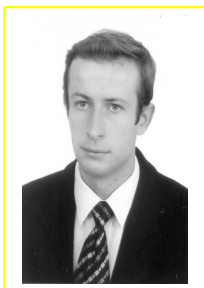


Łukasz BOHDALKATEDRA MECHANIKI TECHNICZNEJ I WYTRZYMAŁOŚCI MATERIAŁÓW, POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA
ul. Raclawicka 15/17, 75-620 Koszalin**Analiza wpływu luzu między narzędziami tnącymi na strukturę geometryczną powierzchni przecięcia wyrobów kształtowanych na nożycach krążkowych**

Dr inż. Łukasz BOHDAL

Absolwent Politechniki Koszalińskiej. W roku 2005 otrzymał tytuł magistra inżyniera mechanika o specjalności Inżynierskie Zastosowanie Komputerów. 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. Zajmuje się zaawansowanym modelowaniem numerycznym 2D i 3D.



e-mail: Bohdall@interia.pl

Streszczenie

W procesach cięcia blach bardzo często aby uzyskać wyrób o pożądanej jakości powierzchni przecięcia i odpowiedniej dokładności wymiarowo – kształtowej steruje się parametrami technologicznymi procesu. Luz między narzędziami tnącymi jest jednym z głównych parametrów, którego precyzyjny dobór umożliwia zwiększenie jakości powierzchni przecięcia wyrobu, przy jednoczesnym zmniejszeniu energochłonności procesu oraz ilości generowanego odpadu. W pracy przeanalizowano wpływ luzu na strukturę geometryczną powierzchni przecięcia stali DC01. W celu analizy rozkładów naprężeń i odkształceń w czasie trwania i po procesie opracowano trójwymiarowy model numeryczny (3D) w środowisku Ansys/LS-Dyna z wykorzystaniem metody explicit. Zastosowano modele przyrostowe, które pozwalają rozwiązać wiele problemów bez znajomości warunków brzegowych w obszarze kontaktu. 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, luz, symulacja 3D.

Analysis of clearance influence on geometrical structure of workpiece cut surface in slitting process**Abstract**

To obtain a high quality product in sheet metal shearing processes, there is very often needed control of technological parameters. The clearance between cutting tools is one of the most important parameters whose precise selection makes it possible to increase the cut surface quality, at simultaneous decrease in energy cost and scrap. In this paper the influence of the clearance on the geometrical structure of DC01 steel is analyzed. To analyze the states of strains and stressed during and after process, there was built a three dimensional numerical model (3D) in the Ansys/LS-Dyna code with use of the explicit method. For description of the non-linear phenomena, at the typical increment ratio, the updated Lagrange's description was used. Nonlinearity of the material was described by means of the increment model taking into consideration the deformation and deformation rate records. These results can be used for design of the slitting process: selection of the process conditions and its optimization.

Keywords: slitting, clearance, 3D simulation.

1. Wstęp

Współczesne techniki wytwarzania nie są pozbawione problemów związanych z zapewnieniem odpowiedniej jakości wytwarzanych wyrobów przy jednoczesnej minimalizacji kosztów ich produkcji jak i wroście wydajności procesu. 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 poddawanych 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. Obecnie w warunkach przemysłowych w celu uzyskania odpowiedniej jakości wyrobu finalnego w wielu przypadkach steruje się parametrami procesu cięcia. Z praktycznego punktu widzenia największe możliwości sterowania tym procesem mogą zapewnić odpowiednio dobrane parametry geometryczne, które mają bardzo duży wpływ na stan naprężeń, odkształceń w ciętym przedmiocie oraz na dekohezję materiału. Parametry te są związane z konstrukcją, budową i kształtem narzędzi tnących, wielkością luzu między narzędziami tnącymi, stosowaniem dociskaczy. Umiejętny ich dobór umożliwia uzyskanie gładkiej powierzchni przecięcia, bez konieczności stosowania dodatkowych operacji obróbkowych.

