



## Zastosowanie matryc o różnej geometrii w wyciskaniu kompozytów warstwowych

IRENA NOWOTYŃSKA

Politechnika Rzeszowska, Zakład Informatyki w Zarządzaniu,  
35-959 Rzeszów, ul. Powstańców Warszawy 8

**Streszczenie.** W pracy zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych dotyczących plastycznego płynięcia dwóch różnych materiałów o układzie rdzeń-powłoka w procesie wyciskania. Przeanalizowano wpływ wybranych parametrów geometrycznych matrycy na plastyczne płynięcie kompozytów warstwowych podczas procesu wyciskania. Stosując różne udziały objętościowe składników w materiale wsadowym w jednoczesnym odkształceniu różnych materiałów, wykorzystano metaliczne materiały modelowe: ołów miękki, twardy stop ołowiu oraz komplet matryc. Na podstawie analizy zdeformowanej siatki, objętości stref plastycznych, siły wyciskania i rozkładu względnych prędkości cząstek w obszarze otworu matrycy zaproponowano najlepszą geometrię matrycy dla danego kompozytu warstwowego, biorąc pod uwagę m.in. względnie małą strefę plastyczną, bardziej jednorodne odkształcenie i stosunkowo małą siłę wyciskania. Opierając się na pomiarach siły podczas wyciskania przez matryce płaskie oraz wypukłe określono zależność maksymalnej jej wartości od kąta matrycy. Wykazano, że istnieje optymalna wartość kąta matrycy wypukłej, dla którego wartość siły wyciskania jest najmniejsza, co może stanowić kryterium wyboru najlepszej geometrii matrycy podczas wyciskania.

**Słowa kluczowe:** przeróbka plastyczna, wyciskanie, kompozyty warstwowe, matryca płaska, matryca wypukła

**Symbole UKD:** 621.71

### 1. Wstęp

We współczesnej technice obserwuje się ciągły wzrost zainteresowania nowymi materiałami, wynikający z rosnących wymagań w zakresie m.in. odporności na działanie agresywnego środowiska czy zmiennych warunków obciążenia. Wymagane, podwyższone właściwości wyrobu mogą być osiągnięte np. przez zastosowanie odpowiedniego materiału kompozytowego. W przeciwieństwie

do czystych metali i stopów materiały takie łączą właściwości różnych komponentów i stanowią nowe materiały o rozszerzonym spektrum właściwości. Najprostszą formą kompozytów warstwowych są materiały dwuskładnikowe wykonywane jako blachy, rury, pręty itp. Do ich produkcji stosuje się głównie metody przeróbki plastycznej, szczególnie procesy wyciskania, które oferują najkorzystniejsze warunki odkształcenia plastycznego materiału, tj. dominujący ściskający stan naprężeń, możliwość dużej zmiany kształtu w jednej operacji oraz możliwość wpływania na strefę plastycznego odkształcenia poprzez zmianę kształtu matrycy. W przypadku jednoczesnego wyciskania materiałów o różnych naprężeniach uplastyczniających i różnych typach płynięcia, geometria matrycy nabiera szczególnego znaczenia [1-4].

