

Łukasz BOHDAL, Leon KUKIEŁKA

MODELOWANIE I ANALIZA NUMERYCZNA PROCESU CIĘCIA BLACH KAROSERYJNYCH NA GILOTYNIE

Streszczenie

W artykule przedstawiono sposób modelowania 3D procesu cięcia stali karoseryjnej na gilotynie. Zaprezentowano zastosowanie opracowanych algorytmów i aplikacji komputerowej do oceny jakości powierzchni przecięcia po procesie. Symulację komputerową przeprowadzono dla przestrzennych stanów naprężeń i odkształceń wykorzystując metodę elementów skończonych. 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 3D, MES, cięcie na gilotynie, pękanie.

WSTĘP

W dziedzinie współczesnych technik wytwarzania dąży się do uzyskania wyrobów o wysokiej jakości przy zminimalizowanych kosztach przedsięwzięcia, wyrażonych również wzrostem wydajności pracy. Wysoka jakość wyrobu powinna być uzyskana w relatywnie prostych procesach, przy możliwie najmniejszej liczbie operacji. Istotne znaczenie mają w tym procesy cięcia materiałów [7]. Aktualne wymagania w tej dziedzinie narzucają konieczność wykorzystywania możliwie dokładnych metod obliczeniowych procesu cięcia. Trudnością w opisie tego procesu jest przede wszystkim jego nieliniowość. Powoduje ona, między innymi, że w narzędziu realizującym cięcie w materiale poddawany procesowi zachodzą niekorzystne zjawiska fizyczne. Wśród nich można wymienić: defekty w przekroju poprzecznym narzędzi, defekty na powierzchni przecięcia (zadziory, zagięcie krawędzi, duża chropowatość powierzchni na całej grubości i szerokości blachy), które uniemożliwiają dalsze wykorzystanie elementu. Powoduje to przyspieszone zużycie narzędzi, wzrost energochłonności procesu oraz zwiększone wydatki finansowe ponoszone na produkcję związaną z przecinaniem.

Stosowanie metod matematycznych w odniesieniu do modelowania procesu cięcia jest współczesnym wyzwaniem naukowym. Celowość wykorzystania tych metod, w tym przykładowo metody elementów skończonych (MES) pozwala na skuteczną analizę procesu, np. w kierunku wyznaczania rozkładu naprężeń i odkształceń w narzędziu i materiale, zjawiska pękania itp.

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 zagranicznej [4] oraz krajowej [6] można znaleźć próby modelowania procesu cięcia na gilotynie. Jednak dotyczy to głównie modelowania tego procesu w 2D uwzględniającego przestrzenny stan naprężeń i płaski stan odkształceń. Tylko nieliczne prace wskazują na pierwsze próby modelowania przestrzennego w 3D [5, 8]. Znaczący postęp w modelowaniu, uwzględniający wpływ rzeczywistych uwarunkowań materiałowych (np.: uwzględnienie mikrostruktury materiału), fizycznych i technologicznych można uzyskać wykorzystując trójwymiarowe metody analizy numerycznej w tym zakresie. Związane jest to z wykorzystaniem stale rosnącej mocy obliczeniowej nowoczesnych jednostek i oprogramowania specjalistycznego komputerów.

