

APARATURA BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Wyznaczanie rozkładów naprężeń kontaktowych w procesach wyciskania z wykorzystaniem piezoelektrycznych przetworników ciśnienia

GRZEGORZ SKORULSKI¹, PIOTR BARANOWSKI²

¹POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY

²CENTRALNY OŚRODEK BADAWCZO ROZWOJOWY APARATURY BADAWCZEJ I DYDAKTYCZNEJ

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono eksperymentalną metodę wyznaczania naprężeń kontaktowych w procesach wyciskania. Do pomiaru użyto przetworników piezoelektrycznych wyposażonych w bardzo czuły układ membrany umieszczonej w obudowie wypełnionej silikonem, który reaguje na zmiany ciśnienia i przekazuje je na elementy czujnika. Zaprezentowano także wyniki badań, dotyczące rozkładów ciśnienia na tłoku i ściankach recypienta (pojemnika). Omówiono technikę przeprowadzenia pomiarów, kalibrację toru pomiarowego przetworników i zastosowaną aparaturę. Badania przeprowadzono na materiale zastępczym (plastelinie) – który bardzo dobrze symuluje procesy wyciskania stopów aluminium w podwyższonych temperaturach. Pokazano również znaczące różnice, jakie wystąpiły w rozkładach ciśnienia podczas wyciskania symetrycznego i niesymetrycznego.

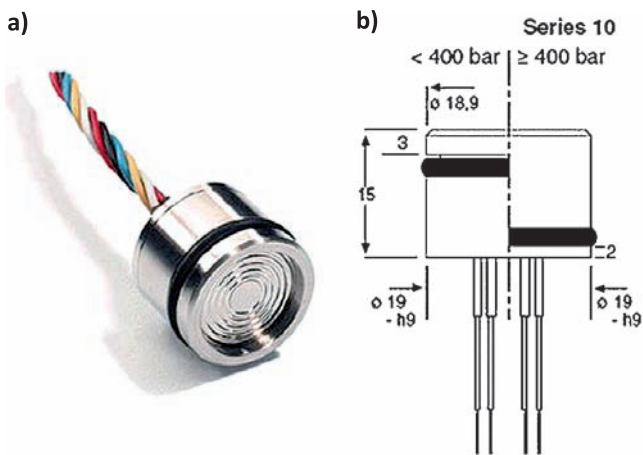
Application of piezoresistive pressure transducers to the measurement of contact stresses in extrusion processes

ABSTRACT

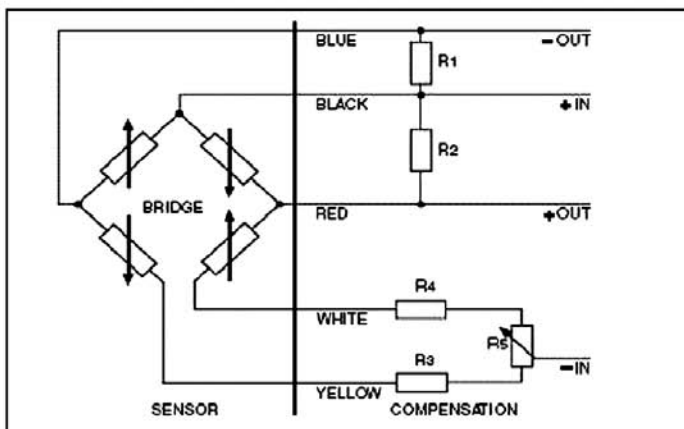
The experimental method based on piezoresistive transducers has been presented in this paper. A **high-sensitivity piezoresistive silicon chip** is used for pressure sensing. The chip is protected against ambient influences by a stainless steel housing sealed with a concentrically corrugated diaphragm. The housing is filled with silicone oil so as to ensure the transfer of the pressure from the diaphragm to the sensing component. The results of pressure distribution have been shown on contact surface between ram, container and extruded material. The technique of measurement has been analysed as well. Experiments are made using plasticine as a substitute material. This kind of material is used to simulate extrusion process of aluminium alloys in elevated temperatures. The significant differences has been obtained in pressure distribution between symmetric and non – symmetric extrusion process.

