

Łukasz BOHDAL, Leon KUKIEŁKA

MODELOWANIE I ANALIZA NUMERYCZNA PROCESU CIĘCIA BLACH KAROSERYJNYCH NA NOŻYCACH

Streszczenie

W niniejszej pracy przedstawiono sposoby modelowania procesu cięcia stali karoseryjnej za pomocą nożyc gilotynowych. Przedstawiono 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.

WSTĘP

Do najważniejszych problemów współczesnych technik wytwarzania podzespołów samochodowych zalicza się zapewnienie odpowiedniej jakości wytwarzanych wyrobów, przy jednoczesnej minimalizacji kosztów ich produkcji i wzroście wydajności procesu. Od wyrobów wymaga się wysokiej jakości, trwałości i niezawodności. Mimo istnienia wielu sposobów cięcia dużo z nich nie spełnia wymagań jakościowych stawianych przed wyrobem, dotyczących przede wszystkim dokładności wymiarowo-kształtowej. Taki stan wymusza powstawanie i rozwój sposobów cięcia, które umożliwiają uzyskanie w jednej operacji wyrobów o wysokiej jakości, charakteryzujących się gładką powierzchnią przecięcia na całej grubości wyrobu, małymi wygięciami wyrobu, małą wysokością zadziorów, dobrą dokładnością wymiarową oraz dobrze zachowaną prostopadłością powierzchni przecięcia do powierzchni wyrobu [4, 6, 7].

Z punktu widzenia mechaniki cięcie blach jest nieliniowym zagadnieniem brzegowo-początkowym. W procesie występują nieliniowości: geometryczna i fizyczna oraz nieliniowe warunki brzegowe w obszarze kontaktu. Poprzez nieliniowość geometryczną należy rozumieć nieliniową zależność pomiędzy odkształceniem a przemieszczeniem. Nieliniowość fizyczna to nieliniowa zależność pomiędzy naprężeniem a odkształceniem. Ponadto, w procesie występują nieliniowe, ruchome oraz zmienne w czasie i przestrzeni warunki brzegowe, które nie są znane w obszarach kontaktu narzędzia z przedmiotem. 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 wykorzystaniem metody elementów skończonych oraz nowoczesnych metod modelowania (badań symulacyjnych). Jednakże analiza tego typu zagadnień nieliniowych, nawet przy zastosowaniu zaawansowanych systemów komputerowych, nadal stanowi wyzwanie dla

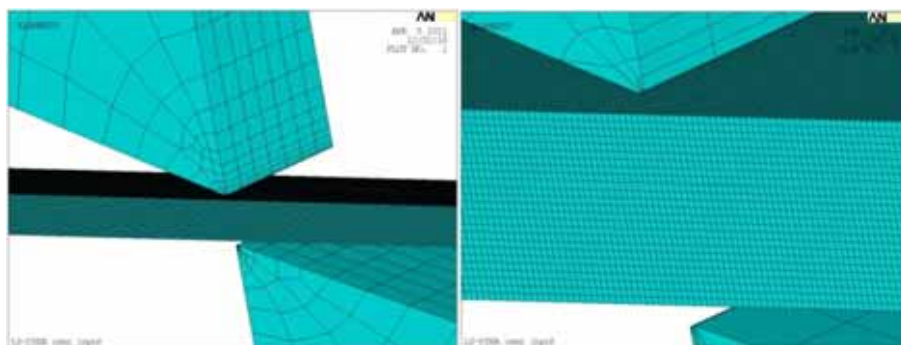
współczesnej mechaniki. Dzięki wynikom uzyskanym w symulacji można zoptymalizować projektowany proces technologiczny, skrócić cykl projektowania oraz zmniejszyć koszty związane z uruchomieniem produkcji, obniżyć koszty procesu i zwiększyć jakość wyrobu. Są to zagadnienia niezbędne dla właściwego projektowania i sterowania tym złożonym procesem obróbki plastycznej.

