

Modelowanie i analiza numeryczna procesu wykrawania elementów o zarysie krzywoliniowym z blach karoseryjnych

Lukasz Bohdal, Leon Kukielka

Streszczenie

W niniejszej pracy przedstawiono sposób modelowania 3D procesu wykrawania z uwzględnieniem krzywej linii cięcia. 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, wykrawanie, elementy krzywoliniowe, naprężenia, odkształcenia.

Wstęp

W praktyce przemysłowej wykrawanie dokładne znajduje coraz większe zastosowanie, gdyż zapewnia uzyskiwanie wyrobów o dokładności i wysokiej jakości powierzchni przecięcia, bez konieczności stosowania dalszych operacji obróbki wykańczającej [5, 6]. Eliminując operacje wykańczające, uzyskuje się w ostatecznym rezultacie obniżenie kosztów produkcji wyrobów. Jednakże istotnym problemem tego rodzaju obróbki jest wykrawanie elementów krzywoliniowych o długiej linii cięcia (rys. 1). Aktualnie w dostępnej literaturze dotyczącej procesów wykrawania, brak jest wytycznych odnośnie prawidłowego doboru parametrów technologicznych procesu w zależności od kształtu elementu wycinanego, rodzaju materiału, jego grubości itp. Powoduje to, że w wielu firmach parametry te dobierane są metodą prób i błędów, powodując wzrost kosztów produkcji i generowanie odpadu.

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 zakresie wyznaczania rozkładu naprężeń i odkształceń w narzędziu i materiale, zjawiska pęknięcia itp. 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. Uwzględnienie rzeczywistych wymiarów i kształtów narzędzi i materiału obrabianego, umożliwi znaczne zwiększenie dokładności uzyskiwanych rozwiązań i może stanowić podstawę do opracowania prawidłowych wytycznych związanych z wykrawaniem elementów o krzywoliniowych profilach.

W niniejszej pracy przedstawiono sposób modelowania procesu wykrawania elementów o krzywoliniowej charakterystyce. W tym celu opracowano



Rys. 1. Przykładowe części uzyskane w procesie wykrawania o charakterystyce krzywoliniowej

aplikację komputerową 3D, umożliwiającą analizę zjawisk fizycznych w każdym miejscu ciętej blachy w dowolnej chwili trwania procesu oraz po całkowitym rozdzielaniu materiału. Przedstawiono wybrane wyniki w postaci rozkładów naprężeń i odkształceń w poszczególnych fazach procesu.

1. Analiza numeryczna

Analizy numeryczne wykonano za pomocą programu Ansys LS-Dyna według algorytmu modelowanie przedstawionego w [1, 4]. Analizie numerycznej poddano element o wymiarach przedstawionych na rysunku 2.

Grubość ciętej blachy (DC01) wynosiła $g = 0,2$ mm. Do opisu materiału ciętej blachy wykorzystano model sprężysto/lepkoplastyczny PIECEWISE-LINEAR. Model uwzględnia m.in. wpływ intensywności prędkości odkształcenia plastycznego według zależności:

$$\sigma_p = \left[1 + \left(\frac{\dot{\phi}_i^{(p)}}{C} \right)^{1/P} \right] \cdot R_e \quad (1)$$

gdzie:

R_e - początkowa, statyczna granica plastyczności MPa,

$\dot{\phi}_i^{(p)}$ - intensywność prędkości odkształceń plastycznych [s^{-1}],

C, P - stałe materiałowe określające wrażliwość materiału na prędkość odkształcenia plastycznego.

Dla stali DC01 wielkości charakterystyczne wynoszą: $R_e = 200$ MPa, gęstość $\rho = 8000$ kg/m³, moduł Younga $E = 210$ GPa, liczba Poissona $\nu = 0,29$, odkształcenie graniczne $\epsilon_f = 0,75$, $C = 40$, $P = 5$ [2, 3]. Dla stali DC01 na podstawie próby rozciągania wyznaczono zależność naprężenia od odkształcenia, którą wprowadzono do modelu.

