

# Wybrane problemy obróbki części samochodowych kształtowanych przez cięcie mechaniczne

Lukasz Bohdal, Katarzyna Gotowała

## Streszczenie

Podczas wytwarzania części samochodowych mogą powstawać różne defekty technologiczne. Najczęstsze defekty powstałe podczas cięcia mechanicznego tych elementów to formowanie się zadziorów, zagięć krawędzi, nadmiernych zaokrągleń powierzchni przecięcia lub występowanie nieregularnej strefy chropowatej na powierzchni przecięcia. W pracy zaproponowano koncepcje określenia jakości wytworzonych elementów w oparciu o symulację MES oraz badania eksperymentalne z wykorzystaniem technik wizyjnych. Przedstawione metody mogą być przydatne do precyzyjnego określania przyczyn formowania się defektów i wad wyrobów na liniach przemysłowych.

**Słowa kluczowe:** cięcie mechaniczne, modelowanie, symulacja MES, badania eksperymentalne.

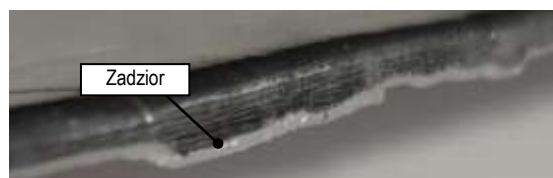
## Wstęp

Obecnie w przemyśle motoryzacyjnym stosuje się wiele technologii wytwarzania elementów opartych na cięciu mechanicznym. Należą do nich m.in.: operacje wykrawania, odcinania krawędzi, przebijania, cięcia na gilotynie lub nożycach krążkowych. Do podstawowych problemów napotykanym podczas cięcia materiałów przeznaczonych na części pojazdów samochodowych można zaliczyć częste pojawianie się niepożądanych losowych defektów w przekroju poprzecznym ciętego elementu co może przyczynić się do znacznego zużycia narzędzi do cięcia, a także obniżenia jakości powierzchni przecięcia i wzrostu energochłonności procesu. Niska jakość powierzchni przecięcia cechuje się występowaniem wielu defektów np.: zadziorów (rys. 1), wiórów (ang. slivers), zagięć krawędzi, występowaniem strefy pęknięcia na całej grubości i szerokości arkusza. Defekty te w wielu przypadkach uniemożliwiają dalsze wykorzystanie elementu. Pojawiają się zatem pytania o ich charakter, przyczyny powstawania i sposoby ich unikania.

Z analizy literatury wynika, że przyczyny powstawania wyżej wspomnianych defektów mogą być wielorakie i wiązać się z geometrią narzędzi do cięcia, z własnościami ciętego materiału lub warunkami procesu. Ustalenie który z parametrów jest odpowiedzialny za wywołany defekt jest bardzo trudne. Należy również rozważyć czy problem nie jest uzależniony od większej liczby parametrów i w jakim stopniu wpływają one na wielkość i rodzaj defektu [1-4]. Aktualne możliwości analizy procesów cięcia mechanicznego opierają się na symulacjach tych procesów z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych. Jednak symulacje te wymagają weryfikacji eksperymentalnej. Szczegółowa analiza procesu jest możliwa poprzez połączenie badań symulacyjnych i eksperymentalnych.

W niniejszej pracy zaproponowano koncepcje umożliwiające określanie przyczyn powstawania defektów uzyskiwanych

wyrobów co może się przyczynić do znacznego zmniejszenia odpadów po cięciu i kosztów wytwarzania. Zaproponowane metody badań umożliwiają kompleksową analizę procesu łącząc badania symulacyjne i eksperymentalne.



**Rys. 1.** Defekt powierzchni przecięcia wyrobu w postaci zadzioru

## 1. Analiza numeryczna procesu cięcia

Analiza numeryczna jest cennym narzędziem pozwalającym na opis zjawisk występujących w niezwykle małych obszarach, przebiegających z super wysokimi prędkościami, trwających bardzo krótko, a decydujących o wynikach procesu cięcia. Do problemów takich należą w szczególności:

- tarcie, przyleganie i poślizg,
- odkształcenia, i naprężenia przedmiotu ciętego,
- zmienność właściwości materiału ciętego,
- pęknięcie materiału.

Analiza numeryczna pozwala również na określenie:

- wpływu na jakość technologiczną wyrobu: rodzaju materiału i jego stanu, geometrii narzędzi,
- wpływu warunków cięcia na stan odkształceń, naprężeń i temperatur w przedmiocie,
- kształtów pęknięć, jakości powierzchni przecięcia.

