

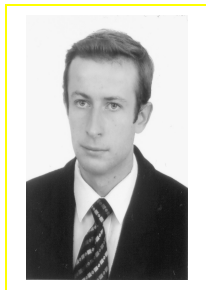
Łukasz BOHDAL

KATEDRA MECHANIKI TECHNICZNEJ I WYTRZYMAŁOŚCI MATERIAŁÓW, POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA
ul. Raclawicka 15/17, 75-620 Koszalin

Numeryczne metody określania jakości wyrobów w procesach cięcia blach na gilotynie

Dr inż. Łukasz BOHDAL

Absolwent Politechniki Koszalińskiej. W 2005 roku obronił pracę dyplomową pod tytułem: „Analiza numeryczna procesu cięcia nożycami krążkowymi” pod kierownictwem prof. dr hab. inż. Leona Kukielki. Zrealizował grant promotorski pt.: „Modelowanie i analiza numeryczna procesów cięcia blach z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej”. Główne zainteresowania naukowe to analiza zjawisk fizycznych zachodzących podczas procesów cięcia.



e-mail: Bohdall@interia.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono numeryczne metody określania jakości wyrobów w procesach cięcia blach na gilotynie. W tym celu opracowano aplikację komputerową 3D dla przestrzennych stanów naprężeń i odkształceń w środowisku Ansys/LS-Dyna z wykorzystaniem metody explicit. W celu realizacji postawionego zadania zastosowano modele przyrostowe, które pozwalają rozwiązać wiele problemów bez znajomości warunków brzegowych w obszarze kontaktu. Do opisu właściwości ciętej blachy został wykorzystany model materiałowy Cowpera-Symonds. Wyniki analiz mogą być wykorzystane do projektowania procesu cięcia na gilotynie a także podstawą doboru parametrów technologicznych w aspekcie jakości technologicznej wyrobu.

Słowa kluczowe: cięcie na gilotynie, modele przyrostowe, symulacja 3D.

Numerical methods for determining the quality of products in guillotining process

Abstract

In this paper numerical methods for determining the quality of products in guillotining process are presented. For this purpose a 3D application in Ansys/LS-Dyna system for spatial states of strain and stresses was developed. To describe the properties of sheet-plate being cut, the Cowper – Symonds equation was used. A Cowper-Symonds model takes into account the linear-isotropic, kinematic or mixed plastic strain hardening and the effect of plastic strain velocity intensity. For description of the non-linear phenomena at the typical increment ratio the updated Lagrange description was used. The material nonlinearity was described by means of the increment model taking into consideration the deformation and deformation rate records. These results can be used for the purpose of design of the guillotining process: selection of the process conditions and its optimization.

Keywords: guillotining, increment models, 3D simulation.

1. Wstęp

W dziedzinie współczesnych technik wytwarzania dąży się do uzyskania wyrobów o wysokiej jakości przy zminimalizowanych kosztach przedsięwzięcia, wyrażonych również wzrostem wydajności pracy. Taki stan wymusza poszukiwanie oraz stosowanie takich procesów wytwarzania, które zapewnią wymaganą w danym przypadku jakość wyrobu finalnego, przy zachowaniu jak najmniejszej liczby operacji potrzebnych do jego wykonania oraz prostoty procesu wytwarzania.

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 i 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 [7].

Trudności związane z silnie nieliniowym charakterem procesów technologicznych przez długi czas nie pozwalały na uzyskanie miarodajnych oraz możliwie uniwersalnych metod analizy. Niezwykle szybki w ostatnich latach rozwój w zakresie teorii ośrodków ciągłych, teorii plastyczności oraz metod numerycznych w mechanice, a zwłaszcza metody elementów skończonych, wsparty postępem systemów obliczeniowych, stworzył warunki, w których analizowanie tak złożonych problemów stało się możliwe. Również wymagania stawiane wobec jakości uzyskiwanych rozwiązań są coraz ostrzejsze. Konieczna jest wysoka wiarygodność pozwalająca na projektowanie procesu nie tylko z odpowiednim stopniem niezawodności, ale również spełniających wymagania dotyczące racjonalnego kształtowania, ekonomiki itd. Dlatego analiza tego typu zagadnień nieliniowych, nawet przy zastosowaniu zaawansowanych systemów komputerowych, nadal stanowi wyzwanie dla współczesnej mechaniki.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie sposobu modelowania procesu cięcia blach na gilotynie z uwzględnieniem nieliniowości procesu. Takie podejście umożliwia analizę wielu zjawisk fizycznych zachodzących podczas cięcia oraz ocenę jakości uzyskiwanych wyrobów.

