

Numeryczne wyznaczanie całkowitej wartości pracy stempła w procesie tłoczenia elementów samochodowych

Paweł Kałduński, Łukasz Bohdal, Jarosław Chodór

Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono numeryczny sposób określenia całkowitej pracy niezbędnej do ukształtowania wyrobu w procesie tłoczenia. Numeryczne analizy i symulacje przeprowadzono w programie Ansys/Ls-Dyna. Przeanalizowano zarówno maksymalną siłę potrzebną do ukształtowania gotowego wyrobu jak i całkowitą pracę niezbędną do wykonania przez stempel. Porównano wyniki numeryczne z dwóch matryc promieniowych: o promieniu 12 mm oraz 18 mm, a także z matrycy o profilu krzywoliniowym. Przedstawiono wybrane wyniki symulacji oraz zestawiono je na zbiorczych wykresach.

Słowa kluczowe: modelowanie, wytłaczanie, Ansys/Ls-Dyna, analiza numeryczna.

Wstęp

We współczesnej produkcji i eksploatacji dąży się do jak największej wydajności, zmniejszenia czasu wytwarzania oraz minimalizowania nakładu energetycznego. Wydajność jest często związana ściśle z nakładem energetycznym. W produkcji masowej i wielkoseryjnej zmniejszenie nakładu energetycznego na dany proces owocuje w postaci zwiększonej trwałości narzędzi i urządzeń oraz oszczędności energii elektrycznej. W przypadku wytłaczania wyrobów kołowo symetrycznych, poprzez zmniejszenie nakładu energetycznego rozumie się zmniejszenie maksymalnej siły tłoczenia. Może to także iść w parze ze zmniejszeniem całościowej pracy niezbędnej do przekształcenia płaskiego krążka w element cylindryczny z dnem.

W celu określenia maksymalnej siły tłoczenia oraz pracy jedną z opcji jest przeprowadzenie próby wytłaczania z możliwością rejestrowania siły w funkcji przemieszczenia. Drugą możliwością jest opracowanie analizy numerycznej i przeprowadzenie symulacji komputerowej procesu wytłaczania. Za pomocą analiz numerycznych możliwe jest też dokonanie dokładnych pomiarów gotowego wyrobu [1]. W przypadku modelowania procesu cięcia można przeprowadzić badania modelowe z wykorzystaniem masy plastycznej do określenia wartości siły [2]. W niniejszej pracy zamieszczono wyniki z przeprowadzonych analiz numerycznych dla trzech różnych profili matrycy. Przeprowadzono numeryczny pomiar siły tłoczenia w funkcji drogi stempła oraz obliczono na tej podstawie całkowitą pracę potrzebną do ukształtowania wyrobu dobrej jakości.

