

Dr hab. inż. Zbigniew ZIMNIAK

Mgr inż. Bartłomiej PONDEL

Politechnika Wroclawska, Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji, Wrocław

Obróbka plastyczna metodami mikroformowania

Micro metal forming

Streszczenie

Ciągły wzrost popytu na miniaturowe części, powoduje szybki rozwój metod mikroformowania z zastosowaniem obróbki plastycznej. W artykule opisano proces mikroformowania metalowych części, problemy związane ze zmniejszeniem skali obrabianych wyrobów, a także zjawiska zachodzące podczas tego procesu w skali mikro. Przedstawiono przegląd głównych procesów obróbki plastycznej stosowanych w mikroformowaniu w tym kształtowanie cienkich blach i kształtowanie brył. Omówiono także zagadnienia związane z produkcją mikromaszyn.

Abstract

Increasing demand on miniature parts causes the great growth of microforming methods using metal forming. This paper gives the review of microforming process, problems associated with miniaturization of metal parts and effects which appear during the micro metal forming. Forming technologies like micro massive forming and micro sheet metal forming are described in this paper. The problem of micro machines is mentioned here.

Słowa kluczowe: mikroformowanie, efekty skali, mikronarzędzia, mikromaszyny

Key words: *microforming, size effects, micro forming tools, micro machines*

1. WSTĘP

Miniaturyzacja elementów różnego rodzaju urządzeń, powoduje, że produkcja miniaturowych części nabiera ogromnego znaczenia. Popyt na miniaturowe wyroby spowodowany jest nie tylko przez rosnącą liczbę użytkowników urządzeń elektronicznych, którzy pragną posiadać bardziej poręczne urządzenia, ale także przez coraz częstsze stosowanie mikrotechnologii w różnych dziedzinach przemysłu: medycynie, optoelektronice czy w wojsku. Typowymi przykładami mikroczęści są: sworznie, wszelkiego rodzaju układy dźwignienek, śrubki, pokrywy, łączniki a także implanty medyczne [1]. Wybrane przykłady pokazano na rysunku 1 [4], [5].

Wytwarzanie metalowych części o małych wymiarach znane było w przemyśle od dawna. Elementy takie produkowano stosując najczęściej obróbkę skrawaniem (toczenie, frezowanie). Rozwój tych technologii, na początku lat 90-tych dwudziestego wieku, spowodował, że zaczęto zadawać sobie pytanie czy do wytwarzania mikroelementów można zastosować obróbkę plastyczną. Stanowiło to wielkie wyzwanie, gdyż wielkość elementów została zredukowana do dziesiątych, a nawet setnych części milimetra, a precyzja wykonania tych części miała wynosić mniej niż kilka mikrometrów [1], [2]. Z tego też powodu zaczęto prowadzić szczegółowe badania mające na celu poznanie procesu kształtowania plastycznego mikroczęści, odkształcenia materiału a także ustalenia optymalnych parametrów procesów.



Rys. 1. Przykłady mikroczęści wykonywanych metodami obróbki plastycznej [4], [5]

Fig. 1. Examples of micro parts

2. EFEKTY SKALI – *Size effects*

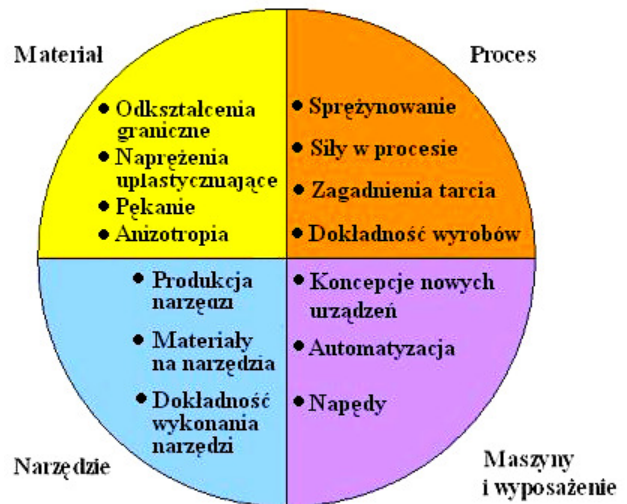
Mówiąc o mikroformowaniu z punktu widzenia obróbki plastycznej, mówimy o produkcji części, elementów, w których przynajmniej dwa wymiary wynoszą mniej niż milimetr [2].

