

**Łukasz BOHDAL**

KATEDRA MECHANIKI TECHNICZNEJ I WYTRZYMAŁOŚCI MATERIAŁÓW, POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA

**Zastosowanie przyrostowej metody analizy siatki koordynacyjnej do numerycznej analizy procesu cięcia**

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 zjawisk fizycznych zachodzących podczas procesów technologicznych w przemyśle.



e-mail: Bohdall@interia.pl

**Streszczenie**

Przedstawiono metodykę określania stanów przemieszczeń i odkształceń w ciętym materiale w oparciu o przyrostową analizę siatki koordynacyjnej. W badaniach modelowych dla płaskiego stanu odkształceń i przestrzennego stanu naprężeń, na tworzywie modelowym wyznaczono wartości przemieszczeń w zależności od zagłębienia narzędzia w materiał oraz dla różnych wariantów jego geometrii. Uzyskane wyniki umożliwiają lepsze zrozumienie procesu oraz weryfikację modeli symulacyjnych bazujących na MES.

**Słowa kluczowe:** cięcie, stany przemieszczeń i odkształceń, badania modelowe.

**Applying the incremental analysis method of the coordinate grid for numerical analysis of the cutting process****Abstract**

The paper describes the determination method of state of displacement and strain in product base on the incremental analysis of the coordinate grid. In the model investigations for plane state of strain and spatial state of stresses, on the plastic material the value of the displacement for node in the contact zone in relation from tool penetration and for different tool geometry, were determined. The model studies identified the areas of strong nonlinearity, both geometric and material depending on the conditions of the process. Obtained results allow for better understanding of the process and can be used to development of new tools, process design and validation of FEM simulation models.

**Keywords:** cutting, states of stresses and strain, model investigations.

**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. Podstawowym problemem w projektowaniu procesu cięcia jest opracowanie odpowiedniej konstrukcji narzędzi i dobór warunków realizacji procesu w celu zapewnienia wymagań technicznych oraz właściwości wyrobu, przy jednoczesnym wzroście trwałości narzędzia i wydajności procesu. W procesach cięcia duże wartości odkształceń połączone z ich koncentracją na niewielkich obszarach, prowadzące do procesu rozdzielania materiału mają duży wpływ na końcową jakość wyrobu. Tradycyjne metody analizy tych zjawisk 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 prze-

mieszczeń i odkształceń materiału z wykorzystaniem systemów wizyjnych [5], zastosowanie numerycznej obróbki obrazu z zastosowaniem korelacji w pomiarach pól przemieszczeń i odkształceń materiału [6].

Modelowanie fizyczne na materiale zastępczym znajduje zastosowanie w doświadczalnej analizie jakościowej i ilościowej. Główną zaletą stosowania tej metody jest możliwość wizualizacji trajektorii płynięcia cząstek materialnych materiału kształtowanego w dowolnej chwili trwania procesu w znacznym powiększeniu w stosunku do rzeczywistych warunków cięcia. Ponadto metoda ta nie wymaga dużych nakładów finansowych w odróżnieniu od metod wizyjnych. W pracy przedstawiono metodykę określania stanów przemieszczeń i odkształceń w wyrobie in oparciu o przyrostową analizę siatki koordynacyjnej. Badania przeprowadzono w celu zaobserwowania kinematyki płynięcia materiału, określenia stanów przemieszczeń i odkształceń, oceny istotności wpływu geometrii narzędzia i zużycia narzędzia na proces cięcia oraz w celu określenia warunków brzegowych dla przemieszczeń, niezbędnych do przeprowadzenia analiz numerycznych procesu cięcia.

**2. Modelowanie fizyczne**

Modelowanie fizyczne polega na zastąpieniu rzeczywistego obiektu badań, obiektem modelowym. Obiekt rzeczywisty i modelowy tworzą system obiektów ekwiwalentnych, których podobieństwo określają zależności matematyczne. Wówczas wyniki modelowania można transponować na rzeczywisty obiekt badań. Podobieństwo obiektów ekwiwalentnych określa się za pomocą następujących skal modelowania:

- reologicznej (stosunek parametrów homologicznych obiektu rzeczywistego i modelowego), geometrycznej i czasowej:

$$k_r = \sigma_p^* / \sigma_p, \quad (1)$$

$$k_g = X^* / X, \quad (2)$$

$$k_t = t^* / t, \quad (3)$$

gdzie:  $\sigma_p^*$  - parametr homologiczny obiektu rzeczywistego,  $\sigma_p$  - parametr homologiczny obiektu modelowego,  $X^*, t^*$  - parametry obiektu rzeczywistego,  $X, t$  - parametry obiektu modelowego.