W procesach wyciskania materiałów monometalicznych najczęściej wykorzystywane są matryce stożkowe oraz płaskie. Te ostatnie, jako najprostsze i podstawowe, stosuje się m.in. do wyciskania wielootworowego czy do analizy konfiguracji stref martwych i stref plastycznych, aby można było wnioskować o określonym (optymalnym) kącie matrycy. Matryce stożkowe wprawdzie umożliwiają dopasowanie kształtu narzędzia do kształtu strefy plastycznej, obniżając opory płynięcia i zmniejszając siłę wyciskania, ale nie zawsze eliminują tworzenie się stref martwych. Ponadto w przypadku wyciskania aluminium i jego stopów pojawia się tendencja do naklejania się wyciskanego materiału na powierzchnię roboczą matrycy. Bardzo korzystne efekty w regulowaniu płynięcia materiałów monometalicznych osiągnięto przy zastosowaniu tzw. matryc wypukłych, których cechą charakterystyczną jest to, że kąt pomiędzy tworzącą stożka roboczego matrycy a osią wyciskania jest większy od  $90^\circ$  [5-7]. Podczas wyciskania stopów aluminium oraz technicznie czystego aluminium z wykorzystaniem matryc stożkowych, matrycy płaskiej oraz matryc wypukłych zaobserwowano zwiększenie się kąta ścinania wraz ze zwiększeniem kąta matrycy, szczególnie widoczne dla kątów  $105-120^\circ$  [5]. Na podstawie badań modelowych procesu wyciskania ołowiu z dwoma współczynnikami wydłużenia stwierdzono, że w przypadku małych współczynników wydłużenia ( $\lambda < 5$ ) wraz ze wzrostem kąta matrycy maksymalny nacisk jednostkowy wyciskania maleje [6]. Kształt matrycy ma znaczący wpływ na poprawę jakości powierzchni wyciskanego wyrobu. Wprowadzenie matrycy wypukłej o kącie stożka roboczego  $\alpha = 93^\circ$  w miejsce matrycy płaskiej pozwoliło uzyskać wyrób wolny od pęknięć [7]. Otrzymane wyniki wskazują na możliwość wykorzystania tego efektu w wyciskaniu kompozytów warstwowych.

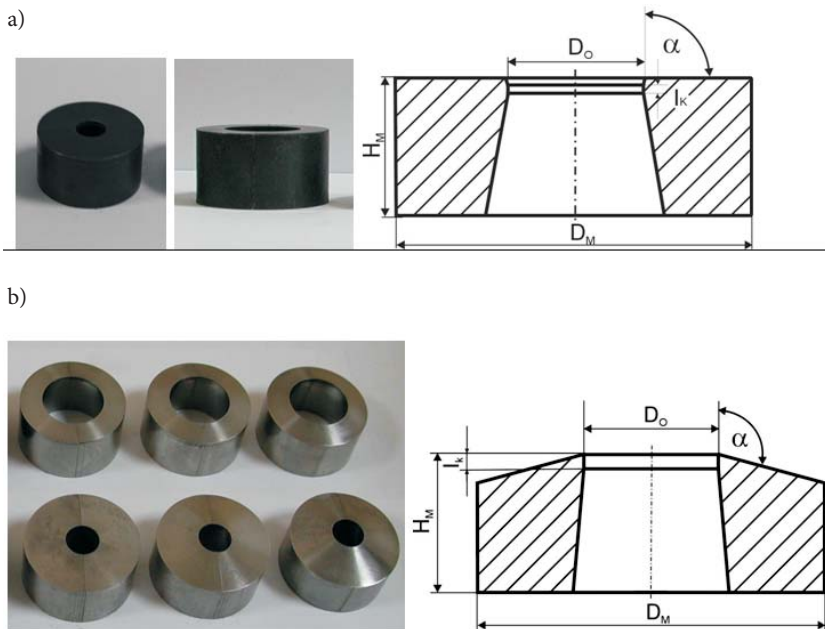
Celem niniejszej pracy jest określenie wpływu wybranych parametrów geometrycznych matrycy na efekt plastycznego płynięcia kompozytu dwuwarstwowego w procesie współbieżnego wyciskania.

## 2. Badania eksperymentalne

Próby współbieżnego wyciskania przeprowadzone zostały na stanowisku badawczym wyposażonym w układ pomiarowo-rejestrujący (rys. 1). Do przeprowadzenia prób wyciskania zastosowano komplet matryc. W tabeli 1 zestawiono wartości podstawowych parametrów matryc, których schemat przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 1. Stanowisko badawcze do prób wyciskania