1. Model i warunki procesu

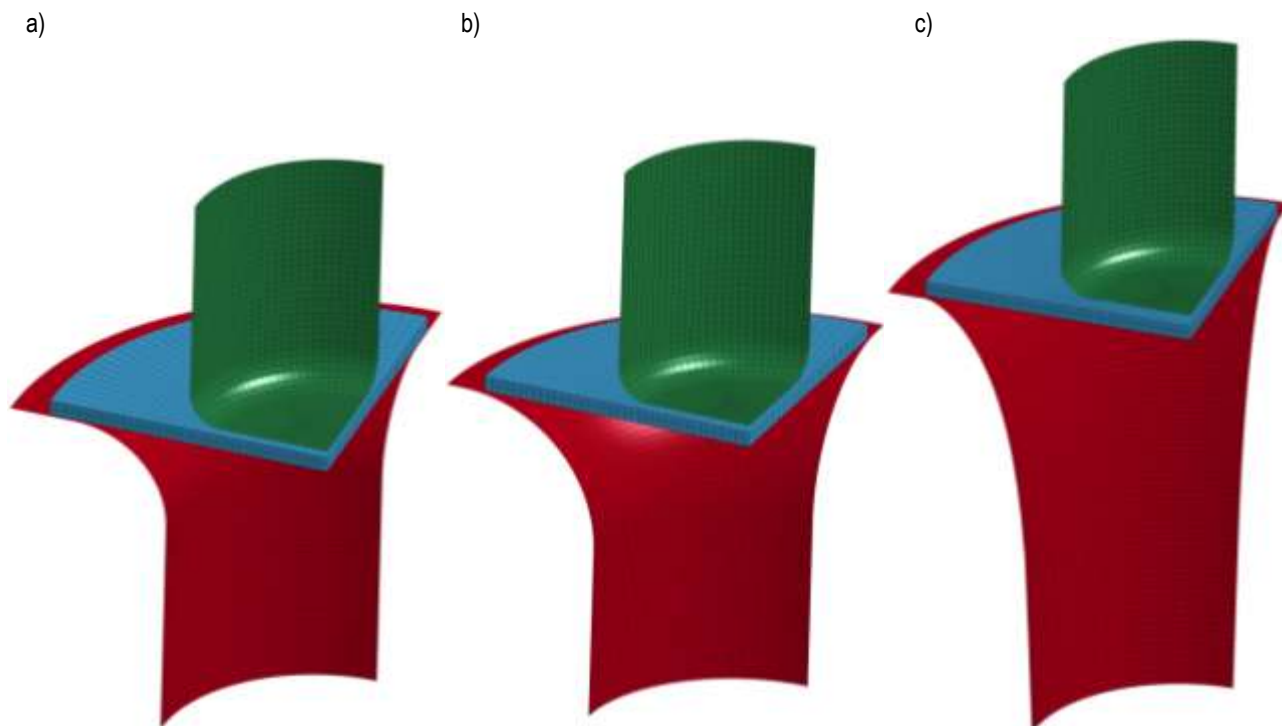
Analizy numeryczne opracowano w programie Ansys/Ls-Dyna, metodą explicit [3]. Wykorzystano model materiałowy typu bilinear, o liniowej charakterystyce sprężystości oraz liniowej plastyczności [4][5]. Proces potraktowano jako izotermiczny oraz quasistatyczny, czyli przyjęto, że na wartości odkształcenia i naprężenia nie ma wpływu prędkość

odkształceń. Z tego względu, że materiał ma charakter izotropowy, w symulacjach można przyjąć kołową symetrię modelując jedynie ćwiartkę obiektów. Jako materiał do tłoczenia przyjęto blachę DC01. Jej charakterystyka została opracowana na podstawie rozciągania płaskiej trójstopniowej próbki na maszynie wytrzymałościowej [6]. Narzędzia czyli stempel i matrycę modelowano jako ciała nieodkształcalne. Ponadto, narzędzia zostały zdyskretyzowane elementami skończonymi typu shell, natomiast blacha do tłoczenia elementami typu solid. Na rysunku 1 przedstawiono trzy modele dyskretne na których wykonano analizy numeryczne. Badania symulacyjne przeprowadzono dla następujących warunków:

- $D_0 = 70$ mm - średnica krążka
- $g_0 = 2$ mm - grubość krążka
- $d_m = 40$ mm - średnica matrycy
- $d_{st} = 34,7$ mm - średnica stempła
- $r_{st} = 4$ mm - zaokrąglenie stempła
- $r_m = 12$ mm - zaokrąglenie matrycy nr 1 (rys. 1a)
- $r_m = 18$ mm - zaokrąglenie matrycy nr 2 (rys. 1b)

Matryca nr 3 przedstawiona na rysunku 1c ma profil krzywoliniowy, który umożliwia stały kontakt blachy z jej powierzchnią podczas trwania procesu.

Wartości siły w trakcie trwania procesu zostaną wyznaczone na podstawie nacisków w strefie kontaktu pomiędzy stemplem i blachą oraz pomiędzy blachą i matrycą. Wyniki eksperymentalne przedstawiono w [6][7][8]. Całkowita praca układu zostanie wyznaczona poprzez scałkowanie całego pola pod wykresem zależności siły od przemieszczenia stempła.



