

Mgr inż. Daniel ANDRZEJEWSKI

e-mail: daniel.andrzejewski@inop.eu

Dr inż. Jacek BOROWSKI, dr inż. Hanna WIŚNIEWSKA-WEINERT

Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań

Dr inż. Mariusz KULCZYK, dr inż. Wacław PACHLA

Instytut Wysokich Ciśnień PAN, Warszawa

Właściwości plastyczne półwyrobów ze stopów aluminium wykonanych metodami dużych odkształceń plastycznych

Plastic properties of aluminium alloy semi-products made by the methods of severe plastic deformations

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu kształtowania półwyrobów metodą dużych odkształceń plastycznych (SPD), takich jak: przeciskanie przez kanał kątowy (ECAP) czy wyciskanie hydrostatyczne (HE) na właściwości mechaniczne aluminium oraz stopów 5483 i 7475. Określono plastyczność materiałów w próbie ściskania i wpływ prędkości odkształcania na charakter krzywej umocnienia. We wcześniejszych badaniach określono graniczną temperaturę kształtowania nie powodującą znacznego rozrostu ziarna do 250 °C. Dlatego wyznaczano krzywe umocnienia tylko do tej temperatury. Półwyroby, po procesach ECAP i HE, posiadają wyższą twardość i naprężenie uplastyczniające, w porównaniu z klasycznymi stopami komercyjnymi. Badane materiały są plastyczne i umożliwiają kształtowanie wyrobów w temperaturze niższej niż temperatura rekrytalizacji.

Abstract

The paper presents the results of the investigation of the influence of forming semi-products by the methods of severe plastic deformations (SPD), such as: equal-channel angular pressing (ECAP) or hydrostatic extrusion (HE) on the mechanical properties of aluminium as well as 5483 and 7475 alloys. Plasticity of the materials has been determined in a compression test; the influence of deformation speed on the character of the work-hardening curve has also been determined. In previous investigations, the limit temperature of forming not causing significant grain growth has been found to be 250 °C. That is why the work-hardening curves have been determined only up to that temperature. Semi-products after the processes of ECAP and HE have higher hardness and yield stress as compared to the classic commercial alloys. The materials under investigation are plastic and make it possible to form products at a temperature lower than that of recrystallization.

Słowa kluczowe: stopy aluminium, ECAP, test ściskania, wyciskanie hydrostatyczne

Key words: aluminium alloys, ECAP, compression test, hydrostatic extrusion

1. WPROWADZENIE

Metody dużych odkształceń plastycznych SPD (Severe Plastic Deformation) są w ostatnich czasach bardzo atrakcyjne z powodu możliwości rozdrobnienia ziaren do rozmiarów nanometrycznych, co umożliwia uzyskanie lepszych właściwości mechanicznych [1]. Do tych metod możemy zaliczyć: cykliczne wyciskanie ściskające (CWS), skręcanie pod wysokim ciśnieniem (HPT), łączenie tradycyjnych

1. INTRODUCTION

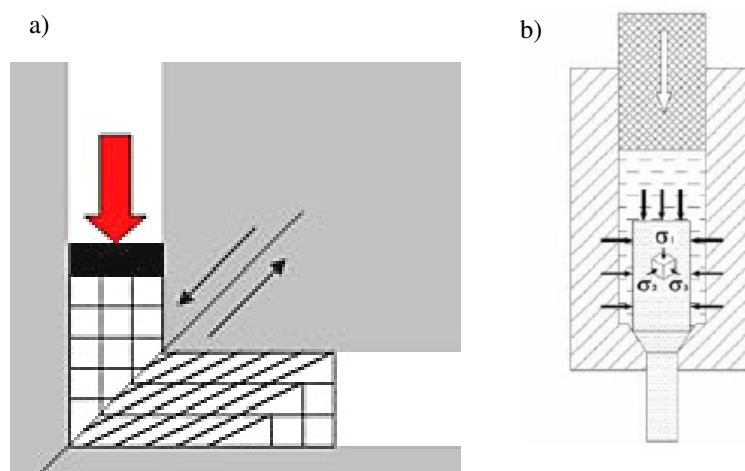
The methods of severe plastic deformation, SPD, are very attractive recently due to the possibility of grain size reduction down to nanometric dimensions, which makes it possible to obtain better mechanical properties [1]. Those methods include: cyclic compressing extrusion (CCE), high pressure torsion (HPT), combination of traditional metal forming processes, e.g accumulative roll-bonding (ARB)

procesów obróbki plastycznej np. walcowanie kumulacyjne (ARB) lub kucie wielokierunkowe. Poza wymienionymi metodami, stosuje się również przeciskanie przez kanał kątowy (ECAP) (rys. 1a) oraz wyciskanie hydrostatyczne (HE) (rys. 1b) [2, 3]. Rozdrobnienie ziaren w stopach serii 7xxx metodą ECAP wg autorów [4] jest bardziej efektywne poprzez prowadzenie procesu w temperaturze ok. 77 K. Metody te umożliwiają otrzymywanie półwyrobów o jednorodnej strukturze nanometrycznej, o względnie dużej objętości oraz nie wprowadzają dodatkowych zanieczyszczeń do materiału. Możliwość wytwarzania w ten sposób półwyrobów o dużych wymiarach stwarza możliwość ich wykorzystania w seryjnej produkcji części maszyn.

Materiały o strukturze nanometrycznej charakteryzują się lepszymi właściwościami mechanicznymi niż materiały tradycyjne. Dlatego istotne jest opracowanie technologii kształtowania części tak aby nie spowodować zmiany struktury (rozrostu ziaren) np. wskutek oddziaływania ciepła potrzebnego do zmniejszenia naprężenia uplastyczniającego. W pracach [1, 2, 5] na temat właściwości materiałów po kształtowaniu metodami SPD, przedstawiono dane dotyczące plastyczności tych materiałów, jednak brak jest danych uzyskanych w próbie ściskania, która określa podatność materiału do kucia. W sposób wystarczający opisane zostały jedynie ich podstawowe właściwości wytrzymałościowe takie jak twardość [6], oraz niekiedy wytrzymałość na rozciąganie [7].

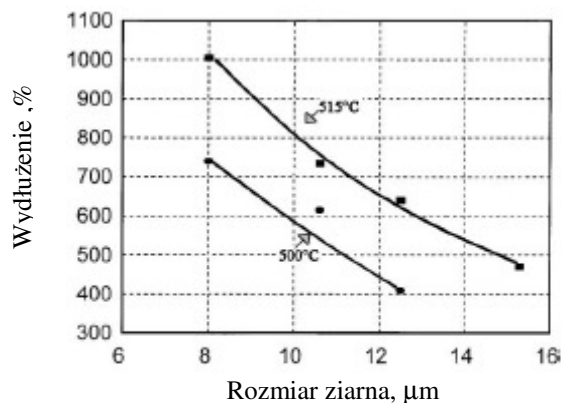
or forging in many directions. In addition to the above mentioned methods, equal-channel angular pressing (ECAP) is also applied (fig. 1a) as well as hydrostatic extrusion (HE) (fig. 1b) [2, 3]. Grain size reduction in alloys of series 7xxx by the ECAP method is, in the opinion of the authors [4] more effective when the process is performed at the temperature of about 77 K. Those methods make it possible to obtain semi-products with homogenous nanometric structure, with relatively large volume, and they do not put additional contaminations into the material. The possibility to manufacture semi-products of large dimensions in this way makes it possible to use them in the production of machine parts.

Materials of nanometric structure have better mechanical properties than the traditional materials. That is why it is important to elaborate a technology of forming parts so as not to cause structure change (grain growth), e.g. as a result of the influence of heat necessary to reduce the yield stress. The works on material properties after forming by the SPD methods [1, 2, 5] present data concerning plasticity of those materials, but there are no data obtained in the compression test which determines the material suitability for forging. Only their basic strength properties, such as hardness [6] and tensile strength [7] have been described in a sufficient way.



Rys. 1. Schemat procesów otrzymywania wyrobów metodą dużych odkształceń plastycznych: a) przeciskanie przez kanał kątowy - ECAP - , b) wyciskanie hydrostatyczne - HE

Fig. 1. A diagram of the processes of product obtaining by the method of severe plastic deformation: a) ECAP – equal-channel angular pressing, b) HE – hydrostatic extrusion



Rys. 2. Wpływ wielkości ziarna stopu aluminium 7475 na wydłużenie rozciągające w temperaturze 500 i 515 °C [8]

Fig. 2. Influence of grain size of the 7475 aluminium alloy on the tensile elongation at the temperature of 500 and 515 °C [8]

Jak wykazały badania własne kształtowanie pręta, ze stopu 2017, po wyciskaniu hydrostatycznym, w temperaturze powyżej 200 °C, może powodować wzrost wielkości ziaren [3]. Natomiast A. Smolej, M. Gnamus, E. Slacek [8] wskazują, na inny sposób wykorzystania ultradrobnej struktury stopu aluminium 7475, dzięki czemu uzyskali (w temperaturze 515 °C) wydłużenie do 1000% (rys. 2).

Superplastyczność stopów metalicznych, cechujących się bardzo wysokim wydłużeniem podczas testu rozciągania jest uzależniona od wielkości ziaren poniżej 10 mikrometrów oraz stałej wysokiej temperatury procesu, ok. 0,5 Tt (temperatury topnienia) [9]. Nadplastyczne formowanie (SPF - superplastic forming) musi być prowadzone przy bardzo wolnej prędkości odkształcania $10^{-2} - 10^{-5} s^{-1}$ i przy niskim przyroście naprężenia [9, 10]. Dlatego tak istotnym jest z jednej strony wyznaczenie parametrów kształtowania pozwalającego zachować drobnoziarnistą strukturę a z drugiej określenie warunków nadplastycznego płynięcia półwyrobów wykonanych metodami SPD.

2. BADANIA WŁASNE

2.1. Przedmiot i metodyka badań

Badaniom zostały poddane półwyroby w postaci pręta o średnicy $\phi 5$ mm, z aluminium i stopów aluminium 7475 oraz 5483 (rys. 3a) otrzymane metodą wyciskania hydrostatycznego.

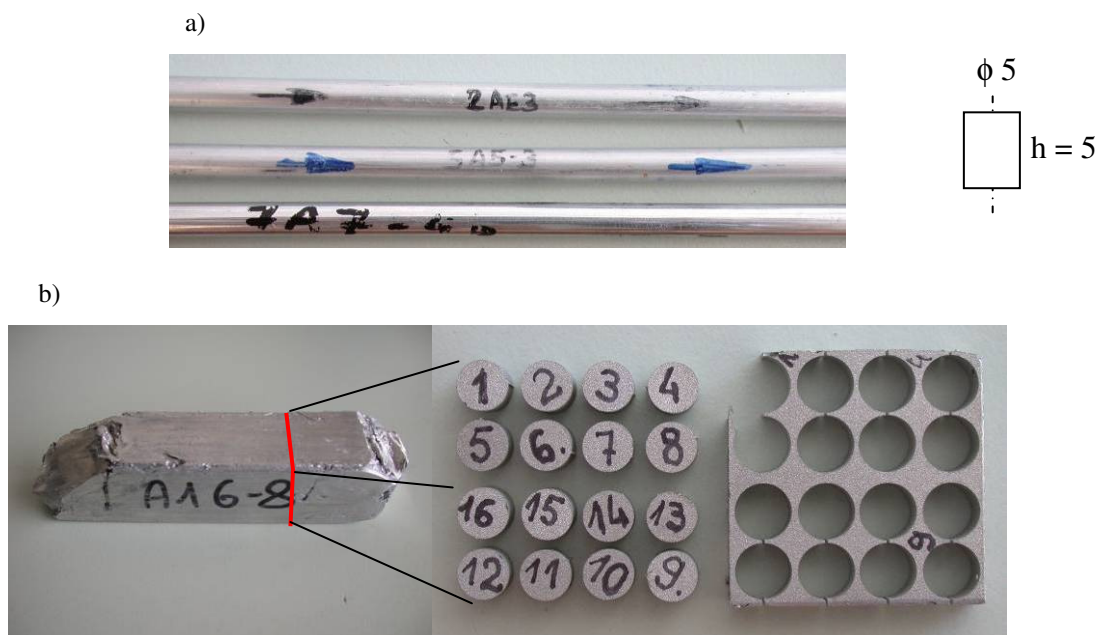
As shown by our own investigation, forming a rod of 2017 alloy after hydrostatic extrusion at a temperature of above 200 °C, can cause grain size growth [3]. However, A. Smolej, M. Gnamus, E. Slacek [8] point to another way of using the very fine structure of the 7475 aluminium alloy due to which they have obtain elongation up to 1000% (at the temperature of 515 °C) (fig. 2).

Superplasticity of metallic alloys, characterized by very high elongation in the tensile test, depends on the grain size below 10 microns and constant high temperature of the process, about 0.5 Tt (melting point) [9]. Superplastic forming must be performed at very low deformation speed of $10^{-2} - 10^{-5} s^{-1}$ and with low stress increment [9, 10]. That is why it is so important to determine the forming parameters allowing for the maintenance of fine grain structure on the one hand and, on the other, to determine the conditions of superplastic flow in the semi-products made by the SPD methods.

2. THE INSTITUTE'S OWN INVESTIGATION

2.1. The subject and methodology of investigation

The tests have been performed on semi-products in the form of a bar with the diameter of $\phi 5$ mm made of aluminium and aluminium alloys 7475 and 5483 (fig. 3a) obtained by the method of hydrostatic extrusion.



Rys. 3. Sposób przygotowania i pobrania próbek do próby ściskania: a) pręt po hydrostatycznym wyciskaniu $\phi = 5$ mm, b) pręt po procesie ECAP 30x30 mm

Fig. 3. The way of preparation and taking samples for the compression test: a) a bar after hydrostatic extrusion, $\phi = 5$ mm, b) a bar after the ECAP process, 30 x 30 mm

Przeciskanie przez kanał kątowy ECAP i wyciskanie hydrostatyczne (HE) zostało przeprowadzone w Instytucie Wysokich Ciśnień PAN w Warszawie. Próbki po procesie ECAP z aluminium wycinano z pręta kwadratowego 30x30mm. Schemat wycięcia próbek do badań przedstawiono na rys. 3b.

Celem określenia możliwości kształtowania plastycznego, a następnie opracowania technologii kształtowania wyrobów z badanych materiałów, przeprowadzono za pomocą maszyny wytrzymałościowej INSTRON 4483 próby ściskania z różnymi prędkościami (0,1; 0,01 oraz 0,001 1/s) i w różnych temperaturach (20, 100, 150, 200, 250 °C). Do badań wykorzystano urządzenie do wyznaczania plastyczności w próbie ściskania do temperatury 600 °C zaprojektowane i wykonane w Instytucie Obróbki Plastycznej w ramach projektu MANUDIRECT realizowanego w ramach VI Programu Ramowego. Pomiar twardości wykonano za pomocą twardościomierza Micromet 2104 firmy Buehler przy obciążeniu 0,5 kg.

Equal-channel angular pressing and hydrostatic extrusion have been performed by the Institute of High pressures of the Polish Academy of Science in Warsaw. Aluminium samples after the ECAP process have been cut out of a square bar 30x30 mm. A sketch of sample cutting can be seen in fig. 3b.

In order to determine the possibility of plastic forming and to elaborate the technology of forming products of the materials under investigation, compression tests with various speeds (0.1; 0.01 and 0.001 1/s) and various temperatures (20, 100, 150, 200, 250 °C) have been performed by means of the INSTRON 4483 testing machine. The experiments have been performed with the use of the device for determining plasticity in a compression test up to the temperature of 600 °C, designed and executed by the Metal Forming Institute within the MANUDIRECT project realized within the 6th Framework Program. Hardness has been measured by means of Micromet 2104 hardness tester made by Buehler, with the load of 0.5 kg.

3. WYNIKI BADAŃ

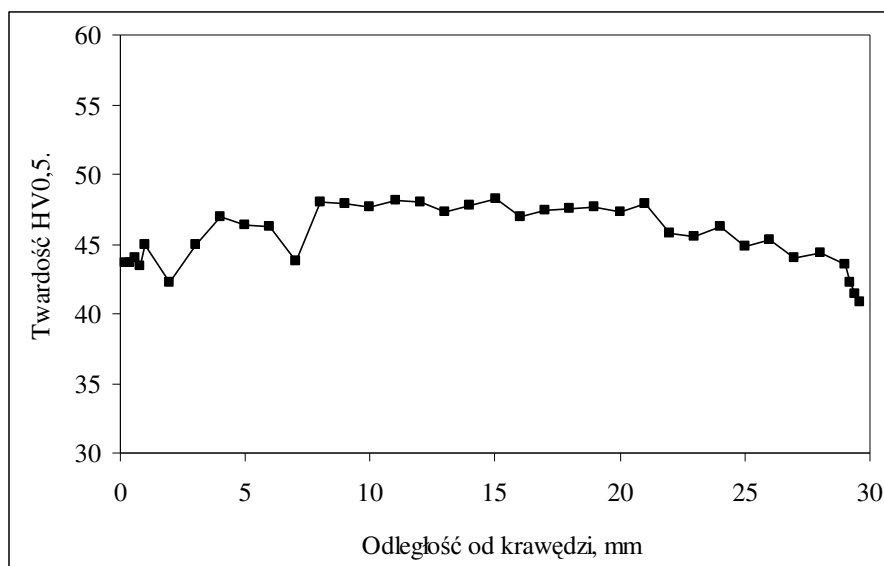
Badania aluminium po procesie ECAP wykazały, że materiał ten charakteryzuje się dobrą plastycznością w temperaturze otoczenia. Uzyskano odkształcenie względne na poziomie 71%, a na powierzchni próbek nie stwierdzono śladów pęknięć. Próbki wycięte z obszarów bliżej krawędzi (próbki 1 i 4 na rys. 3) charakteryzowały się nieco niższą granicą plastyczności. Badania twardości na przekroju poprzecznym próbki po procesie ECAP wykazały minimalne różnice twardości pod powierzchnią roboczą (rys. 4). Prawdopodobnie związane jest to ze wzrostem temperatury na powierzchni tarcia (styku z matrycą) podczas procesu przeciskania aluminium przez kanał kątowy – ECAP.

Pręt aluminiowy o średnicy $\phi 5$ mm wytworzony w procesie przeciskania przez kanał kątowy i później wyciskany hydrostatycznie charakteryzuje się dobrą plastycznością: odkształcony do 70% nie pękał. Jednocześnie jego granica plastyczności była wyższa (ok. 210 MPa) w porównaniu z próbkami wyciętymi z odcinka Al wykonanego tylko w procesie przeciskania przez kanał kątowy (ok. 140 MPa) – rys. 5 i 6.

3. INVESTIGATION RESULTS

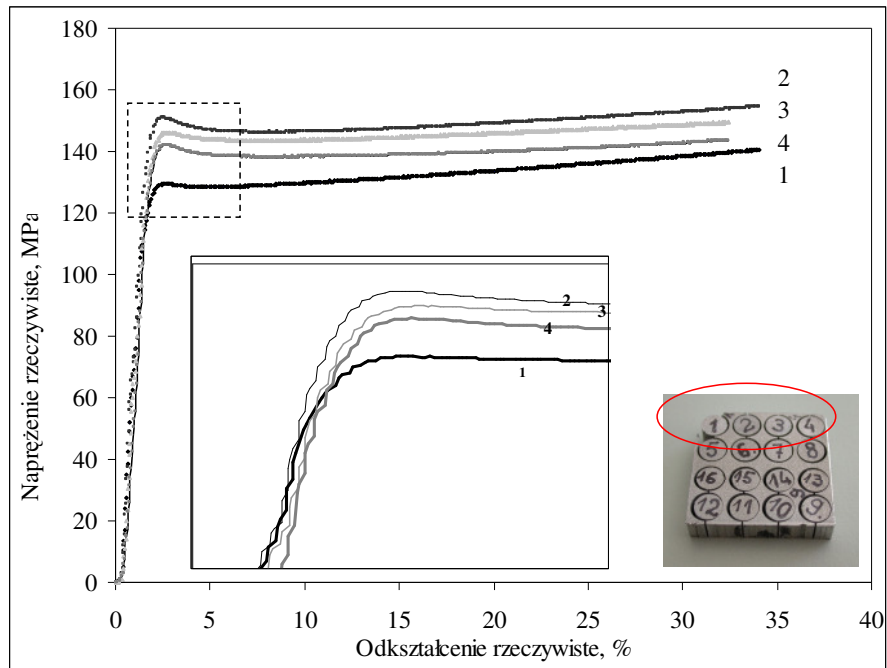
Examination of aluminium after the ECAP process has shown that the material is characterized by good plasticity at ambient temperature. True strain of 71% has been obtained and no traces of cracks have been found on the sample surfaces. The samples cut out of the areas nearer to the edge (sample 1 and 4 in fig. 3) had slightly lower yield point. Hardness tests on the cross section of a sample after the ECAP process had slight hardness differences under the working surface (fig. 4). This is probably related to the increase of temperature on the surface of friction (contact with the die) during the process of equal-channel angular pressing of aluminium – ECAP.

An aluminium bar with the diameter of $\phi 5$ mm made in the process of equal-channel angular pressing and subsequently hydraulically extruded reveals good plasticity: it did not break when deformed up to 70%. Its yield point, too, was higher (about 210 MPa) as compared to that of samples cut out of an Al section made in the process of equal-channel angular pressing only (about 140 MPa) – fig. 5 and 6.



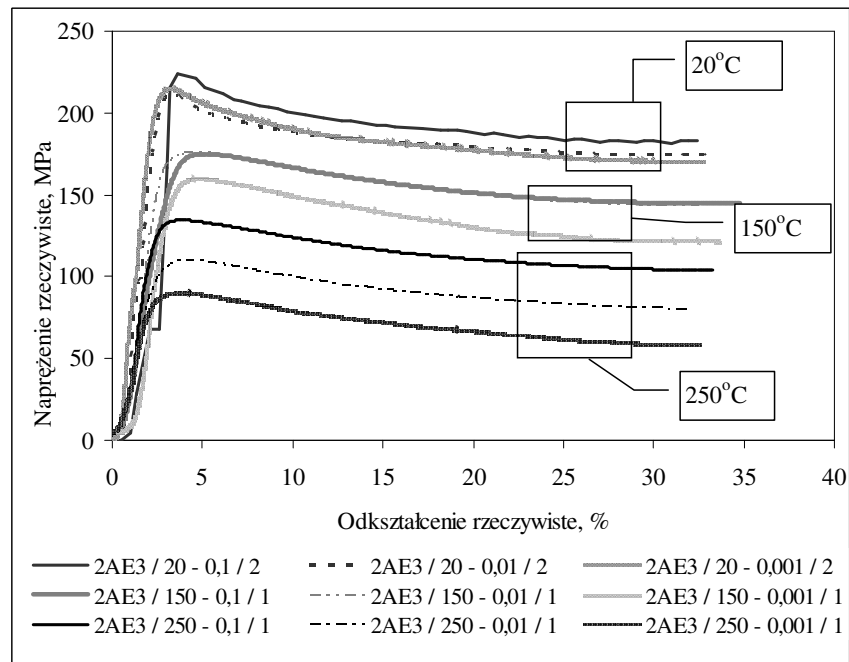
Rys. 4. Rozkład twardości HV0,5 na przekroju pręta z aluminium po procesie ECAP

Fig. 4. HV0.5 hardness distribution on the cross section of an aluminium bar after the ECAP process



Rys. 5. Krzywe umocnienia dla aluminium – próbki wycięte z pręta po procesie ECAP. Parametry próby ściskania: prędkość odkształcania $0,01\text{s}^{-1}$, temperatura otoczenia

Fig. 5. Work-hardening curves for aluminium – samples cut out of a bar after the ECAP process. Parameters of the compression test: deformation speed 0.01 s^{-1} , ambient temperature



Rys. 6. Krzywe umocnienia aluminium – próbki wycięte z pręta po procesie ECAP i HE (wyciskania hydrostatycznego). Parametry próby ściskania: prędkość odkształcania od $0,1$ do $0,001\text{s}^{-1}$, temperatura 20 , 150 i $250\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 6. Work-hardening curves of aluminium – samples cut out of a bar after the processes of ECAP and HE (hydrostatic extrusion). Compression test parameters: deformation speed from 0.1 to 0.001 s^{-1} , temperature 20 , 150 and $250\text{ }^{\circ}\text{C}$

Wyciskanie hydrostatyczne spowodowało umocnienie aluminium przy zachowaniu zdolności do odkształceń. Z krzywych umocnienia wynika, że materiał stracił zdolność do dalszego umocnienia. W temperaturze pokojowej prędkość odkształcenia nie ma wpływu na wartość naprężenia uplastyczniającego. W temperaturze 150 °C przy najniższej prędkości odkształcenia materiał (próbka 2AE3/150-0,001) wykazuje niższe naprężenie uplastyczniające. W wyższej temperaturze wpływ szybkości odkształcenia jest znaczny. Zależność ta jest powiązana z procesami zdrowienia dynamicznego i rekrytalizacji.

Stop aluminium 5483 po procesie hydrostatycznego wyciskania (HE) charakteryzuje się najwyższym naprężeniem uplastyczniającym sięgającym w temperaturze otoczenia ponad 400 MPa (rys. 7). Odkształcanie w temperaturze 150 °C nie spowodowało znacznego obniżenia tego naprężenia. Nie stwierdzono dużego wpływu prędkości odkształcania. Zmiany naprężenia uplastyczniającego pod wpływem zdrowienia i rekrytalizacji widoczne są na krzywych umocnienia wyznaczanych w temperaturze 250 °C.

Wpływ prędkości odkształcania w stopie 7475 po wyciskaniu hydrostatycznym jest już wyraźny podczas ściskania w temperaturze wyższej niż 150 °C (rys. 8). Zdolność do odkształceń w temperaturze pokojowej jest ograniczona do 30%. Po przekroczeniu tego zakresu próbki pękały. Kształtowanie stopu 7475 wywoływane ściskaniem powodującym odkształcenia na poziomie wyższym niż 30% nie jest możliwe bez podgrzania go w wyższej temperaturze.

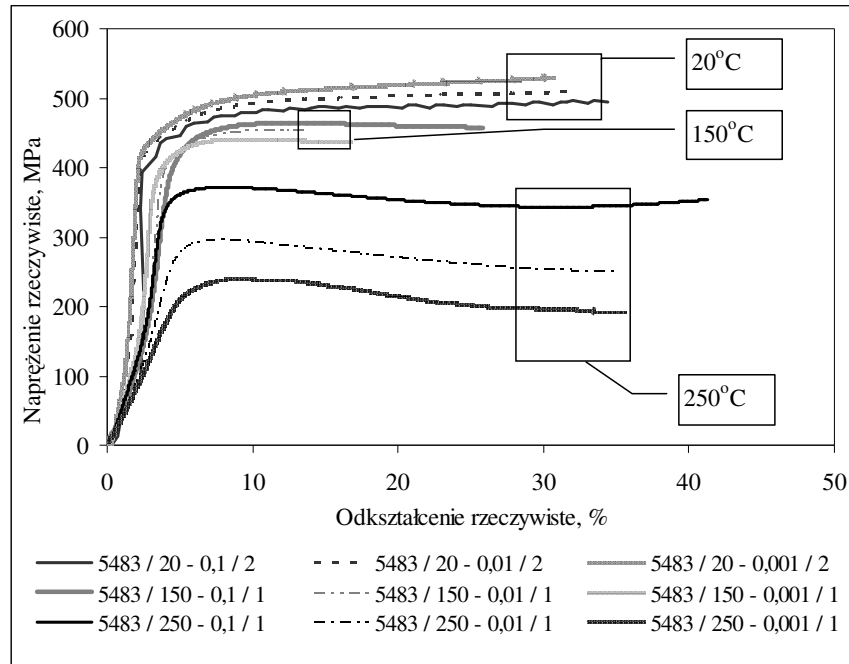
Z próbek odkształconych do 30% wykonano zgłady metalograficzne (wzdłużne) oraz pomiary twardości HV0,5. Najwyższą twardością charakteryzuje się stop 5483. W wyniku odkształcenia na zimno stopu Al 5483 zaobserwowano wzrost twardości, a w przypadku pozostałych materiałów nawet nieznaczny spadek. Twardość materiału odkształcanego w temperaturze 150 °C była zbliżona do twardości w stanie wyjściowym. Wzrost temperatury odkształcania do 200 i 250 °C spowodował spadek twardości (rys. 9), spowodowany prawdopodobnie procesem zdrowienia materiału.

Hydrostatic extrusion has resulted in work-hardening of aluminium while maintaining the ability to deform. The work-hardening curves indicate that the material has lost its ability of further work-hardening. At ambient temperature, deformation speed does not influence the value of yield stress. At 150 °C, with the lowest deformation speed, the material (sample 2AE3/150-0.001) shows lower yield stress. At higher temperatures, the influence of deformation speed is significant. The dependence is related to the processes of dynamic recovery and recrystallization.

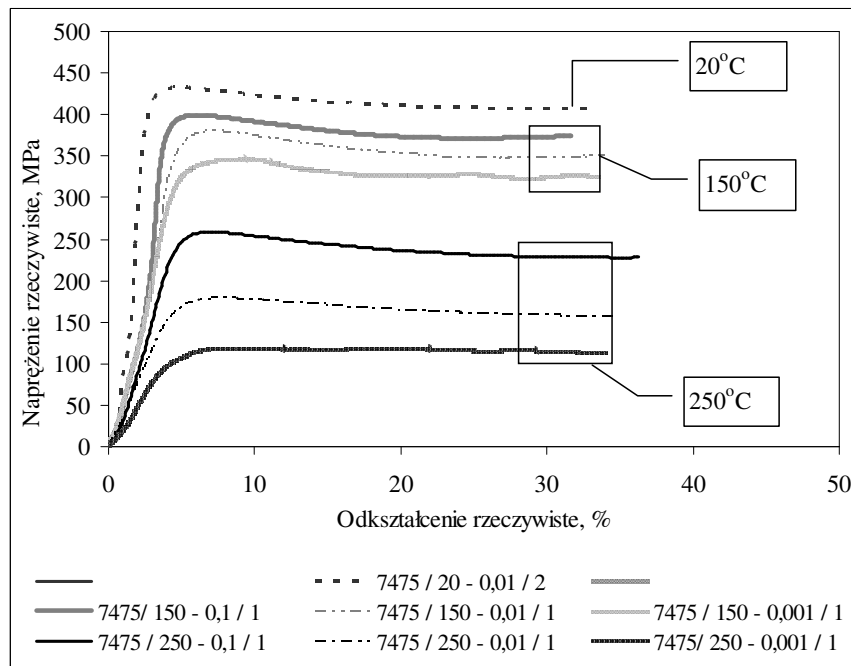
The 5483 aluminium alloy after the process of hydrostatic extrusion (HE) is characterized by the highest yield stress of over 400 MPa at ambient temperature (fig. 7). Deformation at the temperature of 150 °C has not resulted in significant reduction of that stress. The deformation speed has not been found to have a strong influence, either. The changes of yield stress due to recovery and recrystallization can be seen in the work-hardening curves determined at 250 °C.

The influence of deformation speed in the 7475 alloy after hydrostatic extrusion is clearly visible during compression at a temperature of above 150 °C. (fig. 8.). The ability of deformation at ambient temperature is limited to 30%. When that range has been exceeded, the samples broke. Forming the 7475 alloy caused by compression resulting in deformations at a level of over 30% is not possible unless it is heated up to a higher temperature.

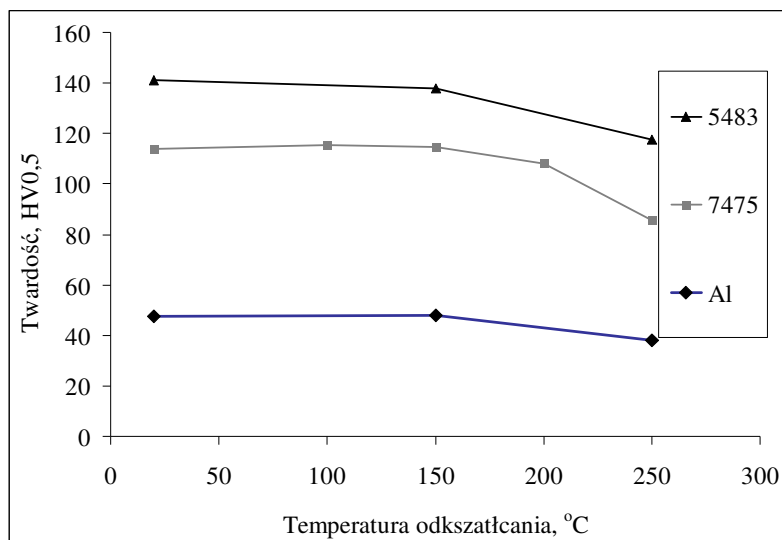
Microsections (longitudinal) have been made of the samples deformed up to 30% and their HV0.5 hardness has been measured. The highest hardness is that of the 5483 alloy. As a result of cold deformation of the Al 5483 alloy, an increase of its hardness has been observed; in the case of the other materials, a slight drop of the hardness took place. The hardness of material deformed at 150 °C was close to that in the initial state. Increase of the temperature of deformation up to 200 and 250 °C has resulted on a drop of hardness (fig. 9), probably due to the process of material recovery.



Rys. 7. Krzywe umocnienia stopu aluminium 5483 – próbki wycięte z pręta po procesie HE (wyciskania hydrostatycznego). Parametry próby ściskania: prędkość odkształcania od 0,1 do 0,001 s⁻¹, temperatura 20, 150 i 250 °C
 Fig. 7. Work-hardening curves of 5483 aluminium alloy – samples cut out of a bar after the HE (hydrostatic extrusion) process. Compression test parameters: deformation speed from 0.1 to 0.001 s⁻¹, temperature 20, 150 and 250 °C



Rys. 8. Krzywe umocnienia stopu aluminium 7475 – próbki wycięte z pręta po procesie HE (wyciskania hydrostatycznego). Parametry próby ściskania: prędkość odkształcania od 0,1 do 0,001 s⁻¹, temperatura 20, 150 i 250 °C
 Fig. 8. Work-hardening curves of 7475 aluminium alloy – samples cut out of a bar after the HE (hydrostatic extrusion) process. Compression test parameters: deformation speed from 0.1 to 0.001 s⁻¹, temperature 20, 150 and 250 °C

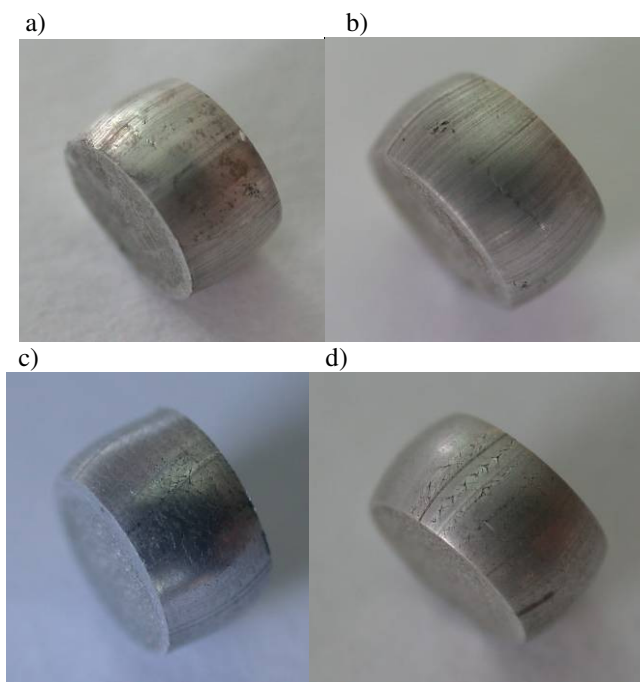


Rys. 9. Wpływ temperatury odkształcania na twardość HV0,5 próbek spęczonych 30%

Fig. 9. The influence of deformation temperature on the HV0.5 hardness of samples after 30% upsetting

Obserwacja powierzchni bocznej spęczanych próbek nie wykazała pęknięć ani innych nieciągłości, świadczących o lokalnym przekroczeniu zakresu wartości odkształcania granicznego (rys. 10). Plastyczność oceniona w badaniach ściskania pozwala na projektowanie technologii kształtowania tych stopów posiadających cechy nanostruktury.

Inspection of the side surfaces of the samples has not revealed any cracks or other discontinuities proving local excess of the limit deformation values (fig. 10). Plasticity assessed in compression tests allows for designing technologies of forming those alloys possessing the features of nanostructure.



Rys. 10. Powierzchnie boczne próbek po spęczaniu w temperaturze otoczenia (a, c) oraz 250 °C (b, d) z prędkością odkształcania = 0,01 s⁻¹ stopów aluminium: a, b) 5483; c, d) 7475

Fig. 10. Side surfaces of samples after upsetting at ambient temperature (a, c) and at 250 °C (b, d) at the deformation speed of 0.01 s⁻¹. Aluminium alloys: a, b) 5483; c, d) 7475

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych prób ściskania oraz pomiarów twardości półwyrobów z aluminium i stopów aluminium wykonanych metodami dużych odkształceń plastycznych w zakresie temperatur 20–250 °C można stwierdzić, że:

- półwyroby wykonane metodami ECAP i HE posiadają wyższą twardość i naprężenie uplastyczniające w porównaniu ze stopami obrobionymi tradycyjnie,
- czyste aluminium, stop 5483 oraz 7475 po procesach ECAP i HE są plastyczne i mogą być kształtowane w temperaturze zapewniającej zachowanie cech nanostrukturalnych,
- stop 7473 po odkształceniu do 30% nie ulegał pękaniu, dalsze odkształcenie może powodować powstanie nieciągłości,
- obniżenie twardości i naprężenia uplastyczniającego w temperaturze wyższej niż 200 °C spowodowane jest prawdopodobnie procesami zdrowienia,
- otrzymane wyniki badań mogą być wykorzystane do projektowania technologii przemysłowego kształtowania wyrobów i części wykonanych z aluminium i jego stopów.

Podziękowania

Praca została zrealizowana w ramach projektu NANOMET „Nowe materiały metaliczne o strukturze nanometrycznej do zastosowań w nowoczesnych gałęziach gospodarki” finansowanego z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach działania 1.3. poddziałania 1.3.1 Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Cheng Xu Terence G. Langdon: The development of hardness homogeneity in aluminum and an aluminum alloy processed by ECAP. *J Mater Sci.* (2007) 42:1542–1550.
- [2] Leszczyńska B., Richert M.: Ewolucja struktury w wyciskanych hydrostatycznie stopach aluminium (AlCu4Zr0,5, AlZn6Mg3CuZr). *Inżynieria Materiałowa* 2008 nr 5 s. 493.
- [3] Borowski J., Wiśniewska-Weinert H., Lewandowska M.: Kształtowanie plastyczne stopu aluminium 2017 o strukturze nanometrycznej. *Rudy i Metale Nieżelazne* 2010 R. 55 nr 7 s. 486.
- [4] Huang Y., Prangnell P.B.: The effect of cryogenic temperature and change in deformation mode on the limiting grain size in a severely deformed dilute aluminium alloy. *Acta Materiala* 56 (2008) 1619-1632.
- [5] Lewandowska M.: Kształtowanie mikrostruktury i właściwości stopów aluminium metodą wyciskania hydrostatycznego. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej Inżynieria Materiałowa* 2006 z. 19.

4. CONCLUSIONS

Basing on the compression tests and hardness measurements of aluminium and aluminium alloy semi-products made by the methods of severe plastic deformation in the temperature range of 20–250 °C, it can be stated that:

- *semi-products made by the ECAP and HE methods have higher hardness and yield stress as compared to traditionally processes products,*
- *pure aluminium, 5483 and 7475 alloys, after the ECAP and HE processes, are plastic and can be formed at a temperature ensuring the maintenance of nanostructural features,*
- *the 7473 alloy, after deformation up to 30%, did not break, further deformation can result in discontinuities,*
- *the reduction of hardness and yield stress at a temperature above 200 °C is probably due to the processes of recovery,*
- *the investigation results obtained can be used for designing technologies of industrial forming of products and parts made of aluminium and its alloys.*

Acknowledgement

The work has been carried out within the NANOMET project, “New metallic materials with nanometric structure for application in modern branches of economy” financed by the European Fund of Regional Development within action 1.3., sub-action 1.3.1 of the operational Program Innovative Economy.

-
- [6] Lewandowska M., Garbacz H., Pachla W., Mazur A., Kurzydłowski K.J. : Grain refinement in aluminium and the aluminium Al-Cu-Mg-Mn alloy by hydrostatic extrusion. *Materials Science –Poland* 2005 vol. 23 No. 1 s. 279-286.
 - [7] Valiev R.Z., Alexandrov I.V.: Nanostructured materials from severe plastic deformation. *NanoStructured Materials*, 1999 vol. 12, s. 3540.
 - [8] Smolej A., Gnamus M., Slacek E.: The influence of the thermomechanical processing and forming parameters on superplastic behaviour of the 7475 aluminium alloy. *Journal of Materials Processing Technology* 118 (2001) s. 397-402.
 - [9] Mahindhara R.K., Yang H.S., Mukherjee A.K.: The effect of grain size and prestrain on the superplastic behaviour of the 7475 aluminium alloy. *Z. Metallkd.* 85 (1994) 715-722.
 - [10] Shin D.H, Lee C.S, Kim W.-J.: Superplasticity of fine-grained 7475 Al alloy and a proposed new deformation mechanism. *Acta Materiala* 45 (1991) 5195-5202.