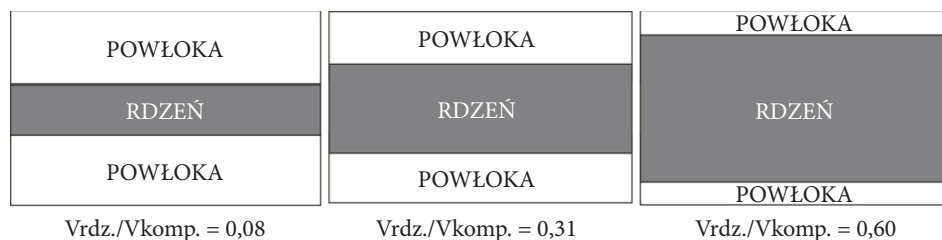
Rys. 2. Widok oraz przekrój wzdłużny matryc użytych w badaniach: a) matryca płaska; b) matryca wypukła

TABELA 1

Podstawowe wymiary matrycy użytych w próbach wyciskania

Parametr	Wartość
Kąt stożka roboczego matrycy $\alpha$ , stopień	90; 95; 100; 105
Średnica matrycy $D_M$ , mm	36
Wysokość matrycy $H_M$ , mm	20
Średnica otworu matrycy $D_O$ , mm	20,78; 10,39
Długość paska kalibrującego $l_K$ , mm	2

Badania współbieżnego procesu wyciskania kompozytów metalowych przeprowadzono na próbkach dwuwarstwowych w postaci rdzenia z koncentryczną powłoką. W wyciskaniu użyto wsadu w układzie: rdzeń twardy (OT3)–powłoka miękka (Pb1). Aby określić wpływ udziału objętościowego rdzenia na sposób płynięcia kompozytu, badania przeprowadzono dla trzech udziałów objętościowych rdzenia w kompozycie (rys. 3). Wybrane cechy materiałów użytych w badaniach zostały podane w tabeli 2, natomiast parametry prób wyciskania podano w tabeli 3.



Rys. 3. Schemat przekroju wsadu do wyciskania z różnym udziałem objętościowym rdzenia

TABELA 2

Wybrane cechy materiałów użytych w badaniach

Materiał	Skład chemiczny [%]	$R_e$ [MPa]	Twardość Brinella HB
Ołów miękki Pb1	99,98 Pb; 0,002 Ag; 0,001As; 0,001Sb; 0,001Sn; 0,002Cu; 0,002Fe; 0,001Zn; 0,005Bi	5	5,3
Ołów twardy OT3	2,5-3,5 Sb; 0,015As; 0,04Cu; 0,012Fe; 0,01Bi	10	8,7

TABELA 3

## Parametry prób wyciskania

Parametr	Materiał złożony rdzeń–powłoka
Średnica wsadu, mm	36
Długość wsadu, mm	72
Temperatura wyciskania, °C	20
Współczynnik wydłużenia, $\lambda = (R^2/r^2)$	3;12
Prędkość wyciskania, mm/s	1

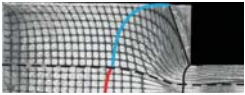
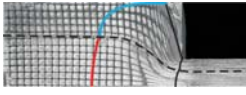
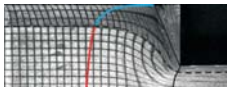
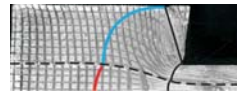
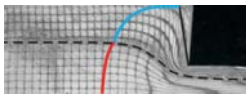
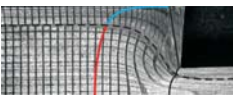
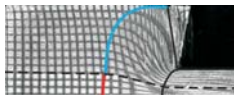
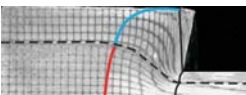
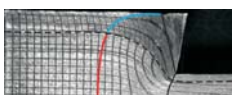
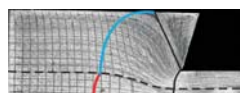
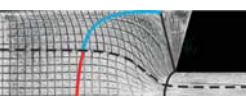
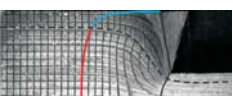
Przed przystąpieniem do procesu wyciskania próbki cięto wzdłuż osi. Na jedną z połówek nanoszono siatkę kwadratową o boku 1,5 mm, a następnie składano połówki próbek i wyciskano. Taki sposób przygotowania próbek umożliwił po procesie m.in. identyfikację strefy odkształcenia. Wyciskanie przeprowadzono do połowy długości próbek, co zapewniało osiągnięcie stanu ustalonego płynięcia.