Rys. 1. Dyskretne modele użyte do analiz numerycznych: a) $r_m = 12$ mm, b) $r_m = 18$ mm, c) matryca krzywoliniowa

2. Wyniki obliczeń numerycznych

Numeryczny pomiar siły w funkcji drogi stempla na podstawie nacisków kontaktowych, dla matrycy o promieniu krzywizny $r_m = 12$ mm, został przedstawiony na rysunku 2. Całkowita droga stempla niezbędna do ukształtowania z płaskiego krążka blachy cylindryczny element z dnem wynosiła: 0,05 m. Maksymalna wartość siły tłoczenia wynosiła 62 kN. Na wykresie został przedstawiony aktualny stan procesu w chwili uzyskania maksymalnej siły. Punkt maksymalnej siły pojawia się w momencie przekształcania kołnierza wytłoczki w cylinder. Od tej chwili siła stopniowo spada, gdzie w końcowym etapie jest potrzebna jedynie do przekroczenia sił tarcia blachy o matrycę. Fluktuacje wartości siły w zakresie 0 – 0,005 mm oraz 0,035 – 0,045 mm mogą wynikać z poślizgu wzajemnego pomiędzy narzędziami a blachą, a także z bezwładności blachy. Pomimo że proces jest quasistatyczny, został zamodelowany metodą explicit, a metoda ta polega na całkowaniu równania ruchu w funkcji czasu. Stąd w symulacji numerycznej przy odpowiednio krótkim czasie całkowitym, w celu skrócenia obliczeń, może występować efekt bezwładności obiektów. Bezwładność stempla została wyeliminowana poprzez zastosowanie skorupowych elementów skończonych (shell). Fluktuacje na wykresie jednak są tylko chwilowe i nie zaburzają trendu funkcji siły.

Na wykres nałożono linię trendu szóstego stopnia aby najdokładniej odwzorować charakterystykę zależności:

$$F = -5,52 \cdot 10^{14} \cdot \Delta l^6 + 8,04 \cdot 10^{13} \cdot \Delta l^5 - 4,11 \cdot 10^{12} \cdot \Delta l^4 + 8,45 \cdot 10^{10} \cdot \Delta l^3 - 6,42 \cdot 10^8 \cdot \Delta l^2 + 3,92 \cdot 10^6 \cdot \Delta l - 2,77 \cdot 10^3 \quad (1)$$

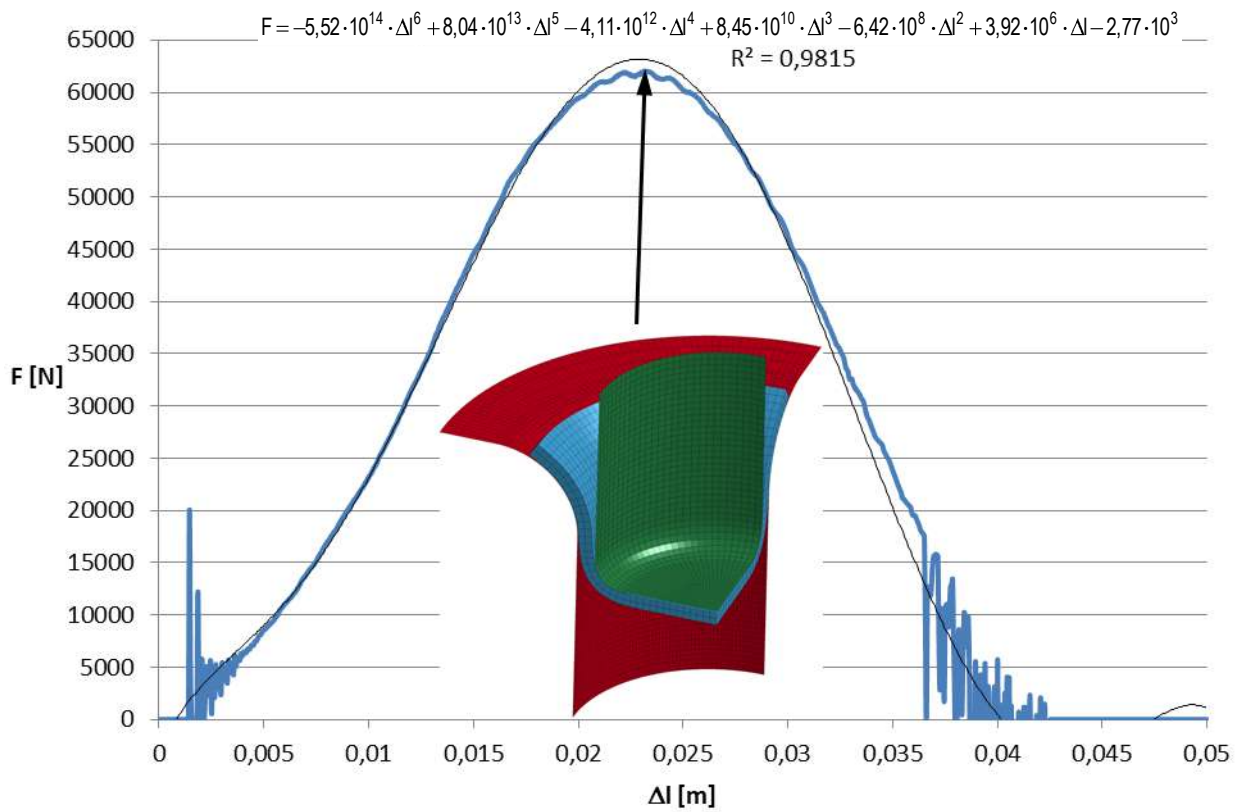
Zgodność linii trendu z wykresem wynosi 98,15%. Równanie to zostało następnie scałkowane w granicach 0 – 0,05 m. Uzyskano wynik całkowitej pracy niezbędnej do przekształcenia krążka w wytłoczkę, która wynosiła 1309 J.