1. WSTĘP

W piezoelektrycznych przetwornikach pomiarowych wykorzystuje się zjawisko powstawania ładunków powierzchniowych w dielektrykach pod wpływem działania określonego stanu naprężenia. Należy zauważyć, że liczbowo ciśnienie działające na powierzchnię kryształu równe jest naprężeniu występującemu w kryształach, które powoduje indukowanie się ładunków elektrycznych. Ze względu na takie właściwości efektu piezoelektrycznego przetworniki ciśnienia znalazły zastosowanie w pomiarach ciśnień szybkozmiennych [3]. Najważniejszą cechą metrologiczną piezoelektrycznych przetworników pomiarowych ciśnienia jest liniowość charakterystyki (toru pomiarowego) oraz bardzo szeroki zakres pomiarowy. W przedstawionej metodzie badawczej podstawowym elementem układu pomiarowego jest przetwornik firmy KELLER typu PA 10 o zakresie pomiarowym od 0 do 1000 bar (Rys. 1), dostępny w ofercie



Rysunek 1. Piezoelektryczny przetwornik ciśnienia firmy KELLER: a) widok ogólny, b) schemat wraz z wymiarami montażowymi



handlowej. Jako materiał modelowy wykorzystano plastelinę. Jej przydatność do modelowania procesów obróbki plastycznej opisano w [2, 6]. Sygnał pomiarowy w postaci zmian napięcia przekazywany był do rejestratora sygnałów MC 201. Rejestrator sygnałów pozwalał na jednoczesny zapis do ośmiu pojedynczych sygnałów pomiarowych. Dwa przetworniki pomiarowe umieszczono w tłoku, pozostałe sześć w bocznych ściankach pojemnika. W wyposażeniu stanowiska pomiarowego znajdował się również komputer. Odpowiednie oprogramowanie pozwoliło zapisać przebieg rejestrowanych sygnałów w postaci plików tekstowych. Na ich podstawie wykonano odpowiednie wykresy porównawcze, wykorzystując profesjonalne narzędzie w postaci programu Origin. Sygnały pomiarowe zostały wzmocnione. Wykorzystano do tego celu dwa mostki tensometryczne.

Na początku zmierzono poziom sygnału przy nieobciążonych przetwornikach. Poziom ten dla każdego z nich został przyjęty jako wskazanie zerowe. Odpowiednia poprawka została dla każdego przetwornika oddzielnie uwzględniona w zestawieniach zbiorczych. Sprawdzone również układ pomiarowy pod względem reakcji na maksymalny sygnał pomiarowy, który w konkretnym przypadku wynosił 1V. Poprawki te pozwoliły na wyskalowanie zakresu pomiarowego każdego z przetworników i każdemu z nich przyporządkowały prawidłową wielkość tego zakresu. Czynności powyższe były niezbędne do otrzymania poprawnych wartości wskazań przetworników pomiarowych, mimo iż każdy z nich został przetestowany i wzorcowany przez producenta (Rys. 2). Następnie dla całego układu wykonano