### 3. Wyniki badań i analiza

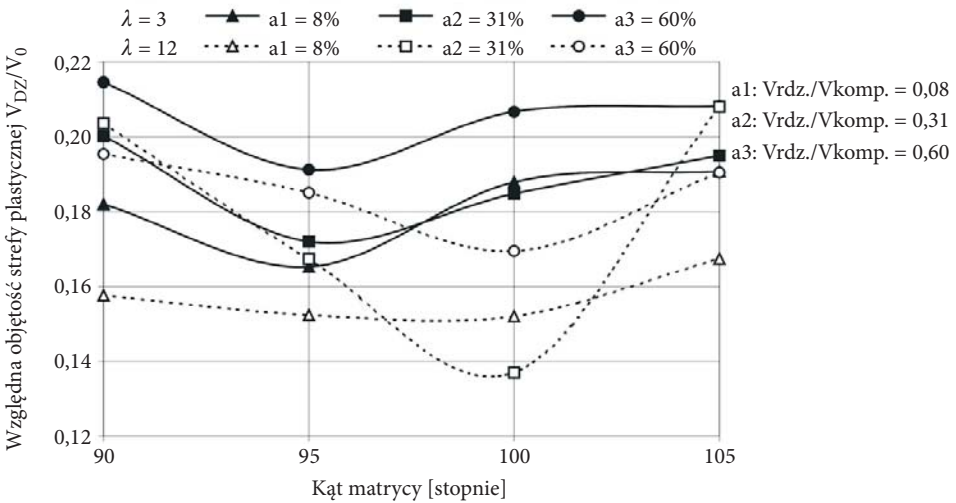
Przykładowe obrazy zdeformowanych siatek z zaznaczonymi strefami odkształcenia rdzenia i powłoki na częściowo wyciśniętych próbkach zamieszczono na rysunku 4. Na podstawie obserwacji zdjęć zniekształconych siatek można zauważyć zmianę kształtu i wielkości stref plastycznych rdzenia i powłoki w zależności od kąta matrycy. Wyciskanie przez matryce wypukłe ujawnia występowanie efektu płynięcia promieniowego głównie materiału powłoki, co może wspomagać lepsze połączenie składników w strefie plastycznej, bardziej korzystny schemat płynięcia czy też lepsze wyrównywanie prędkości cząstek w obszarze otworu matrycy. Obrazy zniekształconych siatek umożliwiają także wyznaczenie zależności objętości stref odkształcenia rdzenia i powłoki od kąta matrycy dla różnych udziałów objętościowych rdzenia w kompozycie.

Wprowadzenie dwóch różnych materiałów do jednej strefy odkształcenia plastycznego powoduje jej ukształtowanie zależnie od cech tych materiałów oraz od parametrów procesu wyciskania. Na podstawie wspomnianych obrazów zniekształconych siatek oraz z wykorzystaniem własnego specjalistycznego oprogramowania dokonano obliczeń objętości stref odkształcenia. Wyniki tych obliczeń pokazano na rysunku 5.

Jak pokazały wyniki, na objętość strefy plastycznej ma znaczny wpływ geometria matrycy (rys. 5). W przypadku wyciskania kompozytu ze współczynnikiem wydłużenia  $\lambda = 3$  można zauważyć najmniejszą wartość objętości strefy dla matrycy

Kąt Matrycy	$\lambda = 12$		
	Vrdz./Vkomp. = 0,08	Vrdz./Vkomp. = 0,31	Vrdz./Vkomp. = 0,60
Matryca płaska $\alpha = 90^\circ$			
Matryca wypukła $\alpha = 95^\circ$			
Matryca wypukła $\alpha = 100^\circ$			
Matryca wypukła $\alpha = 105^\circ$			