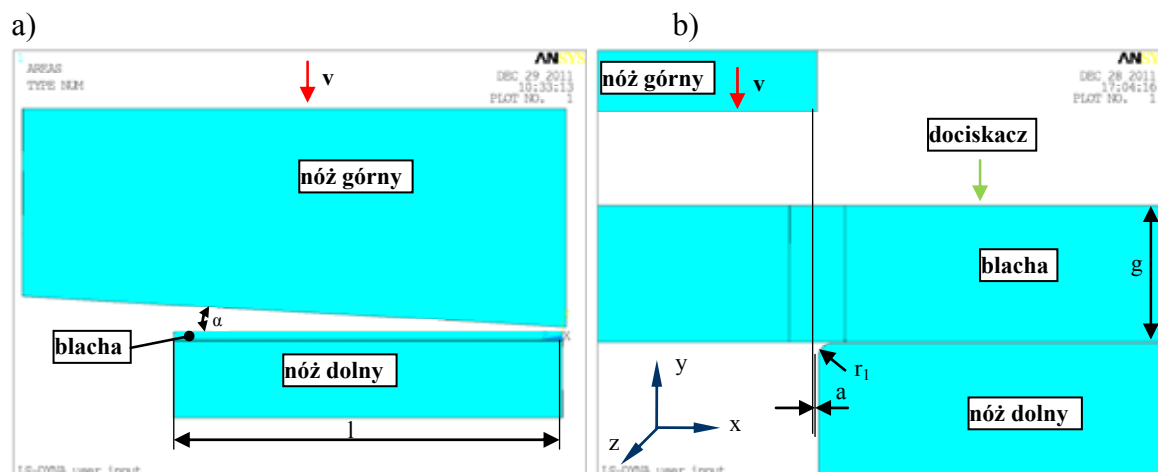
W niniejszej pracy przedstawiono sposoby modelowania procesu cięcia stali karoseryjnej na gilotynie. Opracowano aplikację komputerową 3D umożliwiającą analizę zjawisk fizycznych w każdym miejscu ciętej blachy w dowolnej chwili trwania procesu oraz po całkowitym rozdzielaniu materiału. Cięcie na gilotynie jest jednym ze sposobów cięcia, w którym pęknięcie materiału następuje w przekroju osłabionym na skutek uprzednio dokonanego odkształcenia. Ruch noży następuje pod wpływem przyłożonej siły lub zadanego przemieszczenia. Wskutek uderzenia noży w materiał i wywołaniu odpowiedniego stanu odkształcenia następuje rozdzielanie materiału. W procesie cięcia na gilotynie bardzo ważny jest odpowiedni dobór parametrów technologicznych takich jak kształt narzędzia, prędkość cięcia, dobór odpowiedniej wartości luzu między nożami, współczynnika tarcia. Parametry te mają bardzo duży wpływ na deformację blachy, kształty pęknięć, zużycie narzędzi i jakość uzyskanej powierzchni przecięcia. Jakość uzyskanej powierzchni przecięcia wyznacza się na podstawie długości poszczególnych stref w przekroju blachy. Dąży się do uzyskania jak najdłuższej strefy gładkiej, minimalnej długości strefy chropowatej oraz strefy zaokrąglenia (rys. 4). Istotna jest również dokładność geometryczna kształtu blachy po jej rozdzielaniu. Nieodpowiedni dobór parametrów procesu może spowodować wyginanie blachy oraz znaczne zwiększenie wysokości zadziorów.

1. PARAMETRY ANALIZY NUMERYCZNEJ

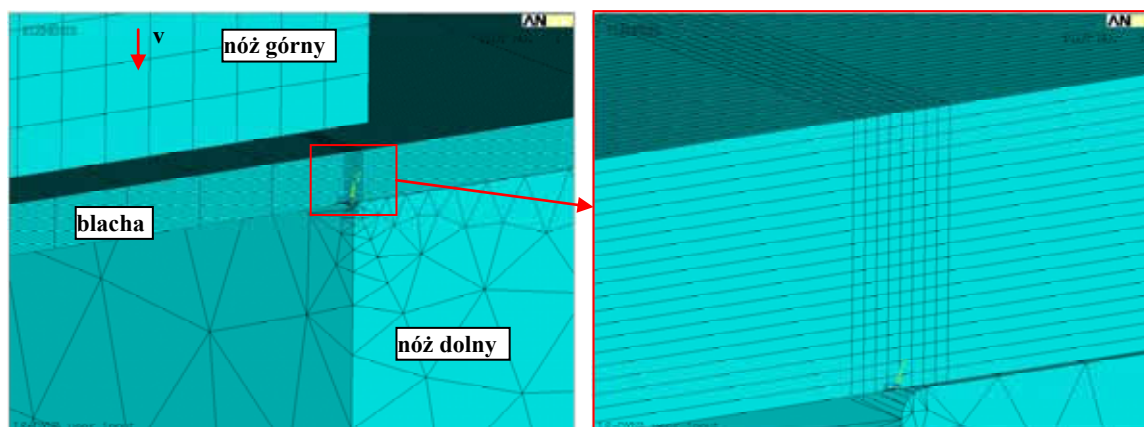
Analizy numeryczne wykonano za pomocą programu Ansys LS-Dyna. Analizie poddano element o następujących wymiarach: długość $l = 50$ mm, szerokość $h = 40$ mm, grubość $g = 1$ mm. Istotnym etapem modelowania procesu cięcia dla przestrzennego stanu naprężenia i przestrzennego stanu odkształcenia jest odpowiedni podział blachy i noży na elementy skończone. Szczególnie dotyczy to miejsca kontaktu narzędzi z elementem ciętym. Nieodpowiedni podział powoduje przenikanie elementów narzędzia i blachy oraz niedostateczne odwzorowanie zjawiska pęknięcia materiału. Zbyt duże zagęszczenie siatki powoduje znaczny wzrost czasu obliczeń [3]. W rozpatrywanym przypadku zastosowano siatkę regularną o polach kwadratowych lub prostokątnych (cięty materiał, nóż górny). Wskutek zaokrąglenia krawędzi tnącej noża dolnego $r_1 = 0,1$ mm został on podzielony siatką o polach trójkątnych, która służy do podziału obiektów o nierównomiernych kształtach. Do obliczeń przyjęto typ elementu skończonego 3D SOLID164. Wymiary elementów skończonych blachy w strefie kontaktu (rys. 2) wynosiły $0,05 \times 0,05$ mm. Symulacje przeprowadzono dla następującej wartości luzu: $a = 0,01$ mm. Kąt pochylenia krawędzi tnącej noża górnego był stały i wynosił $\alpha = 1^\circ$ (rys. 1).

