

Łukasz BOHDAL¹
Katarzyna GOTOWAŁA²

NUMERYCZNA I EKSPERYMENTALNA ANALIZA WPŁYWU GEOMETRII NARZĘDZIA NA ROZKŁAD NAPRĘŻEŃ I ODKSZTAŁCEŃ PODCZAS CIĘCIA STOPÓW ALUMINIUM NA NOŻYCACH KRĄŻKOWYCH

W pracy zbadano wpływ geometrii narzędzia tnącego na przebieg procesu cięcia i jakość uzyskanej powierzchni przecięcia dla stopu aluminium AA6111-T4 kształtowanego na nożycach krążkowych. Przedstawiono sposób modelowania procesu cięcia na nożycach krążkowych metodą elementów skończonych w Solwerze LS-DYNA. Opracowano aplikacje komputerowe umożliwiające m.in. analizę stanów naprężeń i odkształceń występujących podczas i po procesie cięcia, analizę nacisków kontaktowych, ocenę jakości powierzchni przecięcia pod kątem występowania niepożądanych defektów takich jak np.: zadziór. Otrzymane wyniki badań stwarzają możliwość optymalizacji procesu projektowania technologii cięcia w zależności od przyjętych kryteriów np.: jakościowych, trwałościowych.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE TOOL GEOMETRY ON STATES OF STRESSES AND STRAINS DURING SHEAR SLITTING OF ALUMINUM ALLOYS

In this work an influence of tool geometry on cutting process and quality of final product during slitting of AA6111-T4 aluminum alloy is presented. This paper proposes the application of variational and finite element methods for the modeling of this process using LS-DYNA solver. An applications which allows for stress, strains, contact pressure, and quality of cut surface analysis are developed. The simulation results agreed well with experiments in the study, and could be used to both design the slitting process and support the solution of practical problems.

1. WSTĘP

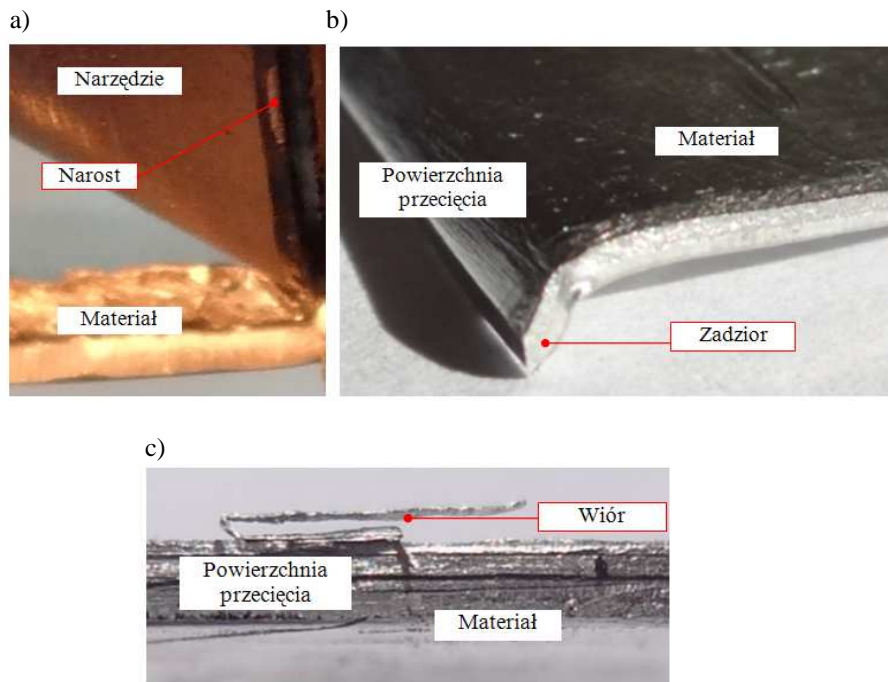
Zastosowanie aluminium i stopów aluminium w wielu gałęziach przemysłu w ostatnich latach uległo znacznemu zwiększeniu. Dotyczy to zwłaszcza przemysłu motoryzacyjnego, gdzie masa wytwarzanych części w dużym stopniu decyduje o efektach ekonomicznych eksploatacji pojazdów [1]. Materiały te są stosowane na elementy poszycia nadwozi, mniej na jego szkielet. Wykonuje się z nich najczęściej odedymowalne części (drzwi, błotniki, pokrywy) oraz inne drobniejsze elementy. Stosowanie tych materiałów umożliwia zmniejszenie masy o ok. 30÷50%, przy zapewnieniu zbliżonych do stali właściwości konstrukcyjnych, mają też dobrą energochłonność i odporność na korozję. Cięcie stopów aluminium na nożycach krążkowych znajduje szerokie zastosowanie w procesach produkcyjnych. Nie jest jednak pozbawione problemów do rozwiązania. Można do nich zaliczyć:

- problemy związane z zapewnieniem stabilności procesu (spowodowane niejednorodnością materiału, występowaniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej),
- problemy związane z dokładnością wymiarowo-kształtową wyrobów,
- zmianami fizykochemicznymi w strefie cięcia na skutek silnych deformacji,
- problemy związane ze skłonnością do tworzenia narostu na narzędziach powodującego zmiany trajektorii pęknięcia (rys. 1a).