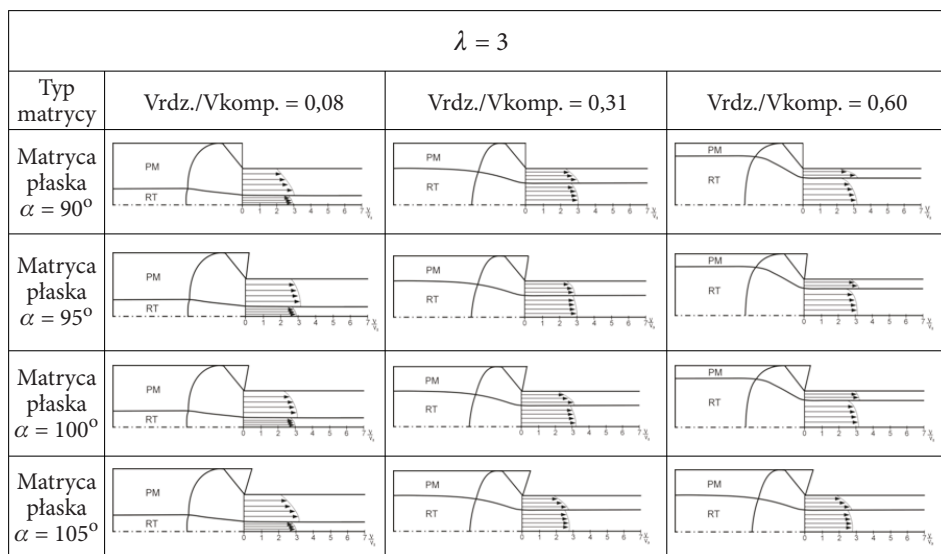
Rys. 4. Zniekształcenie siatki na przekroju wzdłużnym częściowo wyciśniętego wsadu oraz strefy odkształcenia, współczynnik wydłużenia:  $\lambda = 12$



Rys. 5. Zależność względnej objętości strefy plastycznej od kąta matrycy

o kącie stożka równym  $\alpha = 95^\circ$ . Wyciskanie kompozytu warstwowego ze współczynnikiem wydłużenia  $\lambda = 12$  zwiększa zróżnicowanie w wartościach objętości w zależności od zastosowanej matrycy i osiąga wartość najmniejszą przy wyciskaniu przez matrycę wypukłą z  $\alpha = 100^\circ$ .

Istotnym zagadnieniem w procesie wyciskania metali, a w szczególności jednoczesnym odkształceniu dwóch różnych metali jest równomierność ich prędkości na przekroju wyciskanego materiału. Różna prędkość warstw wewnętrznych i zewnętrznych w materiałach przyczynia się do nierównomierności właściwości na przekroju gotowego wyrobu, a dodatkowo w przypadku kompozytów warstwowych może prowadzić do braku połączenia składników lub ich pęknięcia. Na podstawie otrzymanych obrazów płynięcia dokonano rozkładu względnej prędkości cząstek materiału rdzenia oraz materiału powłoki w zależności od zastosowanej geometrii matrycy (rys. 6).

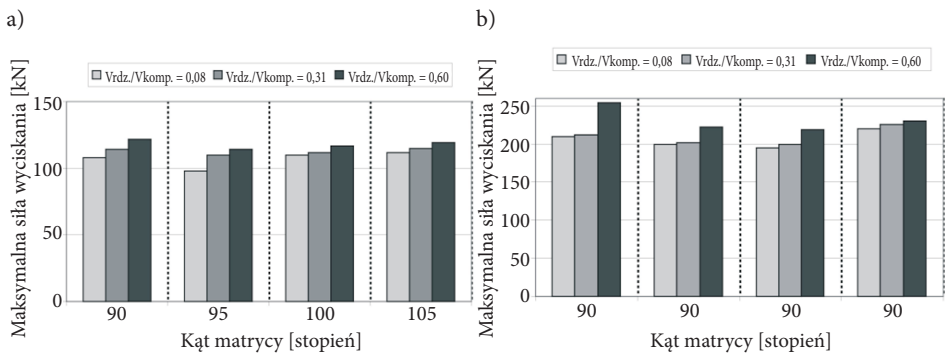


Rys. 6. Rozkład względnych prędkości cząstek w obszarze oczka matrycy podczas wyciskania kompozytu przez matryce o różnej geometrii