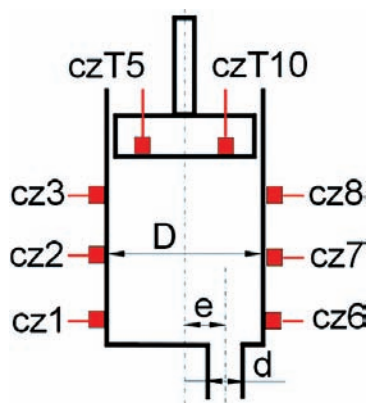
PR-10/0.5 bar/81634.7 ^(a)		SN 10642 ^(b)		7	
^(c) Temp [°C]	^(d) Zero [mV]	^(e) +270 [mV]	^(f) Comp [mV]	^(g) dZero [mV]	
-8.6	-6.6	-16.5	0.4	-0.7	
1.3	-5.9	-16.2	0.7	-0.4	
25.4	-4.3	-15.8	1.1	0.0	
50.5	-2.9	-15.8	1.1	0.0	
80.4	-1.3	-16.2	0.8	-0.3	
COMP		R1 = 270 kOhm ^(h)	R4 = 68.0 Ohm ⁽ⁱ⁾		
RB		3543 Ohm ^(h)			
ZERO		1.1 mV ^(j)			
SENS		123.9 mV/bar at 1.000 mA ^(k)			
SENS		495.7 mV/bar at 4.000 mA ^(k)			
LIN		^(l) Lnorm	^(m) Lnorm	⁽ⁿ⁾ Lbfs1	
^(o) [bar]	^(p) [mV]	^(q) [%Fs]	^(r) [%Fs]	^(s) [%Fs]	
0.000	0.0	0.00	0.05	0.05	
0.125	15.5	-0.07	-0.03	-0.03	
0.250	30.9	-0.07	-0.05	-0.05	
0.375	46.5	-0.01	-0.01	-0.01	
0.500	62.0	0.07	0.05	0.05	
Long Term Stability Ok ^(t)					
Test 500 Volt Ok ^(u)					
Supply 1.000 mA ^(v)					
25.04.06 ^(w)					
					PH01.F03AvK ^(x)

Rysunek 2. Charakterystyka pomiarowa przetwornika cechowanego przez producenta oraz schemat połączeń elektrycznych

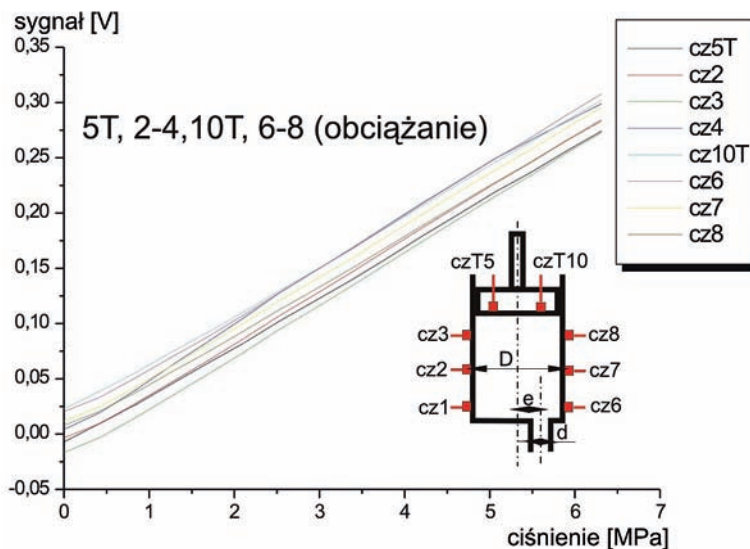
kalibrację toru pomiarowego. Otrzymane charakterystyki przetworników potwierdzają ich przydatność, gdyż w ustalonym zakresie pomiarowym są liniowe.