Na rysunku 3 przedstawiono z kolei numeryczny pomiar siły w funkcji drogi stempla dla matrycy o promieniu $r_m = 18$ mm. Podobnie jak w poprzednim przypadku, całkowita droga stempla niezbędna do ukształtowania wytłoczki wynosiła 0,05 m. Maksymalna wartość siły tłoczenia była w tym przypadku mniejsza, wynosiła bowiem 56,2 kN. Na wykresie został przedstawiony aktualny stan procesu w chwili uzyskania maksymalnej siły. Również w tym przypadku występują fluktuacje siły w początkowym i końcowym etapie wytłaczania.

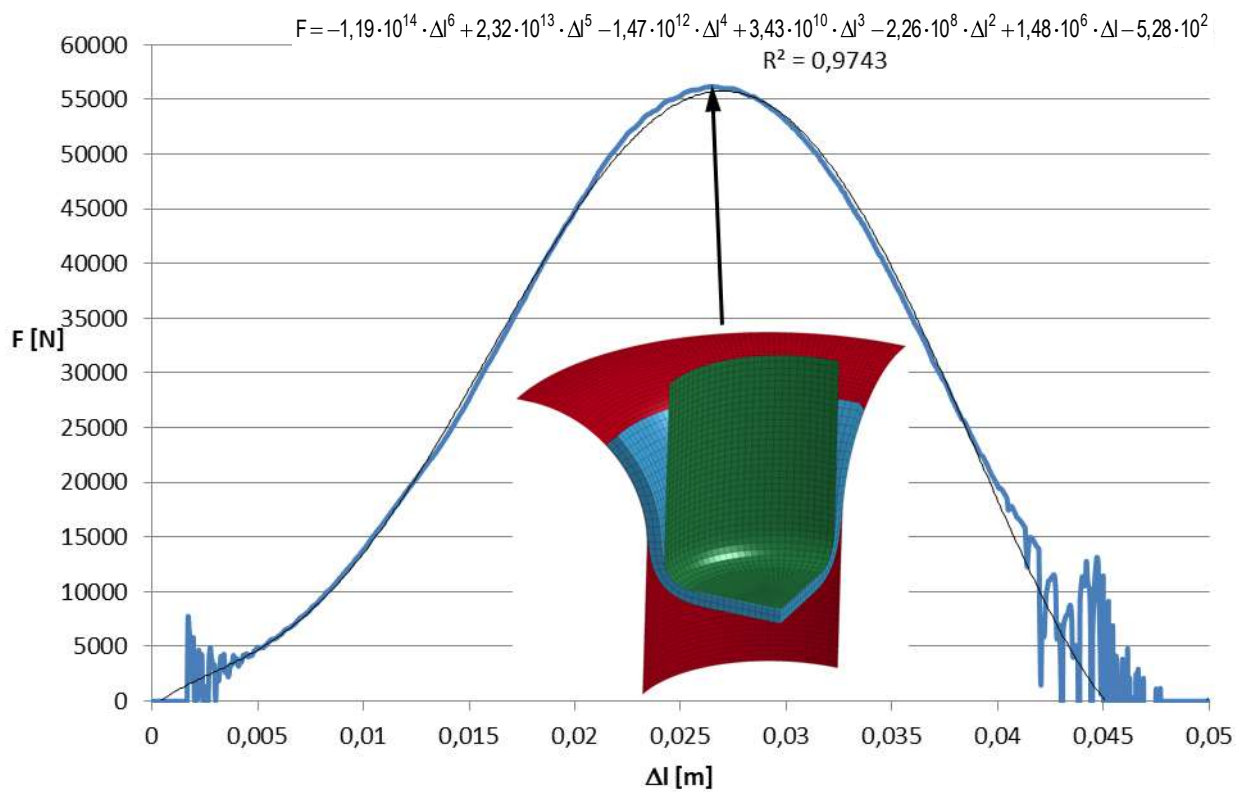
Na wykres nałożono linię trendu szóstego stopnia, która ma postać:

$$F = -1,19 \cdot 10^{14} \cdot \Delta l^6 + 2,32 \cdot 10^{13} \cdot \Delta l^5 - 1,47 \cdot 10^{12} \cdot \Delta l^4 + 3,43 \cdot 10^{10} \cdot \Delta l^3 - 2,26 \cdot 10^8 \cdot \Delta l^2 + 1,48 \cdot 10^6 \cdot \Delta l - 5,28 \cdot 10^2 \quad (2)$$

Zgodność linii trendu z wykresem wynosi 97,43%. Po scałkowaniu równania linii trendu w granicach 0 – 0,05 m uzyskano wynik całkowitej pracy, która wynosiła 1286 J. Była więc mniejsza od pracy na matrycy 12 mm o 23 J. Te niewielkie różnice w całkowitej pracy i większe, na poziomie 8 kN różnice w sile, wynikają z tego, że całkowita praca do przekształcenia wyrobu z krążka w wytłoczkę będzie w przybliżeniu stała. Operując krzywizną matrycy można zmniejszyć naciski kontaktowe, a wraz z nimi siłę maksymalną, ale nie całkowitą pracę.



Rys. 2. Numeryczny odczyt zależności siły od przemieszczenia dla matrycy $r_m = 12$ mm wraz z linią trendu



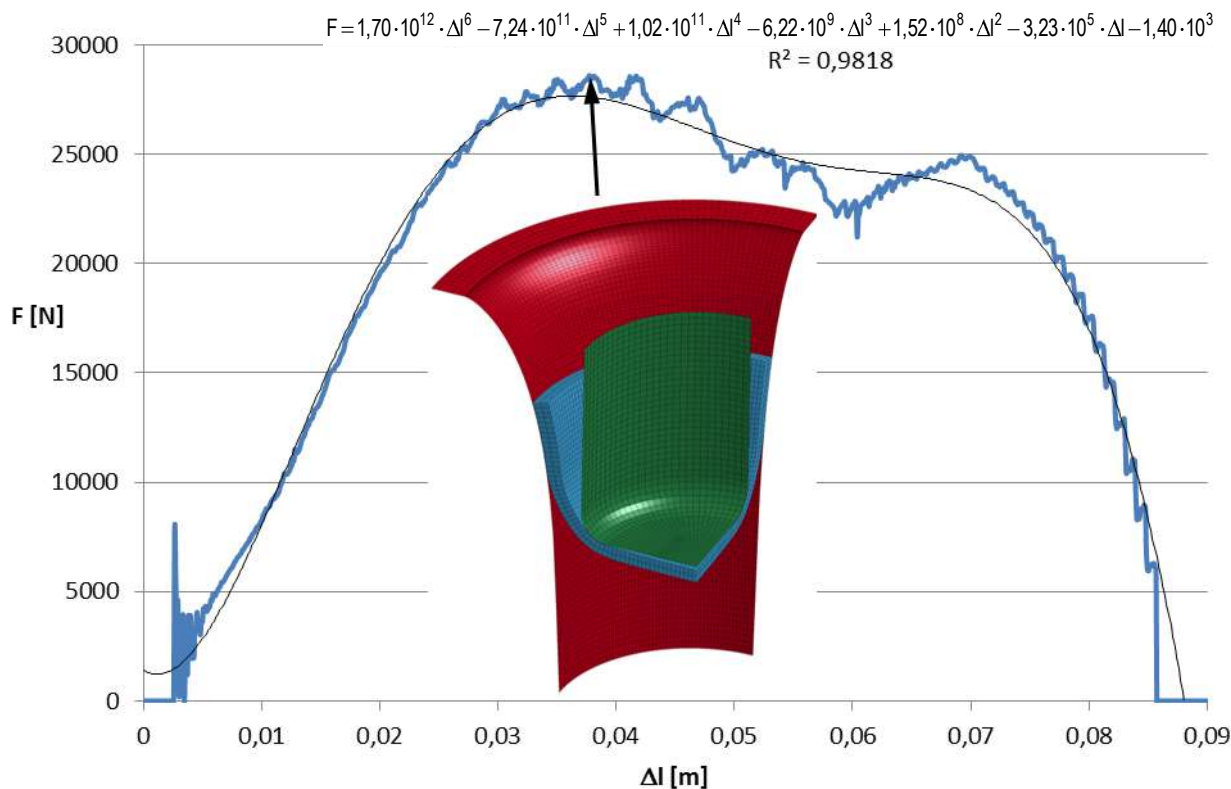
Rys. 3. Numeryczny odczyt zależności siły od przemieszczenia dla matrycy $r_m = 18$ mm wraz z linią trendu

