

Dr hab. inż. Tomasz TRZEPIECIŃSKI, prof. PRz,
tomtrz@prz.edu.pl
Politechnika Rzeszowska, Katedra Przeróbki Plastycznej

Dr inż. Stanisław WARCHOŁ,
warchols@prz.edu.pl
Politechnika Rzeszowska, Katedra Konstrukcji Maszyn

SYMULACJA MES PRZEMIESZCZANIA BLACHY PRZEZ PRÓG CIĄGOWY

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych oraz symulacji numerycznych badania oporów tarcia blach ze stopu aluminium AA5251 H14. Badania tarcia zostały przeprowadzone za pomocą symulatora progów ciągowych. Wykonano również symulacje numeryczne testu tarcia metodą elementów skończonych w programie MSC.Marc 2010. Symulacje wykonano dla modelu izotropowego materiału określonego kryterium plastyczności Huber-Mises-Henck'y oraz kryteriów anizotropowych plastyczności Hilla (1948) oraz Barlata (1991). Analizowano rozkład naprężeń w przekroju przeciąganej blachy oraz prognozowano numerycznie wartość współczynnika tarcia. Numeryczna analiza symulatora progów ciągowych przedstawiona w pracy umożliwia określenie wpływu modelu anizotropii plastycznej materiału, orientacji próbki oraz zjawiska umocnienia odkształceniowego na wartość oporów tarcia.

Słowa kluczowe: anizotropia, MES, próg ciągowy, tarcie, współczynnik tarcia, wyłaczanie

FEM SIMULATION OF SHEET MOVEMENT THROUGH THE DRAW BEAD

Abstract: The paper presents the results of experimental and numerical simulation studies of frictional resistance of AA5251 H14 aluminium alloy sheets. Friction tests were carried out by using the draw bead simulator. Numerical simulations of a friction test using MSC.Marc 2010 software based on finite element method were also performed. Simulations were carried out for an isotropic material model described by using Huber-Mises-Henck'y yield criterion and anisotropic yield criteria proposed by Hill (1948) and Barlat (1991). We analyzed the stress distribution in the section of pulled sheet and also we numerically predicted the friction coefficient value. Numerical analysis of the draw bead simulator presented in the work allows to determine the effect of plastic anisotropy material model, the orientation of the sample and the strain hardening phenomenon on the value of the resistance to friction.

Key words: anisotropy, FEM, draw bead, friction, coefficient of friction, stamping

1. WPROWADZENIE

Zadaniem progów ciągowych jest kontrola przemieszczania się blachy podczas kształtowania wyrobów niesymetrycznych i o złożonej geometrii, a także wywieranie naprężeń rozciągających zapobiegających utracie stateczności kołnierza lub powierzchni swobodnych wyłoczek [1]. Niekiedy zachodzi konieczność zastosowania nawet kilku równoległych progów ciągowych. Istnieją alternatywne sposoby wyrównywania oporów płynięcia materiału na obwodzie wyłoczki, między innymi przez stosowanie dociskaczy segmentowych, które jednak wymagają tłoczników o specjalnej konstrukcji. Progi ciągowe muszą zapewnić stałe warunki płynięcia materiału w trakcie całego procesu kształtowania. Speł-

nienie tego warunku jest często możliwe przez pozostawienie wokół wytłoczki szerokiego kołnierza, który po zakończeniu procesu wytłaczania jest okrawany.

Wartość oporów tarcia w procesach kształtowania blach jest złożoną funkcją właściwości materiału, parametrów procesu, topografii powierzchni kształtowanej blachy i narzędzi oraz warunków kontaktu. Tarcie zachodzące przy dużych wartościach nacisków może w sposób istotny różnić się od zjawisk występujących przy małych obciążeniach oraz w węzłach kinematycznych maszyn z uwagi na duży wpływ odkształceń plastycznych mogących intensyfikować wiele zjawisk w strefie kontaktu. Zwiększone naciski to między innymi większa skłonność do występowania połączeń tarciovych, co z kolei powoduje wzrost oporów tarcia i zwiększone zużycie związane z bardziej intensywnym przemieszczaniem się powierzchni będących w kontakcie.