Mikroformowanie wyrobów metodami obróbki plastycznej obejmuje cztery podstawowe zagadnienia: materiał, proces technologiczny, narzędzia oraz maszyny i wyposażenie [2] (rys. 2).

W zakresie narzędziowym podstawowym problemem jest samo wytwarzanie narzędzi o bardzo małych wymiarach, które są niezbędne w procesach mikroformowania. Dotyczy to w szczególności wewnętrznych powierzchni, np. w matrycy do wyciskania, które muszą być wykonane z bardzo dużą dokładnością.

Problemy produkcyjne wynikające z miniaturyzacji dotyczą także maszyn i wyposażenia. Wszelkiego rodzaju tolerancje i luzy, w skali mikro mogą mieć niekorzystny wpływ

na jakość produkowanych mikroczęści. Pewne trudności mogą także wystąpić przy mocowaniu części, ponieważ powierzchnie, za które część może być chwyтана są bardzo małe. Waga przedmiotu w porównaniu z siłami adhezji jest tak mała, że przedmiot nie może samodzielnie „uwolnić się” z zacisku. Dodatkowo obrabiany element musi być umieszczony w narzędziu z tolerancją kilku mikrometrów.



Rys. 2. Problemy technologiczne związane ze stosowaniem mikroformowania wyrobów metodami obróbki plastycznej [2]

Fig. 2. Problems associated with miniaturization

Kolejnym wyzwaniem jest opracowanie właściwej technologii pomiarowej, odpowiedniej do mierzenia małych konturów części czy narzędzi [2].

W mikroformowaniu oprócz problemów jakie występują w obróbce plastycznej w skali makro (konstrukcja narzędzia, zużycie i odpowiedni dobór materiału), pojawiają się problemy wynikające z samej miniaturyzacji. Symulacje numeryczne procesów mikroformowania wymagają często stosowania specjalnych metod obliczeniowych [3].

Jednym z zagadnień jakie towarzyszy zmniejszaniu skali procesu, jest tak zwany efekt skali (*size effect*). Przyczyny powstawania efektu skali można podzielić na dwa źródła: fizyczne i strukturalne (związane z budową strukturalną materiału) [4].

2.1. Źródła fizyczne

Efekty skali związane z budową strukturalną badanych materiałów pojawiają się wtedy, gdy zmniejszając objętość części zmniejsza się ilość defektów struktury sieciowej. Zachowanie materiału w czasie procesu kształtowania zmienia się z powodu mniejszej liczby ziaren.

Oprócz sił występujących w czasie konwencjonalnej obróbki plastycznej, w procesie mikroformowania należy wziąć pod uwagę inne siły. Należą do nich: siły oddziaływania międzycząsteczkowego Van der Waals'a, siły napięcia powierzchniowego czy też siły grawitacji. Siły te są bardzo małe i w konwencjonalnym procesie obróbki plastycznej mogą zostać pominięte. Jednak w procesie mikroformowania są na tyle duże, że muszą być uwzględnione.

2.2. Źródła strukturalne

Wielkość ziarna materiałów metalicznych zależy od wielu czynników, na przykład od rodzaju obróbki cieplnej, mechanicznej czy też cieplnomechanicznej. Wielkość wyrobu nie może być dowolnie zmniejszana ponieważ ograniczeniem jest sama wielkość ziarna. Struktura powierzchni części, podobnie jak wielkość ziaren, jest zależna od procesów zachodzących podczas obróbki powierzchniowej danej części. Dlatego nie jest możliwe na przykład zmniejszenie chropowatości powierzchni przy zmniejszaniu wymiarów przedmiotu.

