eco-modeling_of_metal_sheet_cutting_with_disc_shears)
14. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740395000542>
15. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740301000704>
16. <https://www.scientific.net/AMM.474.339>
17. 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 2007, 7 (1) pp. 4010045-4010046.
18. Kałduński P, Kukielka L., The sensitivity analysis of the drawpiece response on the finite element shape parameter, PAMM 2008, 8 (1), pp. 10725-10726.
19. Kukielka L., Kułakowska A., Patyk R., Numerical Modeling and Simulation of the Movable Contact Tool-Worpiece 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.
20. 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.
  21. 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 2010, 46, pp. 535–550, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168874X10000211>
  22. Świlto S, Czyżewski P., *An experimental and numerical study of material deformation of a blanking process*, Computer Methods in Materials Science 2013, 13 (2) s. 333–338.
  23. Wisselink H., *Analysis of guillotining and slitting, finite element simulations*, Ph.D - Thesis, University of Twente, The Netherlands, 2000.
  24. Zhou Q, Wierzbicki T., *A Tension Zone Model of Blanking and Tearing of Ductile Metal Plate*, International Journal of Mechanical Sciences 1996, 38 (3), pp. 303–324.

---

### Simulation and experimental researches of the blanking process of parts from aluminum sheets with different thickness

*The paper presents the modeling and experimental researches of the blanking process of parts from aluminum sheets used in automotive industry to building vehicles. Analysis concerns influence of process conditions on quality of cut edge. Numerical analysis was performed for the spatial states of stresses and flat states of strains in LS-DYNA solver and LS-PrePost application regarding blanking process nonlinearities. Researches were realized for different sheet's thickness and punch-die clearances. Results were verified experimentally. Obtained maps of stresses, strains, displacement at any moment of time can be used for design of the blanking process and it's optimization.*

---

**Keywords:** modelling, blanking, aluminum sheets, maps of stresses and strains intensity.

#### Autorzy:

prof. nadzw. dr hab. inż. **Łukasz Bohdal** – Politechnika Koszalińska  
**Franciszek Kalata** – EMET Sp. z o.o.

dr inż. **Paweł Kałduński** – Politechnika Koszalińska  
 prof. dr hab. inż. **Leon Kukielka** – Politechnika Koszalińska  
 dr inż. **Krzysztof Kukielka** – Politechnika Koszalińska  
 dr inż. **Radosław Patyk** – Politechnika Koszalińska