



Ekomodelowanie procesu cięcia blach nożycami krążkowymi

Łukasz Bohdal, Paweł Walczak
Politechnika Koszalińska

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. W XXI wieku przygotowując produkcję nowych wyrobów należy stosować zasadę „*ekoprojektowania produktu*”, która polega na ograniczeniu szkodliwego oddziaływania na otaczające środowisko naturalne człowieka. Dominującą rolę w tym działaniu odgrywa racjonalne wykorzystanie energii i ochrona środowiska. W tym aspekcie ważnym jest prawidłowe opracowanie i właściwa realizacja procesu technologicznego. Niniejsze opracowanie dotyczy doskonalenia powszechnie stosowanego procesu technologicznego, jakim jest cięcie blach, przez co bezpośrednio przyczynia się do ograniczenia negatywnego wpływu tego procesu na otaczające środowisko.

W procesach cięcia blach, aby uzyskać wyrób o pożądanej jakości powierzchni przecięcia i odpowiedniej dokładności wymiarowo–kształtowej steruje się parametrami procesu. Do wielkości tych należą przede wszystkim parametry:

- a) geometryczne – mające wpływ na stan naprężeń w ciętym materiale, związane z konstrukcją, budową i kształtem narzędzi tnących, wartością luzu między narzędziami tnącymi, stosowaniem dociskaczy,
- b) technologiczne i materiałowe – zwłaszcza te mające wpływ na właściwości plastyczne materiału i odporność na pęknięcie.

Z praktycznego punktu widzenia największe możliwości sterowania procesem mogą zapewnić odpowiednio dobrane parametry geometryczne, które mają bardzo duży wpływ na stan naprężeń, odkształceń w ciętym przedmiocie oraz na dekohezję materiału. Dobór właściwych parametrów technologicznych umożliwia uzyskanie wymaganej powierzchni przecięcia, bez konieczności stosowania dodatkowych operacji obróbkowych. Luz między ostrzami jest podstawowym parametrem, który znacząco wpływa na jakość uzyskanego wyrobu, energochłonność procesu oraz ilość generowanego odpadu. Dostępna literatura związana z tematem skupia się głównie na analizie wpływu luzu na przebieg i jakość powierzchni przecięcia bazując na procesach wykrawania. Natomiast brak jest publikacji, które charakteryzują istotę problemu podczas cięcia na nożycach. W pracy [2] przedstawiono metodologię doboru optymalnego luzu w zależności od rodzaju wykrawanego materiału oraz grubości materiału, wykorzystując metodę elementów skończonych oraz kryteria pęknięcia *Crookroft, Latham*. W pracy [3] zbadano wpływ promienia zaokrąglenia stempla i matrycy, wartości luzu oraz rodzaju materiału na jakość uzyskanego wyrobu wykorzystując kryterium pęknięcia *Gurson* oraz metody numeryczne. Autorzy pracy [4] przedstawili optymalizację procesu wykrawania. W pracy [5] przeprowadzono analizę eksperymentalną wpływu luzu na formowanie się defektów na powierzchni przecięcia wykrawanych blach aluminiowych. Autorzy przedstawionych prac wykazują, iż w celu zmniejszenia siły wykrawania wartość luzu powinna wynosić 10% grubości blachy natomiast, aby zmniejszyć długość strefy chropowatej na powierzchni przecięcia wartość luzu powinna wynosić 5% grubości blachy. Maksymalne wartości luzu stosowane w procesach wykrawania wynoszą 25% grubości ciętego materiału. Wraz ze wzrostem luzu zaobserwowano wzrost strefy zaokrąglenia na powierzchni przecięcia, oraz spadek długości strefy gładkiej.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie sposobu modelowania procesu cięcia blach na nożycach krążkowych z uwzględnieniem nieliniowości występujących w tym procesie oraz analiza wpływu luzu między ostrzami tnącymi na stany naprężeń i odkształceń w materiale ciętym i na jakość technologiczną uzyskanego wyrobu. Do tego celu wykorzystano metodę elementów skończonych, sformułowanie wariacyjne w uaktualnionym opisie Lagrange'a oraz adekwatne miary opisu przyrostów stanów odkształceń i naprężeń. Badania zostały przeprowadzone dla

różnych wariantów wartości luzów. Uzyskane wyniki zweryfikowano eksperymentalnie uzyskując dużą zgodność symulacji z eksperymentem.