W procesach kształtowania blach sztywnymi narzędziami znaczący wpływ na wielkość oporów tarcia wywiera makro- i mikrogeometria styku par trących [2, 3]. Podczas kształtowania blach początkowo występuje niewielkie pole rzeczywistego styku. Powierzchnie przylegają do siebie tylko wierzchołkami nierówności, które następnie, pod wpływem działania sił nacisku, zostają odkształcone plastycznie aż powstała w ten sposób powierzchnia styku będąca wystarczająca do przeniesienia obciążenia [4]. Wartość oporów tarcia zależy nie od nominalnego, lecz od rzeczywistego pola powierzchni styku. Kształt powierzchni styku wpływa na wielkość nominalnego pola powierzchni styku i, co jest z tym związane na wielkość nacisków jednostkowych.

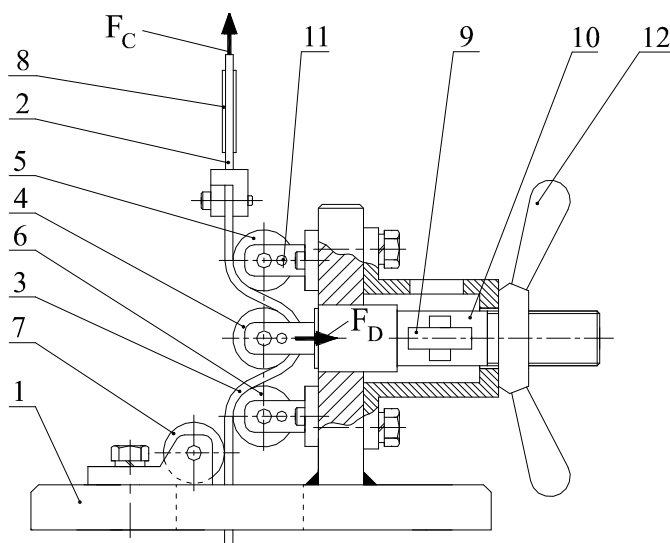
Badania symulujące warunki tarcia i smarowania można podzielić na testy symulujące procesy i testy symulujące warunki tribologiczne [5, 6]. Testy symulujące procesy mają za zadanie modelowanie operacji przeróbki plastycznej z zachowaniem kinematyki procesu. Testy symulujące warunki tribologiczne modelują określone zjawisko, często bez zachowania kinematyki procesu. Obie grupy testów można podzielić na próby z bezpośrednim lub pośrednim pomiarem wartości współczynnika tarcia. W metodach pośrednich wyznaczania współczynnik tarcia jest wyznaczany na podstawie pomiaru innych wielkości np. siły tarcia i siły normalnej. W oparciu o przyjęty model tarcia następuje obliczenie wartości współczynnika tarcia. Istotną cechą metod symulujących warunki tribologiczne w określonych miejscach kształtowanej blachy jest to, że umożliwiają wyznaczenie wartości współczynnika tarcia uśrednionej dla całej powierzchni styku [7]. Wadą opisanych metod jest to, że nie modelują złożonych warunków tarcia występujących w różnych obszarach wytłoczki. Pozwalają jedynie na określenie oporów tarcia w wybranych obszarach, co prowadzi do konieczności posługiwania się wieloma próbami tarcia.

2. MATERIAŁ I BADANIA EKSPERYMENTALNE

Testy eksperymentalne ciągnięcia blachy ze zginaniem zrealizowano za pomocą symulatora progu ciągowego, którego budowa oparta jest na koncepcji Nine'a [8]. Ideą przyrządu jest możliwość oddzielenia oporów odkształcenia blachy od oporów tarcia.