W celu zmniejszenia czasu obliczeń ciętą blachę dyskretyzowano elementami skończonymi typu SHELL163 z 5 punktami całkowania i formule Belytschko-Tsay. W celu ułatwienia analizy wyników obliczeń, stempelowi przypisano właściwości materiału idealnie sztywnego (RIGID) i dyskretyzowano

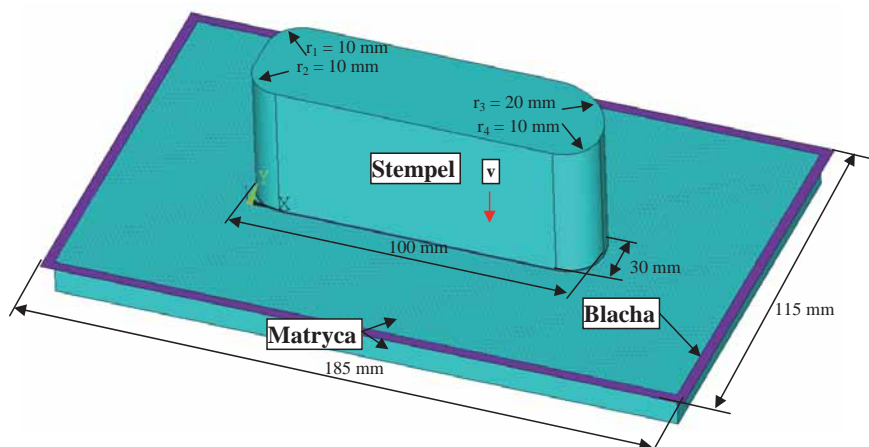
8 węzłowymi elementami skończonymi typu 3D SOLID164. Prędkość cięcia wynosiła $v = 100$ mm/s.

2. Wyniki obliczeń numerycznych

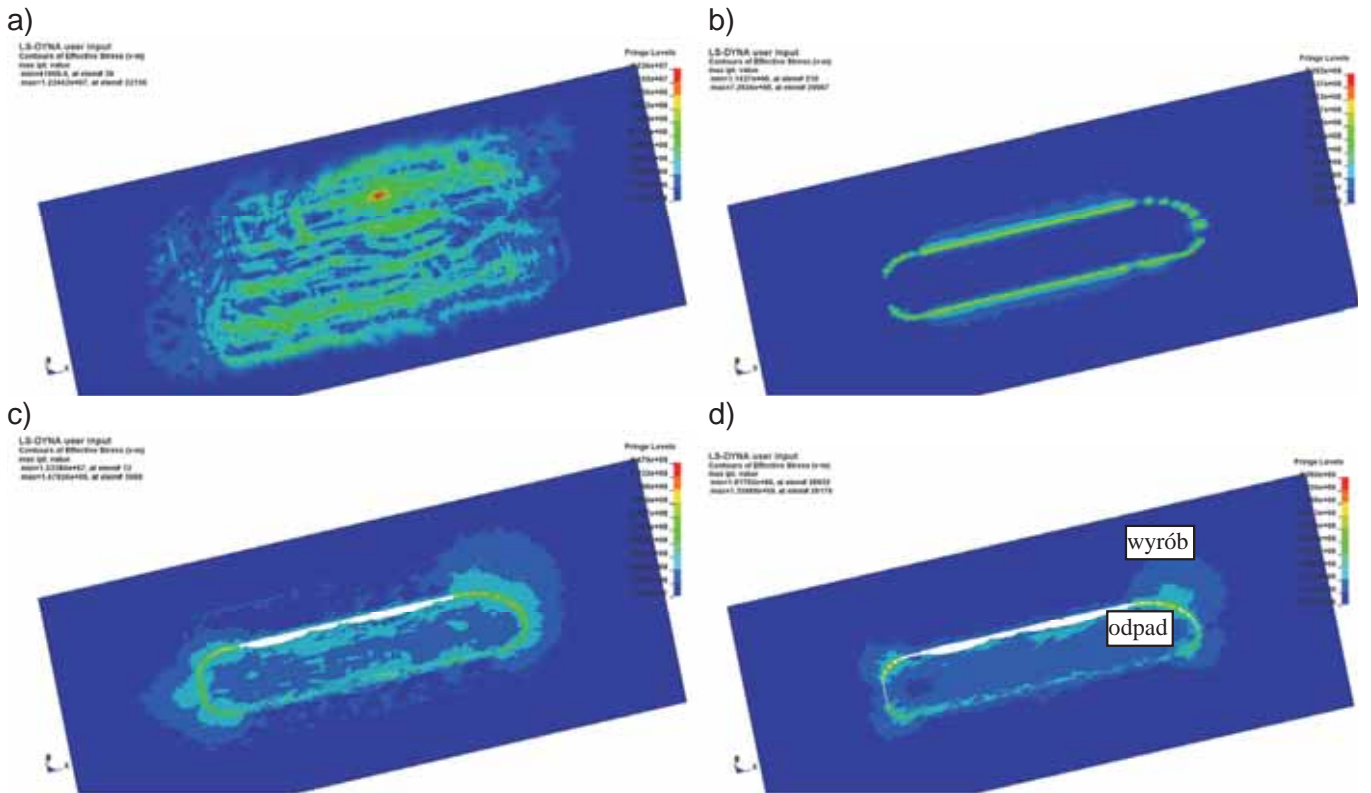
Wybrane wyniki analizy numerycznej przedstawiono na rysunkach 3 ÷ 7. Na rysunku 3 przedstawiono rozkłady naprężeń w poszczególnych etapach wykrawania 3D. Modelowanie 3D umożliwiło analizę zjawisk fizycznych zachodzących nie tylko w przekroju materiału ale także pod narzędziem.