2. Modelowanie procesu cięcia

Jak podano w rozdziale 1 niewiele jest prac poświęconych modelowaniu procesu cięcia blach przy użyciu nożyc. Jest to zagadnienie jeszcze stosunkowo mało poznane, co wymaga prowadzenia dalszych badań w tym zakresie. Dlatego na potrzeby niniejszej analizy opracowano metody i algorytmy do modelowania zjawisk fizycznych zachodzących podczas cięcia materiałów sprężysto/lepko-plastycznych oraz pozwalające określać wpływ wartości luzu na jakość wyrobu finalnego.

Modelowanie procesu przy zastosowaniu metod wariacyjnych i elementów skończonych przebiegało wg następujących etapów:

- 1) Modelowanie fizyczne obiektu rzeczywistego w wyniku, czego uzyskano 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 otrzymano ciągle, przyrostowe modele matematyczne, to jest: równania konstytutywne, model kontaktu narzędzie – przedmiot, model dynamiczny i warunki jednoznaczności. W wyniku sformułowania wariacyjnego otrzymano 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 dyskretnych, przyrostowych modeli matematycznych modelu fizycznego.

Modelując proces cięcia blach wzięto pod uwagę oddziaływanie przedmiotu obrabianego i narzędzia oraz wpływ otoczenia. Przyjęto, że w procesie cięcia występuje przestrzenny stan naprężeń oraz płaski stan przemieszczeń i odkształceń, w płaszczyznach równoległych do płaszczyzny noży. Wówczas przemieszczenia i odkształcenia materiału podczas procesu cięcia mogą być traktowane jako seria pojedynczych identycznych procesów, które charakteryzują się małym obszarem kontaktu

(w porównaniu z wymiarami przedmiotu i narzędzi) pomiędzy powierzchniami czynnymi narzędzi.

Początkowo kontakt narzędzia z przedmiotem następuje na małych długościach, a odkształcenia zachodzą w małych objętościach (rys. 1). Następnie, w miarę zaawansowania procesu strefy te powiększają się, a w końcowej fazie obejmują cały zarys przedmiotu. Ponieważ długość kontaktu i objętość odkształcanego materiału są względnie małe w porównaniu z wymiarami przedmiotu i narzędzia, to proces kształtowania można rozpatrywać jako kontakt sztywnego narzędzia z odkształcaną bryłą pół-nieskończoną. Przy takich założeniach, tj. dla płaskiego stanu odkształcenia, w układzie współrzędnych kartezjańskich (0xyz) jak na rysunku 1, odkształcenia na kierunkach $x - \varepsilon_x$ i $y - \varepsilon_y$ są istotne natomiast odkształcenie na kierunku z jest nieistotne $\varepsilon_z \approx 0$. Warunek ten, przy założeniu nieściśliwości materiału przedmiotu, prowadzi do następującej zależności: $\varepsilon_y = -\varepsilon_x$.

Pisząc szczególne równania ruchu dla wszystkich elementów skończonych wydzielonych z narzędzia i przedmiotu, po ich sumowaniu otrzymuje się równanie ruchu procesu cięcia. Ogólne równanie ruchu obiektu dyskretnego, w uaktualnionym opisie Lagrange'a, na typowym kroku przyrostowym, ma wówczas postać:

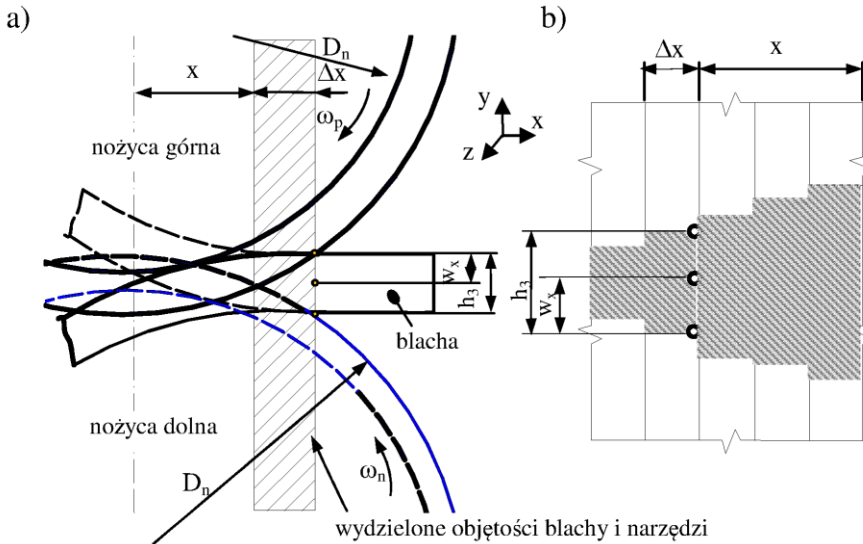
$$\mathbf{M} \cdot \Delta \ddot{\mathbf{r}} + \mathbf{C}_T \cdot \Delta \dot{\mathbf{r}} + (\mathbf{K}_T + \Delta \mathbf{K}_T) \cdot \Delta \mathbf{r} = \Delta \mathbf{R} + \Delta \mathbf{F} + \mathbf{F} + \mathbf{R}, \quad (1)$$

gdzie: \mathbf{M} – chwilowa macierz mas układu, \mathbf{C}_T – chwilowa macierz tłumienia, \mathbf{K}_T – chwilowa macierz sztywności, \mathbf{F} , $\Delta \mathbf{F}$ – odpowiednio chwilowy wektor obciążeń wewnętrznych węzłów oraz jego przyrost, \mathbf{R} , $\Delta \mathbf{R}$ – odpowiednio wektor obciążeń powierzchniowych oraz jego przyrost, $\Delta \mathbf{r}$ – wektor przyrostów przemieszczeń węzłów, $\Delta \dot{\mathbf{r}}$ – wektor przyrostu prędkości węzłów, $\Delta \ddot{\mathbf{r}}$ – wektor przyrostów przyspieszeń węzłów.

Dokładne rozwiązanie równania (1) jest niemożliwe ze względu na nadmiar niewiadomych. Możliwe jest jedynie rozwiązanie przybliżone poprzez zmniejszenie liczby występujących w nim zmiennych. Wśród podstawowych podejść stosowanych do rozwiązywania równania (1) wyróżnia się:

- częściową linearyzację równania ruchu,

- stosowanie metod iteracyjnych,
- stosowanie metod aproksymacyjnych,
- wprowadzenie warunków brzegowych,
- metodę superelementów.



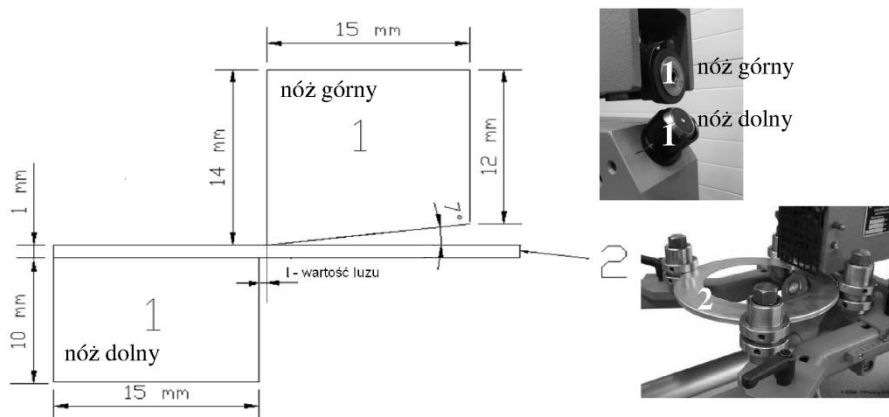
Rys. 1. Zależności geometryczne w strefie odkształceń podczas cięcia nożycami krążkowymi: a) model ciągły, b) model dyskretny

Fig.1. Geometrical dependences in deformation zone during slitting process: a) continuous model, b) discrete model

W niniejszym opracowaniu do rozwiązania równania ruchu zastosowano częściową jego linearyzację oraz dwie metody aproksymacji: metodę explicit (jawna metoda całkowania) i metodę *Newmarka* (niejawna metoda całkowania).

3. Zakres i metodyka analizy numerycznej

Analizy numeryczne wykonano za pomocą programu Ansys LS-Dyna. Na rys. 2 przedstawiono schemat stanowiska badawczego zaimplementowanego do programu.