Luz między narzędziami 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 [3] 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 [4] zbadano wpływ promienia zaokrąglenia stempla i matrycy, wielkości luzu oraz rodzaju materiału na jakość uzyskanego wyrobu wykorzystując kryterium pęknięcia *Gurson* oraz metody numeryczne. Autorzy pracy [5] przedstawili optymalizację procesu wykrawania. W pracy [6] 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 wielkość luzu powinna wynosić 10% grubości blachy natomiast, aby zmniejszyć szerokość strefy chropowatej na powierzchni przecięcia wielkość luzu powinna wynosić 5% grubości blachy. Maksymalne wartości luzu stosowane w procesach wykrawania wynoszą 25% grubości ciętego materiału. Wraz ze wzrostem luzu zaobserwowano wzrost zaokrąglenia, oraz spadek długości strefy gładkiej. W pracy [7] zaproponowano numeryczną metodę wyznaczania optymalnej wielkości luzu dla wykrawanej stali AISI 304. Wykazano, że wraz ze wzrostem luzu materiał łatwiej ulega deformacjom a jego pęknięcie rozpoczyna się dla większych przemieszczeń stempla niż podczas stosowania niewielkich luzów (poniżej 10% grubości ciętej blachy).

Celem niniejszej pracy jest zbadanie wpływu zmiany luzu między narzędziami tnącymi na wygląd oraz strukturę geometryczną powierzchni przecięcia stali DC01 kształtowanej na nożycach krążkowych. Uzyskane wyniki mogą być przydatne na liniach przemysłowych do prawidłowego doboru wartości luzu podczas cięcia na nożycach krążkowych. Ponadto w pracy zaprezentowano trójwymiarowy model numeryczny procesu z zastosowaniem metody elementów skończonych. Model może być wykorzystany m.in. do analizy stanów naprężeń i odkształceń, przemieszczeń podczas trwania i po procesie cięcia.

2. Charakterystyka procesu cięcia nożycami krążkowymi

Podstawowa budowa nożyc to dwa zespolone, połączone przegubowo ostrza poruszające się w zadanej płaszczyźnie. Poprzez ich zwieranie nożyce tną zadany element. W przypadku procesu cięcia nożycami krążkowymi narzędzia wykonują ruch obrotowy (rys. 1). Obrót każdego noża następuje pod wpływem przyłożonego momentu obrotowego M_{obr} . W czasie jednego pełnego obrotu noży krążkowych, momenty wykonują pracę równą:

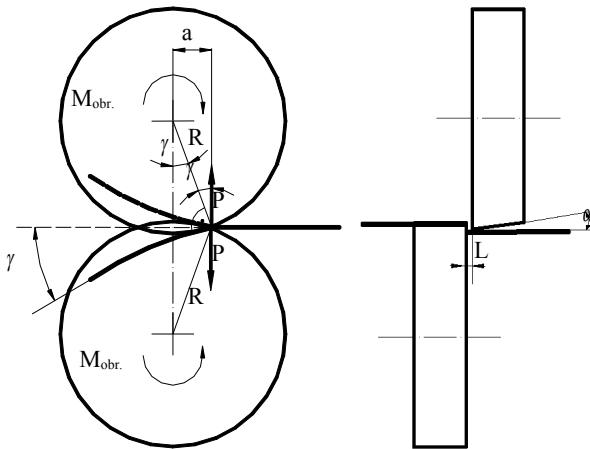
$$W = 2 \cdot 2\pi \cdot M_{obr}, \quad (1)$$

która zostaje zużyta na przecięcie materiału [8]. Długość linii przecięcia l , odpowiadająca jednemu pełnemu obrotowi krążków o promieniu R wynosi:

$$l = 2\pi \cdot R \cdot \cos \gamma, \quad (2)$$

gdzie: γ jest kątem zawartym między kierunkiem ruchu materiału a kierunkiem prędkości obwodowej krążka w miejscu cięcia. Siła P wywierana na każdy z krążków przez cięty materiał skierowana jest równoległe do linii łączącej środki tych krążków i oddalona od niej o wartość a , przy czym:

$$a = R \cdot \sin \gamma. \quad (3)$$

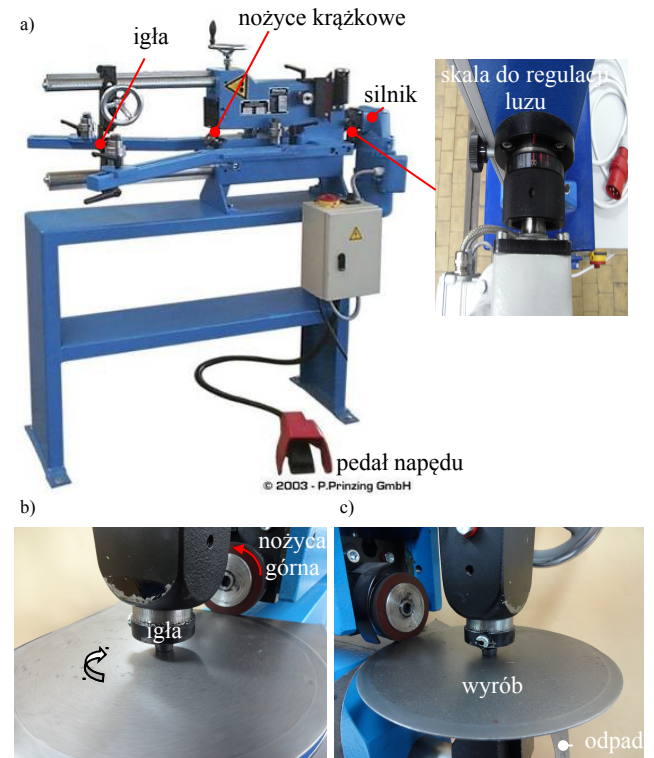


Rys. 1. Schemat procesu cięcia nożycami krążkowymi
Fig. 1. Scheme of the slitting process

3. Badania eksperymentalne

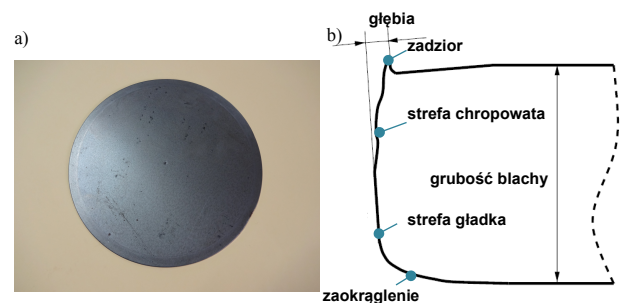
Badania przeprowadzono na stanowisku przedstawionym na rysunku 2. Do badań wykorzystano nożyce krążkowe typu KSE 10/10, które znajdują się w Katedrze Mechaniki Technicznej i Wytrzymałości Materiałów na Politechnice Koszalińskiej. Urządzenie służy do wycinania krążków i pierścieni z pasów blach. Zapewnia bardzo dużą wydajność i wysoką jakość wycinanych wyrobów. Wyposażone jest w elementy służące do wywijania wewnętrznego i zewnętrznego na wyciętych krążkach i pierścieniach. Napęd maszyny odbywa się jednostopniowo, dwustopniowo lub bezstopniowo poprzez silnik z przekładnią i hamulcem. Średnicę wycinanych krążków i pierścieni ustala się za pomocą skali. Mocowanie blachy może odbywać się pneumatycznie lub hydraulicznie. Napęd zadany jest na nóż górny. Regulacja luzu odbywa się poprzez gwintowane gniazdo ze skalą. Badania zrealizowano w następujący sposób: przygotowane arkusze blach zamontowano w urządzeniu i utwierdzono za pomocą specjalnej igły (rys. 2). Na-

stępnie wycięto krążki dla stałej prędkości cięcia $v = 4\text{m/min}$.



Rys. 2. a) Widok ogólny nożyc krążkowych KSE 10/10, b) proces cięcia, c) etap końcowy procesu
Fig. 2. a) View of the slitter KSE 10/10, b) view of the cutting process, c) finish of the process

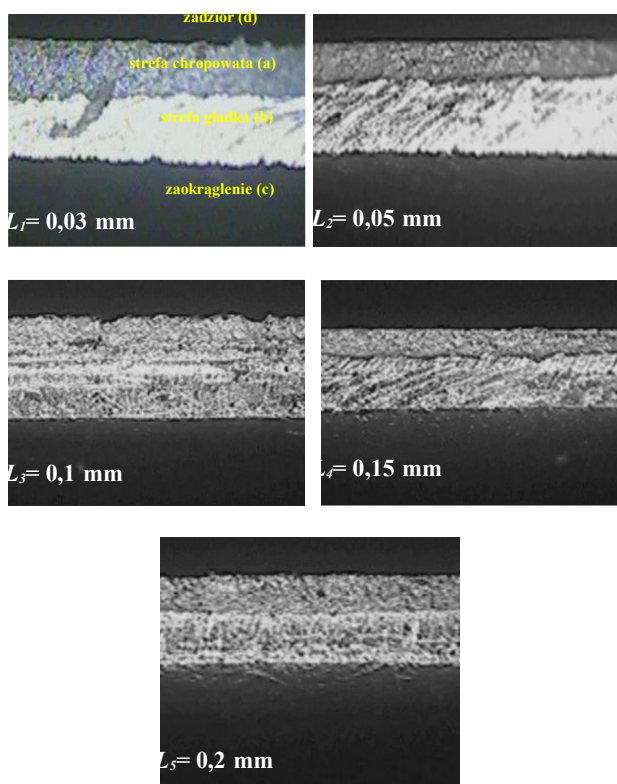
Jakość technologiczną powierzchni przecięcia zdefiniowano na podstawie uzyskanych szerokości stref na powierzchni przecięcia (rys. 3 i 4). Należy dążyć do uzyskania jak szerszej strefy gładkiej b , minimalnej szerokości strefy chropowatej a , minimalnego zaokrąglenia c , oraz ograniczenia występowania zadziorów d na powierzchni rozdzielania. Po procesie cięcia zmierzono szerokości poszczególnych stref na powierzchni przecięcia w losowych miejscach na obwodzie krążka (rys. 3a). Uzyskane wartości uśredniono dla każdej strefy i zestawiono na rys. 5.