2. KALIBRACJA PRZETWORNIKÓW POMIAROWYCH

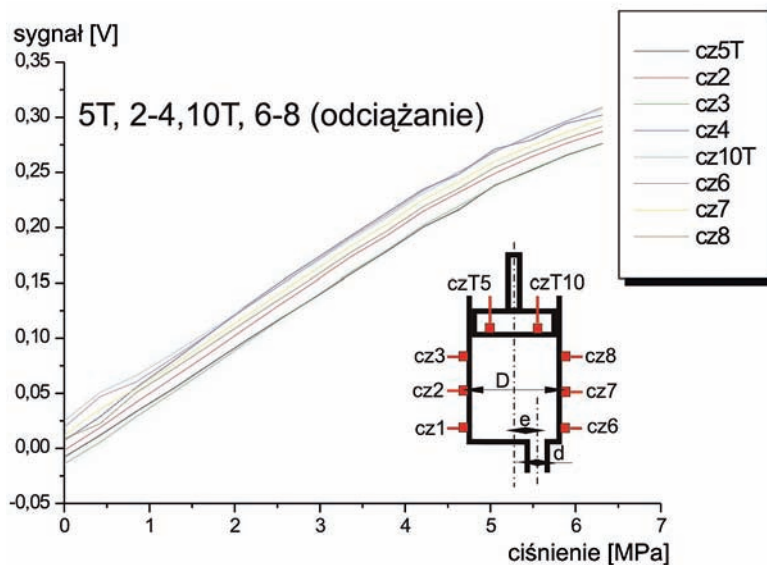
Kalibrację toru pomiarowego przetworników przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej INSTRON. Wykorzystano w tym celu ciśnienie hydrostatyczne w zamkniętym pojemniku, a jako ściskane medium zastosowano plastelinę. Próby przeprowadzono zatem na tym samym medium i z wykorzystaniem tych samych parametrów geometrycznych, jakie później miały miejsce w procesie wyciskania. Po zadaniu określonej wielkości siły na stemple zarejestrowano sygnały pomiarowe przetworników. Próbę powtórzono kilka razy, aby wyeliminować zjawisko ściśliwości. Za każdym razem zadawano ciśnienia w kierunku rosnącym, a potem malejącym, aby uchwycić pętlę histerezy. Dla każdego z przetworników otrzymano charakterystykę zmian napięcia elektrycznego na wyjściu w funkcji zmian ciśnienia jako wielkości wejściowej. Charakterystyka pomiarowa powstała na skutek uśrednienia jej wartości w kierunku rosnącym i malejącym oraz linearyzacji metodą regresji liniowej. Przy metodzie regresji liniowej zaobserwowano stosunkowo małe błędy, co potwierdziło doświadczalnie liniowość charakterystyki przetwornika. Otrzymane współczynniki regresji liniowej obarczone są bardzo małymi błędami i świadczą o liniowości charakterystyk pomiarowych. Schemat



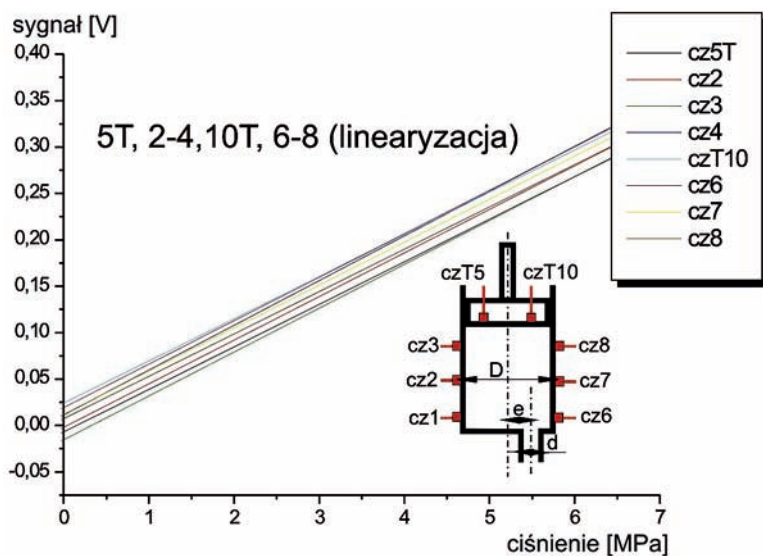
Rysunek 3. Schemat rozmieszczenia i oznaczenia przetworników pomiarowych w pojemniku i na tłoku



Rysunek 4a. Charakterystyka pomiarowa przetworników w wybranym zakresie pomiarowym (próba obciążania)



Rysunek 4b. Charakterystyka pomiarowa przetworników w wybranym zakresie pomiarowym (próba odciążania)



