

**Łukasz BOHDAL**

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, KATEDRA MECHANIKI TECHNICZNEJ I WYTRZYMAŁOŚCI MATERIAŁÓW  
ul. Raclawicka 15/17, 75-620 Koszalin

## Eksperymentalne i numeryczne metody określania jakości wyrobów w procesach cięcia blach

Dr inż. Łukasz BOHDAL



Absolwent Politechniki Koszalińskiej. Uzyskał dyplom magistra inżyniera o specjalności Inżynierskie Zastosowania Komputerów z oceną bardzo dobrą. W latach 2004 - 2005 r. odbył staż w Katedrze Maszyn Roboczych, gdzie zajmował się zaawansowanymi programami komputerowymi (ANSYS i ABAQUS) oraz wykonał symulacje procesów cięcia blach i wykrawania z uwzględnieniem nieliniowości. Stopień naukowy doktora uzyskał w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn z wyróżnieniem.

e-mail: Bohdall@interia.pl

### Streszczenie

W pracy przedstawiono eksperymentalne i numeryczne metody określania jakości wyrobów w procesach cięcia blach w zależności od parametrów technologicznych procesu. W tym celu przeprowadzono badania symulacyjne i eksperymentalne wpływu prędkości cięcia, luzów między nożycami, grubości ciętej blachy na jakość technologiczną wyrobu. Badania eksperymentalne przeprowadzono na nożycach krążkowych. Wyniki opracowano statystycznie otrzymując modele w postaci funkcji regresji. Analizy numeryczne zostały przeprowadzone w programie Ansys/LS-Dyna z wykorzystaniem metody explicit. Do opisu właściwości ciętej blachy został wykorzystany model materiałowy Cowpera-Symonds'a. W celu rozwiązania postawionego problemu zastosowano modele przyrostowe, które pozwalają rozwiązać wiele problemów bez znajomości warunków brzegowych w obszarze kontaktu. Wyniki analiz mogą być wykorzystane do projektowania procesu cięcia a także podstawą doboru parametrów technologicznych w aspekcie jakości technologicznej wyrobu.

**Słowa kluczowe:** cięcie, modele przyrostowe, funkcja regresji, symulacja.

### Experimental and numerical methods of product quality determining in cutting process

#### Abstract

In this paper experimental and numerical methods of determining of quality of products in cutting process in the dependence of technological parameters were presented. The influence of the speed of cutting, clearance and metal thickness on the quality of cut surface was presented. Numerical analyses were done in Ansys/LS-Dyna program with using explicit method. To describe the properties of sheet-plate being cut, the Cowper – Symonds' equation was used. A Cowper-Symonds' model allows for linear-isotropic, kinematic or mixed plastic strain hardening and the effect of the intensity of plastic strain velocity. For the 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. The results of the verification of the experimental research and the statistical analysis of the results were presented. This results can be used for the purpose of designing of the cutting process: selection of the conditions of the process and its optimization.

**Keywords:** cutting, increment models, regression function, simulation.

### 1. Wstęp

Podstawowym problemem w projektowaniu procesu cięcia blach jest opracowanie odpowiedniej konstrukcji narzędzi i dobór warunków realizacji procesu (luz (l) między narzędziami (rys. 1), sposób smarowania, prędkość cięcia, geometria narzędzi, sposób docisku lub mocowania blachy itp.) w celu zapewnienia wymagań technicznych oraz właściwości otrzymanego wyrobu, przy jednoczesnym wzroście trwałości narzędzia i wydajności procesu [3, 5, 6]. Mimo dużej liczby publikacji na temat cięcia ciągle występują problemy przy doborze warunków procesu i w wielu firmach

dobierane są one metodą prób i błędów. Znacząco zwiększa to koszty ze względu na wysoką cenę narzędzi do tego procesu. Trudności związane z silnie nieliniowym charakterem procesu cięcia przez długi czas nie pozwalały na uzyskanie miarodajnych oraz możliwe uniwersalnych metod analizy. Niezwykle szybki w ostatnich latach rozwój w zakresie teorii ośrodków ciągłych, teorii plastyczności oraz metod numerycznych w mechanice, a zwłaszcza metody elementów skończonych, wsparty postępem systemów obliczeniowych, stworzył warunki, w których analizowanie tak złożonych problemów stało się możliwe. Również wymagania dotyczące jakości uzyskiwanych rozwiązań są coraz ostrzejsze. Konieczna jest wysoka wiarygodność pozwalająca na projektowanie procesu nie tylko z odpowiednim stopniem niezawodności, ale również spełniających wymagania dotyczące racjonalnego kształtowania, ekonomiki itd. Dlatego analiza tego typu zagadnień nieliniowych, nawet przy zastosowaniu zaawansowanych systemów komputerowych, nadal stanowi wyzwanie dla współczesnej mechaniki.