Rys. 3. a) Widok wyrobu po procesie, b) przekrój poprzeczny powierzchni przecięcia z oznaczonymi strefami
Fig. 3. a) View of the final product after process, b) cross-section of the cut surface with marked zones

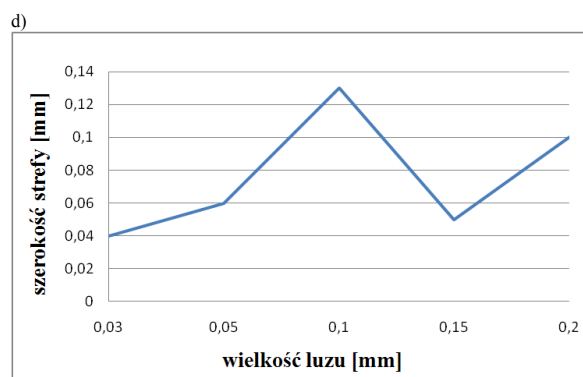
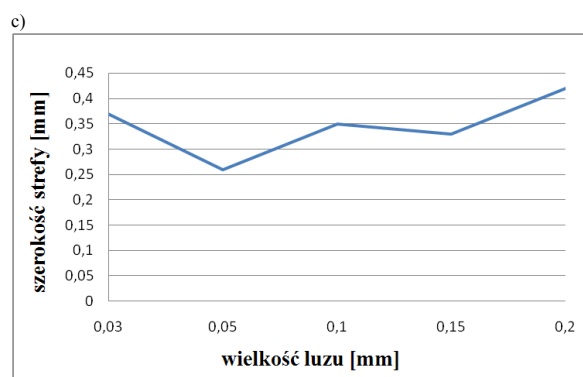
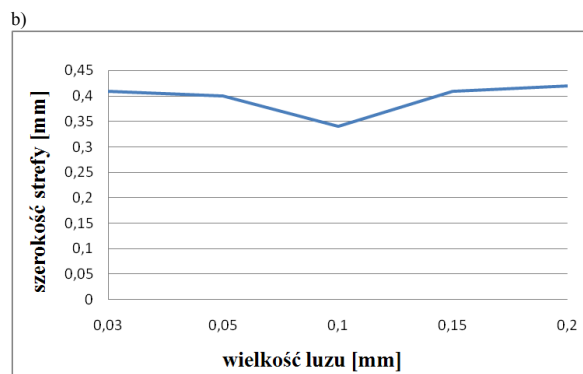
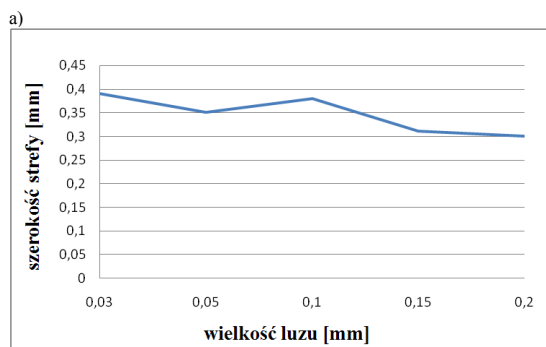
4. Wyniki badań

Na rys. 4. przedstawiono wygląd powierzchni przecięcia wyrobów po procesie cięcia dla zadanych luzów.