Korpus przyrządu 1 (rys. 2.1) zamocowano w uchwycie dolnym maszyny wytrzymałościowej. W górnym uchwycie maszyny zamocowano obrotowe ciągną górne 2 służące do zamocowania próbki 3. Symetryczne prowadzenie blachy względem wałka środkowego 4 zapewnia wałek podporowy 7. W czasie badań za pomocą dwóch czujników tensometrycznych 8 oraz 9 naklejonych na ciągną górnym 2 i poziomym 10 mierzono odpowiednio wartość siły ciągnięcia (tarcia) oraz siły docisku. Metoda wyznaczania wartości współczynnika tarcia wymaga przeprowadzenia dwóch testów ciągnięcia blachy po wałkach zablokowanych i po wałkach ruchomych. Podczas obu testów mierzy się siłę docisku i siłę ciągnięcia. Ciągnięcie blachy przez układ wałków ruchomych pozwala zminimalizować opory tarcia. Siła ciągnąca w tym przypadku wiąże się głównie z pokonywaniem oporów odkształcenia blachy. Podczas realizacji testu przy wałkach nieruchomych obrót wałków

roboczych 4, 5 oraz 6 zablokowano za pomocą kołków 11. Średnica wałków roboczych wynosiła 20 mm. Do regulacji wartości zagłębienia rolki środkowej służy śruba 12.



Rys. 2.1. Schemat przyrządu: 1 - korpus przyrządu; 2 - cięgno górne; 3 - próbka; 4, 5, 6 - wałki robocze, odpowiednio: środkowy, górny i dolny; 7 - wałek podporowy; 8, 9 - tensometry; 10 - cięgno poziome; 11 - kołek blokujący; 12 - nakrętka dociskowa

Testy przeprowadzono w warunkach smarowania powierzchni blach olejem maszynowym. Próbki do testu tarcia o długości około 250 mm i szerokości 20 mm wycięto z arkuszy blach wzdłuż oraz poprzecznie względem ich kierunku walcowania. Próbkę ciągnięto przez układ wałków przy stałej prędkości przesuwu uchwytu górnego wynoszącej 1 mm/s. Rejestrowanie sił rozpoczynano po ustawieniu odpowiedniego zagłębienia z_c wałka środkowego. W czasie próby rejestrowano wartość siły docisku F_D i siły ciągnięcia F_C .

Do badań ciągnięcia blachy ze zginaniem użyto blach ze stopu Al-Mg do przeróbki plastycznej - AA5251 umocnionych wyłącznie gniotem (H14). Wartości podstawowych parametrów mechanicznych testowanych blach (Tabela 2.1) określono w statycznej próbie jednoosiowego rozciągania zgodnie z normą PN-EN ISO 6891-1:2010. Jednoosiowemu rozciąganiu poddano próbki wycięte wzdłuż (0°), poprzecznie (90°) oraz pod kątem 45° względem kierunku walcowania blachy określając następujące parametry:

- umowną granicę plastyczności R_e , wytrzymałość na rozciąganie R_m , współczynnik anizotropii r ,
- wartości parametrów materiałowych charakteryzujących zjawisko umocnienia odkształceniowego: współczynnik umocnienia C oraz wykładnik umocnienia n .

Tabela 2.1. Podstawowe parametry mechaniczne badanych blach ze stopu aluminium AA5251 H14

Orientacja próbki	R_e MPa	R_m MPa	C MPa	n	r
0°	212	234	254	0,058	0,478
45°	203	231	242	0,062	0,689
90°	210	241	327	0,078	0,786
wartość średnia	207	234,25	266,25	0,065	0,6605

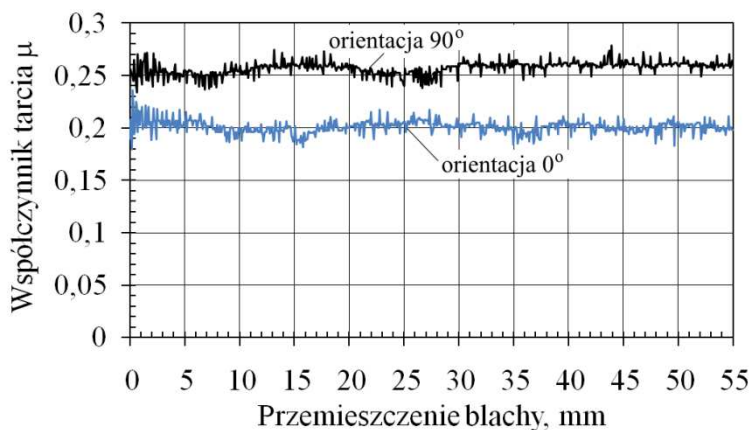
W badaniach wyznaczono wartość współczynnika tarcia dla zagłębienia z_c wałka środkowego równego 18 mm. Dla kąta opasania wałka środkowego równego 180° wartość współczynnika tarcia określa się z zależności (2.1). Dla innych wartości kąta opasania wałka środkowego do określenia wartości współczynnika tarcia należy zastosować następującą zależność:

$$\mu = \frac{1}{\pi} \frac{F_C^z - F_C^r}{F_D^z} \quad (2.1)$$

gdzie:

- F_C^z - siła ciągnięcia przy wałkach zablokowanych,
- F_C^r - siła ciągnięcia przy wałkach obrotowych,
- F_D^z - siła docisku przy wałkach ruchomych.

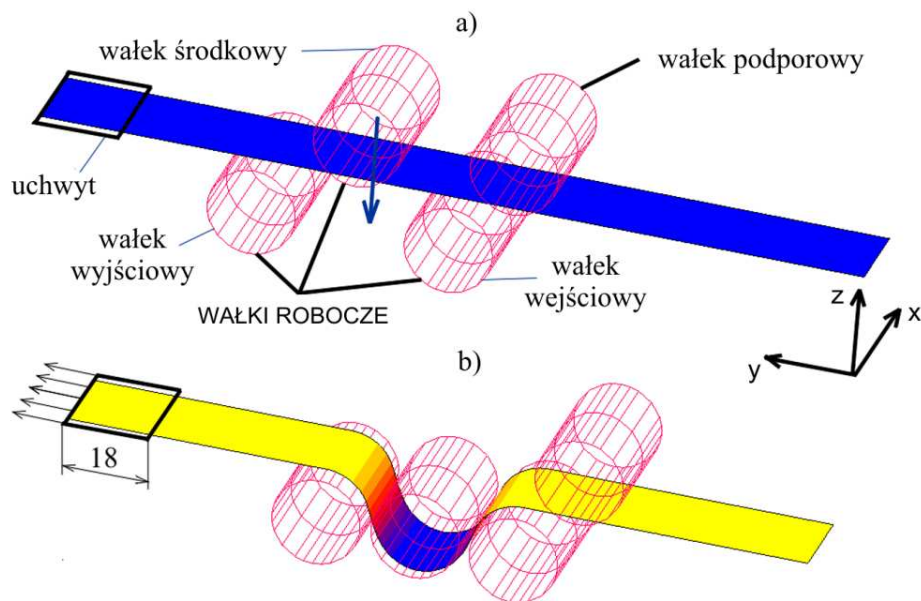
Wartość współczynnika tarcia wyznaczona eksperymentalnie (rys. 2.2) nieznacznie zmienia się w zależności od przesuwu górnego uchwyty maszyny wytrzymałościowej. Znając prędkość przesuwu uchwyty maszyny wytrzymałościowej możliwe było znalezienie zależności zmian współczynnika tarcia w czasie. Do programu wprowadzono przebieg zmian wartości współczynnika tarcia od czasu w formie linii aproksymującej wyniki eksperymentalne.



Rys. 2.2. Zmiana wartości współczynnika tarcia podczas ciągnięcia blachy AA5251 H14