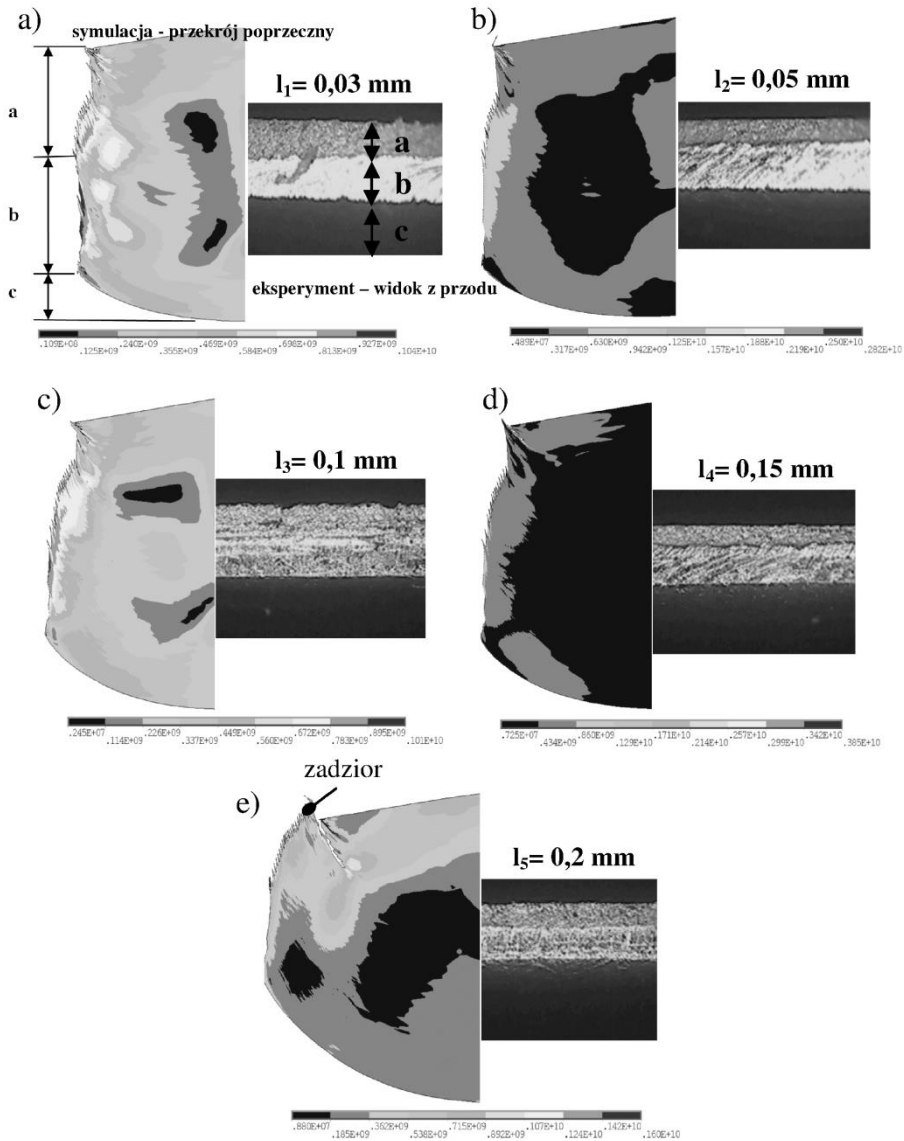


Rys. 2. Stanowisko badawcze: 1 – noże, 2 – cięty materiał
Fig. 2. Test stand: 1 – tools, 2 – material cut