Rys. 4. Wygląd powierzchni przecięcia wyrobów po procesie dla zadanych luzów
Fig. 4. View of the cut surface of workpieces after the process for the analyzed clearances

Z przeprowadzonych badań wynika, że zmiana wielkości 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 luzu powyżej wartości minimalnej jakość wzrasta. Z przeprowadzonych badań wynika, że zmiana wielkości luzu w największym stopniu decyduje o szerokości strefy zaokrąglenia (rys. 5c) oraz wysokości zadzioru (rys. 5d). Największe szerokości strefy zaokrąglenia 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 pęknięcia i wydłużenia fazy plastycznego płynięcia następuje wzrost szerokości strefy gładkiej. Dla przypadku cięcia z luzem $L_5 = 0,2$ mm, gdzie pęknięcie nastąpiło najpóźniej, szerokość strefy gładkiej jest zbliżona do najbardziej optymalnych przypadków cięcia ($L_2 = 0,05$ mm, $L_4 = 0,15$ mm). Jednak nadmierne zaokrąglenie może spowodować, że w praktyce przemysłowej ten przypadek zostanie potraktowany jako odpad. Najmniejszą wartość zaokrąglenia uzyskano stosując luz o wielkości $L_2 = 0,05$ mm.



Rys. 5. Szerokości poszczególnych stref uzyskanych z badań eksperymentalnych:
a) strefa chropowata, b) strefa gładka, c) strefa zaokrąglenia, d) zadziór
Fig. 5. The width of the zones measured in experiment: a) fractured area, b) burnished area, c) rollover area, d) burr

Istotnym defektem bardzo często występującym na powierzchni przecięcia jest zadziór. Główną przyczyną jego powstawania jest stosowanie narzędzi o stępionych ostrzach lub niewłaściwy dobór wartości luzu. Z przeprowadzonych badań wynika, że największe wysokości zadziorów występują podczas stosowania luzów $L_3 = 0,1$ mm oraz $L_5 = 0,2$ mm (około 0,13 oraz 0,1 mm) (rys. 5d). Dla przypadku $L_3 = 0,1$ mm uzyskano nierównomierną wysokość zadziorów na obwodzie krążka, co dodatkowo obniżyło jakość uzyskanego wyrobu.

5. Trójwymiarowy model numeryczny procesu cięcia na nożycach krążkowych

Modelując proces cięcia blach 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 na-

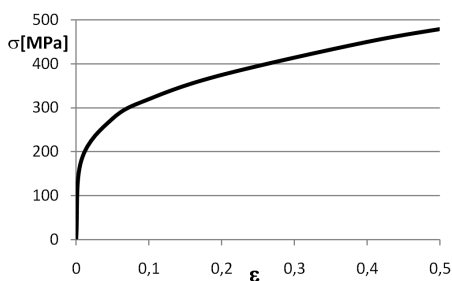
przeżeń Pioli-Kirchhoffa. Opisu nieliniowości materiału dokonano modelem przyrostowym uwzględniając wpływ historii odkształceń i prędkości odkształceń. Przedmiot (cięta blacha) traktuje się, jako ciało, w którym mogą wystąpić odkształcenia sprężyste (w zakresie odkształceń odwracalnych) oraz lepkie i 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) [1, 2].

Do opisu materiału ciętej blachy wykorzystano model sprężysto/lepkoplastyczny PIECEWISE-LINEAR. Model uwzględnia m.in. wpływ intensywności prędkości odkształcenia plastycznego na naprężenia uplastyczniające według zależności:

$$\sigma_p = \left[I + \left(\frac{\dot{\phi}_i^{(p)}}{C} \right)^{1/P} \right] \cdot R_e \quad (4)$$

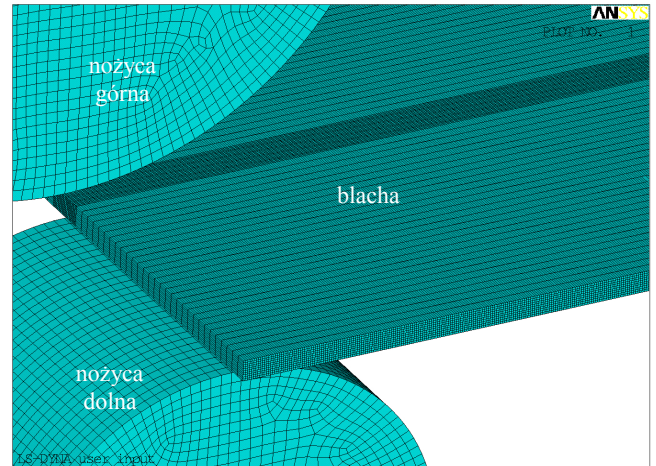
gdzie: R_e - początkowa, statyczna granica plastyczności [MPa], $\dot{\phi}_i^{(p)}$ - intensywność prędkości odkształceń plastycznych [s^{-1}], C , P - stałe materiałowe określające wrażliwość materiału na prędkość odkształcenia plastycznego.