Na rysunku 4 przedstawiono z kolei numeryczny pomiar siły w funkcji drogi stempla dla matrycy o profilu krzywoliniowym. W tym przypadku całkowita droga stempla niezbędna do ukształtowania wytłoczki wynosiła 0,09 m. Zwiększenie drogi wynikało bezpośrednio z zaprojektowanego kształtu matrycy której profil nie miał stałej wartości promienia. Kształt profilu matrycy umożliwia stały kontakt bocznej powierzchni wytłoczki z powierzchnią matrycy, co z kolei przyczynia się do zmniejszenia maksymalnej wartości siły tłoczenia. Maksymalna wartość siły tłoczenia była w tym przypadku znacząco mniejsza w stosunku do wyników uzyskanych na matrycach promieniowych, wynosiła bowiem 28,6 kN. Na wykresie został przedstawiony aktualny stan procesu w chwili uzyskania maksymalnej siły.

Na wykres nałożono linię trendu szóstego stopnia, która ma postać:

$$F = 1,70 \cdot 10^{12} \cdot \Delta l^6 - 7,24 \cdot 10^{11} \cdot \Delta l^5 + 1,02 \cdot 10^{11} \cdot \Delta l^4 - 6,22 \cdot 10^9 \cdot \Delta l^3 + 1,52 \cdot 10^8 \cdot \Delta l^2 - 3,23 \cdot 10^5 \cdot \Delta l - 1,40 \cdot 10^3 \quad (3)$$