Podstawowym warunkiem poprawnego modelowania fizycznego jest spełnienie kryterium podobieństwa według zależności:

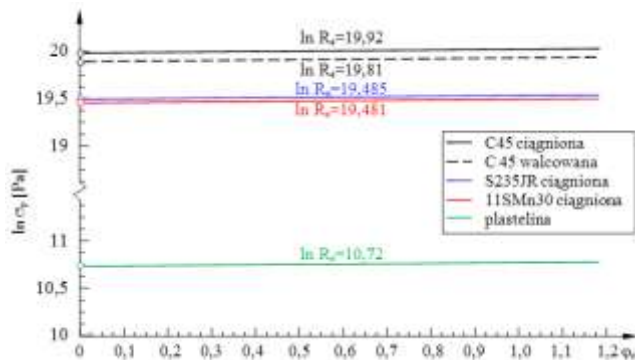
$$Q^*(\sigma_p^*, X^*, t^*) = k_Q \left( \frac{\sigma_p^*}{k_r}, \frac{X^*}{k_g}, \frac{t^*}{k_t} \right). \quad (4)$$

Jako tworzywo modelowe zastępujące metal najczęściej używany jest materiał niemetalowy np.: plastelina, wosk, kit itp. Są to materiały o znacznie mniejszym oporze plastycznego płynięcia. Do doświadczalnej analizy jakościowej i ilościowej procesów obróbki plastycznej stosowane jest modelowanie fizyczne na plastelinie. Analiza jakościowa dotyczy przede wszystkim kinematyki procesu plastycznego płynięcia materiału, natomiast analiza fizyczna obejmuje badanie parametrów siłowo - energetycznych (siła, naciski jednostkowe na powierzchni kontaktu narzędzie - tworzywo modelowe). Celem zapewnienia warunku podobieństwa reologicznego w pracy wyznaczono charakterystykę dla materiału modelowego - plasteliny. Wynika to z jej dostępności,

niskiej ceny, łatwej obrabialności, plastyczności (naprężenia uplastyczniające są 100 – 1000 razy mniejsze od odpowiednich naprężeń metalu), możliwości jej modyfikacji i regeneracji a przez co wielokrotnego użycia. Podstawowym składnikiem plasteliny jest węglan wapnia  $\text{CaCO}_3$  oraz środki wiążące takie jak: woda, tłuszcze pochodzenia mineralnego, roślinnego, zwierzęcego i inne środki zmiękczające i utwardzające i barwniki. Dobierając odpowiedni skład plasteliny można tworzyć różne modele reologiczne ciał (tj. idealnie plastycznych, sztywno – plastycznych, umacniających się, itp.) oraz o takim samym modelu reologicznym, lecz o różnym oporze plastycznym.

Model materiałowy opracowano w oparciu o statyczną próbę ściskania. Wyniki z tej próby są danymi orientacyjnymi ze względu na występowanie zakłóceń w pomiarze siły ściskania. Czynnikiem zakłócającym pomiar siły ściskania jest tarcie występujące na powierzchniach czołowych próbki walcowej. W warunkach idealnych podczas statycznej próby ściskania średnica próbki walcowej zmieniłaby się równomiernie na całej jej wysokości. Jednakże dla warunków rzeczywistych wpływ tarcia powoduje, że materiał próbki płynie nierównomiernie (tworzy się beczka), jest to wynik blokowania płynięcia materiału na czołowych powierzchniach kontaktu próbki z podłożem i stemplem. Ze względu na to, że podczas statycznej próby ściskania tworzywa modelowego praktycznie nie jest możliwe wyeliminowanie wpływu tarcia, w próbie występuje trójosiowy stan naprężeń i odkształceń, a nie jak zakłada próba – jednoosiowy. Dlatego też uwzględniono trójosiowy stan naprężeń i odkształceń tj. poza naprężeniami i odkształceniami występującymi na kierunku działania siły ściskającej uwzględniono naprężenia i odkształcenia obwodowe i promieniowe [7, 8]. Wady tej pozbawiona jest statyczna próba rozciągania jednakże ze względu na charakter tworzywa przeprowadzenie jej jest niemożliwe.