3. SYMULACJE NUMERYCZNE

Modelowanie numeryczne symulatora prognozy ciągowego przeprowadzono w programie Msc.MARC + MENTAT 2010, który umożliwia analizę modeli fizycznych uwzględniających nieliniowości geometryczne wywołane dużymi odkształceniami oraz nieliniową charakterystykę materiałową. Symulacje przeprowadzono dla próbek wyciętych wzdłużnie względem kierunku walcowania blachy. Wszystkie wałki zamodelowano jako nieodkształcalne, co pozwoliło na uwzględnienie w modelu numerycznym tylko tych powierzchni, które kontaktują się z blachą. Symulacja przebiegała w dwóch etapach. W pierwszym etapie jeden z końców paska blachy, do którego w kolejnym etapie zostanie przyłożone przemieszczenie jest zablokowany (rys. 3.1.a). Po osiągnięciu przez rolkę zadanego zagłębienia rozpoczyna się drugi etap. Do powierzchni próbki objętej podczas eksperymentu uchwytem przyłożono przemieszczenie (rys. 3.1.b), którego prędkość odpowiadała warunkom eksperymentalnym.



Rys. 3.1. Geometria i warunki brzegowe modelu symulatora progu ciągowego:
a) położenie początkowe, b) rozpoczęcie drugiego etapu procesu.

Do dyskretyzacji modelu blachy użyto dwóch rodzajów 4-węzłowych elementów biliniowych typu 75 [9] z formułą uwzględniającą efekty poprzecznego ścinania [10], poprawiającą zachowanie się elementów powłokowych podczas gięcia. Model składał się z 3600 elementów z 5 punktami całkowania na grubości [11].

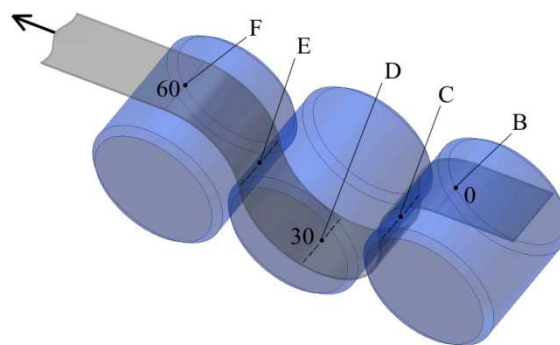
Model materiału przyjęto jako sprężysto-plastyczny z nieliniowym wzmocnieniem opisanym równaniem potęgowym Hollomona [12]. W badaniach założono wykorzystanie trzech kryteriów plastyczności. W pierwszym modelu materiał zdefiniowano jako izotropowy według kryterium Hubera-Misesa-Hencky'ego [13-15]. Kolejny model uwzględnił anizotropowy warunek plastyczności Hilla z roku 1948 [16], który z reguły jest stosowany do opisu blach stalowych, ale może być również wykorzystany do symulacji numerycznej kształtowania blach ze stopu aluminium [17, 18]. W ostatnim modelu jako kryterium konstytutywne zastosowano warunek Barlata z roku 1991 [19]. Pozostałe właściwości materiałowe wynoszą:

- moduł Younga, $E = 70 \text{ GPa}$,
- współczynnik Poisson'a, $\nu = 0,33$,
- gęstość, $\rho = 2690 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Na podstawie wyników badań eksperymentalnych (rys. 2.2) do modelu numerycznego wprowadzono krzywą trendu zmian wartości współczynnika tarcia ze wzrostem wartości przemieszczenia blachy.