Opracowane autorskie algorytmy modelowania i analizy procesu cięcia uwzględniają m.in. oddziaływanie przedmiotu obrabianego i narzędzia oraz wpływ otoczenia. Modelowanie

procesu przy zastosowaniu metod wariacyjnych i elementów skończonych przebiegało 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 [5-7].

Do rozwiązania postawionego problemu posłużono się metodą różnic centralnych zwaną także metodą jawnego całkowania (explicit) [8]. 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:

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

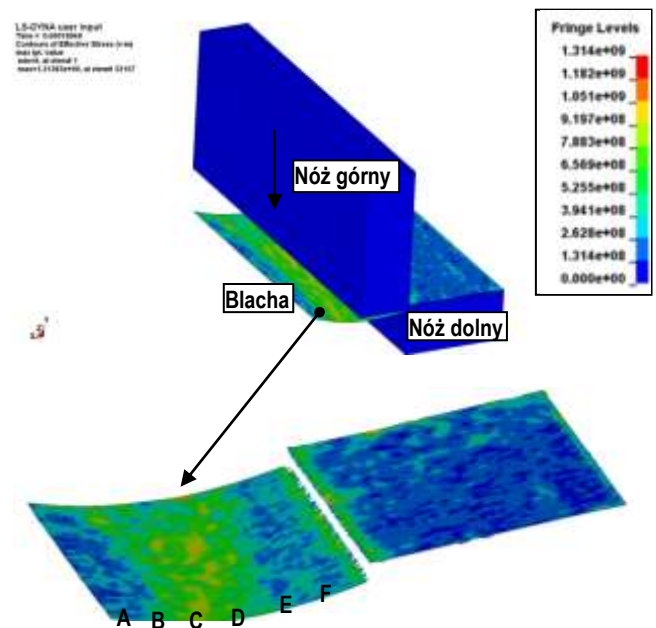
gdzie:

- $[\mathbf{M}]$  - 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  $\Delta t$  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 położeń równowagi układu poddanego działaniu sił zewnętrznych, sił bezwładności oraz sił tłumienia, stosując algorytmy analizy statycznej. Koniec każdej chwili czasowej jest jednocześnie początkiem następczej [9-11].

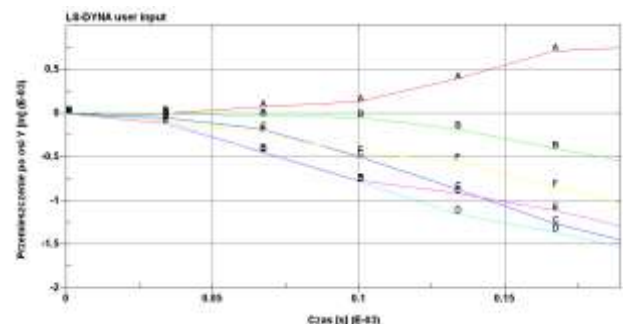
Modele symulacyjne procesu cięcia mechanicznego opracowane zostały przy użyciu Solvera LS-DYNA oraz aplikacji LS-PrePost. Opracowano trójwymiarowe modele numeryczne które uwzględniają rzeczywistą kinematykę procesów. Na rysunkach 2-5 zaprezentowano przykładowe wyniki

symulacji procesów cięcia na gilotynie, wykrawania i nożycach krążkowych. Na rysunku 2 przedstawiono rozkład intensywności naprężeń w wyrobie po procesie cięcia na gilotynie z widocznym defektem zagięcia części odciętej materiału. Na rysunku 4 zaprezentowano w formie wykresu przebieg tworzenia się tego defektu. Było to możliwe poprzez pomiar przemieszczeń podczas procesu wybranych punktów leżących na krawędzi części odciętej.

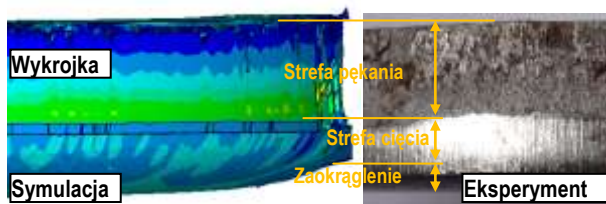


**Rys. 2.** Mapy naprężeń HMH w wyrobie po procesie cięcia na gilotynie [Pa]

Z wykresu możliwe jest odczytanie w którym momencie i w jaki sposób poszczególne fragmenty arkusza przemieszczały się np. po osi Y. W ten sposób możliwe jest analizowanie przyczyn tworzenia się defektów typu: skrócenie arkusza lub jego nadmiernego łuku. Opracowane algorytmy modelowania umożliwiają analizę jakości powierzchni przecięcia otrzymanych wyrobów. Na rysunku 4 zaprezentowano przykładowe porównanie uzyskanych wyników z badaniami eksperymentalnymi dla operacji wykrawania.