Wymienione czynniki przyczyniają się między innymi do znacznego zużycia się narzędzi do cięcia, a także obniżenia jakości powierzchni przecięcia i wzrostu energochłonności procesu. Niska jakość powierzchni przecięcia cechuje się występowaniem defektów np.: zadziórów (ang. burrs) (rys. 1b), wiórów (ang. slivers) (rys. 1c), zagięć krawędzi oraz występowaniem strefy pęknięcia na całej grubości i szerokości arkusza.

¹ Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny; 75-620 Koszalin; ul. Raclawicka 15/17; e-mail: lukasz.bohdal@tu.koszalin.pl.

² Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny; 75-620 Koszalin; ul. Raclawicka 15/17; tel: (0-94) 3478248, e-mail: katarzyna.gotowala@tu.koszalin.pl



Rys. 1. Defekty napotymane podczas cięcia stopów aluminium: a) tworzenie narostu na narzędziu, b) występowanie zadzioru na powierzchni przecięcia, c) występowanie wióra na powierzchni przecięcia

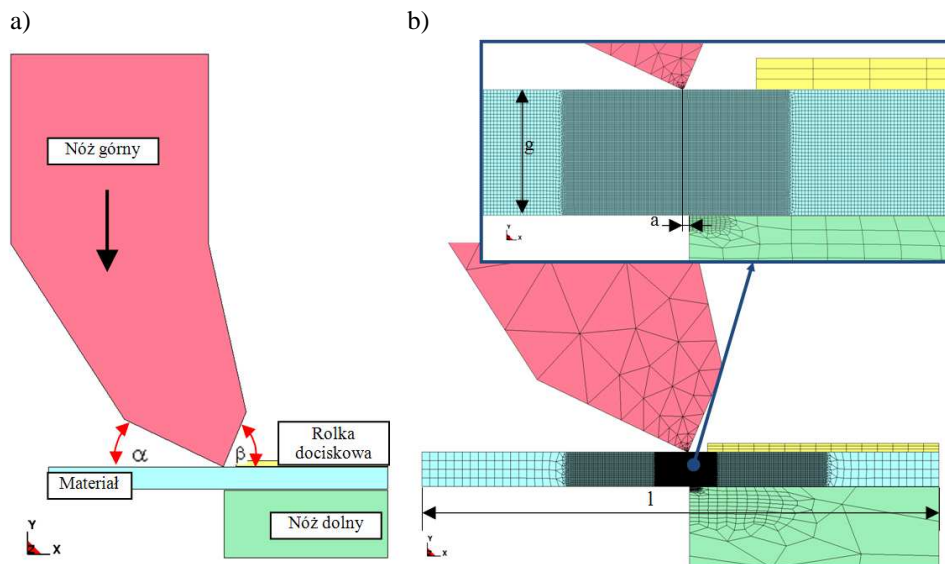
Obecnie większość publikacji, w których autorzy analizują proces cięcia stopów aluminium dotyczy procesów wykrawania tych materiałów [2-4, 12, 13] i cięcia na gilotynie [5-7, 14]. Natomiast tylko kilka pozycji dotyczy cięcia na nożycach krążkowych [8-11]. Z analizy literatury wynika, że specyfika tych 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. Taki stan wymusza konieczność prowadzenia badań, których wyniki pozwolą zoptymalizować projektowany proces technologiczny, skrócić cykl projektowania, zmniejszyć koszty produkcji, oraz zwiększyć jakość wyrobu. Są to zagadnienia niezbędne dla właściwego projektowania i sterowania tym złożonym procesem obróbki plastycznej.

Celem niniejszej pracy jest zbadanie wpływu geometrii narzędzia tnącego na przebieg procesu cięcia nożycami krążkowymi i jakość uzyskanej powierzchni przecięcia części ze stopu aluminium AA6111-T4. Stop aluminium AA6111-T4 jest stosowany głównie do produkcji samochodowych paneli karoseryjnych. Głównym problemem napotykanym podczas jego cięcia na gilotynie jest bardzo częste formowanie się wiórów i zadziorów na powierzchni przecięcia [6, 7]. Wiedza na temat możliwości kształtowania tego materiału za pomocą innych technik cięcia jest niewielka. Aktualnie w literaturze jest znikoma liczba pozycji opisujących zachowanie się tego materiału podczas cięcia na nożycach krążkowych. Brakuje także modeli symulacyjnych, które mogą być cennym narzędziem umożliwiającym rozszerzenie przedziału czasu i poznanie zjawisk fizycznych, których analiza za pomocą badań eksperymentalnych jest utrudniona lub niemożliwa.