Do analiz przyjęto model materiałowy Coopera-Symonds, który dzięki możliwości wprowadzenia kryterium pęknięcia umożliwia symulację procesów rozdzielania [1]. Dla modelu przyjęto parametry odpowiadające parametrom stali karoseryjnej [2]. Na nóż górny zadano przemieszczenie w głąb materiału wynoszące $U_y = 40$ mm (prędkość narzędzia $v = 400$ mm/s). Nożowi dolnemu odebrano translacyjne i rotacyjne stopnie swobody. Poprzez odpowiedni

dobór warunków brzegowych zainicjowano pracę dociskacza utrzymującego blachę w odpowiedniej pozycji.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: a) widok z boku, b) widok z przodu



Rys. 2. Model dyskretny obiektu

2. WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

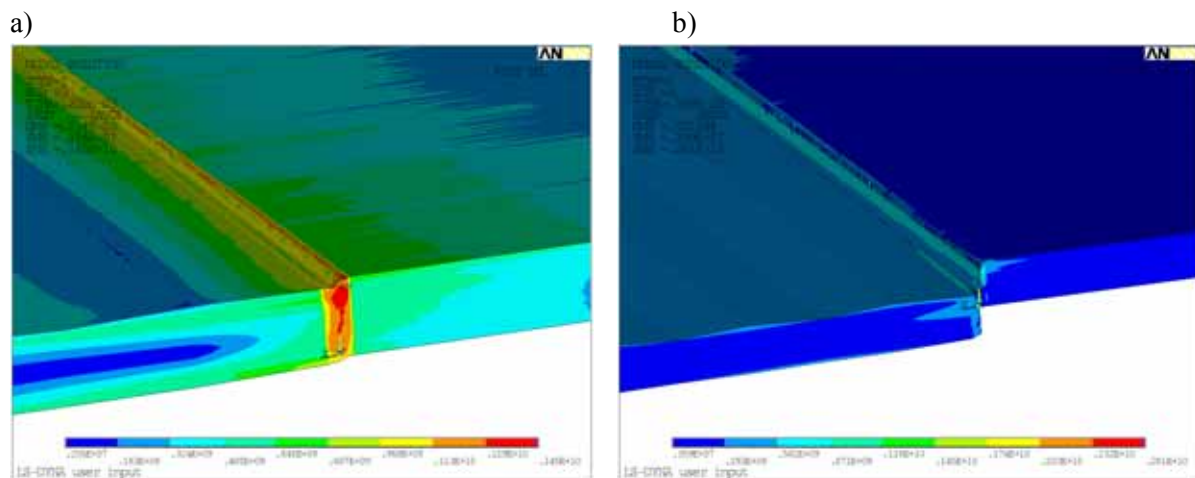
Badania symulacyjne są cennym narzędziem pozwalającym na rozszerzenie przedziału czasu i poznanie zjawisk, których badanie eksperymentalne jest niemożliwe lub bardzo drogie. Umożliwią one uwzględnienie wszystkich istotnych czynników wpływających na jakość wyrobu i wydajność procesu cięcia i symulowanie występujących zjawisk dla dowolnego stanu zaawansowania procesu. Dzięki symulacji numerycznej procesu technologicznego lub procesu deformacji konstrukcji, można określić zmiany układu. Uzyskuje się informację o zmianach obciążeń, naprężeń, rozkładu odkształceń i wymiarów zewnętrznych w kolejnych fazach procesu deformacji. Nowoczesne metody modelowania umożliwiają analizę procesu w dowolnej chwili czasowej, prognozowanie jakości powierzchni przecięcia oraz jakości wyrobu. Dzięki wykorzystaniu opracowanej aplikacji komputerowej możliwa była analiza 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,
- pękanie materiału.