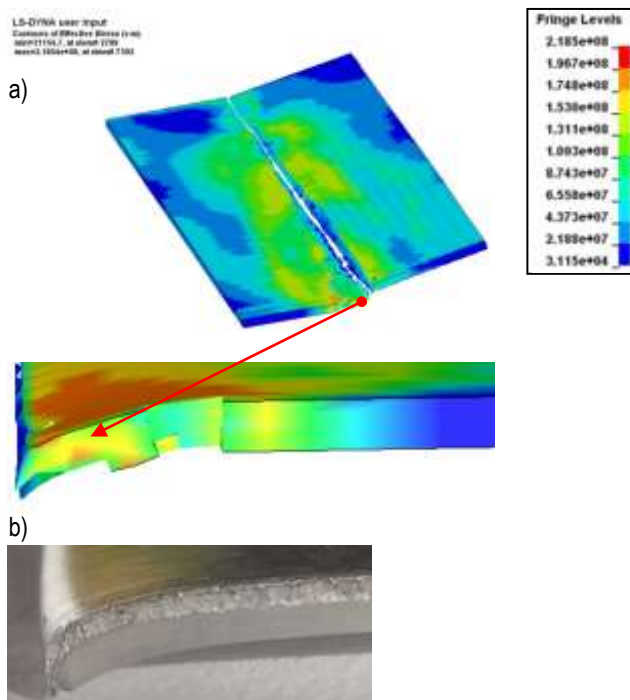


**Rys. 3.** Wykres przemieszczeń wybranych punktów na krawędzi arkusza ciętego



**Rys. 4.** Porównanie długości stref na powierzchni przecięcia z wykorzystaniem trójwymiarowego modelu MES wykrwania i badań eksperymentalnych

W procesach cięcia na nożycach krążkowych bardzo częstym defektem pojawiającym się na liniach przemysłowych jest zakrzywienie powierzchni przecięcia arkusza (rys. 5). Na rysunku 5a i 5b porównano wyniki symulacji z eksperymentem, które wykazywały dużą zgodność.