Celem porównania otrzymanej charakterystyki materiałowej tworzywa modelowego z charakterystykami materiałów obróbkowych (stali: C45, S2135JR i 11SMn30), zestawiono je na wykresie (rys. 1) we współrzędnych logarytmicznych dla naprężeń [8].



Rys. 1. Porównanie charakterystyki materiałowej plasteliny z charakterystykami stali: C45, S235JR i 11SMn30

Fig. 1. Comparison of material's characteristics of plasticine and C45, S235JR and 11SMn30 steels

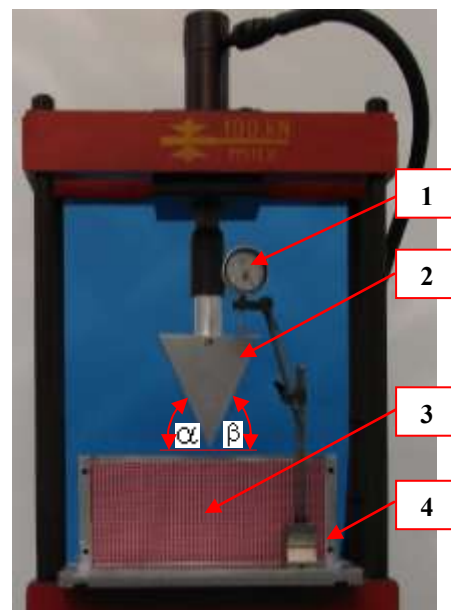
Zbliżone kąty pochylenia linii na wykresie w układzie współrzędnych logarytmicznych, wskazują że otrzymana charakterystyka materiałowa dla tworzywa modelowego wykazuje podobieństwo do charakterystyk materiałowych stali C45 (ciągniona i walcowana) oraz stali 11SMn30 (walcowanej) i S235JR. Na podstawie wyznaczonych w badaniach wytrzymałościowych wartości początkowej granicy plastyczności dla tworzywa modelowego i stali wynoszące odpowiednio:  $R_e^* = 45,63$  kPa (plastelina),  $R_e = 448$  MPa (stal C45 ciągniona),  $R_e = 400$  MPa (stal C45 walcowana),  $R_e = 290$  MPa (stal S235JR ciągniona) i  $R_e = 280$  MPa (stal 11SMn30 ciągniona). Zatem z zależności (1), wartości współczynnika skali reologicznej wynoszą odpo-

wiednio:  $k_r^{(C45c)} = R_e/R_e^* = 448000/45,63 = 9818$ ,  $k_r^{(C45w)} = 8856$ ,  $k_r^{(S235JR)} = 6242$  i  $k_r^{(11SMn30)} = 6136$ .

### 3. Stanowisko do badań modelowych

Badania modelowe procesu cięcia przeprowadzono na specjalnym stanowisku (rys. 2). Tworzywo modelowe umieszczono

w formie o sztywnych (nieodkształcalnych) ściankach. Forma umożliwia wprowadzenie płaskiego stanu odkształceń i przestrzennego stanu naprężeń w materiał modelowy. Proces cięcia przeprowadzono z wykorzystaniem stempli wykonanych ze stali ST3 o różnej geometrii. Narzędzia celowo stępiono aby uzyskać informację o wpływie ich zużycia na kinematykę płynięcia tworzywa modelowego.



Rys. 2. Stanowisko do badań na tworzywie modelowym: 1 – zegarowy czujnik przemieszczenia; 2 – klinowe narzędzie; 3 – materiał modelowy; 4 – nieodkształcalna forma