2. Metodyka analizy numerycznej

W procesie cięcia intensywność obciążeń jest duża i dlatego problematykę procesu należy rozpatrywać w kategoriach mechaniki nieliniowej [1, 5]. Konieczne jest wówczas uwzględnienie wpływu zmian geometrycznych (*nieliniowość geometryczna*) oraz złożonych właściwości materiałowych (*nieliniowość fizyczna, materiałowa*). Poprzez nieliniowość geometryczną należy rozumieć nieliniową zależność pomiędzy odkształceniem a przemieszczeniem. Nieliniowość fizyczna to nieliniowa zależność pomiędzy naprężeniem a odkształceniem. 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.

Modelowanie procesu cięcia przy zastosowaniu metod wariacyjnych i elementów skończonych przebiega wg następujących etapów [3]:

- 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 ciągle, 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 dys-

kretnych, przyrostowych modeli matematycznych modelu fizycznego.

Modelując proces cięcia blach na gilotynie wzięto pod uwagę oddziaływanie przedmiotu obrabianego i narzędzia oraz wpływ otoczenia. Do opisu zjawisk na typowym kroku przyrostowym wykorzystano uaktualniony opis Lagrange'a, przyjmując skokowo-współobrotowy układ współrzędnych. Stany odkształcenia i prędkości odkształcenia opisano zależnościami nieliniowymi bez linearyzacji. Zastosowano adekwatne miary przyrostu odkształceń i przyrostu naprężeń w tym opisie, tj. przyrost tensora odkształceń Greena-Lagrange'a i przyrost drugiego symetrycznego tensora naprężeń Pioli-Kirchhoffa. Opisu nieliniowości materiału dokonano modelem przyrostowym uwzględniając wpływ historii odkształceń i prędkości odkształceń. Przedmiot (ciątej blachę) traktuje się, jako ciało, w którym mogą wystąpić odkształcenia sprężyste (w zakresie odkształceń odwracalnych) oraz lepkie i plastyczne (w zakresie odkształceń nieodwracalnych), z nieliniowym umocnieniem. Do budowy modelu materiałowego zastosowano nieliniowy warunek plastyczności Hubera-Misesa-Hencky'ego, stowarzyszone prawo płynięcia oraz wzmocnienie mieszane (izotropowo-kinematyczne). Uwzględniono również stan materiału po obróbkach poprzedzających przez wprowadzenie początkowych stanów: przemieszczeń, naprężeń, odkształceń i ich prędkości. Opracowany przyrostowy model kontaktowy obejmuje siły kontaktowe, sztywność kontaktową, kontaktowe warunki brzegowe oraz warunki tarcia w tym obszarze. Model matematyczny uzupełniono przyrostowymi równaniami ruchu obiektu oraz warunkami jednoznaczności. Następnie, wprowadzono funkcjonal przyrostowy całkowitej energii układu. Z warunku stacjonarności tego funkcjonału wyprowadzono wariacyjne, nieliniowe równania ruchu i deformacji obiektu dla typowego kroku przyrostowego. Równanie to rozwikłano stosując przestrzenną dyskretyzację metodą elementów skończonych otrzymując dyskretne układy równań ruchu i deformacji obiektu w procesie cięcia, które rozwiązano metodą różnic centralnych (explicit) [4].

Do opisu właściwości ciętej blachy zastosowano model materiałowy sprężysto/lepko-plastyczny Cowpera-Symondsa. W modelu wykorzystuje się warunek plastyczności Hubera-Misesa-Hencky'ego oraz stowarzyszone prawo płynięcia. Model Cowpera-Symondsa uwzględnia liniowo-izotropowe ($\beta = 1$), kinematyczne ($\beta = 0$) lub mieszane ($0 < \beta < 1$) wzmocnienie plastyczne oraz wpływ intensywności prędkości odkształcenia plastycznego, według zależności potęgowej:

$$\sigma_p = [1 + (\dot{\phi}_i^{(p)} / C)]^{1/P} (R_e + \beta E_p \phi_i^{(p)}),$$

gdzie: β – parametr umocnienia, R_e – początkowa, statyczna granica plastyczności [MPa], $\dot{\phi}_i^{(p)}$ – intensywność prędkości odkształceń plastycznych [s^{-1}], C – parametr materiałowy określający wpływ intensywności prędkości odkształcenia plastycznego [s^{-1}], P – stała materiałowa określająca wrażliwość materiału na prędkość odkształcenia plastycznego, $\phi_i^{(p)}$ [-] – intensywność odkształcenia