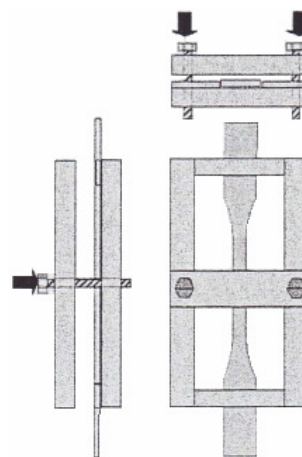
Porównując mikroformowanie do konwencjonalnego procesu obróbki plastycznej można zauważyć, że parametry (wielkość ziaren, struktura powierzchni) nie ulegają zmianie. Związek pomiędzy wymiarami części a parametrami jej mikrostruktury czy też powierzchni ulega zmianie wraz ze zmniejszaniem skali przedmiotu. Prowadzi to właśnie do powstania zjawiska efektu skali. Nie pozwala to na bezpośrednio wykorzystanie w mikroformowaniu dostępnej wiedzy technologicznej dotyczącej konwencjonalnej obróbki metali.

3. MIKROFORMOWANIE BLACH

Z powodu efektu skali właściwości oraz zachowanie się materiału w procesie mikroformowania blach zmieniają się wraz ze zmianą wymiarów elementu. W celu bliższego poznania tych zmian, przeprowadzono szereg badań. Jedną ze strategii jaką przyjęto w badaniach zjawisk zachodzących podczas mikroformowania oraz efektów powstałych w trakcie miniaturyzacji jest dokładne przeniesienie znanego procesu ze skali makro do skali mikro.

3.1. Próba rozciągania

Jako podstawowa metoda badań wytrzymałościowych dla materiałów konstrukcyjnych, statyczna próba rozciągania znalazła także zastosowanie w skali mikro. Próbę rozciągania przeprowadzono na wycinku cienkiej blachy o grubości 0.1 mm [4]. W czasie próby pojawiły się nieoczekiwane trudności. Próbką uległa pofałdowaniu i pomarszczeniu w wyniku braku współosiowości pomiędzy próbką a szczękami mocującymi. Dlatego celem zmniejszenia niewspółosiowości badanej próbki z kierunkiem działania siły w próbie rozciągania zastosowano specjalną wkładkę pokazaną na rysunku 3.



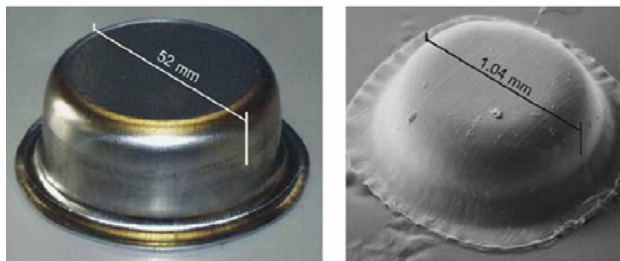
Rys. 3. Schemat urządzenia do mocowania badanej próbki w próbie rozciągania [4]

Fig. 3. A schematic diagram of inserting set

W czasie tego testu zauważono także, że anizotropia normalna zmniejsza się wraz ze zmniejszaniem wymiarów przedmiotu [2]. Oznacza to, że wraz ze zmniejszaniem wymiarów wyrobu warunki obróbki plastycznej ulegają pogorszeniu.

3.2. Głębokie tłoczenie blach

Jednym z procesów obróbki jaki przeprowadzono w skali mikro było głębokie tłoczenie. Wyniki tego testu oraz badania eksperymentalne pozwoliły na wyznaczenie współczynników wyłaczania dla cienkich blach o grubości 0.1mm. Dalsze badania pokazały, że względna średnica stempla (średnica stempla w odniesieniu do grubości blachy) ma znaczący wpływ na współczynniki wyłaczania [4], [6]. Na rysunku 4 pokazano porównanie elementów uzyskanych przez głębokie tłoczenie w skali makro i mikro.