W celu opisu właściwości ciętej blachy wykorzystano model materiałowy sprężysto/lepko-plastyczny *Cowpera-Symonds'a*. W modelu wykorzystuje się warunek plastyczności *Hubera-Misesa-Hencky'ego* oraz stowarzyszone prawo płynięcia. Badania przeprowadzono na stali DC01 której charakterystyki wyznaczono w próbie rozciągania. Dla stali DC01 maksymalna wartość intensywności odkształceń plastycznych, przy której następuje utrata spójności materiału wynosi $\varphi_i^{(dop)} = 0,75$. Gęstość blachy $\rho = 8000$ [kg/m³], moduł *Younga* $E = 210$ [GPa], liczba *Poissona* $\nu = 0,29$, początkowa, statyczna granica plastyczności $R_e = 200$ [MPa], moduł umocnienia $E_T = 1050$ [MPa], parametr $P = 5$ ($m = 0,2$), parametr $C = 40$ [s⁻¹]. Współczynnik umocnienia $\beta = 1$ [1]. Przyjęto, że nożyce są ciałami nieodkształcalnymi $E \rightarrow \infty$. W symulacji przyjęto stałe współczynniki tarcia statycznego 0,08 i kinetycznego 0,009. Są to współczynniki tarcia stali po stali ze smarowaniem olejem. Prędkość cięcia wynosiła $v = 4$ m/min. Badania przeprowadzono dla wybranych wartości luzów z przedziału $l = 0,03$ – $0,2$ mm.

4. Wyniki badań

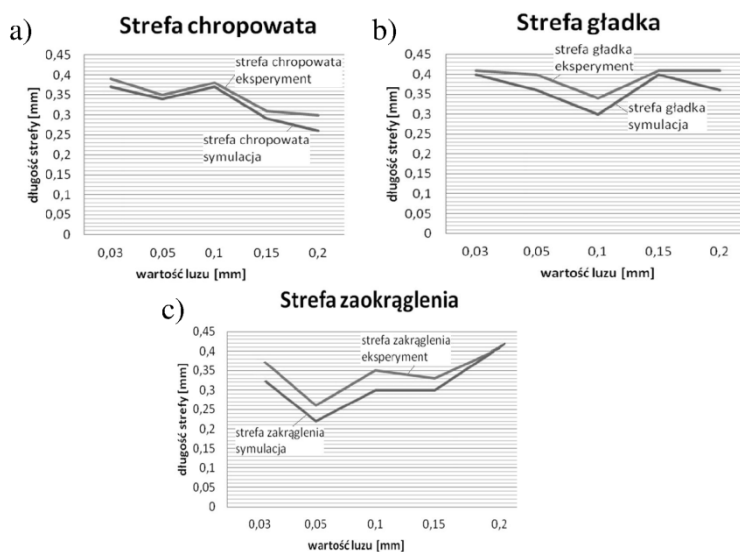
Na rys. 3. przedstawiono wygląd powierzchni przecięcia z rozkładem intensywności naprężeń po procesie dla zadanych wartości luzu.



Rys. 3. Wygląd powierzchni przecięcia wyrobu po procesie dla zadanych wartości luzu

Fig. 3. View of the cut surface of workpiece after process for different clearances

Jakość technologiczną powierzchni przecięcia definiuje się na podstawie uzyskanych długości stref na powierzchni przecięcia (rys. 3). Należy dążyć do uzyskania jak najdłuższej strefy gładkiej b , minimalnej długości strefy chropowatej a , minimalnego zaokrąglenia c , oraz ograniczenia występowania zadziórów na powierzchni rozdzielania (rys. 3 e).



Rys. 4. Porównanie długości poszczególnych stref uzyskanych z badań eksperymentalnych oraz symulacji

Fig. 4. Comparison of the length of zones measured in experiment and simulation

Z przeprowadzonych badań wynika, że zmiana wartości luzu istotnie wpływa na jakość powierzchni przecięcia. Jak wspomniano w procesach wykrawania dla większości blach wraz ze wzrostem wartości luzu spada jakość powierzchni przecięcia. Uzyskane wyniki ukazują, że w procesie cięcia na nożycach istota problemu jest bardziej złożona, gdyż w pewnych zakresach wartości luzu powyżej wartości minimalnej jakość wzrasta. Z przeprowadzonych badań wynika, że zmiana wartości luzu w największym stopniu decyduje o długości strefy zaokrąglenia na powierzchni przecięcia (rys. 4c). Największe długości tej strefy występują dla przypadku cięcia z luzem $l_1 = 0,03$ mm oraz $l_5 = 0,2$ mm. Dla tych przypadków nastąpił wzrost momentu gnącego podczas procesu, powodując opóźnienie pęknięcia materiału. Wskutek opóźnienia procesu pęka-