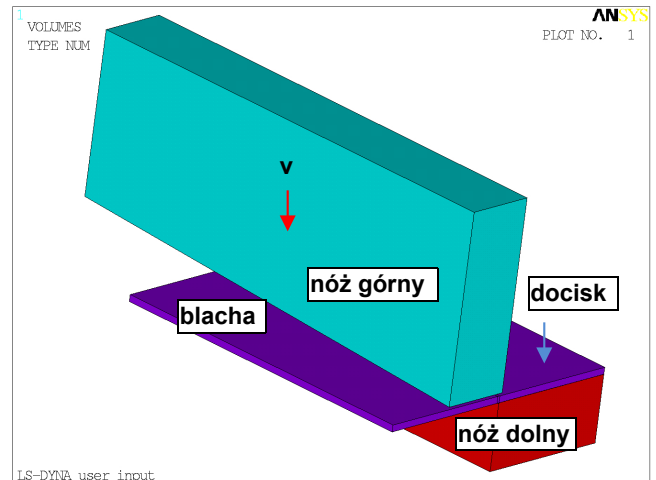
plastycznego, $E_p = \frac{E_T E}{E - E_T}$ – parametr materiałowy zależny od

modułu umocnienia plastycznego $E_T = \partial \sigma_p / \partial \phi_i^{(p)}$ i modułu sprężystości Younga E .

Dla modelu Cowpera-Symondsa przyjęto parametry materiałowe stali DC 01 [4]. Przyjęto, że noże są ciałami nieodkształcalnymi $E \rightarrow \infty$.

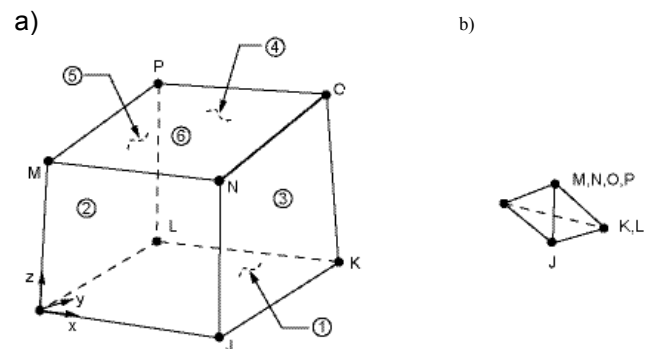
3. Parametry analizy numerycznej

Analizy numeryczne wykonano za pomocą programu Ansys LS-Dyna. Analizie poddano blachę o następujących wymiarach: długość $l = 50$ mm, szerokość $h = 40$ mm, grubość $g = 1$ mm (rys. 1).



Rys. 1. Schemat procesu cięcia na gilotynie – widok ogólny
Fig. 1. Scheme of the guillotining process

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. W rozpatrywanym przypadku przeprowadzona analiza wrażliwości układu na zmiany kształtu i liczby elementów skończonych wykazała, że najlepsze rezultaty otrzymuje się stosując siatkę regularną o polach kwadratowych lub prostokątnych (ciąty 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 (rys. 2).



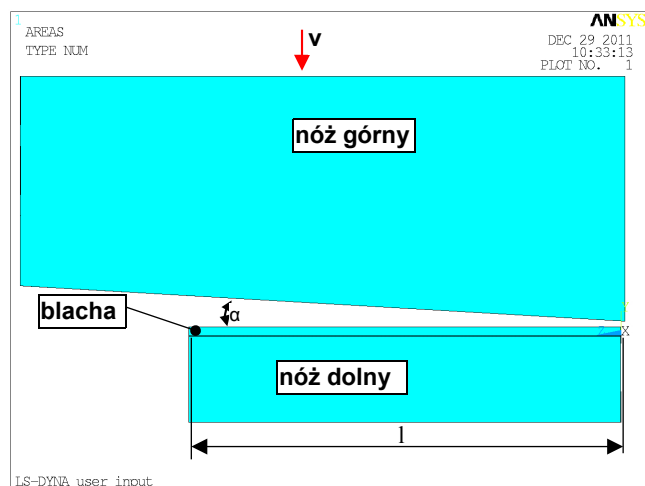
Rys. 2. Budowa 8 węzłowego elementu skończonego typu SOLID 164: a) zastosowanego do dyskretyzacji blachy i noża górnego, b) noża dolnego (element trójkątny)