2. MODEL SYMULACYJNY PROCESU CIĘCIA

Modelowanie matematyczne procesu cięcia na nożycach krążkowych opracowane zostało przy użyciu Solvera LS-DYNA oraz aplikacji LS-PrePost według procedury szczegółowo opisanej w [15, 16]. Badania numeryczne zrealizowano zgodnie z warunkami początkowo-brzegowymi, odwzorowującymi badania na stanowisku eksperymentalnym [15]. Symulacje przeprowadzono dla przestrzennych stanów naprężeń i płaskich stanów odkształceń w materiale. Analizą objęto stop aluminium o grubości $g = 1$ mm i szerokości $l = 15$ mm. Prędkość narzędzia tnącego wynosiła: $v = 150$ mm/s. Luz między narzędziami wynosił $a = 0,05$ mm. Odebrano translacyjne oraz rotacyjne stopnie swobody dla noża dolnego i rolki dociskowej. Przedmiot dyskretyzowano elementami 4 węzłowymi typu PLANE 162. Siatkę elementów skończonych w celu uzyskania dokładniejszych wyników zagęszczono w obszarze kontaktu. 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. Optymalna liczba elementów skończonych

ciętego elementu wynosiła 40000. Obszar kontaktu zamodelowano za pomocą modułu SINGLE SURFACE – AUTO 2D. W symulacjach przyjęto stałe współczynniki tarcia statycznego $\mu_s = 0,08$ i kinetycznego $\mu_d = 0,009$. Wartości te przyjęto, jako stałe dla każdej symulacji. Natomiast zamieniano wartości kątów α i β dla noża górnego uzyskując w ten sposób różne warianty jego geometrii. Według literatury [10] w warunkach przemysłowych do cięcia stopów aluminium stosuje się wartości kątów α dobierając je z przedziału $\alpha \in [16^\circ; 25^\circ]$, kąt β natomiast jest stały i najczęściej wynosi $\beta = 75^\circ$. W związku z tym w niniejszej pracy w celu dokładnej analizy problemu rozszerzono zakres kątów α , który wynosił $\alpha \in [10^\circ; 25^\circ]$ oraz przyjęto zmienny kąt $\beta \in [60^\circ; 75^\circ]$. Plan badań opracowano wykorzystując program E-Planner [15, 16].



Rys. 2. Model symulacyjny procesu cięcia: a) widok ogólny, b) model po dyskretyzacji

Modelowanie procesu cięcia nieodłącznie związane jest z koniecznością zdefiniowania momentu i warunków pęknięcia materiału. Zastosowane równanie konstytutywne Johnson'a – Cooke'a pozwala określać zależność naprężeń uplastyczniających od odkształceń plastycznych, z uwzględnieniem pęknięcia (zniszczenia) materiału. W literaturze [18] 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:

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

gdzie:

σ_p – naprężenia uplastyczniające,

ϵ_{eff}^p – efektywne odkształcenie plastyczne,

$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_{eff}^p / \dot{\epsilon}_0$ – 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 [18]. 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 $\bar{\epsilon}_{eff}^p$:

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

gdzie:

$D_1 \div D_5$ – stałe materiałowe (dla stopu aluminium AA6111: $D_1 = -0,77$; $D_2 = 1,45$; $D_3 = -0,47$;

$D_4 = 0$; $D_5 = 1,6$ [18],

σ_m – naprężenie średnie.

Johnson i Cook sformułowali funkcjonal, który wykorzystuje się jako kryterium zniszczenia. Jest to kryterium całkowite, które w formie sumacyjnej ma postać:

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_{eff}^p}{\bar{\epsilon}_{eff}^p} = 1, \quad (3)$$