4. WYNIKI

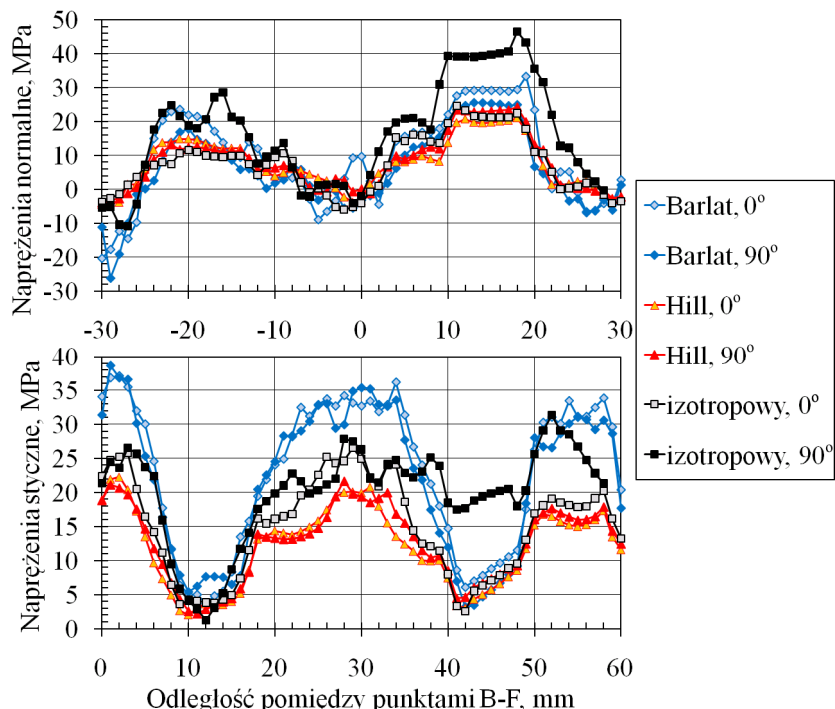
Rozkład naprężeń na przekroju wzdłużnym blachy (rys. 4.1) po zakończeniu etapu zagłębiania wałka środkowego na głębokość 18 mm zamieszczono na rys. 4.2. Punkty C i E leżą w połowie odległości między punktami odpowiednio B, D oraz D i F. Geometryczny kąt opasania mniejszy od 180° sprawia, że punkty te nie leżą na powierzchniach kontaktu blachy z wałkami.



Rys. 4.1. Miejsca na krzywej pomiaru naprężeń

Trzy charakterystyczne obszary największych naprężeń stycznych można zaobserwować wzdłuż blachy (rys. 4.2). Największa wartość tych naprężeń występuje w miejscach kontaktu blachy z wałkami. W strefie pomiędzy wałkami, a więc w okolicy punktu C i E jest obszarem występowania największych naprężeń normalnych. W rozkładzie naprężeń stycznych obserwuje się dużą rozbieżność wartości naprężeń symulowanych przez poszczególne modele i orientacje.

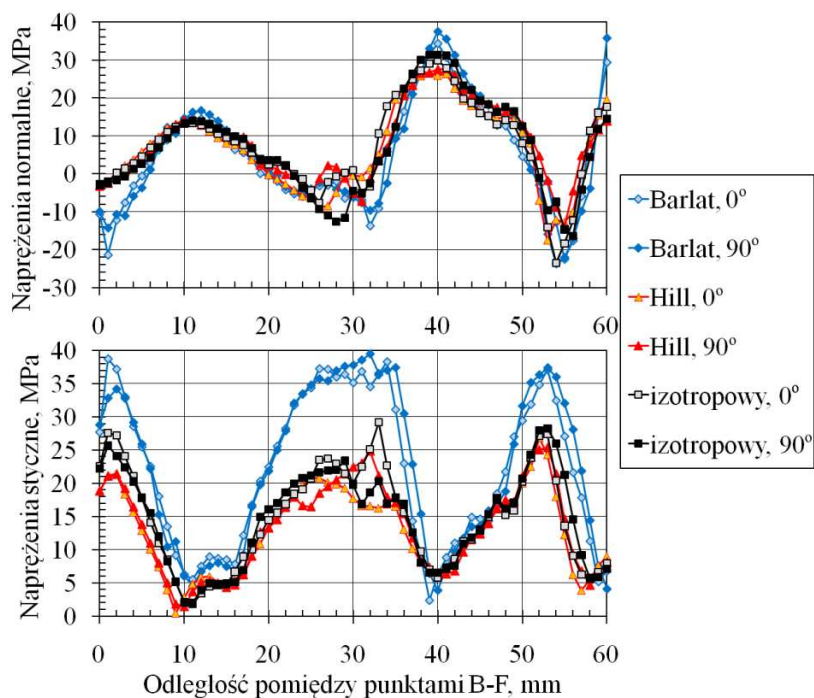
Obserwacje zmian naprężeń dla modelu izotropowego z różnymi przebiegami wartości współczynnika tarcia wynikającymi z ciągnięcia próbek wyciętych wzdłuż i poprzecznie względem kierunku walcowania blachy wykazały, że pomiędzy punktami B i D wartość wszystkich analizowanych naprężeń jest większa dla orientacji 90°, co oznacza, że wyższe wartości naprężeń są spowodowane zwiększonymi oporami tarcia. Najmniejsza różnica pomiędzy wartościami naprężeń dla obu analizowanych orientacji próbek występuje dla modelu Hilla.