Fig. 2. View of the 8 node SOLID 164 element type used for: a) upper knife and sheet mesh, b) lower knife mesh (tetrahedral element)

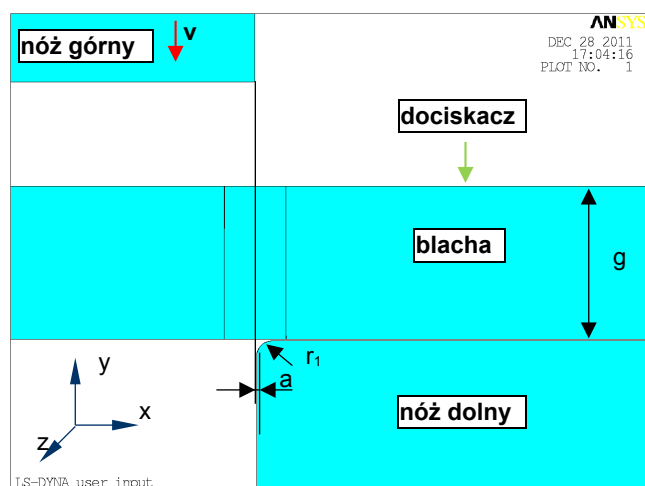
Wymiary elementów skończonych blachy w strefie kontaktu (rys. 5) wynosiły $0,05 \times 0,05$ mm. Symulacje przeprowadzono dla wartości luzu między nożami: $a = 0,01$ mm (rys. 4). Kąt pochylenia krawędzi tnącej noża górnego był stały i wynosił $\alpha = 6^\circ$ (rys. 3).

Prędkość noża górnego była stała i wynosiła $v = 400$ mm/s. Nożowi dolnemu odebrano translacyjne i rotacyjne stopnie swobody. Poprzez odpowiedni dobór warunków brzegowych zainicjowano pracę dociskacza utrzymującego blachę w odpowiedniej pozycji.

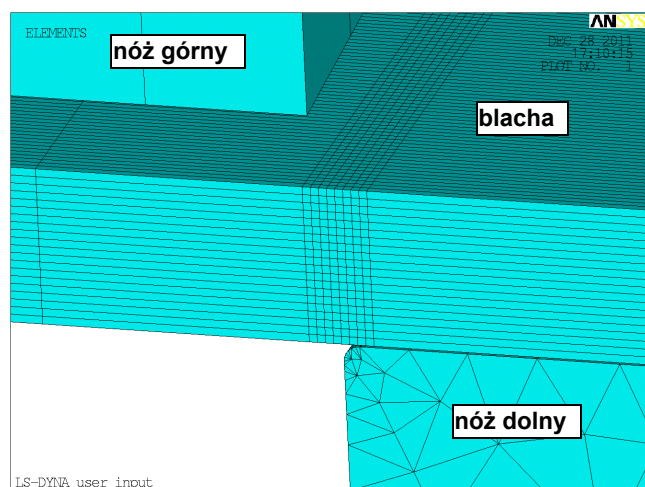
Czasochłonność obliczeń symulacji wynosi około 2 tygodni.



Rys. 3. Schemat procesu cięcia na gilotynie – widok z boku
Fig. 3. Scheme of the guillotining process – side view



Rys. 4. Schemat procesu cięcia na gilotynie – widok z przodu
Fig. 4. Scheme of the guillotining process – front view



Rys. 5. Model dyskretny obiektu (strefa kontaktu)
Fig. 5. Initial mesh of the object (contact zone)

4. Wyniki analizy

Dzięki wykorzystaniu opracowanych aplikacji komputerowych możliwa była analiza zjawisk występujących w niezwykle małych obszarach, przebiegających z super wysokimi prędkościami, trwa-

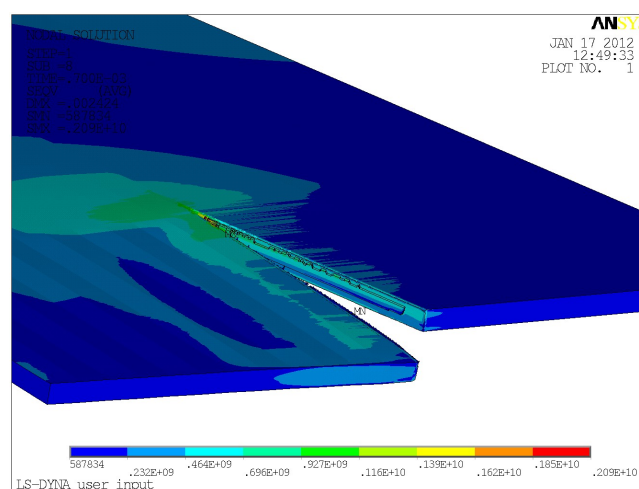
jących bardzo krótko, a decydujących o wynikach procesu cięcia. Do problemów takich należą w szczególności [8, 9]:

- tarcie w obszarach kontaktu narzędzia z przedmiotem, przyleganie i poślizg, odkształcenia, i naprężenia przedmiotu ciętego,
- zmienność właściwości materiału ciętego,
- pękanie materiału.