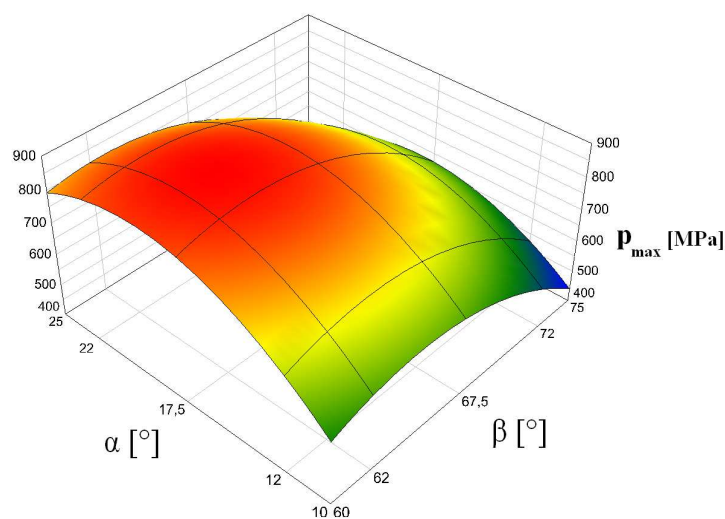
gdzie: D – funkcjonal zniszczenia.

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

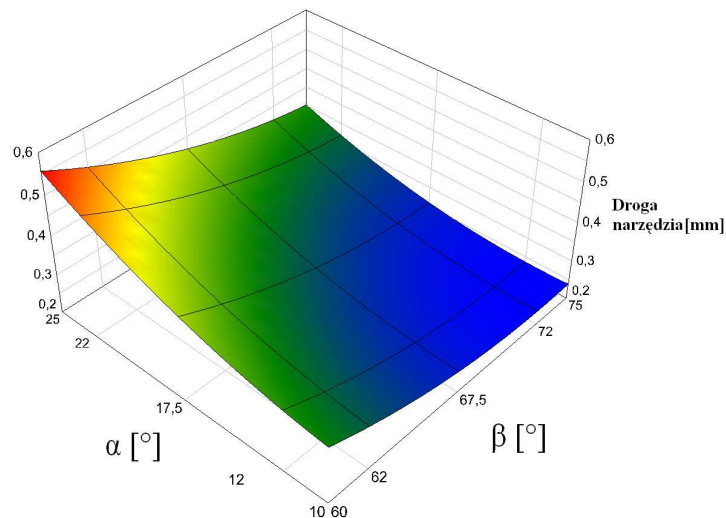
3. WYNIKI BADAŃ

Otrzymane wyniki przeprowadzonych analiz numerycznych zostały przedstawione w formie graficznej na rysunkach 3-7. Rysunek 3 przedstawia wpływ analizowanych wartości kątów α i β narzędzia na wartości maksymalnych nacisków kontaktowych p_{max} w strefie cięcia. Największe wartości nacisków kontaktowych wystąpiły podczas cięcia narzędziem o kątach $\alpha = 17^\circ$ i $\beta = 67^\circ$ czyli mieszczących się w połowie analizowanych zakresów i wynosiły około $p_{max} = 850 \text{ MPa}$. Znaczny spadek wartości nacisków kontaktowych uzyskano stosując narzędzie o geometrii gdzie: $\alpha = 10^\circ$ oraz $\beta = 60^\circ$ ($p_{max} = 400 \text{ MPa}$). Zbliżone wartości nacisków kontaktowych uzyskano w przypadku cięcia, gdy $\alpha = 10^\circ$, $\beta = 75^\circ$.

Na rysunku 4 przedstawiono wpływ analizowanych zmiennych na moment całkowitego rozdzielenia materiału, które miało miejsce dla określonej drogi pokonanej przez narzędzie. Uzyskane wyniki wykazały, że wartości kątów α i β mają istotny wpływ na moment inicjacji pęknięcia oraz na jego przebieg. Szczególnie dotyczy to kąta α . Niewielka jego wartość powodowała, że zjawisko pęknięcia występowało szybciej przy stosunkowo niewielkiej drodze pokonanej przez narzędzie w głąb materiału (około $0,2 \div 0,3 \text{ mm}$).