Rys. 4.2. Rozkład naprężeń pomiędzy punktami B-F przy zagłębieniu wałka środkowego 18 mm

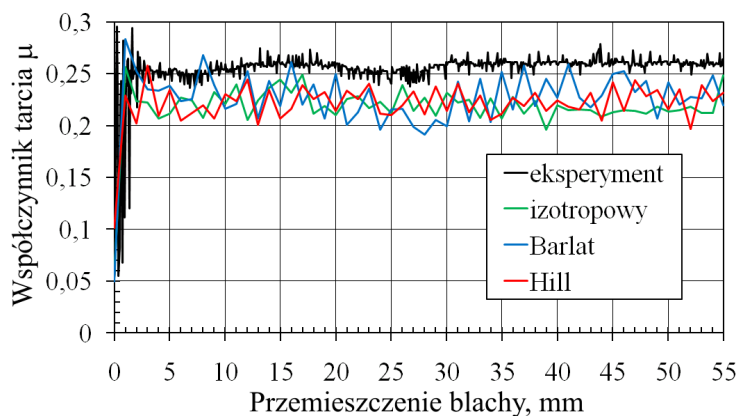
Rozkład naprężeń w przekroju wzdłużnym blachy (rys. 4.1) po uzyskaniu drogi ciągnięcia próbki równej 55 mm przedstawiono na rysunku 4.3. Obserwuje się niewielki

wpływ orientacji i przyjętego modelu materiałowego na rozkład naprężeń normalnych. Występuje znaczna różnica wartości naprężeń stycznych przewidywanych przez poszczególne modele materiałowe. Miejsca lokalnego wzrostu naprężeń stycznych prognozowane przez wszystkie modele pokrywają się. W tych miejscach wartości naprężeń stycznych są zbliżone dla poszczególnych modeli i orientacji.



Rys. 4.3. Rozkład naprężeń pomiędzy punktami B-F po przemieszczeniu uchwytu maszyny wytrzymałościowej równego 55 mm

Na podstawie prognozowanych wartości sił ciągnięcia i docisku wyznaczono przebieg zmian wartości współczynnika tarcia (rys. 4.4). Określone eksperymentalnie oraz na podstawie wyników symulacji zmiany wartości współczynników tarcia wykazują podobną tendencję, z tym, że modele numeryczne niedoszacowują jego wartość. Wyniki średnich wartości przebiegu zmian wartości współczynnika tarcia (Tabela 4.1) wskazują, że błąd numerycznej prognozy jest najmniejszy dla modelu anizotropowego Barlata. Ponadto, dla obu orientacji wartość błędu jest zbliżona. Największą wartość błędu wartości współczynnika tarcia będącego różnicą wartości eksperymentalnej i symulowanej generuje model materiałowy Hilla.



Rys. 4.4. Zmiana wartości współczynnika tarcia dla orientacji próbki 0°

Tabela 4.1. Średnie wartości współczynnika tarcia oraz błąd prognozowania MES

Orientacja próbki	Eksperyment	Barlat		Hill		Materiał izotropowy	
	μ	μ	Błąd	μ	Błąd	μ	Błąd
0°	0,200	0,171	-0,029	0,160	-0,040	0,162	-0,038

5. PODSUMOWANIE

Modele numeryczne rzeczywistych procesów wyłaczania blach z udziałem progów ciągowych są często upraszczane poprzez przykładanie do węzłów siatki elementów skończonych sił ekwiwalentnych lub wręcz eliminację oddziaływania progów i wprowadzenie zwiększonej siły docisku kołnierza. Przesłanką do stosowania sił ekwiwalentnych zastępujących próg ciągowych jest niskie zapotrzebowanie na moc obliczeniową i znaczne skrócenie czasu obliczeń. Wprowadzenie sił ekwiwalentnych nie uwzględnia umocnienia materiału blachy spowodowanego jej plastycznym wielokrotnym gięciem i prostowaniem.