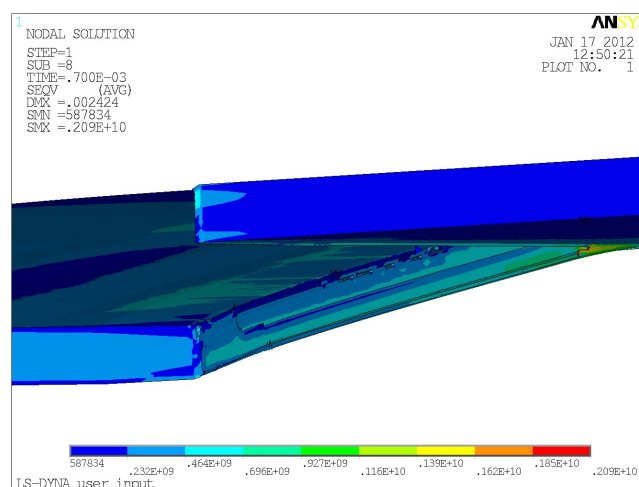
Analiza numeryczna pozwala również na określenie:

- 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.

Wybrane wyniki analizy numerycznej z rozkładami intensywności naprężeń w różnych fazach cięcia przedstawiono na rysunkach (6 ÷ 9 i 11). Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono rozkłady intensywności naprężeń dla zagłębienia narzędzia w materiał wynoszącego $w = 2,4$ mm. Maksymalne wartości naprężeń w tym etapie cięcia wynosiły: 2090 MPa.



Rys. 6. Rozkład intensywności naprężeń dla $w = 2,4$ mm [Pa]
Fig. 6. Stress intensity for $w = 2,4$ mm [Pa]

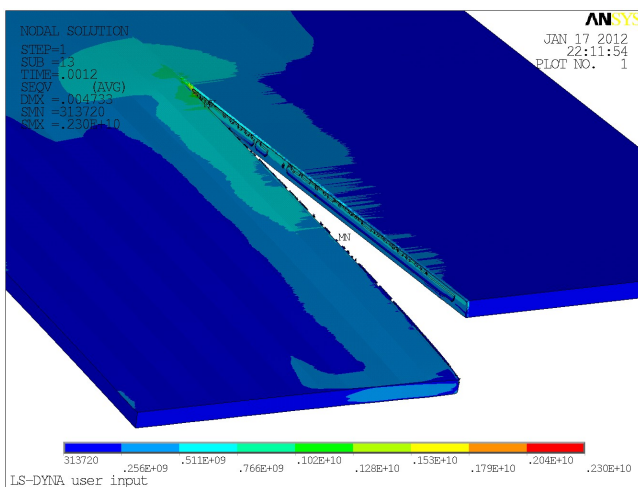


Rys. 7. Rozkład intensywności naprężeń dla $w = 2,4$ mm [Pa] (widok lewej części blachy)
Fig. 7. Stress intensity for $w = 2,4$ mm [Pa] (left side of sheet view)

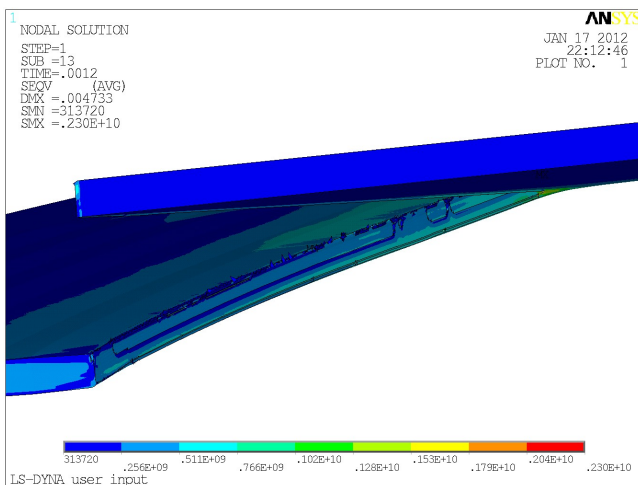
Wskutek nacisku noża górnego na powierzchnię blachy powstaje moment zginający, który powoduje wstępne wybrzuszenie blachy. Wygięcie materiału zależy od kształtu i wymiaru ciętego elementu oraz od wartości luzu. Wygięcie materiału towarzyszące procesowi powoduje zmniejszenie powierzchni styku noży z materiałem. Na zmniejszonej w ten sposób powierzchni styku panują duże naciski powodujące plastyczne odkształcenie i płynięcie materiału. Występuje koncentracja naprężeń w pobliżu krawęd-

