

Łukasz BOHDAL

KATEDRA MECHANIKI TECHNICZNEJ I WYTRZYMAŁOŚCI MATERIAŁÓW, POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA

Zastosowanie metody numerycznej i doświadczalnej do analizy procesu cięcia stopów aluminium na nożycach krążkowych

Dr inż. Łukasz BOHDAL



Absolwent Politechniki Koszalińskiej. W roku 2005 otrzymał tytuł magistra inżyniera mechanika o specjalności Inżynierskie Zastosowanie Komputerów. W latach 2005 - 2009 był słuchaczem studiów doktoranckich na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej. W roku 2009 uzyskał tytuł doktora nauk technicznych w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn. Główne zainteresowania naukowe to analiza teoretyczna i eksperymentalna zjawisk fizycznych zachodzących podczas procesów technologicznych w przemyśle.

e-mail: Bohdall@interia.pl

Streszczenie

Przedstawiono metodykę pomiaru i analizy procesu cięcia opartą na analizie numerycznej i pomiarach wizyjnych. Analizy numeryczne zostały przeprowadzone z zastosowaniem metody elementów skończonych w Solwerze LS-DYNA. Metoda doświadczalna opierała się na rejestracji obrazu umożliwiając obserwację procesu w zwolnionym tempie i analizę płynięcia i pęknięcia materiału. Wyniki analiz mogą być wykorzystane do projektowania procesu cięcia na nożycach krążkowych a także być podstawą doboru parametrów procesu w aspekcie jakości technologicznej wyrobu.

Słowa kluczowe: cięcie na nożycach krążkowych, analiza numeryczna, pomiary wizyjne.

Appling of the numerical and experimental methods for shear slitting process of aluminum alloys

Abstract

The paper describe the methods of measurement and analysis of shearing process based on numerical and vision techniques. Numerical analysis were done in LS-DYNA solver with using finite element method. Developed incremental models allow for solving many problems without knowledge about boundary conditions in contact zones. Developed three dimensional model of the shear slitting process allow for complex analysis of stress and strains states during and after process. An experimental method was based on image recording and analysis of physical phenomena and cracking mechanism in slow motion. Using this method an analysis of plastic flow of material, states of displacement, and material deformation was done. Obtained results allow for better understanding of the process and can be used to development of new tools and shear slitting process design.

Keywords: shear slitting, numerical analysis, vision measurements.

1. Wstęp

Współczesne techniki wytwarzania nie są pozbawione problemów związanych z zapewnieniem odpowiedniej jakości wytwarzanych wyrobów przy jednoczesnej minimalizacji kosztów ich produkcji jak i wzroście wydajności procesu cięcia. W tym aspekcie ważnym jest prawidłowe opracowanie i właściwa realizacja procesu technologicznego. Trudnością w analizie 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 wyrobu (zadziory, zagięcie krawędzi, duża chropowatość powierzchni na całej grubości i szerokości arkusza), które uniemożliwiają dalsze wykorzystanie elementu. Powoduje to przyspieszone zużycie narzędzi, wzrost energochłonności procesu oraz zwiększone wydatki finansowe ponoszone na produkcję zwią-

zaną z przecinaniem. Tradycyjne metody analizy procesu cięcia opierają się wykorzystaniu metod numerycznych [1 - 3]. Z uwagi jednak na dużą koncentrację odkształceń zalecane jest weryfikowanie tych wyników metodami doświadczalnymi. Do metod tych można zaliczyć: modelowanie fizyczne z wykorzystaniem przyrostowej metody analizy siatki koordynacyjnej [4], metody analizy stanów przemieszczeń i odkształceń materiału z wykorzystaniem systemów wizyjnych [5], zastosowanie numerycznej obróbki obrazu z zastosowaniem korelacji w pomiarach pól przemieszczeń i odkształceń materiału [6]. Celem pracy jest przedstawianie metodyki pomiaru i analizy procesu cięcia opartej na analizie numerycznej i pomiarach wizyjnych zastosowanej dla procesu cięcia stopu aluminium AA6111-T4 na nożycach krążkowych. Przedstawiona została także procedura weryfikacji obliczeń numerycznych z wykorzystaniem metody doświadczalnej, w której zastosowano zaawansowane techniki wizyjne.