Rysunek 4c. Linearyzacja charakterystyk przetworników metodą regresji liniowej

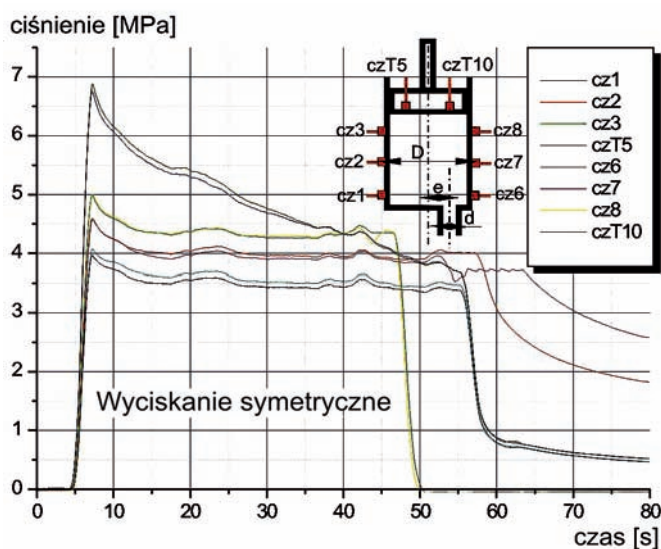
rozmieszczenia poszczególnych przetworników oraz ich oznaczenia przedstawiono na Rysunku 3.

Charakterystyki przetworników zamieszczone są na następujących Rysunkach:

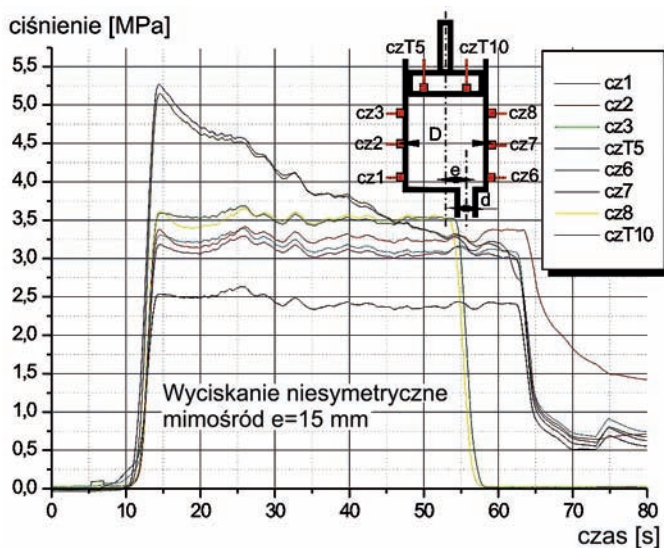
- a) Rysunek 4a – charakterystyka przetworników przy próbie obciążania,
- b) Rysunek 4b – charakterystyka przetworników przy próbie odciążania.

Linearyzacja charakterystyk metodą regresji liniowej została pokazana na Rysunku 4c.

Jako podstawowe informacje uzyskane za pomocą metody badawczej wykorzystującej piezoelektryczne przetworniki ciśnienia należy uznać przebieg ciśnienia w czasie, rejestrowany podczas procesu wyciskania. Wyniki można podzielić na dwie grupy w zależności od charakteru modelowanego proce-



Rysunek 5a. Przykładowe przebiegi zmian ciśnienia w funkcji czasu dla wyciskania symetrycznego ($e=0$)



Rysunek 5b. Przykładowe przebiegi zmian ciśnienia w funkcji czasu dla wyciskania niesymetrycznego ($e=15$ mm)

su. Do badań wykorzystano próbki plastelinowe. Przygotowano dwa materiały różniące się przede wszystkim wielkością granicy plastyczności. Dodatek oleju rzepakowego w ilości ok. 10% składu objętościowego zmieniał także warunki tarcia na powierzchni kontaktu materiału modelowego i recypienta [1, 4, 5]. Przykładowe przebiegi zmian rozkładów ciśnień w czasie trwania procesu wyciskania przedstawiono na Rysunkach: 5a (proces wyciskania symetrycznego) i 5b (proces wyciskania niesymetrycznego).

3. WYKRESY SŁUPKOWE

Wykorzystane do prób wyciskania matryce pozwalały na wyciskanie symetryczne i niesymetryczne. Wykresy słupkowe, przedstawiające aktualne wartości ciśnień dla każdego z użytych przetworników wykonano na podstawie danych z plików tekstowych. Aktualny stan rozkładu ciśnień w danej chwili czasu został przedstawiony w postaci słupków, których wysokość jest proporcjonalna do wartości mierzonych ciśnień. Zestawienia rozkładów ciśnień dokonano w odstępach czasu co 2 sekundy dla wyciskanych próbek plastelinowych. Przykładowe wykresy słupkowe dla zaawansowanej fazy procesu wyciskania symetrycznego i niesymetrycznego przedstawiono na Rysunkach 6a i 6b oraz 6c. Dotyczą one następujących procesów:

- a) wyciskanie symetryczne: Rysunek 6a,
- b) wyciskanie niesymetryczne z dużym stopniem redukcji: Rysunek 6b,
- c) wyciskanie niesymetryczne z małym stopniem redukcji: Rysunek 6c.