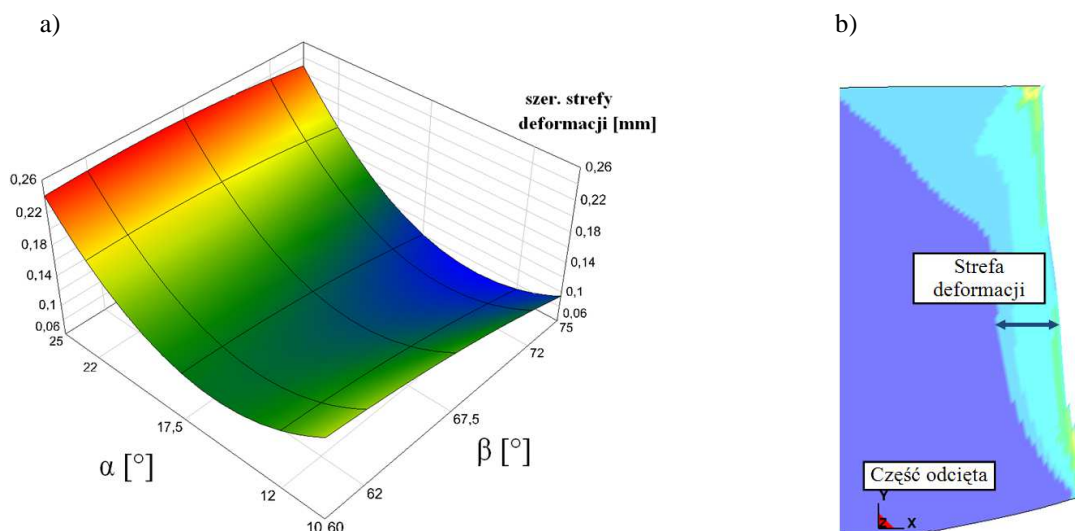


Rys. 3. Wpływ kątów α i β na wartości maksymalnych nacisków kontaktowych w strefie cięcia

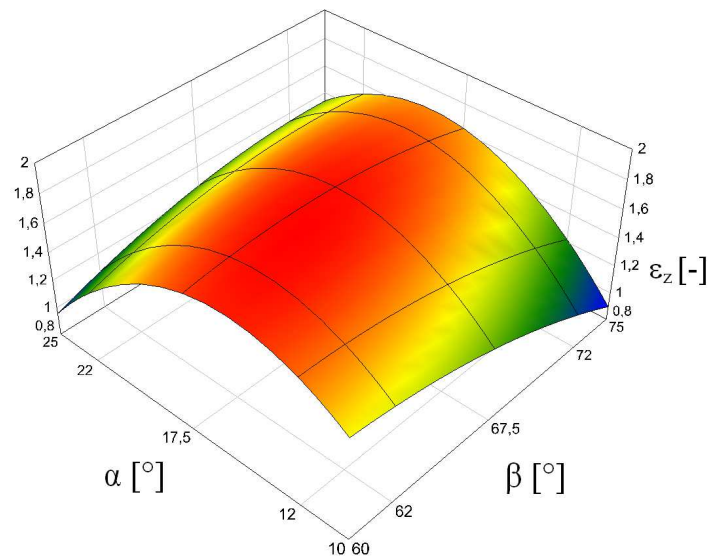


Rys. 4. Wpływ kątów α i β na moment całkowitego rozdzielania określanego na podstawie drogi pokonanej przez narzędzie w głąb materiału

Wzrost kąta α powodował konieczność pokonania większej drogi przez narzędzie w celu rozdzielania materiału (dla $\alpha = 25^\circ$ wartość drogi wynosiła około 0,55 mm). W procesach cięcia jakość uzyskanego wyrobu można określić na podstawie pomiaru szerokości strefy odkształconej na powierzchni przecięcia, wartości maksymalnego odkształcenia zastępczego w strefie cięcia oraz wysokości uzyskanego zadzioru. Badania wykazały znaczący wpływ wartości kąta α narzędzia na szerokość strefy odkształconej mierzonej od ciętej krawędzi w głąb materiału (rys. 5b). Niewielką szerokość strefy deformacji (około 0,1 mm) uzyskano w przypadku cięcia narzędziem o wartości kąta $\alpha = 17^\circ$. Jednak dla tej wartości w strefie cięcia występowały duże odkształcenia zastępcze. Ich maksymalne wartości wynosiły około $\varepsilon_z = 1,7$ (rys. 6). Zarówno zwiększenie kąta α jak i jego zmniejszenie poniżej wartości $\alpha = 17^\circ$ powodowało wzrost szerokości strefy odkształconej dla każdego kąta β mieszczącego się w przedziale $\beta \in [60^\circ; 75^\circ]$. Szczególnie dotyczy to części odciętej materiału. Kąt β decydował głównie o wartości strefy odkształconej części zamocowanej materiału. Najbardziej niekorzystne warunki wystąpiły podczas cięcia narzędziem o kącie $\alpha = 25^\circ$. Szerokość strefy deformacji wynosiła około 0,25 mm, czyli jedną czwartą grubości ciętego elementu.