Obróbka stopów aluminium za pomocą cięcia stwarza problemy związane z zapewnieniem stabilności procesu, dokładnością wymiarowo-kształtową, zmianami fizykochemicznymi w strefie cięcia, skłonnością do tworzenia narostu na narzędziach. Aktualnie w literaturze niewiele pozycji poświęconych jest modelowaniu i analizie eksperymentalnej procesu cięcia stopów aluminium na nożycach krążkowych [7, 8]. Z analizy literatury wynika, że specyfika tych materiałów powoduje trudności w opracowaniu uniwersalnych zaleceń dotyczących prawidłowego doboru parametrów procesu np.: luzów między narzędziami, geometrii narzędzi, prędkości cięcia, sposobu smarowania itp., ze względu na pożądaną jakość wyrobu finalnego. Dla poszczególnych metod cięcia i rodzaju stopu niezbędne jest stosowanie odmiennych parametrów cięcia, które dobrane są często na podstawie prób i błędów. Przedstawione w pracy metody mogą być wykorzystane do precyzyjnej analizy procesu w dowolnej chwili jego trwania a także podstawą doboru parametrów technologicznych w aspekcie jakości technologicznej wyrobu.

2. Modelowanie numeryczne

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. Modelując proces cięcia na nożycach krążkowych 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 (cięty arkusz) 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 mieszkane (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) [9, 10].

Modelowanie procesu cięcia nieodłącznie związane jest z koniecznością zdefiniowania momentu i warunków pęknięcia materiału. Zastosowane równanie konstytutywne Johnsona-Cooke'a pozwala określać zależność naprężeń uplastyczniających od odkształceń plastycznych, z uwzględnieniem pęknięcia (zniszczenia) materiału. W literaturze [11] zaprezentowano funkcjonały, które pozwalają na określenie odkształceń plastycznych, które uznajemy za krytyczne, tj. których osiągnięcie możemy interpretować jako początek pęknięcia. Ponadto model uwzględnia także wpływ prędkości odkształceń oraz temperatury na wartości naprężeń uplastyczniających według zależności:

$$\sigma_p = \left[A + B(\varepsilon_{eff}^p)^N \right] \left(1 + C \ln(\dot{\varepsilon}) \right) \left[1 - \left(\frac{T - T_{ot}}{T_{top} - T_{ot}} \right)^M \right] \quad (1)$$

gdzie: σ_p - naprężenia uplastyczniające, ε_{eff}^p - efektywne odkształcenie plastyczne, $\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\varepsilon}_{eff}^p}{\dot{\varepsilon}_0}$ - prędkość odkształceń plastycznych,

T - temperatura materiału ciętego, T_{ot} - temperatura odniesienia, T_{top} - temperatura topnienia materiału ciętego, A, B, C, m, n - współczynniki zależne od własności materiału. Wartości liczbowe współczynników A, B, C, m, n dla materiału ciętego oraz parametry modelu zniszczenia zaczerpnięto z literatury [11]. Dla stopu aluminium AA6111-T4: $A = 324,1$ [MPa], $B = 113,8$ [MPa], $C = 0,002$ [-], $m = 1,34$ [-], $n = 0,42$ [-]. W celu uwzględnienia procesu utraty spójności materiału wykorzystano rozszerzony model kumulacji uszkodzeń, który uwzględnia trójosiowy stan naprężeń w materiale, wpływ prędkości odkształceń oraz temperatury na tzw. ekwiwalentną wielkość plastycznego odkształcenia niszczącego $\bar{\varepsilon}_{eff}^{pl}$:

$$\bar{\varepsilon}_{eff}^{pl} = \left[D_1 + D_2 \exp\left(D_3 \frac{\sigma_m}{\sigma}\right) \right] \left[1 + D_4 \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \right] \left(1 + D_5 \hat{T} \right) \quad (2)$$

gdzie: $D_1 + D_5$ - stałe materiałowe, σ_m - naprężenie średnie. Dla stopu aluminium AA6111-T4: $D_1 = -0,77$; $D_2 = 1,45$; $D_3 = -0,47$; $D_4 = 0$; $D_5 = 1,6$ [11].