Dla stali DC01 na podstawie próby rozciągania wyznaczono zależność naprężenia od odkształcenia (rys. 6), którą wprowadzono do modelu. Dla stali DC01 wielkości charakterystyczne wynoszą: $R_e = 200$ MPa, gęstość $\rho = 8000$ kg/m³, moduł Younga $E = 210$ GPa, liczba Poissona $\nu = 0,29$ [-], odkształcenie graniczne $\epsilon_f = 0,75$ [-], $C = 40$, $P = 5$.



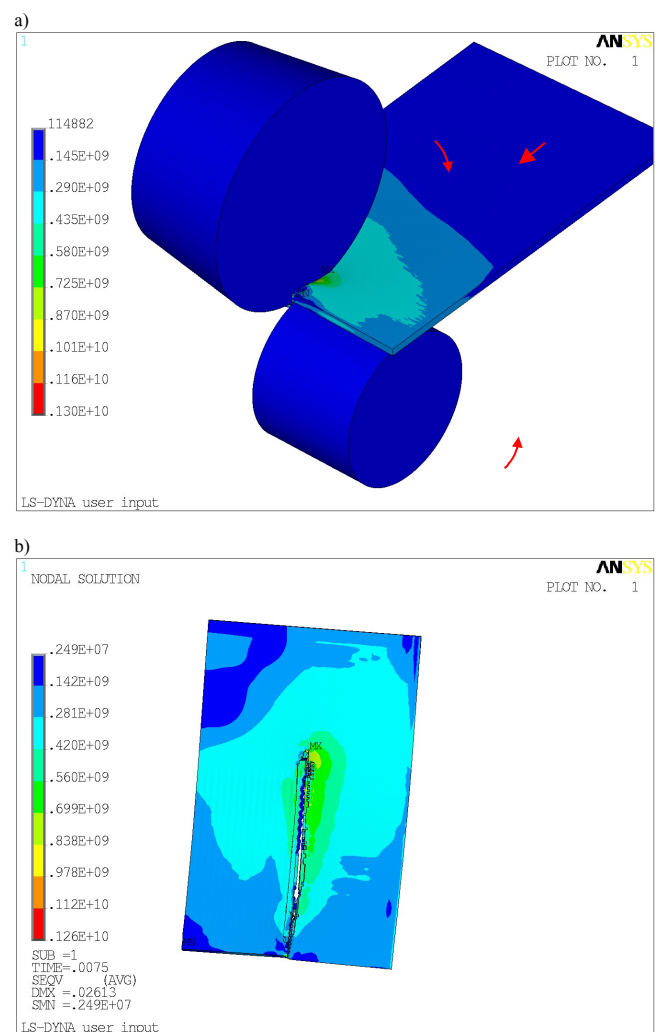
Rys. 6. Przebieg zależności naprężenia od odkształcenia dla stali DC01
Rys. 6. Stress – strain curve for DC01 steel

Trójwymiarowy model komputerowy opracowano w środowisku ANSYS/LS-DYNA dla przestrzennych stanów naprężeń i odkształceń w oparciu o rzeczywiste wymiary narzędzi oraz rzeczywiste warunki realizacji procesu zgodnie z przeprowadzonym eksperymentem. Przyjęto, że nożyce są ciałami nieodkształcalnymi $E \rightarrow \infty$. W symulacji przyjęto stałe współczynniki tarcia statycznego $\mu_s = 0,22$ i kinetycznego $\mu_d = 0,1$. Są to współczynniki dla tarcia stali po stali na suchu. Prędkość cięcia wynosiła $v = 4$ m/min. Obiekty zdyskretyzowano 8 węzłowymi elementami skończonymi typu 3D SOLID164 (rys. 7).



Rys. 7. Model dyskretny obiektu
Fig. 7. The discretized model of the object

Przykładowe wyniki symulacji przedstawiono na rys. 8a i 8b.