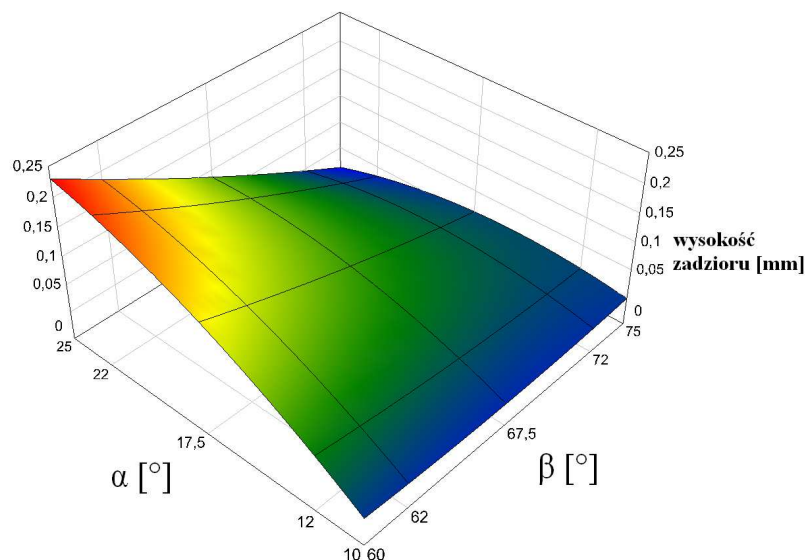


Rys. 5. Wpływ kątów α i β na szerokość strefy deformacji części odciętej materiału



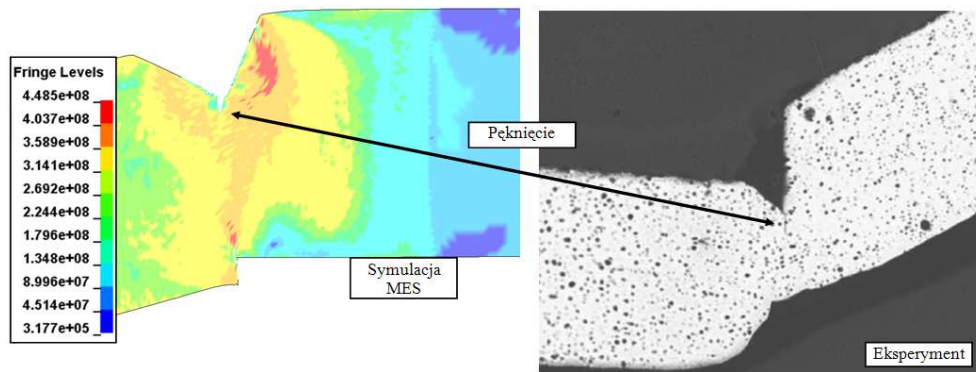
Rys. 6. Wpływ kątów α i β na wartość maksymalnego odkształcenia zastępczego w strefie cięcia

Na rysunku 7 przedstawiono wpływ analizowanych parametrów na wysokość zadzioru na powierzchni przecięcia. Jakość ciętej krawędzi ma ogromne znaczenie podczas kolejnych faz produkcji elementów wykonanych ze stopów aluminium np.: nadwozi samochodowych. Zadziory na powierzchni przecięcia powodują m.in. trudności w wykonaniu operacji procesów łączenia (np.: spawania laserowego, zgrzewania punktowego). Ponadto podczas składowania paneli karoseryjnych mogą powodować zarysowania sąsiadujących elementów. Przeprowadzone badania wykazały znaczący wpływ kąta α narzędzia na wysokość uzyskanego zadzioru, gdy wartość kąta β mieściła się w przedziale $\beta \in [60^\circ; 75^\circ]$. Dla tych przypadków wraz ze wzrostem wartości kąta α następował wzrost wysokości zadziorów (rys. 7). Gdy kąt β był większy od wartości 70° zadziór na powierzchni przecięcia nie występował dla wszystkich przypadków wartości kąta α .



Rys. 7. Wpływ kątów α i β na wysokość zadzioru

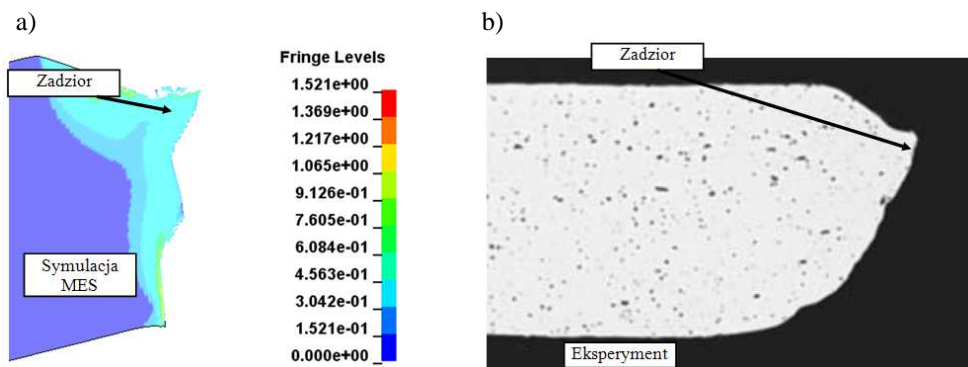
Weryfikacji uzyskanych wyników badań dokonano w oparciu o rezultaty badań eksperymentalnych przedstawionych w pracy [10]. Na rysunku 8 przedstawiono porównanie fazy plastycznego płynięcia materiału symulacji z eksperymentem dla przypadku, gdy $\alpha = 25^\circ$, $\beta = 67^\circ$.