nia i wydłużenia fazy plastycznego płynięcia następuje wzrost długości strefy gładkiej. Dla przypadku cięcia z luzem $l_5 = 0,2$ mm, gdzie pęknięcie nastąpiło najpóźniej, długość strefy gładkiej jest zbliżona do optymalnych przypadków cięcia ($l_2 = 0,05$ mm, $l_4 = 0,15$ mm). Jednak nadmierne zaokrąglenie i wytworzony zadziór mogą spowodować w praktyce przemysłowej, że ten przypadek zostanie potraktowany jako odpad. Dla luzu $l_2 = 0,05$ mm uzyskano najmniejszą wartość zaokrąglenia, dla luzu $l_4 = 0,15$ mm mniejsze opory cięcia oraz mniejszą długość strefy chropowatej ($a = 0,3$ mm).

5. Wnioski

Mimo wielu publikacji na temat cięcia nadal występują problemy jeśli chodzi o dobór warunków procesu w tym luzu między narzędziami. Wiele firm dobiera je na zasadzie metody prób i błędów. Wpływa to na wzrost kosztów produkcji. W pracy przedstawiono sposoby określania wpływu wartości luzu na jakość technologiczną wyrobu. Z przeprowadzonych badań wynika, że nieprawidłowy dobór wartości luzu wpływa na tworzenie się wad wyrobu np. zadziorów, zaokrąglenia blachy, odchyłek kształtu, występowania dużej powierzchni chropowatej itp. Powoduje to wzrost liczby odpadów. Cięcie z niewłaściwym luzem wpływa także na zwiększenie oporów cięcia, wzrost energochłonności procesu. Czynniki te mogą mieć niekorzystny wpływ na środowisko. Opracowane algorytmy numeryczne w systemie ANSYS oraz badania eksperymentalne mogą służyć do oceny wpływu luzu między ostrzami na jakość wyrobu w zależności od rodzaju ciętej stali, jej wymiarów, sposobu mocowania, prędkości cięcia, sposobu smarowania. Wyniki mogą być wykorzystane na liniach przemysłowych w celu minimalizacji odpadów po cięciu. Dla stali DC01 najwyższą jakość powierzchni przecięcia uzyskano stosując luzy $l_2 = 0,05$ mm oraz $l_4 = 0,15$ mm. W celu dokładniejszej analizy istoty problemu należałoby przeprowadzić dodatkowe badania na innych gatunkach stali oraz opracować modele numeryczne 3D gdzie możliwe jest zadanie długości linii cięcia. W niniejszej pracy wskazano kierunki doskonalenia powszechnie stosowanego procesu technologicznego, jakim jest cięcie blach. Pozwoli to na podniesienie jakości uzyskiwanych wyrobów i zmniejszenie odpadów materiałowych. Spowoduje to bezpośrednio zmniejszenie zużycia energii i przyczyni się do ograniczenia negatywnego wpływu tego procesu na otaczające środowisko.

Literatura

1. **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. 1419–1422 (2012).
2. **Faura F., Garcí'a A., Estrems M.:** *Finite element analysis of optimum clearance in the blanking process.* Journal of Materials Processing Technology. Vol. 80–81., 121–125 (1998).
3. **Samuel M.:** *FEM simulations and experimental analysis of parameters of influence in the blanking process.* Journal of Materials Processing Technology, Vol. 84., 97–106 (1998).
4. **Hambli R., Reszka M.:** *Fracture criteria identification using an inverse technique method and blanking experiment.* International Journal of Mechanical Science, Vol. 44., 1349–1361 (2002).
5. **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. Vol. 27. 1134–1138 (2006).

Eco-modeling of Metal Sheet Cutting with Disc Shears

Abstract

In this study, a numerical model of the shearing process was developed using the finite element method and the effect of the main process parameter - clearance between tools on the deformation of DC01 steel and quality of the sheared edge was analyzed. The shearing process was considered a geometrical and physical nonlinear problem with unknown boundary conditions in the contact area of the system, such as the tool and workpiece. Numerical results were obtained based on slitting process using the dynamic explicit method in the ANSYS/LS-DYNA code. Experimental verification was conducted to confirm the results of the finite element simulation. These experimental results showed good agreement with those of the finite element simulation. Obtained results can be used to select the optimal clearance in shearing and decrease the scrap.