W fazie odkształceń sprężystych siły wywierane na blachę przez krawędzie tnące stempla i matrycy są względem siebie przesunięte, a powstały na skutek tego moment zginający powoduje wstępne wybrzuszenie blachy. Miejscowe uplastycznienie materiału rozpoczyna się od chwili, gdy naprężenia tnące osiągną dostateczną wartość. Rozpoczyna się wtedy faza odkształceń sprężysto-plastycznych (rys. 3a). Faza plastycznego płynięcia charakteryzuje się plastycznym płynięciem materiału w otoczeniu powierzchni ścinania. Rozpoczyna się w chwili połączenia się ze sobą obu stref plastycznych i rozciągnięcia się obszaru uplastycznionego na całą grubość blachy, tworzą się wtedy warunki umożliwiające powstanie bardzo dużych odkształceń plastycznych (rys. 3b). W miarę umacniania materiału wzrastają również naprężenia tnące, występujące na powierzchni rozdzielania. W pewnym momencie naprężenia te mogą osiągnąć wartość krytyczną, przy której następuje naruszenie spójności materiału (pęknięcie). Pierwsze pęknięcia pojawiają się w miejscach, gdzie materiał jest najbardziej odkształcony, a więc w pobliżu krawędzi tnących matrycy i stempla. Pęknięcia rozchodzące się od obu krawędzi spotykają się ze sobą tworząc wspólną powierzchnię pęknięcia (rys. 3c, d). Na rysunku 5 przedstawiono wykres zmian maksymalnych naprężeń zastępczych dla wybranych węzłów w poszczególnych miejscach materiału (rys. 4).

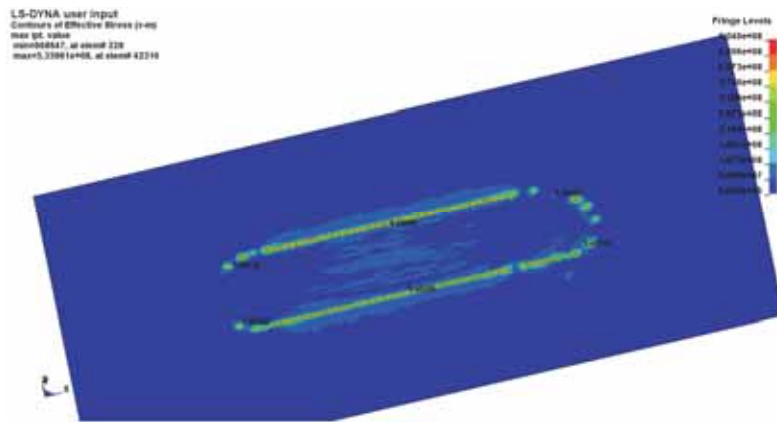
Z przeprowadzonych analiz wynika, że największe wartości naprężeń w materiale występują w miejscach jego kontaktu z zaokrąglonymi krawędziami stempla (linie A, B, E, F). W konsekwencji