Johnson i Cook [12] sformułowali funkcjonal, który wykorzystuje się jako kryterium zniszczenia. Jest to kryterium całkowite, w postaci wyrażonej zależnością:

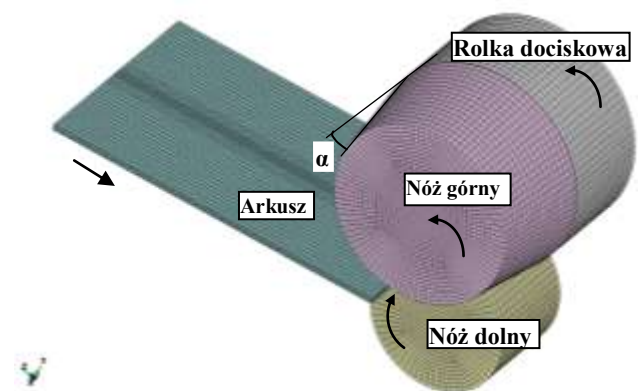
$$D = \sum \frac{A \varepsilon_{eff}^p}{\bar{\varepsilon}_{eff}^{pl}} = 1 \quad (3)$$

gdzie D - funkcjonal zniszczenia. Zależność (3) została zaaplikowana w programie LS-PrePost do identyfikacji momentu zniszczenia materiału.

Model symulacyjny procesu cięcia na nożycach krążkowych opracowane został przy użyciu Solvera LS-DYNA oraz aplikacji LS-PrePost. Badania numeryczne zrealizowano zgodnie z warunkami początkowo-brzegowymi, odwzorowującymi badania na stanowisku eksperymentalnym opisanym w pracy [3].

Opracowano trójwymiarowy model numeryczny uwzględniający rzeczywistą kinematykę procesu: obroty nożyc i rolki dociskowej

wej, ruch arkusza materiału w kierunku poziomym. Symulacje przeprowadzono dla przestrzennych stanów naprężeń i odkształceń w materiale. Opracowana aplikacja do modelowania 3D procesu cięcia na nożycach krążkowych umożliwia uwzględnienie w analizach wielu parametrów technologicznych pomijanych w obliczeniach dwuwymiarowych (2D) (płaski stan odkształceń, przestrzenny stan naprężeń) takich jak: długość linii cięcia, wartość kąta pochylenia krawędzi tnącej nożyca górnej (α), wartości promieni nożyc, sposób mocowania arkusza, sposób docisku w zależności od jego długości i szerokości. Możliwe jest analizowanie przyczyn powstawania defektów arkuszy, które są widoczne tylko w symulacjach 3D oraz opracowanie zaleceń dotyczących zapobiegania ich powstawaniu. Możliwa jest analiza zjawisk fizycznych zachodzących podczas i po procesie cięcia w każdym miejscu arkusza, w całym przekroju, co nie jest możliwe podczas modelowania 2D oraz bardzo często podczas badań eksperymentalnych. Umożliwia to analizowanie, m.in. zjawisk zachodzących pod powierzchnią przylegania narzędzia (np.: analiza przemieszczeń i odkształceń materiału, analiza tarcia i poślizgu, nacisków kontaktowych). Na rysunku 1 przedstawiono model dyskretny procesu cięcia.

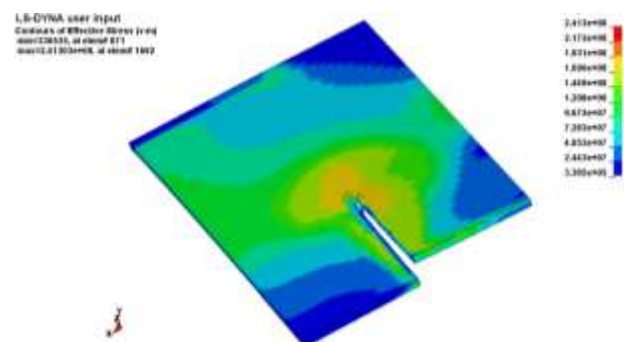


Rys. 1. Model dyskretny procesu cięcia
Fig. 1. Discretized model of cutting process

Prawidłowe zamodelowanie procesu pęknięcia materiału wymagało bardzo precyzyjnego podziału arkusza na elementy skończone, który składał się z 320000 elementów. Prędkość cięcia wynosiła $v = 500$ mm/s, wartość kąta pochylenia krawędzi tnącej nożyca górnej $\alpha = 7^\circ$. Długość linii cięcia $l = 50$ mm. Grubość ciętego arkusza $g = 1,5$ mm.