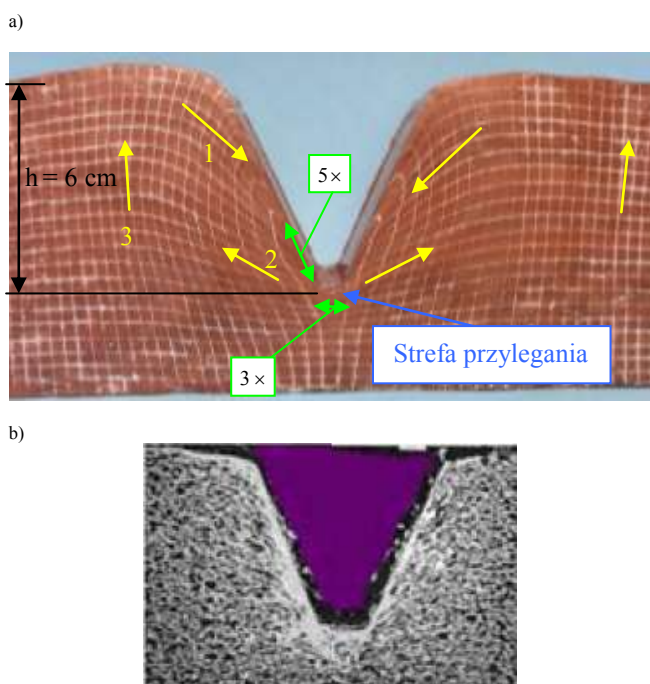
Fig. 2. Test stand: 1 – displacement sensor, 2 – wedge tool, 3 – model, 4 – undeformable form

Do badań modelowych wykorzystano próbki w kształcie prostokąta o wymiarach: długość  $l = 300$  mm, wysokość  $h = 110$  mm, szerokość  $s = 95$  mm. Na powierzchni bocznej próbek naniesiono siatkę kwadratowych elementów skończonych o wymiarach  $5 \times 5$  mm (rys. 2). Poprzez obserwację przemieszczeń węzłów siatki koordynacyjnej, można określić wpływ geometrii oraz stępienia ostrza narzędzia na przebieg procesu cięcia oraz na wygląd powierzchni przecięcia materiału. Badania realizowano w następujący sposób. Na prasie hydraulicznej wciskano stemple w materiał modelowy. Po pokonaniu drogi przez stempel wynoszącej 10 mm w głąb materiału formę rozkręcano w celu wykonania zdjęć powierzchni cięcia. Czynność powtarzano aż do całkowitego przecięcia tworzywa modelowego.

### 4. Wyniki badań

Na rysunkach 3 ÷ 6 przedstawiono przykładowe wyniki badań procesu cięcia tworzywa modelowego symetrycznymi stępionymi narzędziami klinowymi o następujących parametrach: a)  $\alpha = \beta = 45^\circ$ , b)  $\alpha = \beta = 65^\circ$ , oraz  $\alpha = \beta = 85^\circ$ . Uzyskane wyniki badań na tworzywie modelowym porównano z wynikami badań eksperymentalnych na stali przedstawionymi w pracy [9], gdzie użyto narzędzi o zbliżonej geometrii. Stopień zaawansowania procesu cięcia jest określony głębokością  $h$ , na którą zagłębiło się ostrze

klina w materiał (rys. 3). Podczas procesu po obu stronach narzędzia następuje lokalne wypychanie materiału w górę. Elementy skończone sąsiadujące z krawędzią narzędzia na skutek działania współczynnika tarcia zostają znacznie rozciągnięte i wciągnięte ku dołowi. W końcowej fazie procesu można wyróżnić trzy strefy płynięcia materiału oznaczone na rysunku 3. Kierunki płynięcia tych stref oznaczono żółtymi strzałkami. W strefie nr 1 materiał płynął wzdłuż krawędzi tnącej narzędzia. Był ciągnięty przez klin w miarę jego zagłębiania się w materiał. Elementy w tej strefie są najbardziej zmiażdżone i wydłużone (około pięciokrotne wydłużenie). W miarę oddalania się od krawędzi tnącej narzędzia można zaobserwować, iż materiał przechodzi w strefę płynięcia nr 2, w której wydłużenie elementów zmalało. Materiał wypychany przez ostrze popłynął na boki przechodząc w strefę płynięcia nr 3. Elementy w tej fazie zostały ściśnięte zarówno od strony ostrza jak i ścianek formy, co spowodowało ich płynięcie ku górze. Przy krawędzi dolnej formy ściśnięcie elementów siatki jest niewielkie, wzrost następuje w połowie wysokości próbki, wysokość elementów wzrasta kosztem ich szerokości. Niewielkie celowe stępienie klina spowodowało utworzenie się strefy przylegania powodującej wzrost sił cięcia wskutek umacniania się materiału.