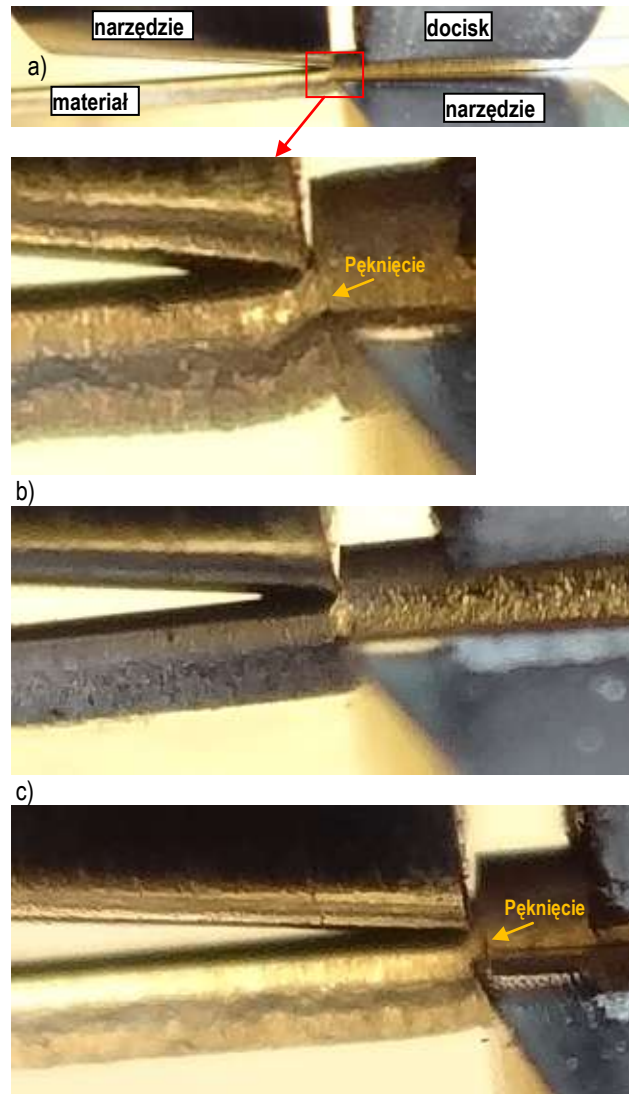


**Rys. 5.** Zakrzywienie powierzchni przecięcia arkusza: a) model symulacyjny, b) eksperyment

## 2. Analiza procesu cięcia z wykorzystaniem technik wizyjnych

Rejestracja obrazu jest ważnym zagadnieniem w nadzorowaniu procesów wytwarzania. W ten sposób możliwa jest pełna obserwacja tworzenia się defektów wyrobów. Szybka zmienność tych zjawisk w czasie, skłania autorów do wykorzystania techniki szybko-klatkowej [12, 13]. Jednakże uzyskanie odpowiednich efektów wymaga wielu prac związanych z doбором odpowiedniego oświetlenia, kamery, obiektywu, a także testowania wielu ustawień. Pomimo, że do badań doświadczalnych wykorzystano kamerę, która rejestrowała przebieg procesu z niewielką prędkości zapisu danych (10 klatek na sekundę) udało się zarejestrować niektóre fazy procesu cięcia stopu aluminium (rys. 6). Analizy uzyskanych obrazów dokonano programem graficznym ImageJ.

W dalszych badaniach niezbędne jest jednak zastosowanie kamery o większej mocy.



**Rys. 6.** Przykładowe etapy procesu cięcia: a) pęknięcie materiału w strefie cięcia, b) faza odkształceń plastycznych, c) pęknięcie materiału poza strefą cięcia

## 3. Wnioski

Częstymi problemami napotykanymi podczas obróbki części samochodowych za pomocą operacji cięcia jest uzyskiwanie wyrobów o niskiej jakości. Wyroby takie cechują się występowaniem zadziórów, zagieć krawędzi, nadmiernych zaokrągleń powierzchni przecięcia lub występowanie nieregularnej strefy chropowatej na powierzchni przecięcia. W artykule przedstawiono metody pomiaru i analizy procesu cięcia oparte na analizie numerycznej i pomiarach wizyjnych. Metody mogą być wykorzystane zarówno do pomiarów naprężeń, odkształceń, przemieszczeń jak i do analizy przyczyn powstawania wad geometrycznych wyrobów. W związku z tym problemy obróbki mogą być znacznie zredukowane.

W dalszych pracach planuje się zastosowanie kamer o większych możliwościach i specjalistycznego oprogramowania



do pomiaru przemieszczeń i odkształceń w strefie cięcia. Umożliwi to precyzyjną analizę procesów cięcia oraz na jeszcze dokładniejszą walidację modeli MES.

## Bibliografia

1. Faura F, Garcí'a A, Estrems M.: *Finite element analysis of optimum clearance in the blanking process*. Journal of Materials Processing Technology 80-81, pp. 121-125, (1998)
2. Tekiner Z, Nalbant M, Hakan G.: *An experimental study for the effect of different clearances on burr, smooth-sheared and blanking force on aluminium sheet metal*. Materials and Design 27, pp. 1134-1138 (2006)
3. 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)
4. Chodór J, Kukielka L.: *Numerical analysis of chip formation during machining for different value of failure strain*. PAMM 7 (1), pp. 4030031-4030032, (2007).
5. 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).
6. 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).
7. Bohdal Ł, Kukielka L.: *Analiza numeryczna procesu cięcia blach karoseryjnych klinowym narzędziem niesymetrycznym*. XII Słupskie Forum Motoryzacji, s. 29-34, (2009).
8. Chodór J, Kukielka L.: *Numerical analysis of micromachining of C45 steel by single abrasive grain*. PAMM 8 (1), pp. 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, pp. 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), pp. 4010045-4010046, (2007).
11. Bohdal Ł, Kukielka L.: *Optimization of the dynamic blanking process*. PAMM 7, s. 4030043-4030044, (2007).
12. Świłto S, Czyżewski P.: *An experimental and numerical study of material deformation of a blanking process*. Computer Methods in Materials Science, Vol. 13 (2), pp. 333-338, (2013)
13. Kacalak W, Królikowski T, Rypina Ł.: *Badanie procesu mikroskrawania z wykorzystaniem zintegrowanego systemu rejestracji obrazów szybkozmiennych*. Mechanik nr. 8-9. XXXVI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, s. 203-211, (2013).

## The problems of mechanical cutting of car elements

### Abstract

*During production of car elements some of defects can be occur. For example it can be a burr formations, twisting, bowing or large fractured zone on cut surface. The paper presents a methods of parts quality analysis based on Finite Element Method and visual techniques. This methods can be used for precision analysis of product defects on industrial lines.*

**Key words:** mechanical cutting, modelling, FEM simulation, experimental researches.

### Autorzy:

Dr inż. **Łukasz Bohdal** – Politechnika Koszalińska  
Inż. **Katarzyna Gotowała** – Politechnika Koszalińska