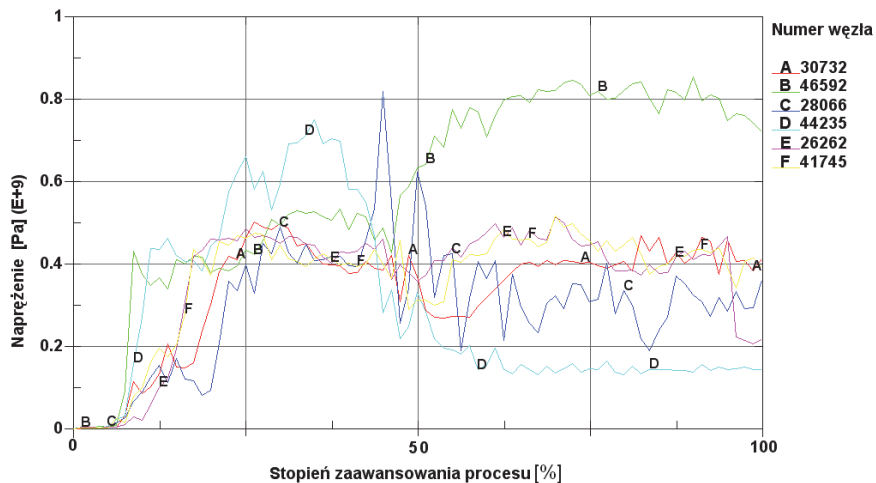
Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego



Rys. 3. Mapy naprężeń zastępczych w poszczególnych etapach wykrawania: a) faza odkształceń sprężysto-plastycznych, b) faza odkształceń plastycznych, c) faza pękania, d) faza końcowa



Rys. 4. Miejsca pomiaru naprężeń zastępczych



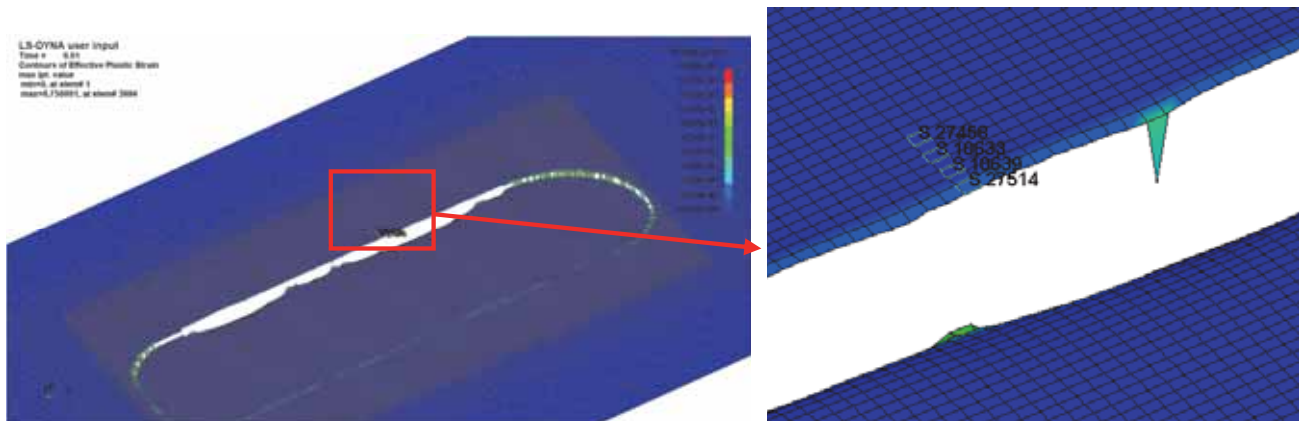
Rys. 5. Wykres zmian maksymalnych naprężeń zastępczych w czasie trwania procesu

w wielu przypadkach powoduje to przyspieszone zużycie krawędzi stempla i matrycy. Mniejsze wartości występują, gdy krawędź stempla jest prostoliniowa (linie C i D). Na rysunku 7 przedstawiono wykres zmiany odkształceń zastępczych w wybranych elementach w wybranych miejscach blachy (rys. 6). W miarę oddalania się od krawędzi cięcia wartości maksymalnych odkształceń zastępczych w materiale gwałtownie maleją. Bezpośrednio przy prostej krawędzi cięcia, maksymalne odkształcenia zastępcze po procesie wynosiły około 0,18. Przy krawędzi krzywoliniowej wartości te kształtowały się w granicach 0,5 – 0,7.