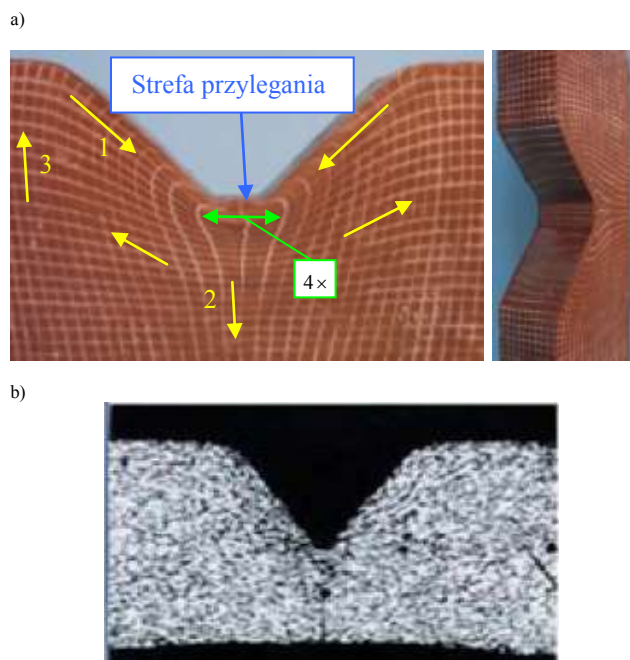


Rys. 3. Widok próbki podczas cięcia stępieniem klinem symetrycznym ( $\alpha = \beta = 65^\circ$ ): a) tworzywo modelowe, b) badania eksperymentalne na rzeczywistym materiale [9]

Fig. 3. View of the sample during cutting by wear symmetric tool ( $\alpha = \beta = 65^\circ$ ): a) plasticine model, b) experiment [9]

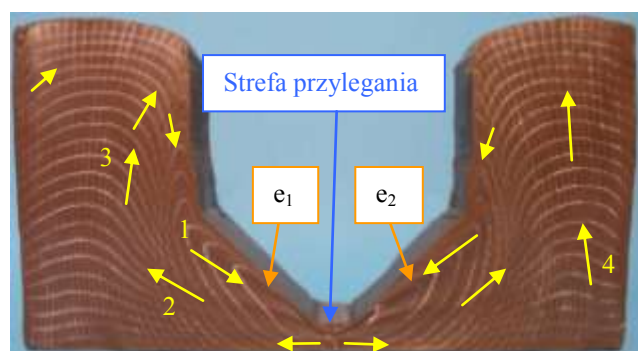
W przypadku cięcia stępieniem klinem symetrycznym o kątach:  $\alpha = \beta = 45^\circ$  już w początkowej fazie procesu pod ostrzem klina utworzyła się strefa przylegania (rys. 4). W dalszej fazie procesu nastąpił wzrost oporu cięcia i tarcia klina o materiał. W strefie nr 2 oprócz płynięcia materiału na boki materiał uległ płynięciu również w dół. W końcowej fazie procesu (rys. 5) obszar pod strefą przylegania został zmiażdżony, a sąsiadujące z nim elementy  $e_1$  i  $e_2$  są najbardziej rozciągnięte.

W przypadku cięcia symetrycznym klinem stępieniem o kątach:  $\alpha = \beta = 85^\circ$  wskutek wzrostu sił tarcia elementy sąsiadujące z krawędziami klina zostały ściśnięte ku dołowi (rys. 6). Warto zwrócić uwagę na to, iż nawet niewielkie stępienie ostrza spowodowało wzrost stopnia deformacji próbki. Elementy  $e_1$  i  $e_2$  zostały praktycznie zmiażdżone. Na próbce po przecięciu można zaobserwować trzy główne strefy płynięcia materiału. Strefę nr 1, która powstała w początkowej fazie procesu. Elementy w tej strefie zostały znacznie zdeformowane i rozciągnięte wskutek wzrostu sił tarcia.