3. Wyniki analizy

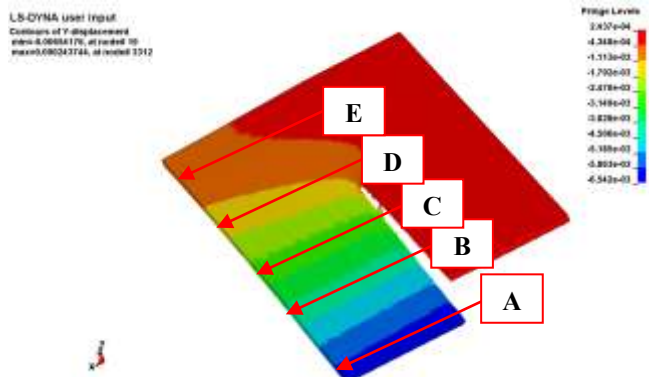
W celu poprawnego zilustrowania uzyskanych wyników przedstawiono je w formie obrazów prezentujących rozkłady: naprężeń zastępczych Hubera – Misesa, przemieszczeń, prędkości odkształceń w różnych krokach czasowych. Na rysunku 2 przedstawiono wyniki naprężeń zastępczych Hubera – Misesa.



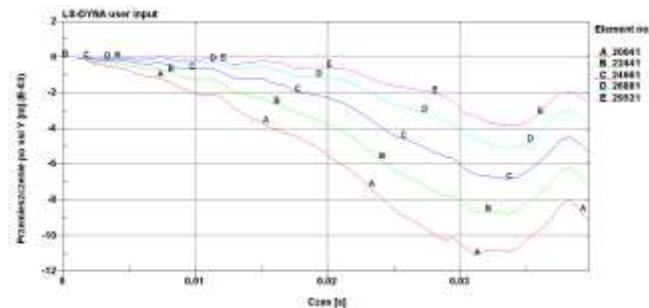
Rys. 2. Mapy naprężeń HMH po pokonaniu drogi przez nożyce wynoszącej $a = 20$ mm [Pa]

Fig. 2. Maps of stresses HMH after tool movement $a = 20$ mm [Pa]

Największe wartości naprężeń występowały w strefie kontaktu nożyc z materiałem ciętym. Przykładowo po pokonaniu drogi przez nożycę wynoszącej $a = 20\text{mm}$ wynosiły około 240 MPa (rys. 2). Na rysunku 3 przedstawiono mapy przemieszczeń poszczególnych fragmentów ciętego arkusza po osi y . Wartości maksymalnych przemieszczeń wystąpiły w przedniej części arkusza odciętego i rosły wraz z ze wzrostem zaawansowania procesu (rys. 4).

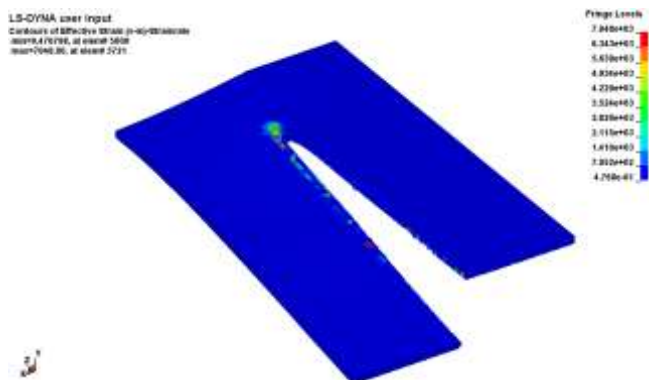


Rys. 3. Mapy przemieszczeń po osi Y po pokonaniu drogi przez nożycę wynoszącej $a = 27\text{ mm}$ [m]
 Fig. 3. Maps of Y displacement after tool movement $a = 27\text{ mm}$ [m]