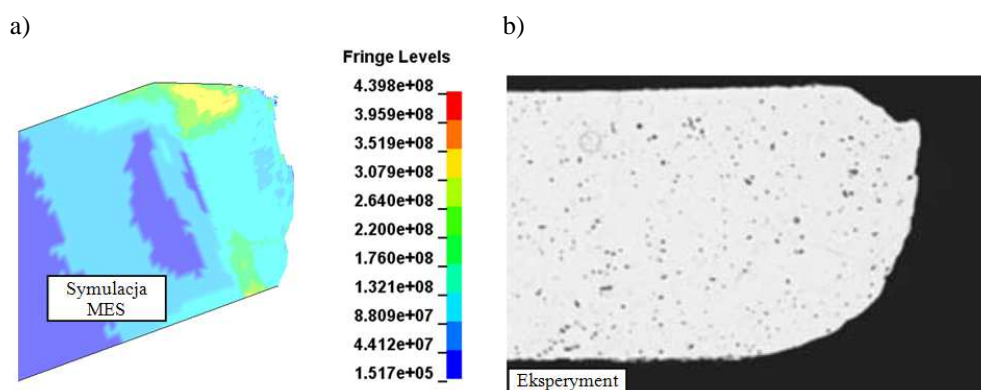
Rys. 8. Porównanie wyników symulacji (rozkład intensywności naprężeń [Pa]) z eksperymentem [10] dla $\alpha = 25^\circ$, $\beta = 67^\circ$

W symulacji zaobserwowano koncentrację naprężeń krytycznych w sąsiedztwie krawędzi narzędzia opisanej kątem β . Pod narzędziem można zaobserwować początek pęknięcia materiału. Uzyskane wyniki charakteryzujące kinematykę płynięcia w strefie kontaktu narzędzi z materiałem ciętym są do siebie zbliżone. W symulacji nie zaobserwowano natomiast tworzenia się charakterystycznego zaokrąglenia powierzchni przecięcia. Jest to związane z zastosowanym kryterium pęknięcia, modelem materiałowym oraz charakterem modelu (2D).

Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono porównanie kształtu i wielkości zadzioru na powierzchni przecięcia przeprowadzonych symulacji z eksperymentem. Porównując wyniki eksperymentu i symulacji dla przypadku gdy $\alpha = 17^\circ$, $\beta = 60^\circ$ można zaobserwować ostry zadarty ku górze zadziór utrudniający dalszą obróbkę arkusza aluminium (rys. 9). Dla przypadku gdy $\alpha = 12^\circ$, $\beta = 62^\circ$ zadziór jest mniejszy i mniej ostry (rys. 10).



Rys. 9. Porównanie kształtu zadzioru na powierzchni przecięcia: a) symulacja MES (rozkład intensywności odkształceń [-]), b) eksperyment [10] ($\alpha = 17^\circ$, $\beta = 60^\circ$)



Rys. 10. Porównanie kształtu zadzioru na powierzchni przecięcia: a) symulacja MES (rozkład intensywności naprężeń [Pa]), b) eksperyment [10] ($\alpha = 12^\circ$, $\beta = 62^\circ$)