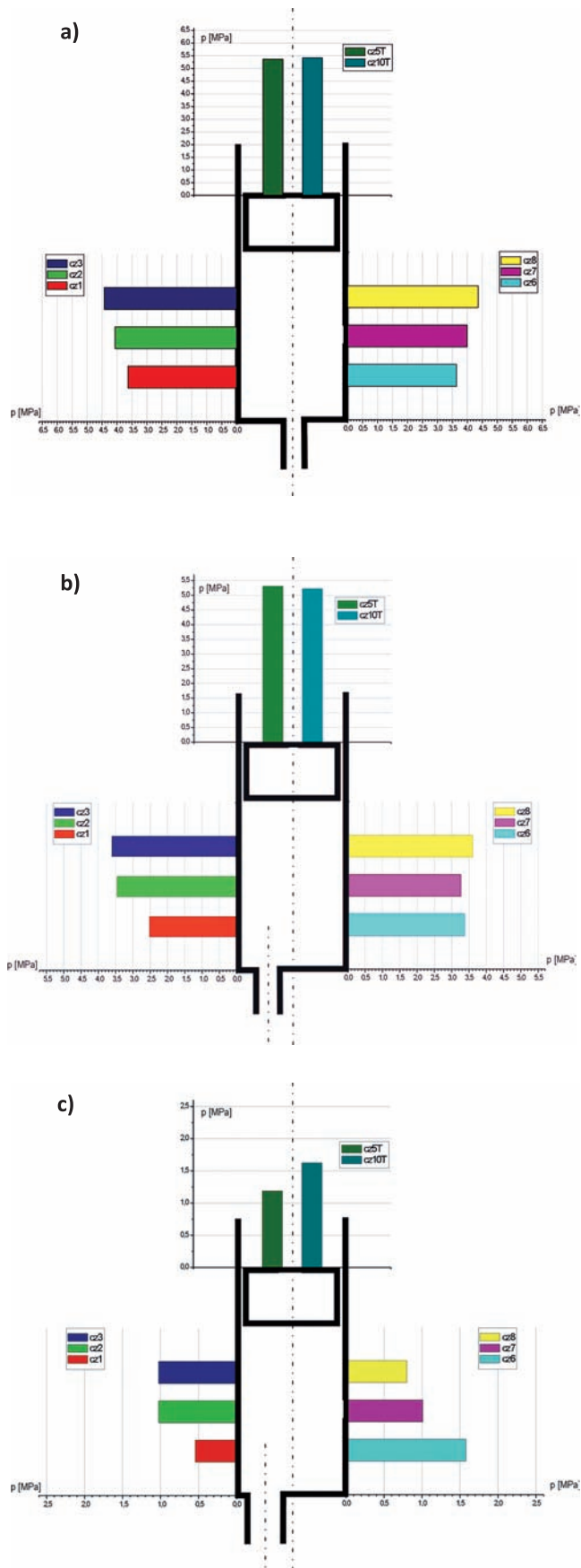
4. ANALIZA WYNIKÓW I WNIOSKI

Metoda pomiaru ciśnień na tłoku i ściankach recypienta wykorzystująca piezoelektryczne przetworniki pomiarowe jest metodą dokładną. Dla zastosowanego układu pomiarowego można dosyć łatwo przeprowadzić kalibrację toru pomiarowego przetworników, czyli wzorcowanie. Wadą metody jest niestety stosunkowo wysoki koszt stanowiska pomiarowego, a zwłaszcza koszt samych przetworników. Czasem przeszkodę stanowią wymiary gabarytowe przetworników. Niestety przez wzgląd na swoją konstrukcję nie mogą być one bardzo znacznie zminiaturyzowane. Posiadają jednak niezaprzeczalną zaletę - małe błędy pomiarowe. Metodę tę można zatem wykorzystać do sprawdzenia poprawności otrzymanych wyników za pomocą in-