Rys. 4. Wykres przemieszczeń po osi Y po pokonaniu drogi przez nożycę wynoszącej $a = 27\text{mm}$ [m] wybranych punktów krawędzi części odcinanej
 Fig. 4. Graph of Y displacement of selected edge nodes after tool movement $a = 27\text{ mm}$ [m]

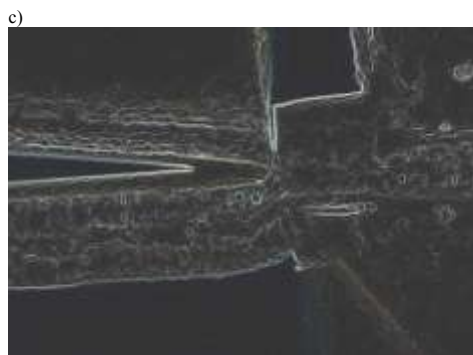
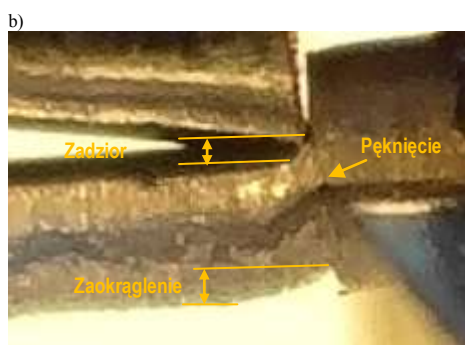
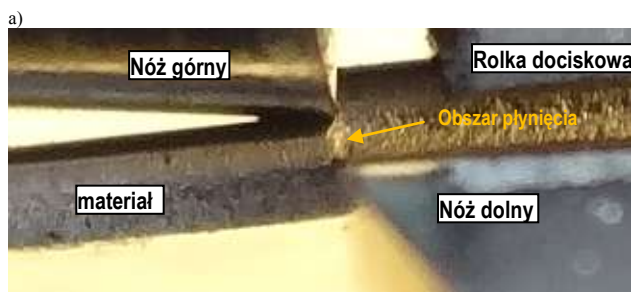
Niewielki wzrost przemieszczeń punktów na krawędzi części odcinanej w końcowej fazie procesu powstał na skutek odsprężynowania materiału. Nastąpiło ono tuż przed całkowitym rozdzieleniem materiału. Zastosowany w symulacji model konstytutywny Johnsona Cook'a umożliwia analizę prędkości odkształceń w dowolnym miejscu ciętego materiału (rys. 5). Największe prędkości odkształceń zachodzą w miejscu rozdzielania materiału przez nożycę.



Rys. 5. Mapy prędkości odkształceń po pokonaniu drogi przez nożycę wynoszącej $a = 36\text{mm}$ [1/s]
 Fig. 5. Maps of strain rate after tool movement $a = 36\text{ mm}$ [1/s]