Jak wynika z rysunku 6, geometria matrycy wywiera istotny wpływ na rozkład prędkości cząstek w otworze matrycy. Większe różnice w prędkościach cząstek występują podczas wyciskania z zastosowaniem matrycy płaskiej w porównaniu z określonymi matrycami wypukłymi. Analiza odkształcenia tego typu materiałów z zastosowaniem konwencjonalnych matryc tu: płaskich oraz proponowanych matryc wypukłych pozwala na stwierdzenie, że najbardziej korzystnym z punktu widzenia bardziej równomiernego wypływu cząstek w odpowiednich warstwach jest wyciskanie przez matryce wypukłe o odpowiednio dobranym kącie stożka roboczego. Analizując efekty wyciskania z użyciem różnych matryc można wykazać, że zastosowanie matrycy wypukłej o kącie stożka z przedziału  $\alpha = 95-100^\circ$  powoduje zmniejszenie różnicy w prędkościach cząstek, jak i zmniejszenie prędkości dopływu

do otworu matrycy. Sugeruje to, że zwiększenie kąta stożka roboczego powyżej  $90^\circ$  spowalnia wypływanie warstw kompozytu, szczególnie materiału powłoki, przyczyniając się m.in. do lepszego połączenia składników kompozytu.

Rejestracja siły wyciskania oraz przemieszczenia stempla podczas procesu wyciskania a następnie określenie wartości maksymalnej siły wyciskania zależnie od geometrii zastosowanej matrycy pokazały zróżnicowanie jej wartości w zależności od kąta matrycy. Wyciskanie kompozytu warstwowego ze współczynnikiem wydłużenia  $\lambda = 3$  powodowało pojawienie się wartości minimalnej siły w przypadku wyciskania przez matrycę wypukłą o kącie stożka roboczego równego  $\alpha = 95^\circ$  (rys. 7a). Przechodząc ze współczynnika wydłużenia  $\lambda = 3$  na  $\lambda = 12$  wartość minimalna „przesuwa się” w kierunku matrycy o większym kącie roboczym, tj.  $\alpha = 100^\circ$  (rys. 7b). Można zatem przyjąć, że istnieje pewien optymalny kąt matrycy dla danego kompozytu warstwowego, dla którego uzyskuje się najniższą siłę w procesie wyciskania. Jak pokazały wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych najkorzystniejsze staje się wyciskanie przez matryce wypukłe o kątach stożka roboczego z zakresu  $95\text{-}100^\circ$  (w badanym zakresie współczynników wydłużenia od  $\lambda = 3$  do  $\lambda = 12$ ).



Rys. 7. Zależność maksymalnej siły wyciskania od kąta matrycy, współczynnik wydłużenia: a)  $\lambda = 3$ ; b)  $\lambda = 12$

Odnotowane w trakcie badań zmiany siły wyciskania związane są z objętością strefy odkształcenia jaka tworzy się wewnątrz wyciskanego kompozytu. Zmniejszenie jej objętości powoduje obniżenie wartości siły wyciskania. Z kolei objętość strefy odkształcenia związana jest z kątem nachylenia strefy martwej.

Jak pokazują wyniki na rysunkach 4 i 5 większy kąt nachylenia strefy martwej prowadzi do zmniejszenia objętości strefy odkształcenia potwierdzając jednocześnie korzystny promieniowy sposób płynięcia metalu dla matryc wypukłych.