Numeryczna analiza symulatora progów ciągowych przedstawiona w pracy umożliwia określenie wpływu anizotropii plastycznej materiału, orientacji próbki oraz zjawiska umocnienia odkształceniowego na wartość oporów przejścia blachy przez próg ciągowy. Wraz ze znaczącym wzrostem mocy obliczeniowej komputerów wyniki badań można wykorzystać w analizach wyłaczania blach z uwzględnieniem rzeczywistej geometrii progów.

LITERATURA

- [1] Trzepieciński T., Lemu H.G.: Study on frictional conditions of AA5251 aluminium alloy sheets using drawbead simulator test and numerical methods. *Strojnicki vestnik - Journal of Mechanical Engineering* 60 (2014), s. 51-60.
- [2] Gierzyńska M.: „Tarcie, zużycie i smarowanie w obróbce plastycznej metali”. Warszawa: WNT, 1983.
- [3] Trzepieciński T.: „Wybrane aspekty oceny tribologicznej blach odkształcanych plastycznie”. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2013.
- [4] Trzepieciński T.: Analysis of the friction influence on change of surface topography in strip drawing test. *Tribologia* 44 (2012), s. 125-134.
- [5] Świątkowski K.: Sposoby oceny wielkości tarcia na powierzchniach kontaktu niemetalicznego materiału modelowego i narzędzia. *Obróbka Plastyczna Metali* 11 (2000), s. 21-30.
- [6] Matuszak A., Kręcisz D.: Badanie oporów przejścia blachy przez progi ciągowy. *Obróbka Plastyczna Metali* 14 (2003), s. 17-25.
- [7] Kowalik M., Trzepieciński T.: Experimental and numerical study of friction in sheet metal forming processes. *Advanced Science Letters* 19 (2013), s. 338-341.
- [8] Nine H.D.: Draw bead forces in sheet metal forming. Proceedings of a Symposium on Mechanics of Sheet metal Forming: Behaviour and Deformation Analysis. Plenum Press, Warren 1978, s. 179-211.
- [9] *Msc.MARC 2010: Element Library*. Santa Ana: Msc. Software, 2010.
- [10] *Msc.MARC 2010: Theory and User Information*. Santa Ana: Msc. Software, 2010.
- [11] Trzepieciński T.: 3D elasto - plastic FEM analysis of the sheet drawing of anisotropic steel sheet metals. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 10 (2010), s. 95-106.
- [12] Hollomon J.H.: Tensile deformation. *Transactions of AIME* 162 (1945), s. 268-290.

- [13] Hencky H.: Zur theorie plastischer deformationen und der hierdurch im material hervorgerufenen nachspannungen. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik* 4 (1924), s. 323-334.
- [14] Huber M.T.: Specific work of strain as a measure of material effort. *Archives of Mechanics* 56 (2004), s. 173-190.
- [15] Von Mises R.: Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand. [w:] Nachrichten der königlichen Gesellschaft der Wissenschaften, *Mathematisch physikalische Klasse* 4 (1913), s. 582-592.
- [16] Hill R.: A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. *Proceedings of the Royal Society London A*193 (1948), s. 281-297.
- [17] Dasappa P., Inal K., Mishra R.: Simulations of forming limit diagrams for the aluminum sheet alloy 5754CC. *AIP Conference Proceedings* 1252 (2010), s. 972-980.
- [18] Tikhovskiy I., Raabe D., Roters F.: Simulation of earing during deep drawing of an Al-3% Mg alloy (AA 5754) using a texture component crystal plasticity FEM. *Journal of Materials Processing Technology* 183 (2007), s. 169-175.
- [19] Barlat F., Lege D.J., Brem J.C.: A six-component yield function for anisotropic metals. *International Journal of Plasticity* 8 (1992), s. 453-476.