4. Analiza procesu cięcia z zastosowaniem technik wizyjnych

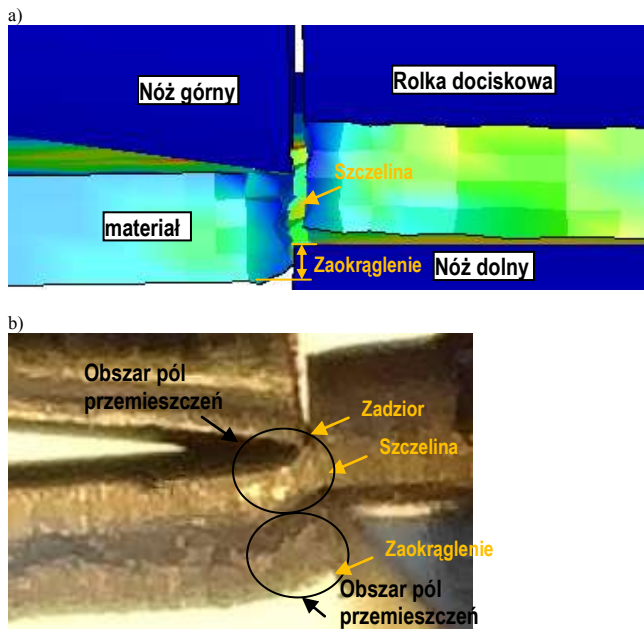
Rejestracja obrazu jest ważnym zagadnieniem w nadzorowaniu procesów wytwarzania. W ten sposób możliwa jest pełna obserwacja tworzenia się defektów wyrobów. Szybka zmienność tych zjawisk w czasie, skłania autorów do wykorzystania techniki szybko-klatkowej [5, 6, 13]. Jednakże uzyskanie odpowiednich efektów wymaga dużego nakładu pracy związanego m.in. z doborem odpowiedniego oświetlenia obiektów, rodzaju kamery i obiektywu. W analizie procesu cięcia na nożycach krążkowych dodatkowym utrudnieniem jest uzyskanie odpowiedniej ostrości i doświetlenia w strefie cięcia, która zmienia swoje położenie wraz z ruchem arkusza. Badania eksperymentalne zostały zrealizowane na stanowisku badawczym opisanym w pracy [3]. Analizie poddano stop aluminium AA6111-T4 o grubości $g = 1,5\text{mm}$. Za pomocą kamery zarejestrowano przebieg procesu cięcia, a następnie dokonano obróbki uzyskanych obrazów za pomocą programu graficznego ImageJ. Obróbka obrazów miała na celu uzyskanie odpowiedniej ich ostrości. Zastosowana metoda stwarza możliwość śledzenia płynięcia i pęknięcia materiału. Możliwa jest rejestracja wyglądu powierzchni powstałej po cięciu w postaci obszarów: błyszczącego i matowego oraz ocena wielkości zaokrąglania i zadzioru na powierzchni cięcia (rys. 6b i c). W dalszych pracach za pomocą pomiaru przemieszczeń pikseli materiału i z wykorzystaniem opcji wykrywania krawędzi możliwe będzie także wyznaczenie wartości odkształceń w strefie cięcia.



Rys. 6. Przykładowe fazy procesu cięcia: a) plastycznego płynięcia, b) pęknięcia, c) pęknięcia z wykrytymi krawędziami obiektów
 Fig. 6. Sample phases during shearing process: a) plastic flow, b) cracking, c) cracking with find edges of the objects

5. Weryfikacja modelu symulacyjnego z zastosowaniem technik wizyjnych

W niniejszej pracy techniki wizyjne zostały wykorzystane do walidacji modeli numerycznych. Na obecną chwilę walidacja modeli symulacyjnych procesów cięcia opiera się głównie na porównywaniu sił cięcia i jakości powierzchni przecięcia uzyskanych w symulacji z eksperymentem [7, 8]. Pomiar wizyjny stwarza możliwość porównywania także momentów inicjacji pęknięcia, wartości odkształceń, kształtów pęknięć w dowolnej chwili trwania procesu, co stwarza możliwość weryfikacji stosowanych modeli zniszczenia bądź kryteriów pęknięcia użytych w symulacjach MES. Na rysunku 7 przedstawiono porównanie geometrii rozdzielnia materiału. W obu przypadkach w danym momencie procesu zaobserwowano całkowite rozdzielenie materiału w miejscu kontaktu z narzędziami. Kształt i szerokość szczeliny w symulacji odbiega nieco od kształtu uzyskanego w eksperymencie. Jest to zależne od wielkości elementów skończonych, które w związku z czasochłonnością obliczeń muszą być większe niż stosowane w symulacjach dwuwymiarowych. Duży wpływ ma także zastosowane kryterium pęknięcia. Mniejsze różnice pomiędzy symulacją a eksperymentem odnotowano w analizie kinematyki płynięcia materiału w sąsiedztwie szczeliny. Do analizy pól przemieszczeń zastosowano funkcję śledzenia w trybie 2D. Funkcja ta umożliwia śledzenie punktów w dwóch wymiarach i przedstawia dwuwymiarowe współrzędne dla każdego śledzonego obiektu. Analiza przesuńnięcia pól przemieszczeń wykazała dużą zgodność (około 80%) symulacji z eksperymentem w dolnej części przekroju blachy co objawia się powstaniem zaokrąglenia (rys. 7). Większe różnice nastąpiły w górnej części materiału (zgodność wynosiła około 60%), gdzie w eksperymencie uzyskano skierowany ku górze zadziór w symulacji natomiast zadziór był mniejszy i skierowany ku dołowi.