Badania symulacyjne są cennym narzędziem pozwalającym na rozszerzenie przedziału czasu i poznanie zjawisk, których badanie eksperymentalne jest niemożliwe lub bardzo drogie [5, 8, 9]. Umożliwią one uwzględnienie wszystkich istotnych czynników wpływających na jakość wyrobu i wydajność procesu cięcia i symulowanie występujących zjawisk dla dowolnego stanu zaawansowania procesu. Dzięki symulacji numerycznej procesu technologicznego lub procesu deformacji konstrukcji, można w prosty sposób określić zmiany układu. Uzyskuje się informację o zmianach obciążeń, naprężeń, rozkładu odkształceń i wymiarów zewnętrznych w kolejnych fazach procesu deformacji. Dzięki wykorzystaniu nowoczesnych metod modelowania możliwa jest analiza procesu w dowolnej chwili czasowej, prognozowanie jakości powierzchni przecięcia oraz jakości wyrobu. Symulacja numeryczna procesów technologicznych tj. cięcia blach, pozwala ograniczyć liczbę prototypów kosztownych narzędzi: matryc, stempli i dociskaczy. Ułatwia i skracza czas potrzebny do ich zaprojektowania. Może więc, przynieść znaczne oszczędności na etapie przygotowania produkcji nowych wyrobów. Badania symulacyjne pozwalają także na uwzględnienie nieliniowości procesu, które mają wpływ na stany deformacji i naprężeń w kształtowym wyrobie. Pominięcie tych nieliniowości może spowodować powstawanie błędów w modelowaniu jakości wyrobów.

### 2. Badania symulacyjne procesu cięcia

Dzięki wykorzystaniu opracowanych aplikacji komputerowych możliwa była analiza zjawisk występujących w niezwykle małych obszarach, przebiegających z super wysokimi prędkościami, trwających bardzo krótko, a decydujących o wynikach procesu cięcia. Do problemów takich należą w szczególności:

- tarcie w obszarach kontaktu narzędzia z przedmiotem, przyleganie i poślizg, odkształcenia, i naprężenia przedmiotu ciętego,
- zmienność właściwości materiału ciętego,
- pęknięcie materiału.

Analiza numeryczna pozwala również na określenie:

- wpływu na jakość technologiczną wyrobu: rodzaju materiału i jego stanu, geometrii narzędzi,
- wpływu warunków cięcia na stan odkształceń, naprężeń i temperatur w przedmiocie,
- kształtów pęknięć, jakości powierzchni przecięcia.

Do rozwiązania postawionego problemu posłużono się metodą różnic centralnych zwaną także metodą jawnego całkowania (explicit). Należy ona do większej grupy metod bezpośredniego całkowania dynamicznych równań ruchu [4, 5].

Przyjęto model materiałowy sprężysto/lepko-plastyczny Cowpera-Symonds. W modelu wykorzystuje się warunek plastyczności Hubera-Misesa-Hencky'ego oraz stowarzyszone prawo płynięcia. Model Cowpera-Symonds uwzględnia liniowo-izotropowe ( $\beta=1$ ), kinematyczne ( $\beta=0$ ) lub mieszane ( $0 < \beta < 1$ ) wzmocnienie plastyczne oraz wpływ intensywności prędkości odkształcenia plastycznego, według zależności potęgowej [4, 5]:

$$\sigma_p = [1 + (\dot{\phi}_i^{(p)} / C)]^{1/P} (R_e + \beta E_p \dot{\phi}_i^{(p)}),$$

gdzie:  $\beta$  – parametr umocnienia,  $R_e$  – początkowa, statyczna granica plastyczności, MPa,  $\dot{\phi}_i^{(p)}$  – intensywność prędkości odkształceń plastycznych,  $s^{-1}$ ,  $C$  – parametr materiałowy określający wpływ intensywności prędkości odkształcenia plastycznego,  $s^{-1}$ ,  $P$  – stała materiałowa określająca wrażliwość materiału na prędkość odkształcenia plastycznego,  $\dot{\phi}_i^{(p)}$  [–] – intensywność odkształcenia plastycznego,  $E_p = \frac{E_T E}{E - E_T}$  – parametr materiałowy zależny od

modułu umocnienia plastycznego  $E_T = \partial \sigma_p / \partial \dot{\phi}_i^{(p)}$  i modułu sprężystości Younga  $E$ .