4. WNIOSKI

1. Podczas procesów cięcia nadal występują liczne problemy do rozwiązania. Dotyczy to w szczególności procesów obróbki materiałów trudnoobrabialnych, do jakich zalicza się stopy aluminium. Głównym problemem jest to, że dla poszczególnych metod cięcia jak i rodzaju kształtowanego stopu niezbędne jest stosowanie odmiennych parametrów procesu, których prawidłowy dobór stwarza problemy ze względu na niewielką liczbę publikacji związanych z tematem. Szczególnie dotyczy to operacji cięcia na nożycach krążkowych. Proces ten charakteryzuje się złożoną kinematyką i nie zawsze stosowanie parametrów obróbki odpowiednich dla cięcia innymi technikami pozwala uzyskiwać wyroby o wysokiej jakości.
2. W pracy zbadano wpływ geometrii narzędzia na charakterystyczne cechy wyrobu finalnego, który powinien charakteryzować się niewielkim stopniem deformacji w sąsiedztwie ciętej krawędzi, a także brakiem występowania zadziorów na powierzchni przecięcia. Istotne jest również zmniejszenie nacisków kontaktowych i sił cięcia w czasie trwania procesu. Według dostępnej literatury narzędzie tnące, którym jest nóż krążkowy jest charakteryzowane za pomocą wartości kątów α i β . Uzyskane rezultaty wykazały znaczący wpływ kąta α na mechanizm rozdzielania i jakość wyrobu finalnego. Wpływa on znacząco na zachowanie się części odcinanej materiału i jakość powierzchni przecięcia. Kąt β natomiast w bardzo dużym stopniu wpływa na stan naprężeń w części zamocowanej materiału, która jest dociskana do noża dolnego rolką poliuretanową. Przeprowadzone badania wykazały, że w pewnych przypadkach stosowanie stałego kąta β jest nieodpowiednie powoduje bowiem przy pewnych zakresach wartości kąta α obniżenie jakości uzyskanego wyrobu.
3. W celu dokładniejszej analizy istoty problemu planuje się przeprowadzić dodatkowe badania z uwzględnieniem dodatkowych parametrów technologicznych procesu np.: zmienna prędkość cięcia, zmienne warunki tarcia, geometrie nożyc uwzględniające ich średnice i obroty (model 3D). W badaniach zostanie wykorzystana opracowana procedura modelowania MES, która może być przydatna do analizy przemischceń i odkształceń materiału, analizy tarcia i poślizgu, nacisków kontaktowych, oraz wpływu wybranych parametrów technologicznych procesu na jakość uzyskanego wyrobu.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Idzior M.: *Kierunki zmian materiałowych w motoryzacji w świetle wymogów ekologii*. Motrol nr 9, 2007, s. 72÷87.
- [2] Thipprakmas S.: *Application of Taguchi technique to investigation of geometry and position of V-ring indenter in fine-blanking process*. Materials and Design 31, 2010, pp. 2496÷2500.
- [3] Kwak T.S., Kim Y.J., Bae W.B.: *Finite element analysis on the effect of die clearance on shear planes in fine blanking*. Journal of Materials Processing Technology 130-131, 2002, pp. 462÷468.
- [4] 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 27, 2006, pp. 1134÷1138.
- [5] Hilditch T.B., Hodgson P.D.: *Development of the sheared edge in the trimming of steel and light metal sheet. Part 1 - Experimental observations*. Journal of Materials Processing Technology 169, 2005, pp. 184÷191.
- [6] Golovashchenko S.F.: *A study on trimming of aluminum autobody sheet and development of a new robust process eliminating burrs and slivers*. International Journal of Mechanical Sciences. Tom 48, 2006, pp. 1384÷1400.
- [7] Kaczmarczyk J., Gąsiorek D., Mężyk A.: *Analiza numeryczna przyczyn powstawania defektów w ustalonym procesie cięcia płyt na gilotynach*. Modelowanie Inżynierskie 34, 2007, s. 61÷66.
- [8] Ghosh S., Li M., Khadke A.: *3D modeling of shear-slitting process for aluminum alloys*. Journal of Materials Processing Technology 167, 2005, pp. 91÷102.
- [9] Liu C., Lu H., Huang Y.: *Dynamic steady-state stress field in a web during slitting*, ASME Journal Applied Mechanics 72, 2005, pp. 157÷164.
- [10] Lu H., Ma J., Li M.: *Edge trimming of aluminum sheets using shear slitting at a rake angle*. Transactions of the ASME, 128, 2006, pp. 866÷873.
- [11] Ma J., Lu H., Li M., Wang B.: *Burr height in shear slitting of aluminum webs*, ASME Journal Manufacturing Science Engineering 128, 2006, pp. 46÷55.
- [12] Samuel M.: *FEM simulations and experimental analysis of parameters of influence in the blanking process*. Journal of Materials Processing Technology 84, 1998, pp. 97÷106.
- [13] Hambli R., Reszka M.: *Fracture criteria identification using an inverse technique method and blanking experiment*. International Journal of Mechanical Science 44, 2002, pp. 1349÷1361.
- [14] Li M.: *An experimental investigation on cut surface and burr in trimming aluminum autobody sheet*. International Journal of Mechanical Sciences 42, 2000, pp. 889÷906.

- [15] Bohdal Ł.: *Modelowanie i analiza numeryczna procesów cięcia blach z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej*. Rozprawa doktorska. Koszalin 2009.
- [16] Kukielka S.: *Experiment Planner 1.0 – komputerowy program planowania eksperymentów rozpoznawczych i właściwych oraz identyfikacji i analizy modelu matematycznego obiektu badań*. Praca magisterska, Politechnika Koszalińska WM, Koszalin, 2002.
- [17] Bohdal Ł., Kukielka L.: *Modelowanie i analiza numeryczna procesu cięcia blach nożami krążkowymi z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej*. *Mechanik* 84, nr 8-9, 2011, s. 712÷716.
- [18] 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.