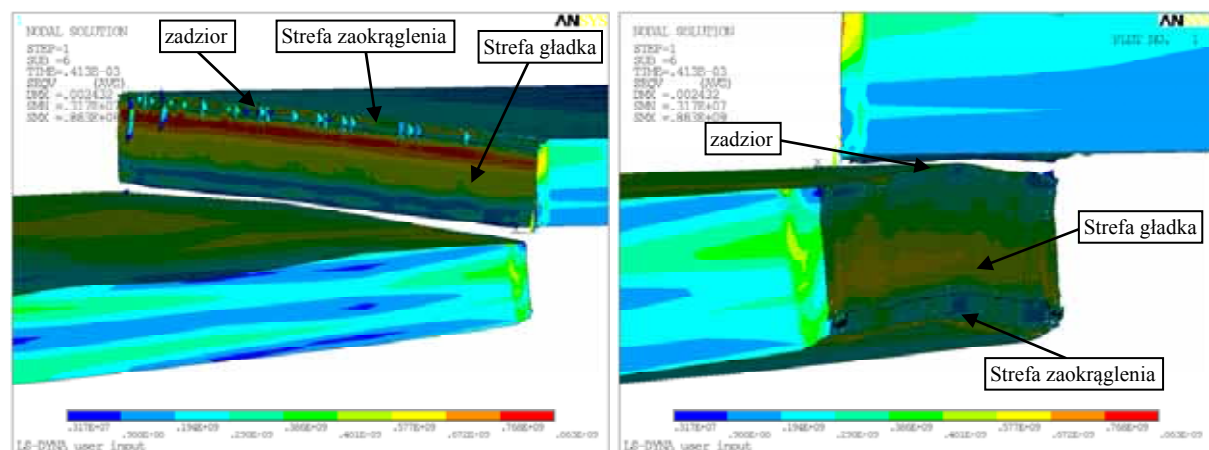
Analiza numeryczna pozwala również na określenie:

- 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.

Wskutek nacisku noża górnego na powierzchnię blachy w procesie cięcia na gilotynie powstaje moment zginający, który powoduje wstępne wybrzuszenie blachy (rys. 3a). Wygięcie materiału zależy od kształtu i wymiaru ciętego elementu oraz od wartości luzu. 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. Naprężenia te powodują przemieszczanie się cząstek materiału w kierunku obszarów o mniejszych naprężeniach ściskających. Objawia się to na wyrobie gotowym w postaci zaokrąglenia (rys. 4).



Rys. 3. Rozkład intensywności naprężeń w materiale w fazie: a) sprężysto-plastycznej, b) pęknięcia procesu cięcia



Rys. 4. Wygląd powierzchni przecięcia wyrobu po procesie cięcia

Dzięki opracowanej aplikacji możliwa jest obserwacja zachowania się materiału bezpośrednio pod narzędziem na całej szerokości blachy, co jest niemożliwe w warunkach rzeczywistych. Maksymalne naprężenia skupiają się głównie w przekroju osłabionym oraz co jest możliwe do zaobserwowania w symulacjach 3D wzdłuż powierzchni przyłożenia narzędzia i wynoszą 1450 [MPa].

W miarę umacniania się materiału wzrastają również naprężenia tnące, występujące na powierzchni ścinania. W pewnym momencie mogą one osiągnąć wartość krytyczną, przy któ-

rej następuje naruszenie spójności materiału. Rozpoczyna się wtedy faza pękania (rys. 3b). Zjawisko pękania jest bardzo ważnym procesem podczas cięcia blach ponieważ decyduje ono o jakości powierzchni przecięcia uzyskanego wyrobu. Pęknięcie materiału jest bardzo złożonym procesem i zależy od wielu czynników m. in. czynników materiałowych (modułu Younga, współczynnika Poissona, początkowej granicy plastyczności, modułu umocnienia, wrażliwości na prędkość odkształcenia, wartości odkształcenia granicznego), czynników geometrycznych ciętej blachy i narzędzia (narzędzi) (wymiarów narzędzi, stanu powierzchni i stanu fizycznego stref warstwy wierzchniej po obróbkach poprzedzających, geometrii ostrza narzędzia, rodzaju narzędzia) oraz parametrów technologicznych (prędkości cięcia, luzów między narzędziami, współczynników tarcia).

Aby uzyskać wyrób o pożądanej jakości powierzchni przecięcia i odpowiedniej dokładności wymiarowo-kształtowej steruje się parametrami procesu tak aby ingerować w przebieg pęknięcia materiału. Z praktycznego punktu widzenia największe możliwości sterowania procesem pęknięcia mogą zapewnić odpowiednio dobrane parametry geometryczne, które mają bardzo duży wpływ na stan naprężeń i odkształceń w ciętym przedmiocie. Umiejętny dobór parametrów geometrycznych narzędzi, wielkości luzów itp., umożliwia uzyskanie gładkiej powierzchni przecięcia, bez konieczności stosowania dodatkowych operacji obróbkowych.