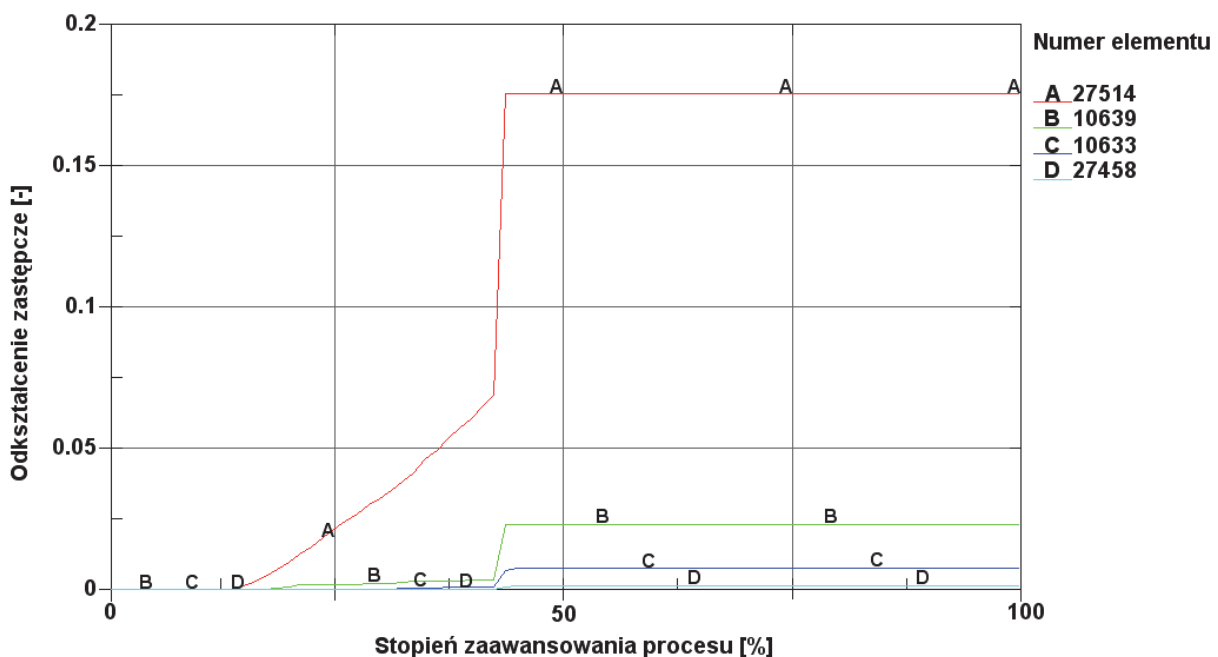
Wnioski

Celem niniejszej pracy było przedstawienie sposobu modelowania procesu wykrawania elementów o krzywoliniowej charakterystyce, z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Jest to zagadnienie nowe, które wymaga dalszych badań

oraz dalszego doskonalenia procedury modelowania poprzez np.: wprowadzenie automatycznego zagęszczania siatki elementów skończonych w miejscach występowania największych nielinowości. Umożliwi to znaczne zmniejszenie czasu obliczeń. Opracowana aplikacja do analizy zjawisk fizycznych zachodzących podczas trwania procesu i po procesie wykrawania 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 m.in. analiza przyczyn powstawania defektów ciętych blach, takich jak np.: skręcenie, wygięcie. Defekty te mogą występować w różnych płaszczyznach co znacznie ogranicza zastosowanie analiz 2D do oceny przyczyn ich powstawania.



Rys. 6. Miejsca pomiaru odkształceń zastępczych



Rys. 7. Wykres zmian maksymalnych odkształceń zastępczych w czasie trwania procesu

Bibliografia

1. Bohdal Ł., Kukielka L.: *Modelowanie i analiza numeryczna procesu cięcia blach karoseryjnych na gilotynie*. Autobusy. Technika – Eksploatacja – Systemy Transportowe 2012, nr 5.
2. Bohdal Ł.: *Eksperymentalne i numeryczne metody określania jakości wyrobów w procesach cięcia blach*. Pomiary Automatyka Kontrola. Nr 5/2011.
3. Bohdal Ł.: *Finite element simulation of 3D sheet metal guillotining using elastic/visco-plastic damage model*. Steel Research International. Special Edition: 14th International Conference on Metal Forming 2012, str. 1419-1422.
4. Bohdal Ł., Florianowicz M.: *Modelowanie skraplania czynników chłodniczych w obszarze pary przegrzanej*. Annual Set The Environment Protection 14, 2012.
5. Marciniak Z.: *Konstrukcja wykrojników*. Wydawnictwa Naukowo – Techniczne Warszawa, 1994.
6. 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 (2010).

Modeling and numerical analysis of autobody curvi-linear blanking

Abstract

Paper discussed the 3D modeling of the auto body sheet blanking with regarding curvilinear shearing line. Numerical results were done with using FEM method, and explicit method in Ansys LS-Dyna program. The states on the strains and stresses with regarding process nonlinearities were obtained. Obtained results can be used for the purpose of designing blanking process and its optimization.

Key words: 3D modeling, blanking, curvilinear profiles, stress, strain

Autorzy:

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

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