dzi 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 i wygięcia. Przy dalszym zagłębieniu narzędzia powstają pęknięcia rozdzielcze materiału (rys. 6 i 7). Umocnienie blachy blisko krawędzi tnących narzędzi jest niekiedy tak duże, że rozdzielenie materiału nie następuje pomiędzy ostrzami, lecz obok w miejscach mniej odkształconych plastycznie, w wyniku, czego tworzą się zadziory (rys. 10). Powstawanie zadzioru zależy od wielu czynników, m. in. takich jak: rodzaj ciętego materiału, wielkość luzu między nożami, zużycie powierzchni czołowych noży. W ogólnym przypadku rozdzielenie materiału w procesie cięcia może nastąpić w wyniku:

- ścinania odpowiadającego pojęciowo zjawisku tzw. złomu poślizgowego,
- pęknięcia poprzedzonego odkształceniami plastycznymi, odpowiadającego pojęciowo zjawisku tzw. złomu rozdzielczego [6].



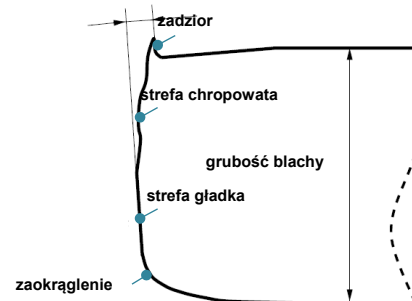
Rys. 8. Rozkład intensywności naprężeń dla $w = 4,7$ mm [Pa]
Fig. 8. Stress intensity for $w = 4,7$ mm [Pa]



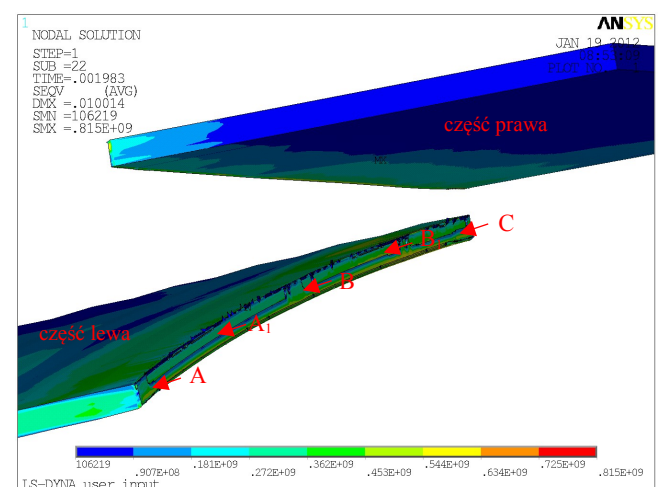
Rys. 9. Rozkład intensywności naprężeń dla $w = 4,7$ mm [Pa] (widok lewej części blachy)
Fig. 9. Stress intensity for $w = 4,7$ mm [Pa] (left side of sheet view)

Miejsce powstania pierwszych pęknięć oraz ich przebieg zależą także od właściwości mechanicznych ciętego materiału, anizotropowej budowy materiału, istnienia wad wewnętrznych (np. wtrąceń niemetalicznych) [5]. Na przebieg pęknięcia w trakcie plastycznego rozdzielania materiału ma wpływ zjawisko zwiększania się innych wad wewnętrznych, zwanych pustkami [2]. Podczas odkształcania materiału następuje ich zarodkowanie, wzrost wielkości oraz łączenie, co w konsekwencji prowadzi do tego, że dwie