W niniejszej pracy przedstawiono sposoby modelowania procesu cięcia stali karoseryjnej na nożycach. Opracowano aplikację komputerową 3D umożliwiającą analizę zjawisk fizycznych w każdym miejscu ciętej blachy w dowolnej chwili trwania procesu oraz po całkowitym rozdzieleniu materiału. Cięcie na nożycach 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 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. 5). Istotna jest również dokładność geometryczna kształtu blachy po jej rozdzieleniu. Nieodpowiedni dobór parametrów procesu może spowodować wyginanie blachy oraz znaczne zwiększenie wysokości zadziorów.

1. PARAMETRY ANALIZY NUMERYCZNEJ

Symulację komputerową wykonano za pomocą programu Ansys LS-Dyna. Analizie poddano element o wymiarach gabarytowych 42×1 mm, który umieszczono w matrycy. Istotnym etapem modelowania procesu cięcia dla przestrzennego stanu naprężenia i przestrzennego stanu odkształcenia jest odpowiedni podział blachy i nożyc 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 [5]. W rozpatrywanym przypadku liczba elementów skończonych wynosiła: 750 000 – cięta blacha, 570 – narzędzie. Przyjęto typ elementu skończonego 3D SOLID164.

Na nożyce zadano przemieszczenie w głąb materiału wynoszące $U_y = 0,7$ mm. Luz między nożycami wynosił $l = 0,1$ mm.



Rys. 1. Model dyskretny obiektu

Źródło: Opracowanie własne.

Do analiz przyjęto model materiałowy Cowpera-Symonds, który dzięki wartości maksymalnego odkształcenia powoduje niszczenie materiału [1]. Dla modelu przyjęto parametry odpowiadające parametrom stali karoseryjnej [3].

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. Wykorzystanie nowoczesnych metod modelowania umożliwia analizę procesu w dowolnej chwili, prognozowanie jakości powierzchni przecięcia oraz jakości wyrobu. Na podstawie opracowanych aplikacji komputerowych 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:

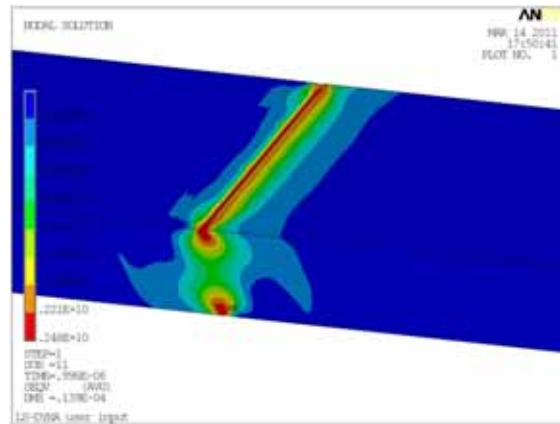
- tarcie, przyleganie i poślizg,
- odkształcenia, i naprężenia przedmiotu ciętego,
- zmienność właściwości materiału ciętego,
- pękanie materiału.

Analiza numeryczna pozwala również na określenie:

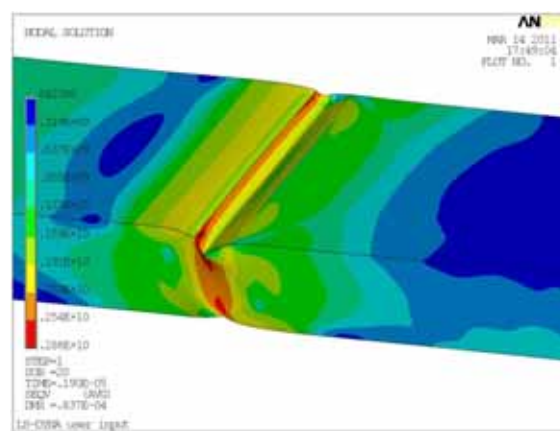
- wpływu na jakość technologiczną wyrobu: rodzaju materiału i jego stanu, geometrii narzędzi,
- wpływu warunków cięcia na stan odkształceń, naprężeń i temperatur w przedmiocie,
- kształtów pęknięć, jakości powierzchni przecięcia.