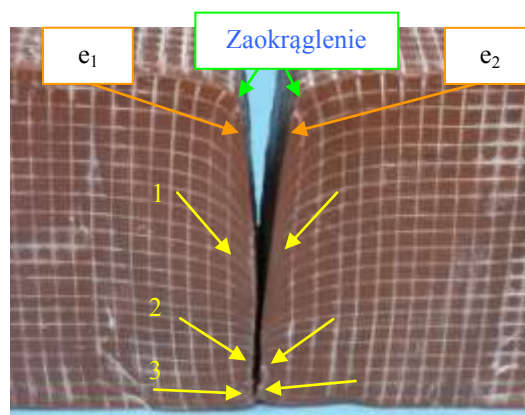
Rys. 4. Widok próbki podczas cięcia stępieniem klinem symetrycznym ( $\alpha = \beta = 45^\circ$ ): a) tworzywo modelowe, b) badania eksperymentalne na rzeczywistym materiale [9]

Fig. 4. View of the sample during cutting by wear symmetric tool ( $\alpha = \beta = 45^\circ$ ): a) plasticine model, b) experiment [9]



Rys. 5. Widok próbki po procesie cięcia stępieniem klinem symetrycznym ( $\alpha = \beta = 45^\circ$ )

Fig. 5. View of the sample after cutting by wear symmetric tool ( $\alpha = \beta = 45^\circ$ )



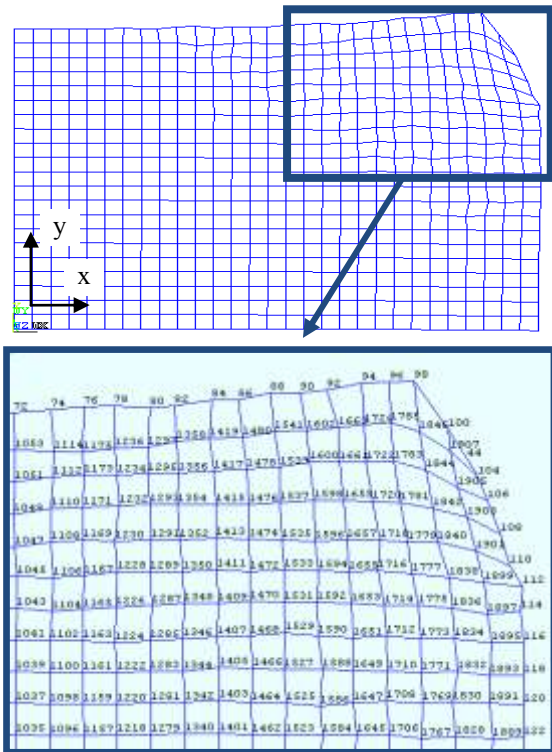
Rys. 6. Widok próbki po przecięciu stępieniem klinem symetrycznym ( $\alpha = \beta = 85^\circ$ )

Fig. 6. View of the sample after cutting by wear symmetric tool ( $\alpha = \beta = 85^\circ$ )

W strefie nr 2 materiał uległ umocnieniu, w związku z tym elementy zostały mniej zdeformowane. Po pokonaniu oporu materiału (strefa nr 3) ostrze rozdzieliło próbkę. Elementy w tej fazie charakteryzują się niewielkim zdeformowaniem i rozciągnięciem (rys. 6).

## 5. Wyznaczanie warunków brzegowych dla przemieszczeń

W badaniach modelowych wyznaczono wartości przemieszczeń punktów węzłowych w modelu przedmiotu w zależności od zagięcia narzędzia i jego geometrii. Przykładowe warunki brzegowe dla przemieszczeń węzłów zlokalizowanych w strefa kontaktu, dla narzędzia  $\alpha = \beta = 65^\circ$  zamieszczono w tablicy 1.



Rys. 7. Numeracja punktów węzłowych na próbce ciętej klinem symetrycznym ( $\alpha = \beta = 65^\circ$ ) (lewa strona próbki)

Fig. 7. Nodes numbering on sample cut by symmetric tool ( $\alpha = \beta = 65^\circ$ ) (left side of the sample)

Tab. 1. Wyznaczone w badaniach modelowych warunki brzegowe dla przemieszczeń wybranych punktów węzłowych podczas cięcia narzędziem symetrycznym ( $\alpha = \beta = 65^\circ$ )

Tab. 1. A boundary conditions of nodes for displacement obtained in model research during cutting by symmetric tool ( $\alpha = \beta = 65^\circ$ )