Na rysunku 4 przedstawiono wygląd powierzchni przecięcia po całkowitym rozdzieleniu materiału z oznaczonymi strefami. Opracowane algorytmy modelowania numerycznego z uwzględnieniem nieliniowości procesu oraz przestrzennym stanem naprężeń i odkształceń umożliwiają dokładne określenie długości poszczególnych stref w różnych miejscach na powierzchni rozdzielania. Umożliwia to jeszcze dokładniejsze w porównaniu do modelowania 2D określenie wpływu czynników geometrycznych ciętej blachy i narzędzia (narzędzi) oraz parametrów technologicznych procesu na przebieg cięcia i jakość wyrobu finalnego.

WNIOSKI

Analizy numeryczne umożliwią uwzględnienie wszystkich istotnych czynników wpływających na jakość wyrobu i wydajność procesu cięcia i symulowanie występujących zjawisk dla dowolnego stanu zaawansowania procesu. Dzięki wykorzystaniu nowoczesnych metod modelowania możliwa jest analiza procesu w dowolnej chwili czasowej, prognozowanie jakości powierzchni przecięcia oraz jakości wyrobu. Opracowana aplikacja do analizy zjawisk fizycznych zachodzących podczas trwania procesu i po procesie cięcia dla stanów przestrzennych (3D) ułatwia wykonywanie skomplikowanych pomiarów. Dzięki niej przedstawiono rozkłady naprężeń i odkształceń w poszczególnych etapach, które dają szczegółowy pogląd na przebieg badanego procesu. Symulacje 3D wprowadzają dodatkowe możliwości analizy jakościowej uzyskiwanych wyrobów. Możliwa jest analiza przyczyn powstawania defektów ciętych blach takich jak np.: skrzywienie, wygięcie. Defekty te mogą występować w różnych płaszczyznach, co znacznie ogranicza zastosowanie analiz 2D do oceny przyczyn ich powstawania. Powstawanie niektórych defektów związane jest z nieprawidłowym doбором kąta pochylenia krawędzi tnącej noża górnego α . Analizy 2D umożliwiają jedynie symulowanie zjawisk fizycznych zachodzących podczas tzw. cięcia ortogonalnego, gdy $\alpha = 0^\circ$. Tylko dzięki modelowaniu 3D możliwe jest stosowanie większych kątów α oraz analiza ich wpływu na przebieg procesu.

BIBLIOGRAFIA

1. Bohdal Ł., *Modelowanie i analiza numeryczna procesów cięcia blach z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej*. Rozprawa doktorska, Koszalin 2009.
2. Bohdal Ł., Kukielka L., *Analiza numeryczna procesu cięcia blach karoseryjnych klinowym narzędziem niesymetrycznym*. XII Słupskie Forum Motoryzacji, Słupsk 2009.
3. Bohdal Ł., Kukielka L., *Modelowanie i analiza numeryczna procesu cięcia blach nożami krążkowymi z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej*. Mechanik 2011, nr 8-9.
4. Hambli R., *Comparison between Lemaitre and Gurson damage models in crack growth simulation during blanking process*. International Journal of Mechanical Sciences 2001, No. 43.
5. Ghosh S., Li M., Khadke A., *3D modeling of shear-slitting process for aluminum alloys*. Journal of Materials Processing Technology 2005, No. 167.
6. Kaczmarczyk J., Gąsior D., Mężyk A., *Analiza numeryczna przyczyn powstawania defektów w ustalonym procesie cięcia płyt na gilotynach*. Modelowanie Inżynierskie 2007, nr 34.
7. Marciniak Z., *Konstrukcja wykrojników*. WNT, Warszawa 1994.
8. 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, No. 46.

MODELING AND NUMERICAL ANALYSIS OF AUTO BODY SHEET GUILLOTINING

Abstract

Paper discussed the 3D modeling of the auto body sheet guillotining. Numerical results were done with using FEM method, and explicit method in Ansys LS-Dyna program. It includes a larger group of methods for the direct integration of dynamic equations of motion. To describe the properties of sheet-plate being cut, the Cowper-Symonds' equation was used. The states on the strains and stresses and estimation of the quality of cut surface was presented.

Key words: 3D modeling, FEM, guillotining, cracking.

Autorzy:

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

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