Rys. 7. Porównanie wyników symulacji MES i eksperymentu: a) symulacja, b) eksperyment

Fig. 7. Comparison of obtained results: a) FEM simulation, b) experiment

6. Wnioski

Zwiększenie jakości technologicznej wyrobów powoduje konieczność zwiększenia dokładności analiz zjawisk fizycznych towarzyszących procesom obróbki. W procesach cięcia analiza zagadnienia kontaktowego jest problemem podstawowym. Złożony charakter zjawisk zachodzących podczas kontaktu narzędzia

tnącego z przedmiotem oraz trudności w ich badaniu zmuszają do poszukiwania nowych rozwiązań. 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. Analiza obrazu, procesu cięcia za pomocą kamery szybkościowej umożliwia dokładną weryfikację i walidację modeli numerycznych, które w dalszych badaniach umożliwią przeprowadzenie analiz numerycznych w skali – mikro. Wykorzystanie technik rejestracji procesów szybkozmiennych umożliwia analizę plastycznego płynięcia bez przyjmowanych uproszczeń tj. granica plastyczności jest niezależna od szybkości odkształcenia. Przedstawiono nowy sposób walidacji modeli symulacyjnych wykorzystując techniki wizyjne. Oprócz porównywania wartości sił cięcia i jakości krawędzi ciętej możliwe jest śledzenie i analizowanie przemieszczeń materiału, stref przylegania i poślizgu, obserwacja tworzenia się zadziorów, zaokrąglenia krawędzi na materiale rzeczywistym.

7. Literatura

- [1] Faura F., Garcí a A., Estrems M.: Finite element analysis of optimum clearance in the blanking process. *Journal of Materials Processing Technology* 1998, Vol. 80-81., pp. 121-125.
- [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* 2006, Vol. 27., pp. 1134-1138.
- [3] Bohdal Ł., Walczak P.: Eco-modeling of metal sheet cutting with disc shears, *Annual Set The Environment Protection* 2013, Vol. 15., pp. 863-872.
- [4] Bohdal Ł.: Modelowanie i analiza numeryczna procesów cięcia blach z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej. *Rozprawa doktorska*. Koszalin 2009.
- [5] Świłło S.: Experimental apparatus for sheet metal hemming analysis. *Computer Methods in Materials Science*, Vol. 13 (2), 2013, pp. 326-332.
- [6] Świłło S., Czyżewski P.: An experimental and numerical study of material deformation of a blanking process. *Computer Methods in Materials Science*, Vol. 13 (2), 2013, pp. 333-338.
- [7] Wisselink H. Analysis of guillotining and slitting, finite element simulations. Ph.D - Thesis, University of Twente, The Netherlands, 2000.
- [8] 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.
- [9] Bohdal Ł., Kukielka L.: Application of variational and FEM methods to the modelling and numerical analysis of guillotining process for geometrical and physical nonlinearity. *Mechanika* 20(2) 197-204, 2014.
- [10] Kukielka L., Geleta K., Kukielka K.: Modelling and Analysis of Nonlinear Physical Phenomena in the Burnishing Rolling Operation with Electrical Current, *Steel Res. Int. Special Edition: 14th International Conference on Metal Forming*, 2012, pp. 1379-1382.
- [11] Schwer L. E.: Aluminum plate perforation: A comparative case study using Lagrange with erosion, multi-material ALE, and Smooth Particle Hydrodynamics. *7th European LS-DYNA Conference* (2009).
- [12] Kosmol J., Mieszczak W.: Zastosowanie metody elementów skończonych do modelowania procesu wiercenia. *Modelowanie Inżynierskie* 37, s. 169-176, (2009).
- [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).