## 4. Podsumowanie

Dobór odpowiedniego kąta zależy od rodzaju wyciskanych materiałów złożonych i wymaga dostosowania do niego optymalnej wielkości ze względu na efekt wyrównywania prędkości płynięcia cząstek oraz minimalizację siły wyciskania. Zastosowanie matryc wypukłych o dobranych do rodzaju wyciskanego materiału parametrach geometrycznych może prowadzić do bardziej jednorodnego płynięcia warstw kompozytu.

Wykazano efekt zmiany kształtu i wielkości stref odkształcenia w zależności od kąta matrycy wypukłej. Dla kąta rozwarcia stożka roboczego matrycy większego niż  $90^\circ$  można zaobserwować tendencję płynięcia materiału powłoki w kierunku promieniowym. Taki sposób zachowania się materiału powłoki może spowodować lepsze wyrównywanie prędkości cząstek w obszarze rdzenia i powłoki w otworze matrycy. Zmiana współczynnika wydłużenia pociąga za sobą zmianę objętości strefy plastycznej. Przy większym współczynniku wydłużenia i mniejszym udziale objętościowym rdzenia najlepsze efekty daje zastosowanie matrycy o kącie z przedziału  $\alpha = (95-100^\circ)$ .

Artykuł wpłynął do redakcji 4.07.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano we wrześniu 2008 r.

### LITERATURA

- [1] K. LAUE, H. STENGER, *Extrusion*, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1981.
- [2] H. TOKUNO, K. IKEDA, *Analysis of deformation in the extrusion of composite rods*, J. Mat. Proc. Tech., 26, 1991, 323-335.
- [3] R. SLIWA, *Plastic zones in extrusion of metal composites*, J. Mat. Proc. Tech., 67, 1997, 29-35.
- [4] H. YEONG-MAW, H. TE-FU, *An investigation into the plastic deformation behavior within a conical die during composite rod extrusion*, J. Mat. Proc. Tech., 121, 2002, 226-233.
- [5] R. DRAGUTINOWIC, J. ZASADZIŃSKI, *Flow of aluminium alloys during extrusion through the dies of various geometry*, Proceedings of the Sixth International Symposium on Plasticity and Resistance to Metal Deformation, Herceg-Novi, 1989, 107-110.
- [6] J. ZASADZIŃSKI, W. LIBURA, *Wyciskanie metali przez matryce wypukłe*, Mat. Konf., Przeróbka Plastyczna '93, Komitet Metalurgii PAN, Sekcja Przeróbki Plastycznej, Krynica, 1993, 175-183.
- [7] W. LIBURA, J. ZASADZIŃSKI, W. Z. MISIOLEK, *Metal flow control in extrusion*, Mat. Konf. International Congress on Metallurgy and Materials Technology, Sao Paulo, Brazylia, 6, 1994, 231-238.

### I. NOWOTYŃSKA

#### **Application of different geometry dies in extrusion of layered composites**

**Abstract.** Material flow during the extrusion strongly depends on the die design. Choice of the adequate die geometry gives the possibility of controlling plastic flow of material under condition of plastic deformation.

Experimental studies of metal flow in the co-extrusion of two different materials of core-sleeve system have been presented in this work. The influence of various parameters of the die on the flow pattern during extrusion of layered composite material has been analyzed.

Using different volume ratios of a hard core-soft sleeve in final effect of simultaneous deformation of layered composite model materials: soft lead, hard lead alloy, and set of dies have been used. Basing on the analysis of the grid distortion, volume of the deformation zones, extrusion load and relative velocity distribution in the plastic zone and orifice region, the best convex die geometry in comparison with others has been proposed. It can be selected taking into account relatively small plastic zone, more uniform deformation and relatively small extrusion load. Possible indication of the range of the die angles for given properties of the components of the composite and process parameters have been presented. Based on the experimental study of the extrusion load using flat and convex dies, the dependence of maximal load on the angle of the die have been determined. One can observe that there exists an optimal value of the convex die angle minimizing a value of the extrusion load, what can be a criterion for looking for the adequate shape of the extrusion die.

**Keywords:** forming process, extrusion, composite materials, flat die, convex die

**Universal Decimal Classification:** 621.71