partie materiału są połączone tylko wąskimi wiązaniami, a w końcu dochodzi do zerwania tych wiązań. Zjawisko to dotyczy przede wszystkim procesów kształtowania blach z dużym udziałem naprężeń rozciągających, które mają bardzo duży wpływ na utratę spójności materiału. Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono rozkłady intensywności naprężeń dla zagłębienia narzędzia w materiał wynoszącego $w = 4,7$ mm. Maksymalne wartości naprężeń w tym etapie cięcia wynosiły: 2300 MPa. Opracowane algorytmy do modelowania trójwymiarowego 3D (przestrzenne stany naprężeń i odkształceń) umożliwiają analizę zjawisk fizycznych zachodzących podczas i po procesie cięcia w każdym miejscu blachy, w całym przekroju, co nie jest możliwe podczas modelowania dwuwymiarowego 2D (płaski stan odkształceń, przestrzenny stan naprężeń) oraz podczas badań eksperymentalnych. Umożliwia to analizowanie, m.in. zjawisk zachodzących pod powierzchnią przylegania narzędzia (np.: analiza przemieszczeń i odkształceń siatek, analiza poślizgu, wpływu tarcia). Możliwa jest również ocena jakości powierzchni przecięcia na całej długości blachy. Jakość technologiczną powierzchni przecięcia definiuje się na podstawie uzyskanych długości stref na powierzchni przecięcia (rys. 10). Należy dążyć do uzyskania jak najdłuższej strefy gładkiej, minimalnej długości strefy chropowatej, minimalnej wartości głębokości oraz minimalnej wysokości zadziorów. Pomiarów stref dokonano w pięciu miejscach powierzchni przecięcia lewej części blachy oznaczonych na rysunku 11. Odległość punktu A i C od krawędzi bocznych blachy wynosi 1 mm. Punkt B leży pośrodku długości blachy. Odległość punktów A_1 i B_1 od krawędzi bocznych blachy wynosi 12 mm. Uzyskane wyniki przedstawiono na wykresie (rys. 12).



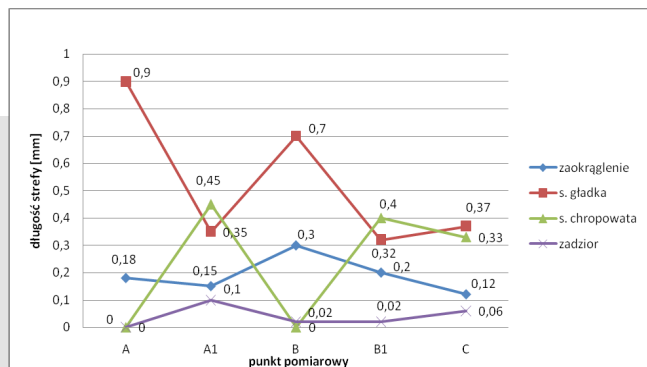
Rys. 10. Przekrój poprzeczny powierzchni przecięcia z oznaczonymi strefami
Fig. 10. Cross-section of cut surface with marked zones



Rys. 11. Widok powierzchni przecięcia lewej strony blachy po całkowitym rozdzielaniu [Pa]
Fig. 11. View of the cut surface of left side sheet after separation [Pa]

Najwyższą jakość powierzchni przecięcia uzyskano w punkcie A, gdzie długość strefy gładkiej wynosiła $s_g = 0,9$ mm, a strefa chropowata nie wystąpiła. W punktach A_1 oraz B_1 jakość po-

wierzchni przecięcia znacznie zmalała. Wartość strefy gładkiej w tych miejscach wynosi około 0,3 mm, strefa chropowata natomiast wynosi około 0,4 mm. Spowodowane jest to występowaniem niekorzystnych stanów naprężeń, które przyczyniają się do rozrywania materiału i obniżenia jakości powierzchni przecięcia. Z badań autora wynika, że stosowanie mniejszych kątów pochylenia krawędzi tnącej noża górnego w granicach $\alpha = 1 \div 3^\circ$ powoduje, że naprężenia te są znacznie mniejsze i defekty w postaci uszczerbień, nie występują. Strefa chropowata nie występuje w punkcie B, gdzie uzyskano wartość strefy gładkiej wynoszącą $s_g = 0,7$ mm. Największą długość strefy zaokrąglenia $s_z = 0,3$ mm uzyskano w punkcie B blachy. Najmniejszą w punkcie C gdzie $s_z = 0,12$ mm.



Rys. 12. Długości poszczególnych stref na powierzchni przecięcia lewej części blachy
Rys. 12. Length of cut zones for the left side of sheet

Największa wysokość zadzioru występuje w punkcie A₁ gdzie $z = 0,1$ mm. Średnia wartość głębokości ze wszystkich punktów pomiarowych wynosi $g_{sr} = 0,04$ mm.