W fazie odkształceń sprężysto-plastycznych (rys. 2) obszar uplastyczniony występuje jedynie w miejscu największej koncentracji naprężeń, a więc w bezpośrednim sąsiedztwie krawędzi nożyc. W miarę wzrostu nacisku granica obszaru uplastycznionego przesuwa się w głąb materiału, a jednocześnie krawędzie noży wgniatają się nieco w materiał, wytwarzając dostatecznie dużą powierzchnię przylegania będącą w stanie przenieść ich zwiększony nacisk. Dzięki opracowanej aplikacji możliwa jest obserwacja zachowania się materiału bezpośrednio pod narzędziem na całej szerokości blachy, co jest niemożliwe w warunkach rzeczywistych.

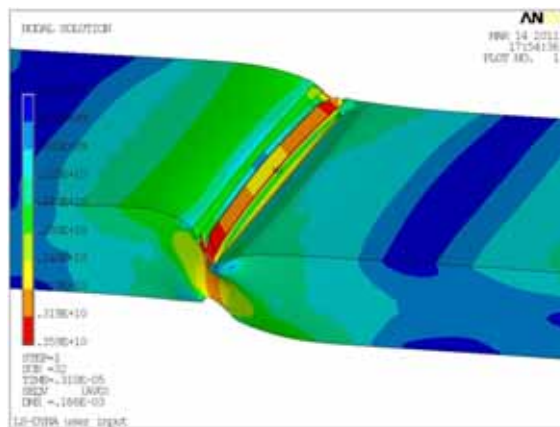
Faza plastycznego płynięcia (rys. 3) charakteryzuje się plastycznym płynięciem materiału w otoczeniu powierzchni ścinania. Rozpoczyna się w chwili połączenia się ze sobą obu stref plastycznych i rozciągnięcia się obszaru uplastycznionego na całą grubość blachy, tworzą się wtedy warunki umożliwiające powstanie bardzo dużych odkształceń plastycznych. Maksymalne naprężenia skupiają się głównie w przekroju osłabionym oraz, co jest możliwe do zaobserwowania w symulacjach 3D, wzdłuż powierzchni przyłożenia narzędzia. Po obu stronach następuje lokalne umacnianie się materiału i wypychanie go na boki przez nożyce. Aby zmniejszyć to zjawisko, należałoby ciąć materiał szerszymi nożycami niż wynosi szerokość blachy. W miarę umacniania się materiału wzrastają również naprężenia tnące, występujące na powierzchni ścinania. W pewnym momencie mogą one osiągnąć wartość krytyczną, przy której następuje naruszenie spójności materiału. Rozpoczyna się wtedy faza pękania (rys. 4). Zjawisko pękania jest bardzo ważnym procesem podczas cięcia blach, ponieważ decyduje ono o jakości powierzchni przecięcia uzyskanego wyrobu. Pękanie 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, rodzaj narzędzia) oraz parametrów technologicznych (prędkości cięcia, luzów między narzędziami, współczynników tarcia).



Rys. 2. Rozkład intensywności naprężeń w materiale w fazie sprężysto-plastycznej procesu cięcia
 Źródło: Opracowanie własne.