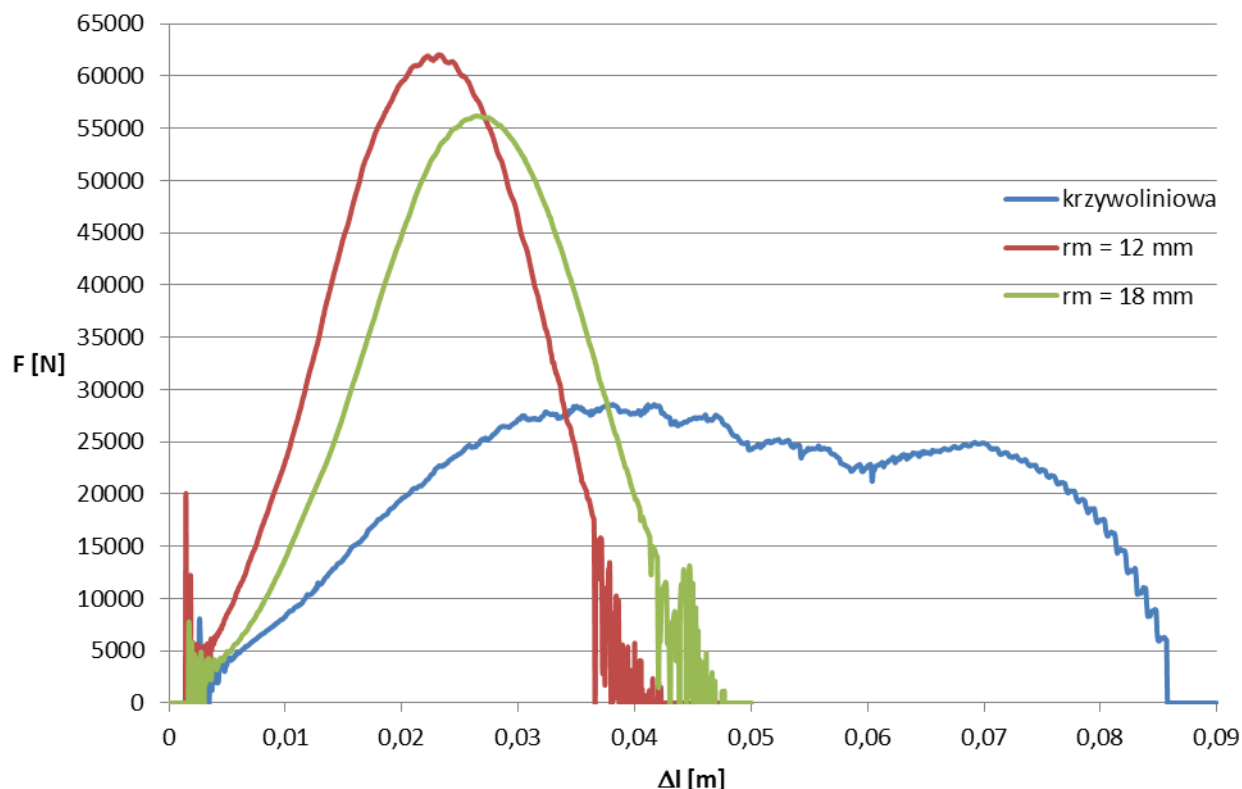
Zgodność linii trendu z wykresem wynosi 98,18%. Po scałkowaniu równania linii trendu w granicach 0–0,09 m uzyskano wynik całkowitej pracy, która wynosiła 1727 J. Uzyskanie całkowitej pracy większej o 441 J w stosunku do matrycy o promieniu 18 mm wynika bezpośrednio z wydłużenia całkowitego przemieszczenia stempla. Pomimo tego, że maksymalna siła jest mniejsza o około 28 kN to całkowita praca jest większa. Prawdopodobnie większość pracy idzie na pokonanie większej siły tarcia, która wynika ze zwiększonej powierzchni kontaktowej pomiędzy matrycą i blachą. W analizach przyjęto stały współczynnik tarcia zarówno statycznego jak i kinetycznego. Stąd można przyjąć, że w każdym z przypadków na całkowitą pracę tłoczenia składa się: siła tłoczenia, przemieszczenie całkowite i chwilowa powierzchnia kontaktu blachy z matrycą. Jeśli siła tłoczenia uzyskana była mniejsza, kosztem wydłużenia drogi stempla, to na zwiększonej pracy, bezpośrednio zaważyła chwilowa powierzchnia kontaktu blachy z matrycą



Rys. 4. Numeryczny odczyt zależności siły od przemieszczenia dla matrycy o profilu krzywoliniowym wraz z linią trendu

Na rysunku 5 zestawiono wszystkie trzy zależności siły od przemieszczenia stempla. Można zaobserwować, że maksymalne piki uzyskane zarówno dla matrycy o promieniu 12 mm jak i matrycy 18 mm, w przypadku matrycy krzywoliniowej nie występują. W przypadku matrycy krzywoliniowej nie występuje moment przejścia blachy przez zaokrągloną jej krawędź, lecz stopniowe formowanie wytłoczki, poprzez zmniejszanie jej średnicy z $D = 70$ mm do $d = 40$ mm.

Całkowite pole pod wykresami nie powinno być mniejsze, może mieć jednak łagodniejszy charakter w zależności od użytej matrycy i jej profilu. Ponadto poniższy wykres podkreśla jak ważne jest utrzymanie jak najmniejszego współczynnika tarcia pomiędzy matrycą, a blachą, który bezpośrednio wpływa na wartość siły tłoczenia w trakcie całego procesu.