Material:	Al 99.5	Al 99.5
Grubość blachy:	1.0 mm	0.02 mm
Współczynnik tłoczenia:	1.8	1.8
Średnica stempla:	50 mm	1.0 mm
Głębokość tłoczenia:	25 mm	0.5 mm
Prędkość tłoczenia:	25 mm/s	1.0 mm/s

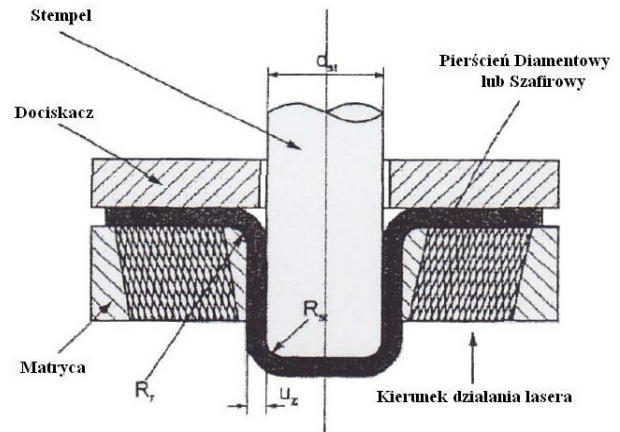
a)

b)

Rys. 4. Porównanie wytłoczek uzyskanych w procesie tłoczenia w skali makro (a) i mikro (b) [4], [6]

Fig. 4. Comparison of macro (a) and micro (b) deep drawing cups

W dalszych badaniach, celem poprawy tłoczności zaproponowano narzędzia z zastosowaniem światła lasera do miejscowego podgrzewania obrabianego detalu [4], [6]. Narzędzia pokazano na rys. 5.



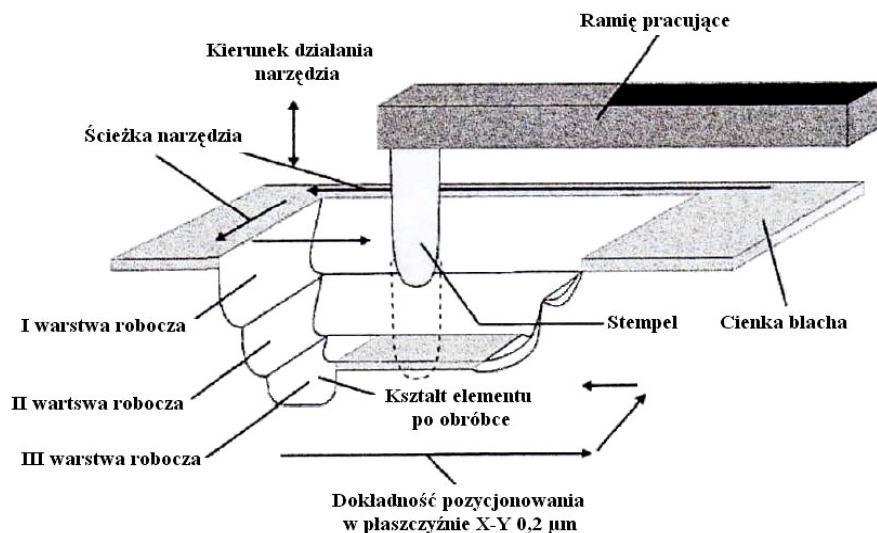
Rys. 5. Koncepcja narzędzia z laserowym podgrzewaniem części w procesie głębokiego tłoczenia [4], [6]

Fig. 5. Tool concept for laser supported part heating in micro deep drawing

Wiązka lasera przechodząc przez pierścień wykonany z diamentu lub szafiru, dociera do kołnierza wytłoczki. Zadaniem lasera ma być podgrzewanie kołnierza wytłoczki w czasie tłoczenia w miejscu gdzie powstają duże naprężenia. Oczekiwana jest także większa odkształcalność wytłoczki w obszarze działania lasera.

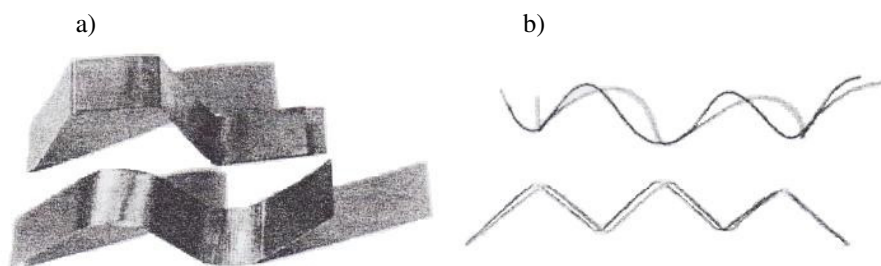
3.3. Młotkowanie

Inną metodą mikroformowania cienkiej blachy jest metoda młotkowania. Blacha o grubości 10 μm została odkształcona uderzeniami stempla o średnicy 10 μm . W wyniku tego powstało kilka warstw roboczych (rys. 6) [4]. Blacha przesuwana jest za pomocą maszyny pozycjonującej 3D – CNC wyposażonej w serwomotory o dokładności wynoszącej 0.2 μm . Do obserwacji procesu wykorzystano elektronowy mikroskop skaningowy.



Rys. 6. Przyrostowe kształtowanie cienkich blach metodą młotkowania

Fig. 6. Incremental sheet metal forming by hammering



Rys. 7. Miedziana folia (a) i drut (b) formowane impulsem promieniowania laserowego [4]

Fig. 7. Copper foils (a) and wires (b) bent by pulse laser radiation

3.4. Mikroformowanie laserowe

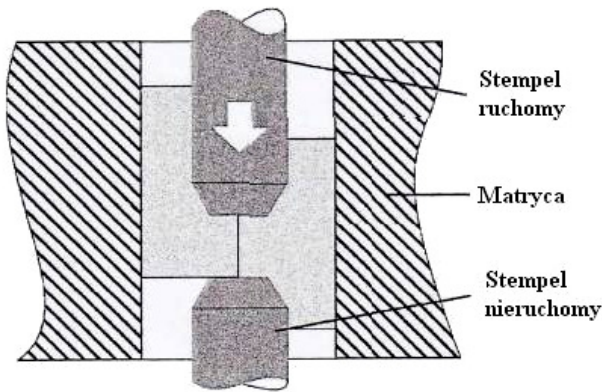
Kolejnym procesem mikroformowania jest kształtowanie wyrobów wiązką lasera. Impulsy lasera powodują powstanie naprężeń blachy, która wygina się w kierunku promienia lasera. Jednymi z ważniejszych parametrów tej metody są: gęstość energii, grubość materiału i jego właściwości. Na rysunku 7 widoczne są dwie miedziane folie o grubości 50 μm oraz drut o takiej samej średnicy. Widoczne zagięcia (kątowe i sinusoidalne) wytworzone zostały metodą laserową [4].

4. MIKROFORMOWANIE BRYŁ (obróbka plastyczna objętościowa)

4.1. Proces wyciskania złożonego

Miniaturyzacja ma ogromny wpływ nie tylko na właściwości materiału ale jak się później okazało silnie wpływa na zjawiska fizyczne zachodzące podczas danej obróbki plastycznej. Podczas testu procesu złożonego wyciskania zauważono znaczący wzrost tarcia wraz ze zmniejszaniem wymiarów badanej próbki. W procesie wyciskania złożonego zastosowano olej jako czynnik smarujący [2], [4].

Do testu DCE (*Double Cup Extrusion*) użyto cylindrycznych próbek wykonanych ze stopu CuZn_{15} o średnicach z przedziału $\phi 0.4 - \phi 0.5\text{mm}$ (rys. 8). Umieszczono je pomiędzy dwoma jednakowego kształtu stemplami: ruchomym i nieruchomym [2].



Rys. 8. Schemat testu DCE [2], [4]

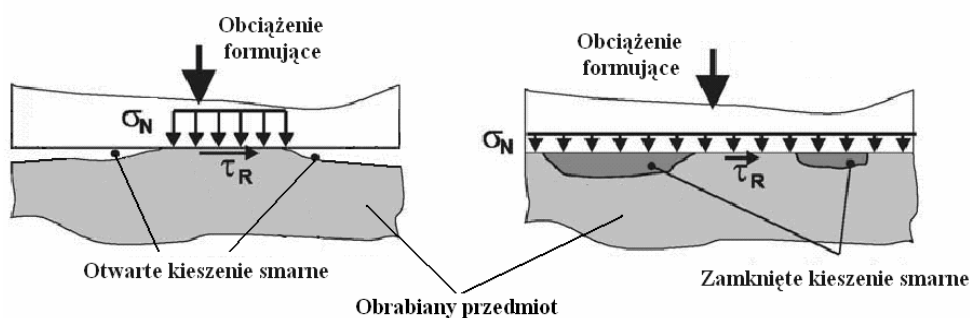
Fig. 8. Double Cup Extrusion test – schematic diagram

Stempel górny poruszając się w dół powoduje formowanie się materiału. Ilościowo zmiany warunków tarcia zostały wyznaczone z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Jak już wcześniej wspomniano eksperyment pokazał wyraźną zmianę warunków tarcia wraz ze zmniejszeniem rozmiarów przedmiotu pomimo użycia oleju jako środka smarującego.

Dalsze badania tego zjawiska pozwoliły na wysunięcie teorii modelu otwartych i zamkniętych kieszeni smarnych (*lubricant pockets*) [2, 4, 6] pokazanych na rysunku 9.

Każda powierzchnia zewnętrzna obrabianego przedmiotu nie jest idealnie gładka lecz posiada określoną chropowatość, co w powiększeniu widoczne jest jako zbiór „wierzchołków” i „dolin”. Gdy do nasmarowanej powierzchni obrabianej części zostanie przyłożone obciążenie formujące „wierzchołki” zaczynają odkształcać się w rezultacie zwiększając ciśnienie środka smarowego uwięzionego w „dolinie” między nimi (zamknięte kieszenie smarne) (rys. 9).

Gdy „doliny” połączone są z krawędzią powierzchni (rys. 9), nie mogą „zatrzymać” środka smarującego (otwarte kieszenie smarne). Wzrost obciążenia na tej powierzchni powoduje, że olej wypływa z tych zagłębień i nie pomaga w przenoszeniu obciążenia formującego. Obciążenie działa tylko na „wierzchołki” powierzchni czego konsekwencją jest wzrost ciśnienia normalnego, większy stopień spłaszczenia powierzchni i wzrost tarcia. Zamknięte kieszenie smarne nie łączą się z krawędziami powierzchni. W rezultacie „uwięziony” w zagłębieniach środek smarujący ulega ściśnięciu pod wpływem obciążenia. Ściśnięty olej pomaga w przenoszeniu obciążenia formującego, co powoduje redukcję ciśnienia działającego na „wierzchołki” powierzchni, a co za tym idzie redukcję tarcia [2], [4], [6].



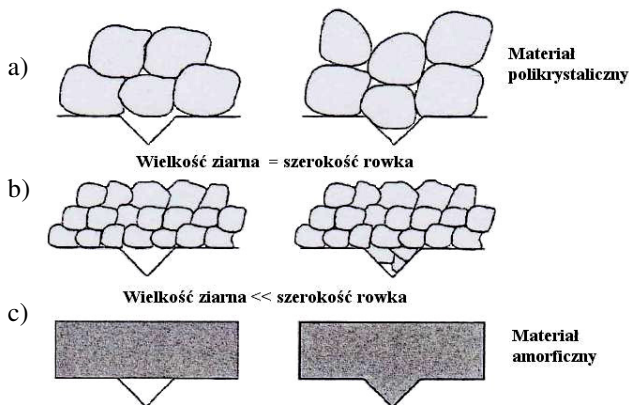
Rys. 9. Otwarte i zamknięte kieszenie smarne (lubricant pockets) [2], [4], [6]

Fig. 9. Open and closed lubricant pockets

Obecność otwartych i zamkniętych kieszeni smarnych może być potwierdzona przez pomiary chropowatości powierzchni po procesie wyciskania. Detale o bardzo małych wymiarach mają jedynie otwarte kieszenie smarne [4].

4.2. Wyciskanie współbieżne i wyciskanie przeciwbieżne

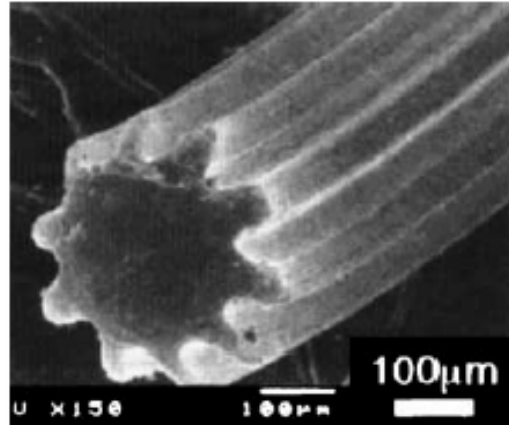
Zbadano także zdolność do formowania materiałów polikrystalicznych i materiałów bezpostaciowych. Materiały o różnych wielkościach ziaren zostały wprasowane w rowki w kształcie litery „V” o szerokości 1 i 2 μm . Nadplastyczny, polikrystaliczny stop aluminium praktycznie nie wypełnił rowka. Natomiast stop amorficzny ($\text{Zr}_{55}\text{Al}_{10}\text{Cu}_{30}\text{Ni}_5$) wykazał znacząco większą zdolność do formowania (rys. 10) [4], [6].



Rys. 10. Zdolność do mikroformowania materiałów polikrystalicznych (a, b) i bezpostaciowych (c) [4], [6]

Fig. 10. Microformability of polycrystalline (a, b) and amorphous materials (c) [4], [6]

Dalsze badania doprowadziły do wytworzenia mikro koła zębatego (rys. 11) o module równym 50 μm i średnicy 500 μm . Koło to zostało wytworzone metodą wyciskania współbieżnego [4], [6].



Rys. 11. Zębate mikro koło wykonane metodą wyciskania współbieżnego [4], [6]

Fig. 11. A forward extruded micro gear shaft

5. MIKRO MASZyny

Maszyny, narzędzia do obróbki i przyrządy mają ogromne znaczenie w przemysłowych zastosowaniach technologii mikrokształtowania. Wraz z badaniami technologii wytwarzania mikroczęści powstały nowe strategie wykorzystywane przy tworzeniu maszyn do mikroformowania [6]. Jedną z propozycji było wykorzystanie istniejących maszyn po odpowiednim ich dostosowaniu do obróbki przedmiotów, o małych wymiarach, z wymagana precyzją.

Alternatywnym rozwiązaniem są mikro maszyny. Badania ich rozwoju przyciągnęły ogromne zainteresowanie w ciągu ostatnich 10 lat. Mikro maszyny muszą spełniać określone wymagania [5]. Muszą zapewnić dokładność w pozycjonowaniu elementów obrabianych w zakresie kilku mikrometrów i mniej. Wysoka dokładność musi także być zachowana przy ich sterowaniu. Luz pomiędzy ruchomymi częściami maszyny oraz drgania powstające w wyniku tarcia przy powolnym przesuwaniu przywierających powierzchni, powodują niedokładności kształtu obrabianego elementu. Mając na uwadze te i wiele innych czynników zbadano wiele różnych koncepcji dotyczących projektowania i produkcji prototypów mikro maszyn.

Typowym przykładem jest powstały w Gunma University w Japoni [1],[6] model urządzenia wielkości dłoni, przeznaczonego do wyciskania przeciwbieżnego materiałów superplastycznych. W urządzeniu tym wykorzy-

stano piezoelektryczny serwomotor do napędzania stempla. Próbka podgrzewana jest do temperatury kształtowania. Proces wyciskania przeprowadza się za pomocą piezoelektrycznego serwomotoru. Przykładem takiego urządzenia może być też prasa z piezoelektrycznym napędem opracowana w Zentrum Fertigungstechnik Stuttgart (ZFS) w Niemczech [1].

W 2000 r. japońska grupa badawcza zaprezentowała „biurkową” wersję mikro fabryki o wymiarach 625mm x 490mm x 380mm, wadze 34kg i poborze mocy 60W. W skład tej przenośnej „mikro – fabryki” wchodzi takie urządzenia jak: tokarka, frezarka, urządzenie chwytające, prasa oraz dwie kamery [1]. Urządzenia tego nie można było wykorzystać w masowej produkcji mikroczęści. Urządzenie stało się jednak kamieniem milowym w rozwoju mikrotechnologii i mikroformowania.

6. PODSUMOWANIE

Konwencjonalne procesy obróbki plastycznej: kucie, wyciskanie, tłoczenie, głębokie tłoczenie, mogą być stosowane przy wykonywaniu mikroczęści [1]. Biorąc pod uwagę zalety obróbki plastycznej takie jak oszczędność materiału, stosunkowo niskie koszty wytwarzania, duża wydajność produkcji, mikroformowanie może być lepszą alternatywą w masowej produkcji miniaturowych części. Jednak aby do tego doszło, większy nacisk należy położyć na rozwijanie całego systemu wytwarzania. Oprócz tego powinny być prowadzone dalsze badania w celu wytworzenia odpowiednich narzędzi i maszyn do produkcji tak małych elementów.

Dotychczasowe prototypy mikro maszyn skupiały się na pokazaniu możliwości wytworzenia mikro części. Rozwój miniaturowych maszyn dla procesów formowania plastycznego musi podążać w kierunku praktycznego zastosowania ich w przemyśle ze szczególnym uwzględnieniem masowej produkcji.

Warto tu także wspomnieć, że mikro maszyny mogą mieć znaczący wpływ na ochronę środowiska naturalnego. Wraz ze zmniejszeniem skali urządzeń zmniejszy się zapotrzebowanie na energię, zmniejszeniu ulegnie zanieczyszczenie powietrza, powstanie bardziej przyjazne otoczenie miejsca pracy.

LITERATURA

- [1] Y. Qin, „Micro - forming and miniature manufacturing systems – development needs and perspectives”, *Journal of Materials Processing Technology* 177, 2006, pp. 8-18.
- [2] U. Engel, R. Eckstein, „Microforming – from basic research to its realization”, *Journal of Materials Processing Technology*, 125 – 126, 2002, pp. 35-44.
- [3] J. Cao, N. Krishnan, Z. Wang, H. Lu, W. K. Liu, A. Swanson, „Microforming: Experimental investigation of extrusion process for micropins and its numerical simulation using RKEM”, *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 126, 2004, pp. 642-652.
- [4] F. Vollertsen, H. S. Niehoff, Z. Hu, „State of the art in micro forming”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46, 2006, 1172-1179.
- [5] www.ayaseminiheader.info
- [6] F. Vollertsen, Z. Hu, H. S. Niehoff, C. Theiler, „State of the art in micro forming and investigations into micro deep drawing”, *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 70 – 79.