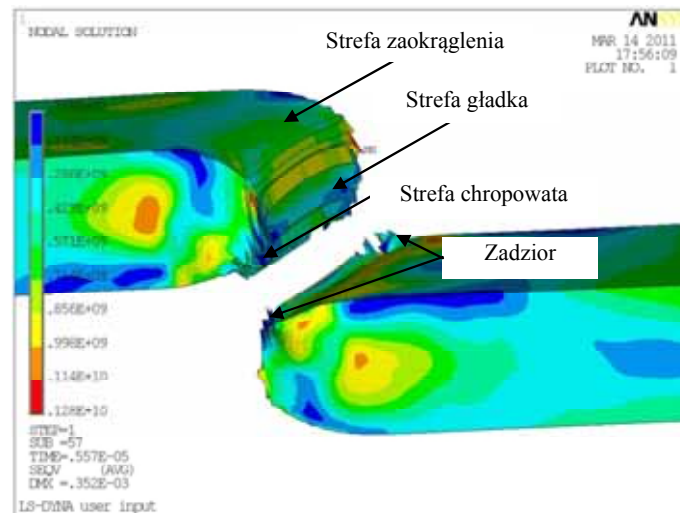
Rys. 3. Rozkład intensywności naprężeń w fazie plastycznego płynięcia procesu cięcia
 Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 4. Rozkład intensywności naprężeń w fazie pęknięcia procesu cięcia
 Źródło: Opracowanie własne.

Uzyskanie wyrobu o pożądanej jakości powierzchni przecięcia i odpowiedniej dokładności wymiarowo-kształtowej wymaga takiego sterowania parametrami procesu, aby ingerować w przebieg pęknięcia materiału [2]. 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, matrycy, wielkości luzów itp., umożliwi uzyskanie gładkiej powierzchni przecięcia bez konieczności stosowania dodatkowych operacji obróbkowych.

Na rysunku 5 przedstawiono wygląd powierzchni przecięcia po całkowitym rozdeleniu materiału z oznaczonymi strefami. Opracowane algorytmy modelowania numerycznego z uwzględnieniem nieliniowości procesu oraz przestrzennym stanem naprężeń i odkształceń umożliwiły dokładne określenie długości poszczególnych stref w różnych miejscach na powierzchni rozdzielania. Umożliwi 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.



Rys. 5. Wygląd powierzchni przecięcia wyrobu po procesie cięcia

Źródło: Opracowanie własne.

PODSUMOWANIE

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. Pozwoliło to przedstawić rozkłady naprężeń i odkształceń w poszczególnych etapach, które dają szczegółowy pogląd na przebieg badanego procesu. Na podstawie uzyskanych wyników można określić, dla jakich wartości parametrów procesu, opracowany model będzie odzwierciedlał rzeczywiste zjawisko w tym wypadku proces cięcia. Uzyskane wyniki mogą być wykorzystane do szczegółowych analiz zjawisk fizycznych i projektowania procesu technologicznego cięcia dla różnych danych, np. inny rodzaj materiału obrabianego, warunki smarowania, geometrie narzędzi, luzy, kształty matryc itp. ze względu na wymaganą jakość technologiczną wyrobu.

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.: *Optimization of the dynamic blanking process*, PAMM 7, (2007), s. 4030043-4030044.
3. Bohdal Ł., Kukielka L.: *Analiza numeryczna procesu cięcia blach karoseryjnych klinowym narzędziem niesymetrycznym*, XII Słupskie Forum Motoryzacji, Słupsk, 2009, s. 29-34.

4. Hambli R.: *Comparison between Lemaitre and Gurson damage models in crack growth simulation during blanking process*, International Journal of Mechanical Sciences, 43 (2001), s. 2769-2790.
5. Kleiber M.: *Metoda elementów skończonych w nieliniowej mechanice kontinuum*, PWN, Warszawa-Poznań, 1982.
6. Marciniak Z.: *Konstrukcja wykrojników*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1994.
7. Marciniak Z.: *Konstrukcja tłoczników*. Ośrodek Techniczny A. Marciniak, Warszawa, 2002.

MODELING AND NUMERICAL ANALYSIS OF THE CAR BODY STEEL CUTTING

Abstract

The modeling of the car body steel cutting with using guillotine tools is presented in the paper. The applications and algorithms to research the quality of the cut surface were presented. Computer simulation was done with taking use of FEM method. The analysis of the states of stresses and strains in three dimensions taking place in the process was carried out. The maps of intensity of stresses and strains for any moment with the nonlinearities of the process are obtained. Some results of the numerical analysis, which can be used in designing of the process and optimization, are presented.

Autorzy:

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

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