5. Wnioski

Z punktu widzenia mechaniki cięcia blach jest nieliniowym zagadnieniem brzegowo-początkowym. W procesie występują nieliniowości: geometryczna i fizyczna, występują nieliniowe warunki brzegowe w obszarze kontaktu. 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). Opracowana aplikacja umożliwia uwzględnienie wszystkich istotnych czynników wpływających na jakość wyrobu, wydajność procesu cięcia i symulowanie występujących zjawisk dla dowolnego stanu zaawansowania procesu. Jakość uzyskanego wyrobu zależy wielu czynników które w wielu przypadkach powodują uszkodzenia na krawędzi

blach; szczególnie powszechne jest zagięcie ich krawędzi, znaczna chropowatość powierzchni oraz powstawanie zadziorów. Niezwykle istotne jest określenie przyczyn powstawania i sposobów unikania tych defektów. Trudno jest ustalić, który z parametrów jest odpowiedzialny za wywołany defekt. Należy również rozważyć czy problem nie jest uzależniony od większej liczby parametrów i w jakim stopniu wpływają one na wielkość i rodzaj defektu.

Opracowane symulacje dla przestrzennych stanów naprężeń i odkształceń (3D) pozwalają lepiej poznać zjawiska fizyczne zachodzące w strefach kontaktu narzędzia z przedmiotem np.: zjawiska powodujące powstawanie defektów na powierzchni przecięcia oraz ich wpływ na jakość wyrobu i energochłonność procesu. Mogą być wykorzystane do weryfikacji wyników otrzymanych w symulacjach 2D. Możliwe jest prowadzenie bardziej złożonych obliczeń dotyczących wpływu warunków procesu na jakość wyrobu. Uzyskane wyniki mogą być podstawą do opracowania wytycznych doboru warunków cięcia, ze względu na wymaganą jakość technologiczną wyrobu.

W pracy wykazano że jakość powierzchni przecięcia podczas cięcia na gilotylinie nie jest równomierna na całej długości blachy. W związku z czym modelowanie tego procesu dla płaskich stanów odkształceń jest znacznym uproszczeniem, które w dużym stopniu wpływa na zmniejszenie dokładności uzyskiwanych wyników.

6. Literatura

- [1] Anderson T.L.: Fracture mechanics fundamentals and applications. CRC Press, Boston 1991.
- [2] Bednarski T.: Mechanika plastycznego płynięcia w zarysie. PWN, Warszawa 1995.
- [3] Bohdal Ł., Kukielka L.: Modelling and Numerical Analysis of the Cutting Process. Gamm Gdańsk 2009.
- [4] Bohdal Ł.: Modelowanie i analiza numeryczna procesów cięcia blach z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej. Rozprawa doktorska, Koszalin 2009.
- [5] Dzikowski E.S.: Mechanizm pękania poślizgowego w aspekcie dekohezji sterowanej metali. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 1990.
- [6] Ghosh S, Li M, Khadke A.: 3D modeling of shear-slitting process for aluminum alloys. Journal of Materials Processing Technology 167 (2005), s. 91÷102.
- [7] Kaczmarczyk J, Gąsiorek D, Męzyk A.: Analiza numeryczna przy czyn powstawania defektów w ustalonym procesie cięcia płyt na gilotylinach. Modelowanie Inżynierskie 34 (2007), s. 61÷66.
- [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 46 (2010), s. 535÷550.
- [9] Wisselink H, Hue'tink J.: 3D FEM simulation of stationary metal forming processes with applications to slitting and rolling. Journal of Materials Processing Technology 148 (2004), s. 328÷341.

otrzymano / received: 01.03.2012

przyjęto do druku / accepted: 01.05.2012

artykuł recenzowany / revised paper

INFORMACJE

Informacja redakcji dotycząca artykułów współautorskich

W miesięczniku PAK od numeru 06/2010 w nagłówkach artykułów współautorskich wskazywany jest autor korespondujący (Corresponding Author), tj. ten z którym redakcja prowadzi wszelkie uzgodnienia na etapie przygotowania artykułu do publikacji. Jego nazwisko jest wyróżnione drukiem pogrubionym. Takie oznaczenie nie odnosi się do faktycznego udziału współautora w opracowaniu artykułu. Ponadto w nagłówku artykułu podawane są adresy korespondencyjne wszystkich współautorów.

Wprowadzona procedura wynika z międzynarodowych standardów wydawniczych.