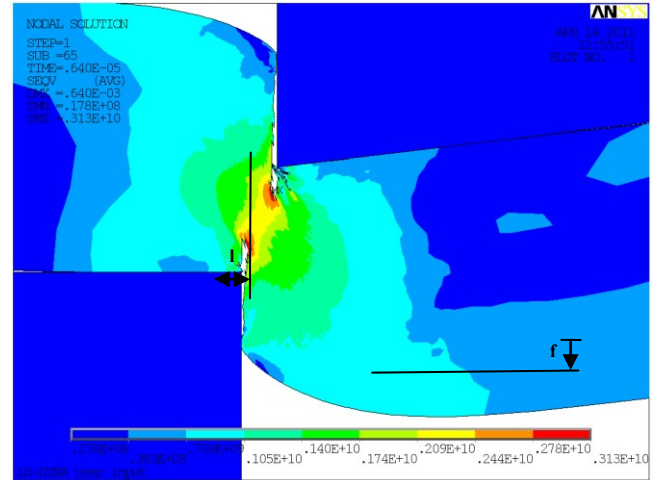
Dla modelu Cowpera-Symonds przyjęto parametry materiałowe stali DC 01 [5]. Przyjęto, że uchwyt i noże są ciałami nieodkształcalnymi  $E \rightarrow \infty$ . Analizy numeryczne przeprowadzono dla parametrów cięcia zestawionych w tabeli 1.

### 3. Wyniki analizy numerycznej

Jednym z wielu problemów związanych z modelowaniem procesu cięcia jest opracowanie modelu fizycznego, matematycznego, aplikacji komputerowych umożliwiających analizę procesu w dowolnej chwili czasowej z uwzględnieniem nieliniowości procesu i zjawisk zachodzących podczas kształtowania wyrobów. Opracowany model matematyczny procesu cięcia sformułowany w przyrostach w uaktualnionym opis Lagrange'a oraz rozwiązania opracowanych układów równań po zastosowaniu jawnych i niejawnych metod całkowania umożliwiają analizę skomplikowanych zjawisk fizycznych towarzyszących procesowi. Jednym z takich zjawisk jest pęknięcie materiału.

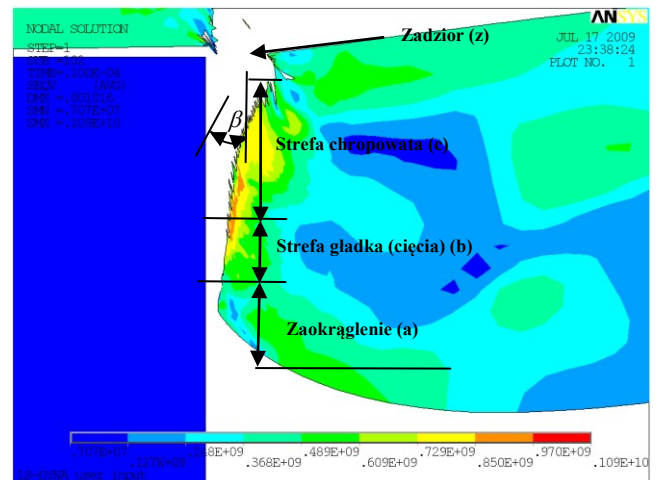
Pęknięcie materiału jest bardzo złożonym procesem i zależy od wielu czynników m. in. czynników materiałowych (modułu Younga, współczynnika Poissona, początkowej granicy plastyczności, modułu umocnienia, wrażliwości na prędkość odkształcenia, wartości odkształcenia granicznego), czynników geometrycznych ciętej blachy i narzędzia (narzędzi) (wymiarów narzędzi, stanu powierzchni i stanu fizycznego stref warstwy wierzchniej po obróbkach poprzedzających, geometrii ostrza narzędzia, rodzaj narzędzia) oraz parametrów technologicznych (prędkości cięcia, luzów między narzędziami, współczynników tarcia) [1, 2].

Aby uzyskać wyrób o pożądanej jakości powierzchni przecięcia i odpowiedniej dokładności wymiarowo – kształtowej steruje się parametrami procesu. 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. Umiejętny dobór parametrów geometrycznych narzędzi, dociskaczy, wielkości luzów (l) itp., umożliwia uzyskanie gładkiej powierzchni przecięcia, bez konieczności stosowania dodatkowych operacji obróbkowych. Jakość technologiczną wyrobu określa się na podstawie struktury geometrycznej uzyskanej powierzchni przecięcia. Należy dążyć do uzyskania jak najdłuższej strefy gładkiej (cięcia) przy jak najmniejszym udziale strefy złomu rozdzielczego (chropowatej).



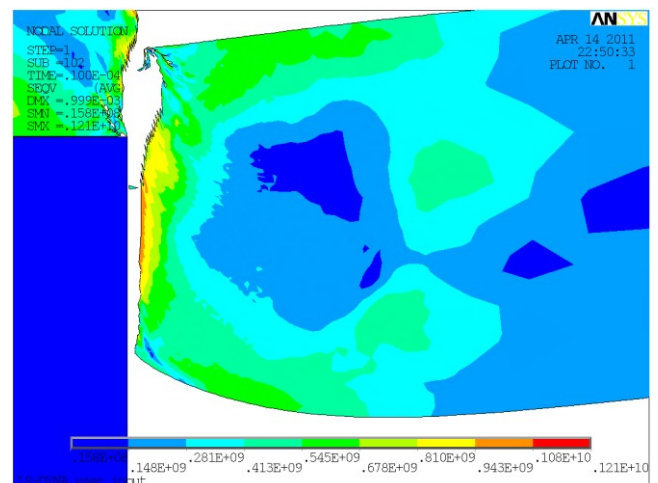
Rys. 1. Faza pęknięcia materiału podczas procesu cięcia (widok przekroju, mapy intensywności naprężeń) dla 6. poziomu planu badań

Fig. 1. Cracking phase during the cutting process (cross-section maps of stress intensity) for 6th level research plan



Rys. 2. Przekrój wyrobu wyciętego z widocznym rozkładem naprężeń oraz oznaczonymi strefami na powierzchni przecięcia dla 6. poziomu planu

Fig. 2. Cross-section of the product. Distribution of stresses and marked areas on the cut surface for 6th level research plan



Rys. 3. Przekrój wyrobu wyciętego z widocznym rozkładem naprężeń oraz oznaczonymi strefami na powierzchni przecięcia dla 5. poziomu planu

Fig. 3. Cross-section of the product. Distribution of stresses and marked areas on the cut surface for 5th level research plan

Oprócz struktury geometrycznej powierzchni przecięcia istotna jest również dokładność geometryczna kształtu całego wyrobu. Dokładność tę, można opisać wprowadzając parametry charakteryzujące, jakość geometryczną wyrobu określoną za pomocą:

- wysokości zadzioru,  $z$ ,
- strzałki ugięcia wyrobu,  $f$ ,
- zbieżności określonej kątem  $\beta$ .

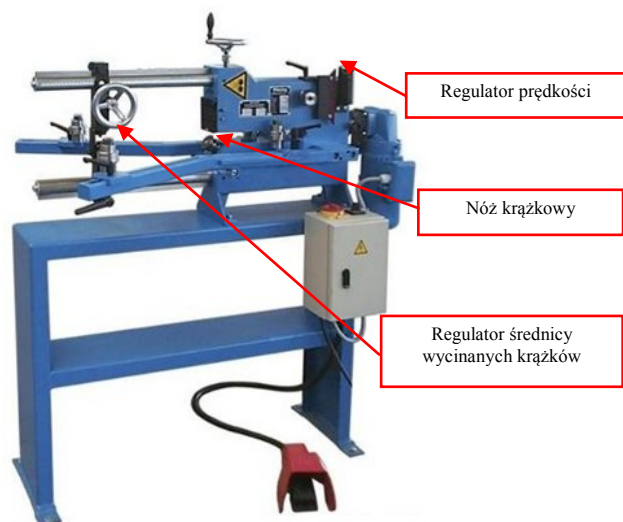
Opracowane aplikacje komputerowe umożliwiają m.in. analizę stanów naprężeń i odkształceń w dowolnej chwili trwania procesu (rys. 1) oraz obserwację i pomiar stref na powierzchni przecięcia i ocenę jakości uzyskanego wyrobu (rys. 2 i 3).

#### 4. Badania eksperymentalne

Pomimo ogromnego postępu w dziedzinie obliczeń numerycznych zagadnień nieliniowych, otrzymane wyniki poddaje się weryfikacji eksperymentalnej. Celem przeprowadzonych badań była weryfikacja wyników badań modelowych i analiz numerycznych na tworzywie modelowym i rzeczywistym, opracowanie funkcji regresji opisujących wpływ poszczególnych parametrów na stany naprężeń i odkształceń oraz jakość uzyskanego wyrobu [5, 6, 7, 10].

Zakres badań wynikał z zapotrzebowania przemysłu i obejmował analizę wpływu prędkości cięcia  $v$ , luzów między narzędziami i grubości stosowanej blachy na jakość wyrobu określaną jako długości poszczególnych stref na powierzchni przecięcia wyrobu: strefy przełomu rozdzielczego (strefa pękania)  $c$ , strefy cięcia  $b$ , strefy zaokrąglenia  $a$ .

Badania przeprowadzono na stanowisku przedstawionym na rys. 4. 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 obrzeży wycinanych krążków. Napęd maszyny odbywa się jednostopniowo, dwustopniowo lub bezstopniowo poprzez silnik z przekładnią i hamulcem. Średnicę wycinanych krążków i pierścieni ustala się za pomocą skali.



Rys. 4. Stanowisko do badań eksperymentalnych  
Fig. 4. Test stand

W wyniku przeprowadzonej analizy czynnikowej oraz badań rozpoznawczych określono zbiór czynników badanych (wejściowych), wyjściowych, stałych i zakłócających. Do czynników badanych zaliczono: prędkość cięcia, luz między narzędziami i grubość ciętej blachy. Do czynników wyjściowych zaliczono długości stref: pękania, gładkiej oraz zaokrąglonej na powierzchni

przecięcia wyrobu. Do czynników stałych należały: rodzaj maszyny (nożyce krążkowe KSE 10/10), geometria narzędzi, twardość narzędzi, twardość i rodzaj ciętej stali. Czynniki zakłócające to m. in.: losowe fluktuacje nastawionych parametrów obróbki, niejednorodność materiału próbek, niedokładność mocowania próbek, dokładność wykonania narzędzi tnących (noży).

Taki podział czynników wpływających na obiekt badań pozwolił na przeprowadzenie planowanych badań eksperymentalnych oraz opracowanie funkcji regresji [5]. Otrzymana w procesie identyfikacji funkcja regresji posłuży do sterowania obiektem badań. W tym przypadku obiekt badań traktuje się jako „czarną skrzynkę” a poszukuje się relacji pomiędzy wyjściami i wejściami obiektu bez znajomości zjawisk fizycznych zachodzącym w nim.

Proces identyfikacji obiektu wielowymiarowego przebiegał w następujących punktach [9]:

- 1) ustalenie przedziału zmienności czynników badanych,
- 2) przyjęcie klasy modelu matematycznego,
- 3) kodowanie czynników badanych,
- 4) realizowanie badań właściwych,
- 5) wyniki eksperymentu,
- 6) eliminacja wyników obciążonych błędem grubym,
- 7) obliczenie wariancji międzywierszowej i odchylenia standardowego,
- 8) sprawdzenie jednorodności wariancji w próbie,
- 9) obliczenie współczynników w funkcji regresji,
- 10) analiza statystyczna funkcji regresji,
- 11) badanie istotności współczynnika korelacji wielowymiarowej,
- 12) sprawdzenie adekwatności modelu matematycznego,
- 13) odkodowanie funkcji regresji.

Po wyodrębnieniu czynników wpływających na obiekt badań należy określić przedziały zmienności czynników wejściowych. Przyjęty obszar badań w rozpatrywanym przypadku wynosi:

- 1) Prędkość cięcia:  $\bar{x}_1 = v : v = 4; 32 \text{ m/min}$
- 2) Luzy między narzędziami:  $\bar{x}_2 = l : l = 0,03; 1 \text{ mm}$ ,
- 3) Grubość blachy:  $\bar{x}_3 = g : g = 0,8; 1 \text{ mm}$ ,

Eksperyment przeprowadzono zgodnie z planem badań statycznym zdeterminowanym dwupoziomowym całkowitym, zwanym całkowitym doświadczeniem czynnikowym. Plan ten wymaga realizacji doświadczeń na dwóch poziomach dla wszystkich możliwych układów czynników na wejściu (tab. 1). Stosowano dwukrotne powtarzanie eksperymentu dla każdego poziomu planu.

Tab. 1. Macierz planu eksperymentu według planu dwupoziomowego  
Tab. 1. Two levels experiment plan

Poziom planu	Czynniki badane		
	Wartości rzeczywiste		
	Luz, mm	Prędkość, m/min	Grubość, mm
	$l$	$v$	$g$
1	0,03	4	0,8
2	0,1	4	0,8
3	0,03	32	0,8
4	0,1	32	0,8
5	0,03	4	1
6	0,1	4	1
7	0,03	32	1
8	0,1	32	1

#### 5. Wyniki badań eksperymentalnych

Zgodnie z planem eksperymentu z przygotowanych pasów blach ze stali DC01 wycięto krążki. Po procesie cięcia zmierzono długości poszczególnych stref na powierzchni przecięcia w 4 miejscach na obwodzie krążka. Uzyskane długości uśredniono dla każdej strefy. Uzyskane wyniki zestawiono w tabelach 2-4.

Tab. 2. Wartości czynników wynikowych dla strefy zaokrąglonej  
Tab. 2. The output factor values for the indentation zone

Poziom planu	Wartość czynnika wynikowego			
	a, mm			
	Średnia	1	2	3
1	0,344	0,356	0,331	0,345
2	0,418	0,424	0,411	0,419
3	0,199	0,221	0,183	0,193
4	0,474	0,472	0,481	0,469
5	0,443	0,453	0,434	0,444
6	0,425	0,437	0,425	0,413
7	0,415	0,411	0,414	0,421
8	0,452	0,443	0,453	0,462

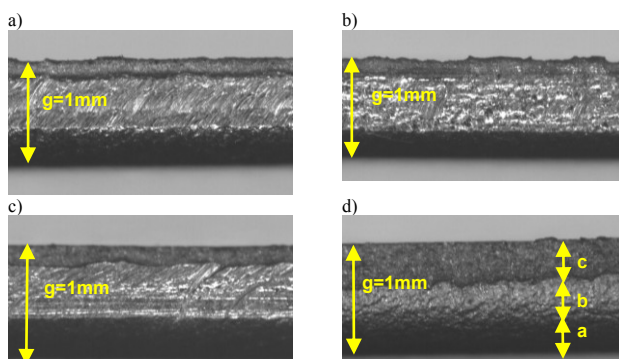
Tab. 3. Wartości czynników wynikowych dla strefy ścięcia  
Tab. 3. The output factor values for the burnished zone

Poziom planu	Wartość czynnika wynikowego			
	b, mm			
	Średnia	1	2	3
1	0,480	0,482	0,487	0,473
2	0,645	0,638	0,655	0,642
3	0,516	0,513	0,52	0,515
4	0,966	0,956	0,971	0,972
5	0,455	0,462	0,454	0,451
6	0,240	0,243	0,238	0,241
7	0,496	0,5	0,497	0,491
8	0,453	0,444	0,452	0,463

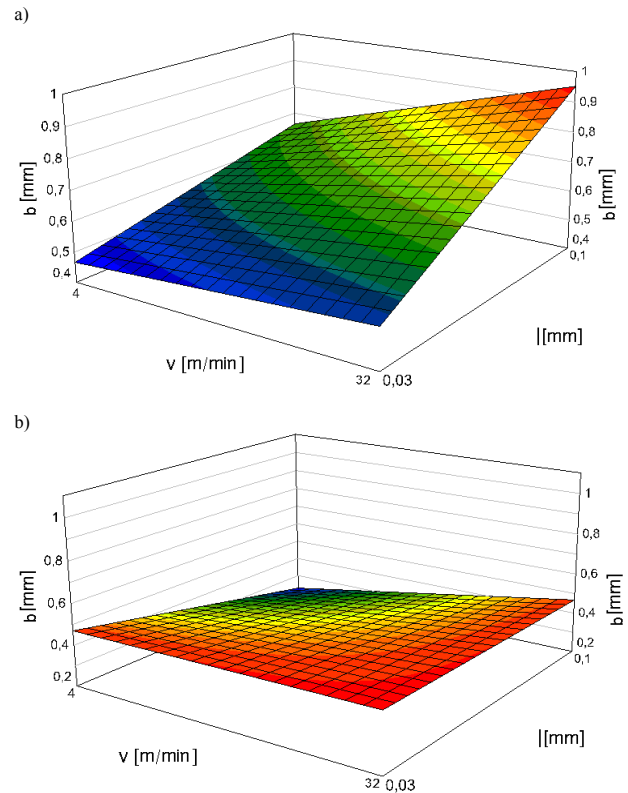
Tab. 4. Wartości czynników wynikowych dla strefy chropowatej  
Tab. 4. The output factor values for the fracture zone

Poziom planu	Wartość czynnika wynikowego			
	c, mm			
	Średnia	1	2	3
1	0,145	0,152	0,131	0,153
2	0,121	0,126	0,113	0,125
3	0,140	0,143	0,145	0,133
4	0,140	0,142	0,136	0,143
5	0,204	0,2	0,199	0,213
6	0,387	0,394	0,386	0,383
7	0,17	0,171	0,167	0,172
8	0,211	0,212	0,2	0,222

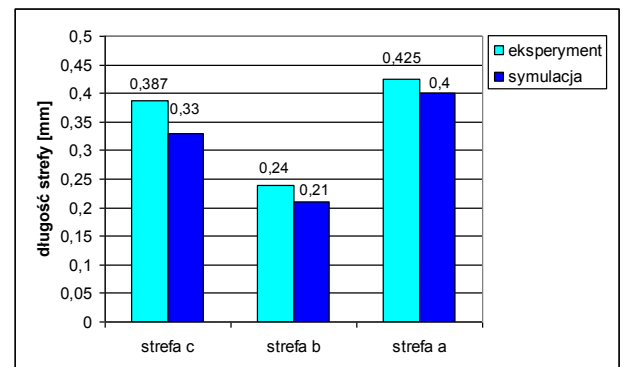
Na rysunku 5 przedstawiono wygląd powierzchni przecięcia krążków: a) 1. poziom planu, b) 3. poziom planu, c) 5. poziom planu, d) 6. poziom planu



Rys. 5. Wygląd powierzchni przecięcia krążków: a) 1. poziom planu, b) 3. poziom planu, c) 5. poziom planu, d) 6. poziom planu  
Fig. 5. View of the cut surface of products: a) 1st plan level, b) 3rd plan level, c) 5th plan level, d) 6th plan level



Rys. 6. Wykres zależności  $b=f(v, l)$  dla a)  $g=0,8$  mm, b)  $g=1$  mm  
Fig. 6. Dependency surface plot  $b=f(v, l)$  for a)  $g=0,8$  mm, b)  $g=1$  mm



Rys. 7. Porównanie wyników badań eksperymentalnych z symulacyjnymi dla 6. poziomu planu  
Fig. 7. Comparison of experimental results with simulation (6th plan level)

W wyniku analizy statystycznej otrzymano funkcje regresji, które pozwalają obliczać wielkości decydujące o jakości wyrobu w zależności od warunków technologicznych cięcia lub określać optymalne warunki procesu [5]. Uzyskane funkcje regresji dla każdej strefy pozwalają na obliczenie ich długości dla dowolnych wartości czynników wejściowych w zakresie dla prędkości od 4 do 32 m/min, luzów w zakresie od 0,03 do 0,1 mm, grubości blachy od 0,8 do 1 mm przy ustaleniu jednego czynnika wejściowego [5]. Na rysunku 6 przedstawiono wpływ luzu i prędkości na długość strefy cięcia w zależności od grubości ciętej blachy.

## 6. Podsumowanie

Z punktu widzenia mechaniki cięcia blach jest nieliniowym zagadnieniem brzegowo-początkowym. W procesie występują nieliniowości: geometryczna i fizyczna, występują nieliniowe warunki brzegowe w obszarze kontaktu. Poprzez nieliniowość geometryczną należy rozumieć nieliniową zależność pomiędzy odkształceniem a przemieszczeniem. Nieliniowość fizyczna to nieliniowa

zależność pomiędzy naprężeniem a odkształceniem. Ponadto, w procesie występują nieliniowe, ruchome oraz zmienne w czasie i przestrzeni warunki brzegowe, które nie są znane w obszarach kontaktu narzędzia z przedmiotem. Analityczne rozwiązanie problemu, czyli określenie stanów przemieszczeń, odkształceń, naprężeń, nacisków, sił tarcia itd., w dowolnej chwili realizacji procesu jest niemożliwe. Możliwe jest natomiast rozwiązanie numeryczne z wykorzystaniem metody elementów skończonych oraz nowoczesnych metod modelowania (badań symulacyjnych). Opracowane aplikacje umożliwiają uwzględnienie wszystkich istotnych czynników wpływających na jakość wyrobu, wydajność procesu cięcia i symulowanie występujących zjawisk dla dowolnego stanu zaawansowania procesu. Badania eksperymentalne potwierdziły istotność wpływu wybranych parametrów technologicznych cięcia na jakość technologiczną wyrobu. Jakość uzyskanego wyrobu zależy między innymi od luzu, grubości blachy oraz od prędkości cięcia. Opracowane równania regresji pozwalają obliczać wielkości decydujące o jakości wyrobu w zależności od warunków technologicznych cięcia lub określać optymalne warunki procesu. Przeprowadzone badania eksperymentalne pozwoliły zaobserwować długości poszczególnych stref na wyrobie.

Wyniki eksperymentu są zbieżne z wynikami badań modelowych i numerycznych. Porównanie wyników analiz numerycznych z wynikami pomiarów (rys. 7) wykazuje nieistotność różnic na przyjętym poziomie istotności  $\alpha=0,05$ . Zatem można uznać, że z dokładnością wystarczającą dla praktyki inżynierskiej możliwe jest prognozowanie jakości wyrobów ciętych na podstawie wyników symulacji komputerowej. Wyniki badań eksperymentalnych wykazały przydatność opracowanych modeli matematycznych procesu cięcia. Algorytmy numeryczne, zaimplementowane w systemie ANSYS mogą być wykorzystane do oceny wpływu warunków technologicznych cięcia na jakość wyrobu. Pozwalają lepiej zrozumieć zjawiska zachodzące w strefach kontaktu i odkształceń, a zatem mogą być podstawą do opracowania wytycznych doboru warunków cięcia, ze względu na wymaganą jakość technologiczną wyrobu.

## 7. Literatura

- [1] Anderson T.L.: Fracture mechanics fundamentals and applications. CRC Press, Boston 1991.
- [2] Bednarski T.: Mechanika plastycznego płynięcia w zarysie. PWN, Warszawa 1995.
- [3] Bohdal L., Kukielka L.: Modelling and Numerical Analysis of the Cutting Process. Gamm Gdańsk 2009.
- [4] Bohdal L., Kukielka L.: The effect of fillet radius of the tool blade on the stress and strain states in the process of cutting a sheet plate with circular cutters. 6th International Congress on Industrial and Applied Mathematics 2007, Zürich, Switzerland.
- [5] Bohdal L.: Modelowanie i analiza numeryczna procesów cięcia blach z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej. Rozprawa doktorska, Koszalin 2009.
- [6] Dzidowski E.S.: Mechanizm pęknięcia poślizgowego w aspekcie dekohezji sterowanej metali. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 1990.
- [7] Hambli R.: Comparison between Lemaitre and Gurson damage models in crack growth simulation during blanking process. International Journal of Mechanical Sciences 43: 2769–2790, 2001.
- [8] Jasiński G., Wolnik L.: Wykorzystanie metody elementów skończonych do symulacji czujników elektrochemicznych na bazie elektrolitów stałych. PAK 2010 nr 06, s. 552-554
- [9] Kukielka L.: Podstawy badań inżynierskich. Politechnika Koszalińska, PWN, Warszawa 2002.
- [10] Patyk S., Patyk R., Kukielka L., Kułakowska A.: Eksperymentalne i numeryczne metody określania parametrów siłowych w procesie nagniatania tocznego powierzchni chropowatej. PAK 2010 nr 06, s. 620-623.

otrzymano / received: 01.02.2011  
przyjęto do druku / accepted: 04.04.2011

artykuł recenzowany

## INFORMACJE

### Newsletter PAK

Wydawnictwo PAK wysyła drogą e-mailową do osób zainteresowanych Newsletter PAK, w którym są zamieszczone:

- spis treści aktualnego numeru miesięcznika PAK,
- kalendarz imprez branżowych,
- ważniejsze informacje o działalności Wydawnictwa PAK.

Newsletter jest wysyłany co miesiąc do osób, które w jakikolwiek sposób współpracują z Wydawnictwem PAK (autorzy prac opublikowanych w miesięczniku PAK, recenzenci, członkowie Rady Programowej, osoby które zgłosiły chęć otrzymywania Newslettera).

Celem inicjatywy jest umocnienie w środowisku pozycji miesięcznika PAK jako ważnego i aktualnego źródła informacji naukowo-technicznej.

Do newslettera można zapisać się za pośrednictwem:

- strony internetowej: [www.pak.info.pl](http://www.pak.info.pl), po dodaniu swojego adresu mailowego do subskrypcji,
- adresu mailowego: [wydawnictwo@pak.info.pl](mailto:wydawnictwo@pak.info.pl), wysyłając swoje zgłoszenie.

Otrzymywanie Newslettera nie powoduje żadnych zobowiązań ze strony adresatów. W każdej chwili można zrezygnować z otrzymywania Newslettera.

Tadeusz SKUBIS  
Redaktor naczelny Wydawnictwa PAK