Rys. 5. Zestawienie sił tłoczenia dla trzech matryc

Wnioski

Z przeprowadzonych analiz numerycznych można wysnuć kilka istotnych wniosków. Pierwszym jest to, że opracowanie modelu komputerowego i analizy numerycznej pozwala dokonać pomiaru siły w funkcji drogi stempla za pomocą odczytu nacisków kontaktowych. Następnie opisanie tej funkcji za pomocą linii trendu o znanym równaniu dowolnego stopnia, którego R^2 przekracza 0,95 i scałkowaniu tego równania w granicach całkowitego przemieszczenia stempla. Wynikiem całkowania jest natomiast całkowita praca układu, czyli niezbędna praca potrzebna do ukształtowania gotowego wyrobu.

Dzięki uzyskanym wynikom zaobserwowano, że profil matrycy ma bezpośredni wpływ na maksymalną wartość siły tłoczenia. Czym większy promień matrycy i łagodniejszy profil tym maksymalna siła jest mniejsza. Zwiększenie promienia matrycy lub zastosowanie matrycy krzywoliniowej nie wpływa natomiast na zmniejszenie całkowitej pracy układu, a wręcz przeciwnie. Całkowita praca układu będzie w przybliżeniu stała dla danej wyłocznicy. Dla matrycy krzywoliniowej praca wyniosła o 441 J więcej niż dla matrycy o promieniu 18 mm, co wynikało z wydłużonego działania siły tarcia, gdyż przemieszczenie stempla było prawie dwukrotnie większe. Stąd wniosek, że należy dążyć do minimalnego tarcia pomiędzy matrycą, a blachą. W takim przypadku możliwe będzie uzyskanie podobnych wartości pracy dla każdego z przypadków.

Bibliografia

1. Kałduński P.: *Numeryczny sposób określenia wymiarów wyrobów kształtowanych w procesie tłoczenia*. PAK Vol. 57, nr 5, 547-550, (2011).
2. Bohdal Ł., Kukielka L.: *Analiza numeryczna procesu cięcia blach karoseryjnych klinowym narzędziem niesymetrycznym*. XII Słupskie Forum Motoryzacji, s. 29-34, (2009).
3. Bohdal Ł., Kukielka L.: *The effect of selected material parameters on the stress and strain states in the process of cutting a sheet plate with circular cutters*. TASK Quarterly, vol. 10, no. 4, pp. 391-400, (2006).
4. Bohdal Ł., Kukielka L.: *Modelowanie i analiza numeryczna procesu cięcia blach nożami krążkowymi z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej*. Mechanik nr. 8-9, s. 712-716, (2011).
5. Bohdal Ł., Kukielka L.: *Optimization of the dynamic blanking process*. PAMM 8, issue 1, pp. 10773-10774, (2008).
6. Kałduński P.: *Modelowanie i symulacja kształtowania wyłoczek kołowo symetrycznych bez kołnierza z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej*. praca doktorska, Koszalin (2009).
7. Kałduński P., Kukielka L.: *Dynamic nonlinear modelling of deep drawing process on the curved line drawing die with planar anisotropy by Finite Element Method*. Machine Dynamics Research Vol. 34, No. 1, pp. 38-43, (2010).
8. Kałduński P., Kukielka L.: *Numerical analysis and simulation of drawpiece forming process by Finite Element Method*. Applied Mechanics and Materials Vol. 474, pp. 153-158, (2014).

Numerical determination of the total work stamp value in the drawing process of the car elements

Abstract

This article presents a numerical method of determining the total work required to shape the product in the drawing process. Numerical analysis and simulations were performed in Ansys / Ls-Dyna program. Was analyzed both, the maximum drawing force needed to shape the finished product and the total work required to be executed by the punch. Numerical results were compared with two radial dies: radius of 12 mm and 18 mm, and with the curvilinear profile die block. Presents chosen results of simulation and summarizes them in collective charts.

Key words: modelling, drawing, Ansys/Ls-Dyna, numerical analysis.

Autorzy:

Dr inż. **Paweł Kałduński** – Politechnika Koszalińska.

Dr inż. **Łukasz Bohdal** – Politechnika Koszalińska.

Dr inż. **Jarosław Chodór** – Politechnika Koszalińska.