nych narzędzi pomiarowych. Obróbka wyników jest bardzo czasochłonna (w przypadku zastosowanej aparatury pomiarowej) i wymaga licznych operacji pośrednich na otrzymanych plikach z danymi, ale otrzymane rezultaty są bardzo dokładne i dlatego rekomenduje się zastosowanie opisanej metody badawczej w analizie procesów wyciskania.

Wyniki badań doświadczalnych pokazują wyraźne różnice między rozkładami ciśnień utożsamianymi z lokalnymi naprężeniami kontaktowymi w procesie symetrycznego i niesymetrycznego wyciskania. Stwierdzono silną niesymetrię rozkładów naprężeń kontaktowych na ściankach pojemnika i na powierzchni tłoka w procesie niesymetrycznego wyciskania (Rys. 6b i 6c). Ciekawym jest ponadto, że niesymetria ta jest bardziej widoczna w przypadku zastosowania matrycy o mniejszym stopniu redukcji λ . W przypadku dużej redukcji rozkłady ciśnień również wykazują niesymetryczność, lecz jest ona bardziej niwelowana przez większe opory przepływu. Obserwujemy zatem w tym przypadku rozkłady nieco zbliżone do rozkładów ciśnień otrzymanych dla prób wyciskania symetrycznego. Większe pole przekroju otworu w matrycy powoduje znaczne zmniejszenie oporów przepływu plastycznego. Jest to widoczne przy porównaniu maksymalnego ciśnienia pojawiającego się na tłoku, czyli siła, jaka musi być przyłożona, jest w tym przypadku znacznie mniejsza. Dodatkowo warunki geometryczne, na jakie napotyka struga wyciskanego materiału powodują zjawisko powstawania wiru w pobliżu miejsca, w którym materiał opuszcza matrycę.

W wyniku otrzymujemy w bliskim sąsiedztwie otworu matrycy największą różnicę ciśnień. Fizycznie zjawiska związane z niejednorodnością przepływu przekładają się na powstawanie momentów gnących. Ich działanie należy uwzględnić w procesie projektowania matrycy i jej właściwego zamocowania na prasie. Oprócz wysokich kosztów budowy stanowiska badawczego, metoda wykorzystania piezoelektrycznych przetworników ciśnienia do analizy naprężeń w procesach wyciskania wydaje się zatem jak najbardziej celowa. Duża różnorodność zakresów pomiarowych pozwala na zastosowanie do eksperymentów różnych materiałów zastępczych, a w niewielkim zakresie również metali i ich stopów. Zasadniczą zaletą przedstawionej metody badawczej jest jej duża dokładność i czułość na zmiany mierzonych wielkości.



Rysunek 6. Rozkłady ciśnień w formie wykresów słupkowych:
a) wyciskanie niesymetryczne,
b) wyciskanie niesymetryczne z dużą redukcją – $\lambda = 5,5$,
c) wyciskanie niesymetryczne z małą redukcją – $\lambda = 3,05$

LITERATURA

- [1] Ashby M. F.: Dobór materiałów w projektowaniu inżynierskim, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1995.
- [2] Kowalczyk L.: Modelowanie fizyczne procesów obróbki plastycznej, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom, 1995.
- [3] Miłek M.: Pomiary wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi, Wydawnictwa Politechniki Zielonogórskiej, Zielona Góra, 1998.
- [4] Piwnik J.: Mechanika procesów wyciskania metali, Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Białystok, 1991.
- [5] Piwnik J.: Modelowanie procesów plastycznego płynięcia, Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Białystok, 1992.
- [6] Piwnik J.: Mechanika jednoczynnikowego, niesymetrycznego procesu wyciskania metali, Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Nauki Techniczne Nr 107, Mechanika Z.16, 1996, s. 299–337.
- [7] Materiały reklamowe firmy KELLER AG.