Rys. 8. Rozkład intensywności naprężeń w materiale w różnych fazach procesu dla $L_1 = 0,03$ mm

Fig. 8. Distribution of the stress intensity in material in different phases of the process for $L_1 = 0,03$ mm

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, spo-

sób mocowania blachy, sposób docisku blachy w zależności od jej długości i szerokości. Możliwe jest analizowanie przyczyn powstawania defektów blach, 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 blachy, 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). Do wad modelowania 3D należy zaliczyć dużą czasochłonność obliczeń. Przykładowo dla 400 000 elementów skończonych blachy, do pokonania przez narzędzia drogi wynoszącej 6 cm, niezbędny czas obliczeń wynosił około jednego tygodnia. Jednak metodyka ta umożliwia zadanie rzeczywistych warunków brzegowych, pominięcie szeregu uproszczeń związanych z geometrią narzędzi, wymiarami ciętych elementów. Wpływa to znacząco na zwiększenie dokładności uzyskiwanych wyników. Opracowany model zostanie poddany modyfikacjom mającym na celu optymalne dopasowanie siatki elementów skończonych ze względu na jak najlepsze odwzwierciedlenie zjawiska pęknięcia materiału oraz zmniejszenie czasu obliczeń.

6. Podsumowanie

Pomimo wielu publikacji na temat cięcia nadal występują liczne problemy do rozwiązania. Dotyczy to w szczególności doboru 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 przeanalizowano wpływ luzu na jakość technologiczną powierzchni przecięcia stali DC01. Z przeprowadzonych badań wynika, że nieprawidłowy dobór wartości luzu wpływa na tworzenie się wad wyrobu, np. zadziórów, zaokrąglenia blachy, odchyłek kształtu, występowania dużej powierzchni chropowatej itp. Cięcie z niewłaściwym luzem wpływa także na zwiększenie oporów cięcia, wzrost energochłonności procesu. 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 z uwzględnieniem dodatkowych parametrów technologicznych np.: zmienna prędkość cięcia, zmienne warunki tarcia.

Opracowany model numeryczny procesu cięcia na nożycach krążkowych dla przestrzennych stanów naprężeń i odkształceń (3D) umożliwi uwzględnienie wszystkich istotnych czynników wpływających na jakość wyrobu, wydajność procesu cięcia i symulowanie występujących zjawisk dla dowolnego stanu zaawansowania procesu. Pozwala lepiej poznać zjawiska fizyczne zachodzące w strefach kontaktu narzędzi z przedmiotem np.: zjawiska powodujące powstawanie defektów na powierzchni przecięcia oraz ich wpływ na jakość wyrobu i energochłonność procesu. Możliwe jest prowadzenie bardziej złożonych obliczeń dotyczących wpływu warunków procesu na jakość wyrobu.

W dalszych pracach można rozważyć rozbudowanie opracowanego modelu, tak aby uwzględnił on efekty anizotropii blachy oraz temperatury podczas cięcia.

7. Literatura

- [1] Bohdal Ł., Kukielka L.: Modelowanie i analiza numeryczna procesu cięcia blach nożami krążkowymi z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej. *Mechanik* nr. 8-9/2011r. s. 712-716.
- [2] 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 2012*, pp. 1419-1422.
- [3] 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.
- [4] Samuel M.: FEM simulations and experimental analysis of parameters of influence in the blanking process. *Journal of Materials Processing Technology* 1998, Vol. 84., pp. 97-106.
- [5] Hambl R., Reszka M.: Fracture criteria identification using an inverse technique method and blanking experiment. *International Journal of Mechanical Science* 2002, Vol. 44., pp. 1349-1361.
- [6] 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.
- [7] 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* 2002, Vol. 130-131., pp. 462-468.
- [8] Erbel S., Kuczyński., Marciniak Z.: *Obróbka Plastyczna*. PWN, Warszawa 1981.

otrzymano / received: 25.04.2013

przyjęto do druku / accepted: 03.06.2013

artykuł recenzowany / revised paper

INFORMACJE

Zapraszamy do publikacji artykułów naukowych w czasopiśmie PAK

WYDAWNICTWO PAK
ul. Świętokrzyska 14A, pok. 530, 00-050 Warszawa,
tel./fax: 22 827 25 40

Redakcja czasopisma POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, pok. 30b,
tel./fax: 32 237 19 45, e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl