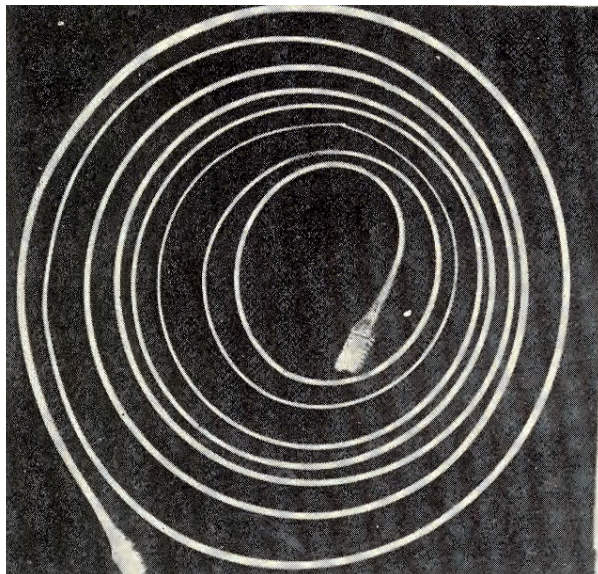


Jan Dutkiewicz, Piotr Malczewski

Odształcenie nadplastyczne w mosiądzach $\alpha+\beta$ za pomocą ciśnienia gazu

Kształtowanie wyrobów z metali i stopów poprzez odkształcenie plastyczne towarzyszy człowiekowi już od starożytności. Z biegiem czasu udoskonalono techniki wytwarzania, ale nadal poważnym wyzwaniem jest opracowanie takiej technologii, która pozwoliłaby na nadanie ostatecznego kształtu przedmiotu przy wykonaniu jak najmniejszej liczby niezbędnych operacji wymagających wkładu energii. Idealnym rozwiązaniem byłby taki dobór metody wytwarzania, aby możliwe było zastosowanie jednej operacji prowadzącej do uzyskania z jednego kawałka metalu gotowego wyrobu. Możliwość taką stwarza zjawisko nadplastyczności w materiałach, które pozwala na uzyskiwanie dużych odkształceń w jednej operacji, dochodzących do 1000% przy stosunkowo niskich naprężeniach. Liczba niezbędnych operacji odkształcenia koniecznych do uzyskania gotowego produktu mogłaby zatem zostać zredukowana. Pierwszy zarejestrowany opis zjawiska nadplastyczności zawiera praca Bengongha z 1912 roku, który opisał specjalny mosiądz $\alpha+\beta$ o składzie 60% Cu i 40% Zn, dla którego osiągnął wydłużenie 163% w temperaturze 700°C [1]. Uważa się, że zjawisko i proces odkształcenia nadplastycznego odnosi się do wczesnych lat XX wieku. Jednak według O.D. Sherby'ego i J. Wadswortha [2], zjawisko to w sposób niezamierzony zostało wykorzystane przez starożytnych rzemieślników podczas procesów przeróbki plastycznej brązów arsenowych (zawierających do 10% wag. As). Również stale damasceńskie będące w użyciu od około 300 roku p.n.e. posiadają skład zbliżony do współczesnych wysokowęglowych stali o własnościach nadplastycznych [2,3,4] i były prawdopodobnie już wówczas odkształcane nadplastycznie. Pierwsza praca z obszaru „internal stress superplasticity” została opublikowana przez A. Sava w 1924 roku i dotyczyła odkształcania stali w trakcie cyklicznych zmian temperatury [5]. W 1928 roku C.H.M. Jenkins osiągnął wydłużenie od 300% do 400% dla drobnokrystalicznych eutektyk Cd-Zn i Pb-Sn [6]. Ogromne wydłużenie 1950% otrzymał w 1934 roku na drobnokrystalicznym, dwufazowym stopie Sn-Bi C.E. Pearson [2,7]. Próbką Pearsona jest przedstawiona na ryc. 1.



Ryc. 1. Próba stopu Pb-Sn odkształcona superplastycznie przez C.E. Pearsona wykazująca maksymalne odkształcenie w próbie rozciągania 1950% wg [7]

Po raz pierwszy termin „sverchplasticznost” został użyty w publikacji A.A. Boczwara i Z.A. Swiderskiej w roku 1945 [8], a jego odpowiednik w języku angielskim „superplasticity” został zastosowany w Chemical Abstracts w 1947 roku. W latach 60. ukazały się obszernie przeglądy dotyczące zagadnień nadplastyczności. Pierwszym było opracowanie E. Underwooda z 1962 [9], A.A. Presnjakova [10]. Jednymi ze stopów, które posiadają zdolność do odkształcenia nadplastycznego, są mosiādze o strukturze $\alpha+\beta$, zawierające około 40% Zn. Wykazują one nadplastyczność strukturalną, co umożliwia odkształcenie nadplastyczne dochodzące do 1000% w zakresie temperatur 400–700°C [1–16].

Oceniając zdolność materiału do odkształcenia nadplastycznego, konieczne jest odniesienie się do wielkości, która nie jest związana bezpośrednio ze stopniem odkształcenia materiału. Jeśli jednak weźmiemy pod uwagę stopień odkształcenia, należy odnieść go do wyników dla materiału uzyskanego w sposób „tradycyjny”, co często nastrocza trudności z uwagi na brak materiału do porównań (materiał wykazuje minimalną plastyczność). W celu jednoznacznego określenia, czy dany materiał odkształca się nadplastycznie, należy przyjąć bardziej uniwersalny parametr, jak wielkość odkształcenia względnego. Backofen i współpracownicy [11] podjęli próby zastosowania ilościowych parametrów, które stanowiłyby jednoznaczne kryterium występowania zjawiska nadplastyczności. Stan ten scharakteryzowany został poprzez czułość na prędkość odkształcenia, niskie naprężenie płynięcia oraz brak lub występowanie nieznacznego umocnienia odkształceniowego [12].

Czułość na prędkość odkształcenia m możemy zdefiniować poprzez następujące równanie różniczkowe:

$$m = \frac{d \ln \sigma}{d \ln \dot{\epsilon}} \quad (1)$$

gdzie: σ – napężenie płynięcia plastycznego, $\dot{\epsilon}$ – prędkość odkształcenia w próbie rozciągania.

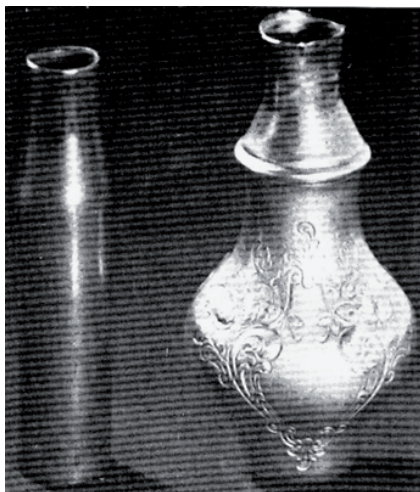
Przyjmując zatem, że materiały zdolne do odkształcenia nadplastycznego powinny charakteryzować się wysoką wartością współczynnika czułości na prędkość odkształcenia m oraz zakładając, że nie występuje efekt umocnienia podczas odkształcenia nadplastycznego, możemy zależność napężenia od szybkości odkształcenia opisać równaniem:

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m \quad (2)$$

gdzie: σ – napężenie płynięcia plastycznego, $\dot{\epsilon}$ – prędkość odkształcenia w próbie rozciągania, K – stała.

Zakres współczynnika czułości na prędkość odkształcenia m dla różnych materiałów zmienia się w przedziale 1–0. Wiele tradycyjnych materiałów metalicznych i stopów stosowanych w technice wykazuje wartość współczynnika $m < 0,2$; przyjęło się zatem, iż wartość współczynnika czułości na prędkość odkształcenia dla materiałów przeznaczonych do odkształcenia nadplastycznego powinny posiadać wartość wynoszącą od $m > 0,3$. W przypadku, gdy współczynnik czułości na prędkość odkształcenia m wynosi 1, wówczas mamy do czynienia z lepkością zdefiniowaną przez Newtona. Taki materiał nie doznaje niestabilności podczas rozciągania i może być teoretycznie nieskończenie odkształcany.

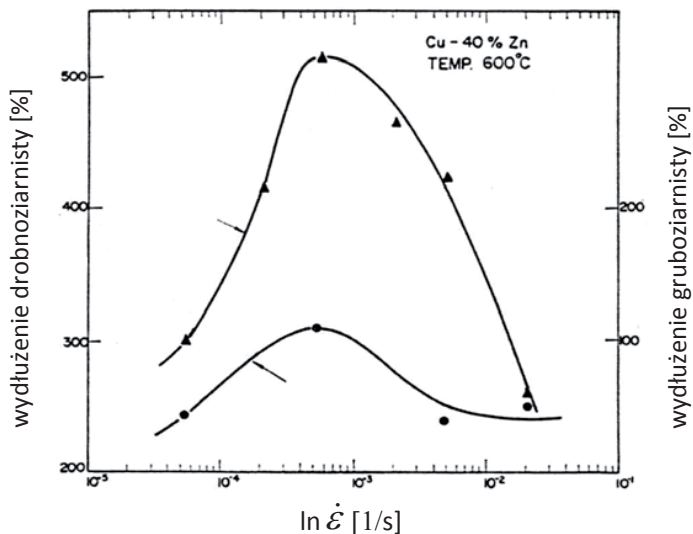
W 1964 roku W.A. Backofen [11] otrzymał metodą odkształcenia ciśnieniem gazu półsferę z odpowiednio przygotowanego stopu Zn-Al, a następnie wykonał z niego gotowy wyrób w postaci ozdobnego flakonu przedstawionego na ryc. 2.



Ryc. 2. Wyjściowa wytłoczka i flakon otrzymany przez Backofena ze stopu Zn-Al metodą doksztalcenia za pomocą ciśnienia gazu wg [11]

Stworzyło to możliwości zastosowania odkształcenia nadplastycznego do formowania wyrobów metodą tłoczenia i spowodowało wzrost zainteresowania badań nad tą problematyką. Zaowocowało to w konsekwencji tym, że zastosowano tę metodę w latach 70. do przemysłowej produkcji elementów wyposażenia lotniczego ze stopów aluminium typu Supral [13]

W ostatnich latach prowadzono również szereg prób odkształcenia superplastycznego mosiądzów $\alpha + \beta$, m.in. Sagat i współpracownicy [14] prowadzili badania odkształcenia nadplastycznego dla mosiądzu CuZn40. Porównali oni zdolność do odkształcenia nadplastycznego mosiądzu $\alpha + \beta$ o strukturze drobnoziarnistej ($3 \mu\text{m}$) i gruboziarnistej ($30 \mu\text{m}$). Na ryc. 3 przedstawiono wyniki uzyskane w próbie rozciągania dla mosiądzu o drobnym i grubym ziarnie prowadzonych w temperaturze 600°C z prędkościami odkształcenia w zakresie od 10^{-2} do 10^{-6} s^{-1} .



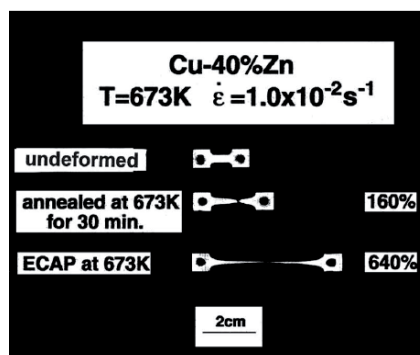
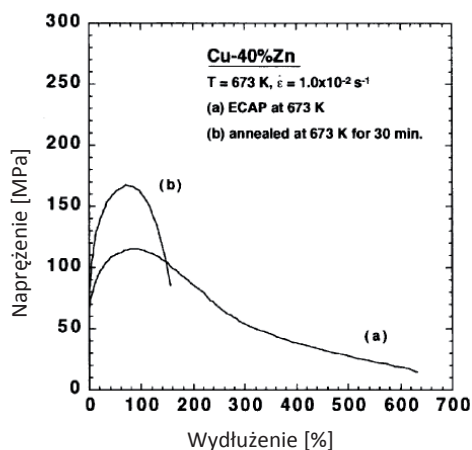
Ryc. 3. Zależność wydłużenia od $\ln \dot{\epsilon}$ logarytmu prędkości odkształcenia dla mosiądzu CuZn40 w temperaturze 600°C . -▲- krzywa dla mosiądzu gruboziarnistego, -●- krzywa dla mosiądzu drobnoziarnistego wg [14]

Na wykresie na rycinie 3 można zauważyć, że dziesięciokrotne zmniejszenie rozmiaru ziarna spowodowało znaczne zwiększenie wydłużenia od 100% dla mosiądzu o rozmiarze ziarna $30 \mu\text{m}$ do ponad 500% dla mosiądzu o rozmiarze ziarna $3 \mu\text{m}$. Rozdrobnienie ziarna w tym przypadku nie spowodowało znacznej zmiany prędkości odkształcenia (około $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$), dla której obserwowano maksymalne wydłużenie. Maksymalne wydłużenie uzyskano w nieco niższym zakresie prędkości odkształcenia, niż w pracy Sueryego [15].

Kaj Neishi i współpracownicy [16] poddali odkształceniu nadplastycznemu mosiądz Cu-Zn40% dostarczony przez firmę TOTO Ltd. o zawartości ołowiu nie większej niż 0,002%. W celu uzyskania wyjściowego bardzo drobnego ziarna o średniej wielkości około $1 \mu\text{m}$ zastosowali metodę przeciskania przez kanał kątowny. W próbie rozciągania otrzymali maksymalne wydłużenie do 649% w temperaturze 400°C z prędkością odkształcenia $1,0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, co pokazano na rycinie 4. Jak można zauważyć, nawet bez wprowadzenia dodatków stopowych mosiądze

o strukturze $\alpha+\beta$ wykazują dobre własności nadplastyczne, jednak konieczne jest znaczne rozdrobnienie ziarna. Zmniejszenie rozmiaru ziarna powoduje zwiększenie maksymalnego odkształcenia przy równoczesnym spadku temperatury odkształcenia nadplastycznego, co można zauważyć na podstawie prac Sagata [14] i Kaj Neishi [16].

W pracy zamieszczono wyniki próby odkształcenia superplastycznego ciśnieniem gazu mosiądzów z wysokim dodatkiem manganu, co nie było dotychczas prezentowane w literaturze. Badania prowadzono na stopach o strukturze $\alpha + \beta$, które, podobnie jak stopy podwójne, są łatwe do wykonania z uwagi na szeroki zakres dwufazowy $\alpha + \beta$. Stosowano odkształcenie ciśnieniem gazu w wysokiej temperaturze optymalnej dla deformacji superplastycznej w celu określenia możliwości zastosowania tej techniki do wykonania wyrobów z mosiądzów z dodatkiem manganu.

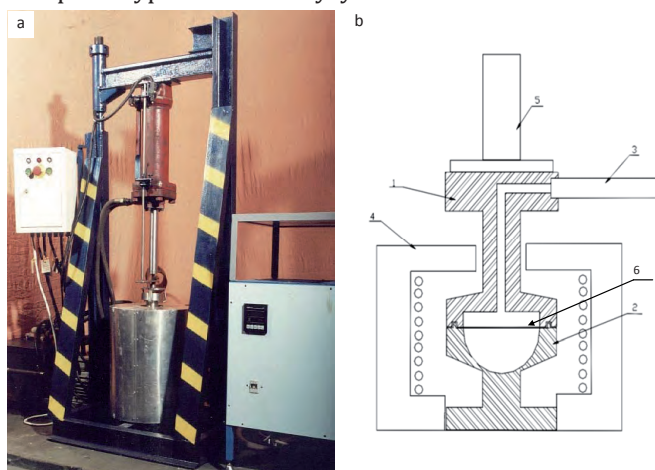


Ryc. 4. Zależność naprężenia od wydłużenia dla Cu-Zn40%, temperatury 400°C i prędkości odkształcenia $1,0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ wg [16]

Metodyka badań

W celu przeprowadzenia badań wpływu zmiany składu chemicznego na odkształcenie nadplastyczne mosiądzów $\alpha+\beta$ sporządzono mosiądz o zawartości 11% wagowo manganu wlewki o masie 1,5 kg zostały odlane w IMIM PAN w Krakowie. W celu przygotowania wsadu odważano składniki stopowe, jak miedź i cynk z dokładnością do jednego grama. Mangan dodawano w postaci wcześniej przygotowanej zaprawy o składzie 30% Mn i 70% Cu wagowo. Tak przygotowany wsad topiono pod osłoną soli stopionych (boraksu) w celu odcięcia dostępu tlenu i zminimalizowania parowania cynku. Po odlaniu wlewki był poddany wyżarzaniu homogenizującemu przez okres 4 godzin w temperaturze 750°C. Kolejnym etapem przygotowania materiału było odcięcie nadlewu (jamy skurczowej) i poddanie wlewki walcowaniu na gorąco w zakresie temperatur 500–600°C do maksymalnego zgniotu 50%, co pozwoliło na uzyskanie blach o grubości około 10 mm. Następnie zastosowano obróbkę cieplno-plastyczną polegającą na przesyceniu do wody z zakresu występowania fazy β w temperaturze 850°C, a następnie walcowaniu na zimno do 70% odkształcenia oraz wyżarzaniu w zakresie temperatur

450–600°C przez 30 minut. Mikrostrukturę stopów zaobserwowano na mikroskopie optycznym Olympus GX-51 z cyfrową rejestracją obrazu. Próbki trawiono w odczynniku 10 cm³ HCl, 5g FeCl₃, 50 cm³ C₂H₅OH, 50 cm³ H₂O. Próby wytrzymałościowe przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron wyposażonej w piec do prób wysokotemperaturowych. Próby rozciągania prowadzono w celu określenia wielkości czułości na prędkość odształcenia m oraz optymalnych warunków dla przeprowadzenia prób odształcania blach za pomocą ciśnienia gazu. Na podstawie przeprowadzonych prób rozciągania dobrano optymalne warunki odształcenia nadplastycznego: temperaturę i wielkość czułości na prędkość odształcenia m . Przeprowadzono próby odształcenia za pomocą ciśnienia gazu. Eksperyment prowadzono na urządzeniu przeznaczonym do odształcania blach za pomocą ciśnienia gazu, które zostało zaprojektowane i zbudowane w IMIM PAN w Krakowie. Na ryc. 5 przedstawiono zdjęcie i schemat działania tego urządzenia. Krążek z blachy (6) o średnicy $\varnothing = 60$ mm i grubości 1–2 mm jest umieszczony pomiędzy dwiema matrycami – górną i dolną, co zilustrowano na schemacie na ryc. 5(b). W górnej matrycy (1) wykonany jest kanał, którym doprowadzono przewodem (3) gaz będący medium odształcającym próbkę. Gaz w kanale ulega stopniowemu ogrzaniu, aby w trakcie odształcenia nie oziębiał odształcanej blachy. Odształcana blacha przyjmuje kształt dolnej matrycy (2). Zastosowano kształt matrycy w postaci czasy o promieniu 50 mm lub 30 mm. Matryce wraz z próbką umieszczono w piecu (4) o kontrolowanej temperaturze. Stosowano temperaturę odształcenia 500–550°C oraz czas 30-minutowego wygrzewania matrycy z założoną blachą w piecu, w celu wyrównania temperatury na zewnątrz oraz wewnątrz matrycy. Ciśnienie gazu podawanego z butli w celu odształcenia krążka blachy wynosiło 0,1–0,6 MPa. W prowadzonych próbach stosowanym gazem był azot. Próbę prowadzono w taki sposób, że zwiększano stopniowo ciśnienie gazu przez okres 15 minut do maksymalnego zakładanego ciśnienia i utrzymywano przez czas około 30 minut, aby mieć pewność, że blacha wypełniła formę, gdyż urządzenie nie posiada możliwości bieżącego kontrolowania stopnia wypełnienia matrycy.

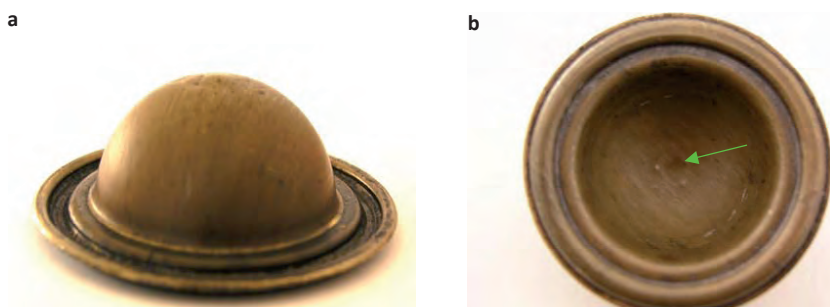


Ryc. 5. Prasa do odształcania za pomocą ciśnienia gazu w IMIM PAN w Krakowie: a) widok ogólny, b) schemat działania: 1 – matryca górna, 2 – matryca dolna, 3 – dopływ gazu, 4 – piec, 5 – siłownik hydrauliczny, 6 – próbka

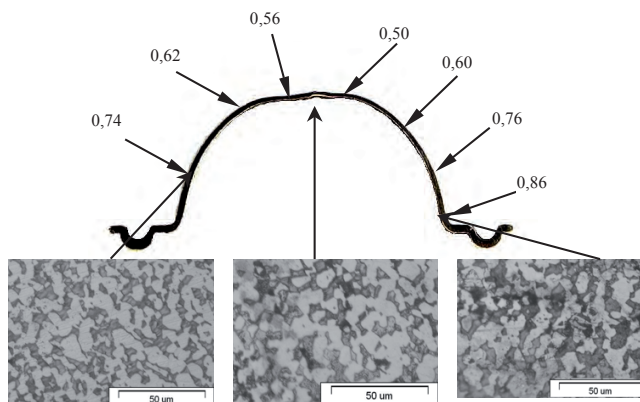
Wyniki badań oraz dyskusja

Wykorzystując wyniki obliczeń czułości na prędkość odkształcenia m dla poszczególnych temperatur, uzyskane wcześniej w próbie rozciągania, określono wstępnie temperaturę odkształcenia, a także oszacowano wymagane ciśnienie gazu konieczne do wytłoczenia czaszy. Na tej podstawie dla próby tłoczenia wybrano temperaturę 550°C oraz czas podawania ciśnienia gazu około 40 minut, maksymalne ciśnienie argonu wynosiło około 0,3 MPa. Metodę i sposób przeprowadzenia prób opisano w części eksperymentalnej. W próbie rozciągania dla temperatury 550°C uzyskano wielkość czułości na prędkość odkształcenia $m = 0,53$ w zakresie prędkości odkształcenia $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ do 10^{-3} s^{-1} , natomiast naprężenie płynięcia σ wyniosło 1–11 MPa. Na ryc. 6 przedstawiono uzyskaną wytłóczkę w kształcie półsfery o średnicy $\varnothing = 60 \text{ mm}$, wielkość odkształcenia, jakie uzyskano dla gotowego wyrobu w jednej operacji wynosiła około 82%. Obserwując powierzchnię prezentowanej na fotografii wytłóczki, można zauważyć, że nastąpiło bardzo dobre odwzorowanie powierzchni matrycy. Powierzchnia gotowego wyrobu jest gładka i czysta, równocześnie można zauważyć, że materiał został nawet wtłoczony w odpowietrznik.

Zastosowanie tej metody pozwala na dokładne odwzorowanie rysunku reliefu z powierzchni matrycy, co sugerowano także w pracy S.M. Poliakova [8], który tą metodą otrzymał samowar oraz w pracach [14–15].



Ryc. 6. Wytłóczka po odkształceniu za pomocą ciśnienia gazu: a) widok z boku, b) widok od spodu



Ryc. 7. Przekrój przez czaszę oraz mikrostruktury dla poszczególnych miejsc

Na ryc. 7 przedstawiono przekrój przez wytłoczkę. Można zaobserwować, że największe pocienienie następuje w środkowej części blachy, gdzie grubość spada do 0,50 mm, po czym następuje stopniowy wzrost grubości do 0,86 mm w pobliżu kołnierza. Na kołnierzu uszczelniającym grubość blachy zbliżona była do grubości wyjściowej i wynosiła 1,1 mm. Nierównomierne odkształcenie wynika najprawdopodobniej z tego, że w początkowym okresie deformacji następuje dociśnięcie materiału przylegającego do pierścienia uszczelniającego do ścianek matrycy. Lokalnie następuje spadek intensywności procesu odkształcenia na skutek wzrostu tarcia na styku matrycy i blachy. Równocześnie gaz dociska blachę do matrycy. Przedstawiono także, jak zmienia się mikrostruktura na przekroju czaszy. Jak można zauważyć, w miejscu o największym pocienieniu (odkształceniu) zaobserwowano nieznaczny rozrost ziarna w stosunku do obszarów o najmniejszym odkształceniu (pocienieniu), co jest zgodne ze wcześniejszymi obserwacjami, że przy deformacji nadplastycznej następuje rozrost ziaren [8–10]. Średni rozmiar ziarna po obróbce rozdrabniającej ziarna wynosił 3,5 μm , a po odkształceniu nadplastycznym około 8 μm .

Wnioski

1. W procesie odkształcenia nadplastycznego blach z mosiądzu CuZn11Mn za pomocą ciśnienia gazu uzyskano kształt półsfery w jednej operacji, co odpowiada 82% odkształcenia.

2. Mosiądz CuZn11Mn w temperaturze 550°C wykazuje dobre własności nadplastyczne, czułość na prędkość odkształcenia m wynosi 0,53.

3. Wytłoczki uzyskane metodą odkształcania za pomocą ciśnienia gazu wykazują gładką powierzchnię i charakteryzują się dokładnym odwzorowaniem powierzchni matrycy.

Bibliografia

- [1] Bengough G.D., A study of properties of alloys at high temperatures, J. Inst. Metals, 1912, p. 123
- [2] Sherby O.D., Wadsworth J., Observations on historical and contemporary developments in superplasticity, Materials Research Society, vol. 196, 1990 "Superplasticity in Metals, Ceramics, and Intermetallics", pp. 3–14
- [3] Sherby O.D., Wadsworth J., Ancient blacksmiths, the IronAge, Damascus steels, and modern metallurgy, Journal of Materials Processing Technology 117, 2001, s. 347–354
- [4] Wadsworth J., Sherby O.D., On the Bulat – Damascus Steel Revisited, Progr. Mater.S ci. 25, 1980, p. 35
- [5] Saveur A., What is Steel ? Another Answer, Iron Age, 113, 1924, p. 581
- [6] Jenkins C.H.M., Strength of Cd-Zn and Pb-Sn alloy solder, J. Inst. Metals 40, 1928, p. 21
- [7] Pearson C.E., Viscous Properties of Extruded Eutectic Alloys of Pb-Sn and Bi-S, J. Inst. Metals, 54, 1934
- [8] Boczwara A.A., Swiderskaja Z.A., Swerchplastycznost Al-Zn spławow, Izv. Akad. Nauk SSSR, 9 1945, p. 821

- [9] Underwood E., A Review of Superplasticity and related phenomenon, J. Metals, 14 1962, 914
- [10] Presnjakow A.A., Fiziczeskaja priroda anomalii pŁasticznosti u metalliczeskich spŁawow, Izd. Akad.Nauk Kazachskoj SSR, 1963
- [11] Backofen W.A., Turner I.R., Avery D.H., Superplasticity in Al-Zn Alloys, Trans. ASM, 57 1964, p. 980
- [12] Dybiec H., Wysokotemperaturowe odksztaŁcanie stopu AlMg4,5 eksperymentalne studium lokalizacji odksztaŁcania i mechanizmów deformacji w próbie rozciŁgania. Zeszyty Naukowe AGH, Metalurgia i odlewnictwo, nr 136, 1991
- [13] Dunwoody B.J., Stracey R.J., Barness A.J., Mechanical Prosperities of 5003 SPF After Superplastic Deformation, Materials Research Society, vol 196, 1990, "Superplasticity in Metals, Ceramics, and Intermetallics" pp. 161–166
- [14] Sagat S., Blenkinsop P., Taplin D.M.R., A Metallographic study of superplasticity and cavitation in microduplex Cu-40% Zn, Jurnal of the Institute of Metals, Vol. 100, 1972, pp. 268–274
- [15] Suery M., Baudelet B., Flow stress and microstructure in superplastic 60/40 brass, Journal of materials science 8 1973, 19 1984, pp. 363–369
- [16] K.Neishi, Z.Horita, T.G.Langdon, Achieving superplastisity in Cu-40%Zn through severe plastic deformation, Scripta Materialia 45, 2001, pp. 965–970

Superplastic deformation of $\alpha+\beta$ brasses by means of gas pressure

Abstract

In the present paper bases of superplastic deformation in metals are described starting from the first papers up to the recent industrial application. The aim of the investigations was superplastic deformation of $\alpha+\beta$ brass containing 11%Mn by means of gas pressure. The m value (strain rate sensitivity coefficient) attained maximum of 0.53 at temperature of 550°C. Applying deformation gas pressure at 0,3 MPa, a shape of hemisphere matrix was attained in one operation starting from a flat sheet of brass, what corresponds to 82% deformation of the sheet of a thickness of 1,1 mm.

Key words: brasses $\alpha+\beta$, superplastic deformation