Numer węzła	UX mm	UY mm	Numer węzła	UX mm	UY mm
1889	0,42	9,08	88	-5,66	4,7
1895	0,213	0,1	90	-6,2	5,45
1897	-2,03	-0,64	92	-6,84	6,3
1899	-2,45	-0,64	94	-7,6	6,2
1901	-4,38	-1,49	96	-6,04	7,16
1903	-6,03	-0,64	98	-8,44	5,02
1905	-8,12	-0,21	100	-11,3	1,71
1907	-9,32	0,85	122	0,53	3,63
44	-12,4	-4,17	120	0,42	-0,85
72	-2,03	1,60	118	0,98	-0,96
74	-1,17	2,24	116	1,06	-1,49
76	-1,71	2,35	114	0,96	-3,63
78	-2,13	2,67	112	0,64	0,64
80	-2,56	2,77	110	-1,2	-1,2
82	-4,06	2,34	108	-4,49	-8,12
84	-4,55	3,63	106	-6,73	-7,75
86	-5,13	4,15	104	-9,40	-7,59

## 6. Wnioski

Z przeprowadzonych badań modelowych na obiekcie modelowym wynikają następujące wnioski:

- 1) W złożonych procesach obróbki plastycznej, w których materiał kształtowany ma więcej niż jeden stopień swobody, takich jak cięcie, intuicja lub doświadczenie mogą okazać się niewystarczające w przewidywaniu mechaniki procesu. Wizualizacja procesu jest w tym przypadku bardzo przydatnym i efektywnym narzędziem. Modelowanie jakościowe może być wykorzystane do uzyskania szybkiej odpowiedzi na pytanie: *jak i gdzie popłynie odkształcony materiał w procesie cięcia?* Pozwala również określić wpływ geometrii i zużycia narzędzia tnącego na stany przemieszczeń i odkształceń materiału.
- 2) W badaniach modelowych określono obszary silnych nieliniowości zarówno geometrycznych jak i materiałowych w zależności od warunków realizacji procesu.
- 3) Wyznaczone przemieszczeniowe warunki brzegowe tj. węzłów położonych na powierzchniach kontaktowych modelu są niezbędne do przeprowadzenia obliczeń numerycznych metodą elementów skończonych (metoda implicit). Mogą być również wykorzystane do weryfikacji wyników otrzymanych z symulacji numerycznych na obiekcie rzeczywistym (metoda explicit).
- 4) Duża liczba czynników wpływających na jakość uzyskanego wyrobu powoduje, że w celu uniknięcia kosztownych badań eksperymentalnych celowe jest prowadzenie badań modelowych i symulacyjnych przy zastosowaniu metody elementów skończonych i systemów komercyjnych np. ANSYS, ABAQUS.
- 5) Zmiana geometrii stempli istotnie wpływa na stany deformacji i przemieszczeń. Podczas procesu cięcia przemieszczeniu materiału towarzyszą zjawiska przylegania i poślizgu występujące w obszarach kontaktu. Stosowanie stępionych narzędzi powoduje znaczny wzrost oporu, tarcia oraz siły potrzebnej do rozdzielania materiału, zwiększa stopień deformacji próbki przyczyniając się do większej energochłonności procesu. Powoduje powstawanie stref przylegania, w których materiał ulega umocnieniu powodując wzrost oporu w czasie cięcia. Zwiększa również wielkość wpływek. Czynniki te decydują o mechanice płynięcia materiału oraz wpływają na stany przemieszczeń i odkształceń.

## 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] 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.
- [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] Bohdal Ł., Kukielka L.: „Analiza numeryczna procesu cięcia blach karoseryjnych klinowym narzędziem niesymetrycznym” XII Słupskie Forum Motoryzacji, Słupsk 2009 str. 109-114.
- [8] Bohdal Ł.: Modelowanie i analiza numeryczna procesów cięcia blach z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej. *Rozprawa doktorska*. Koszalin 2009.
- [9] Labergere C., Dubois C., Saanouni K., Beigneux O., Li J.J.: Numerical simulation of easy opening lids for food cans using fully coupled advanced constitutive equations with ductile damage. *International Journal of Materials Forming, Suppl 1*, 2008, pp. 149-152.