

# Mikrostruktura i właściwości mechaniczne aluminium i jego stopów po wyciskaniu metodą KoBo

Microstructure and mechanical properties of aluminium and its alloys after extrusion via KoBo method

**Paweł Koprowski**

## Streszczenie

W niniejszej pracy doktorskiej badano efekty wywołane odkształceniem plastycznym aluminium i jego stopów przez osiowo symetryczne wyciskanie w oscylującej matrycy metodą KoBo. Metoda ta wywołuje zmiany schematu odkształcenia plastycznego prowadząc do innego stanu naprężeń niż w przypadku wyciskania konwencjonalnego. Do badań wybrano: aluminium wysokiej czystości Al6N, stop o czystości technicznej AA1070 oraz stop umacniany wydzieleniowo AA6013. Badania przeprowadzone na dwóch pierwszych metalach pozwoliły na stwierdzenie, że odkształcenie metodą KoBo przy tych samych parametrach może prowadzić do różnej odpowiedzi mikrostrukturalnej. Dla Al6N mikrostruktura była częściowo zrekrystalizowana, natomiast dla AA1070 zbliżona do stopu wyciskanego konwencjonalnie na zimno.

W dalszej części pracy wyjaśniono, że mikrostruktura i właściwości mechaniczne mogą być kontrolowane przez zmianę parametrów wyciskania dzięki nakładaniu się efektów odkształcenia plastycznego i dynamicznej odbudowy mikrostruktury, co będzie miało wpływ na późniejsze procesy wydzieleniowe w stopie AA6013. W celu poznania możliwości sterowania strukturą stopu wybrano dwie oscylacje matrycy: 2,5 Hz i 8 Hz. Tak dobrane parametry sprawiły, że materiał zachowywał się odmiennie podczas starzenia po odkształceniu plastycznym. Dla niskiej częstotliwości materiał cechował się stabilnością mikrostruktury. Wyniki statycznej próby rozciągania oraz twardości pokazały niemal jednakowe wartości niezależnie od czasu starzenia. Dla wyższej częstotliwości stop zachował siłę pędną wydzielenia podczas procesu starzenia

uzyskując maksimum właściwości wytrzymałościowych po 2-godzinnym starzeniu w temperaturze 165°C. W celu wyjaśnienia mechanizmów powodujących różne zachowanie stopu aluminium wykorzystano szereg technik badawczych. Przy użyciu dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych (EBSD) w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM) analizowano takie parametry jak wielkość ziarna, długość granic ziaren na jednostkę powierzchni oraz teksturę. Transmisyjną mikroskopię elektronową (TEM) wykorzystano do identyfikacji wydzielań w stopie. Skaningowa kalorymetria różnicowa (DSC) posłużyła do badania przemian fazowych zachodzących podczas nagrzewania. Przy pomocy rentgenowskiej analizy fazowej (XRD) identyfikowano fazy występujące w materiale. Wyniki pokazały, że dla wyższej częstotliwości mikrostruktura posiada znamiona odnowy struktury krystalicznej. Dalsze badania nad procesem wydzielania doprowadziły do ustalenia typu wydzielań dla materiałów odkształcanych z różną częstotliwością. Wariant KoBo 2,5 Hz doprowadził do wystąpienia stabilnych wydzielań typu Q w stopie, natomiast zastosowanie wyciskania z częstotliwością 8 Hz sprawiło, że po przeróbce plastycznej materiał posiadał niewielkie umocnienie, wykazując zdolność do umacniania wydzieleniowego. Po samym odkształceniu KoBo w wariacie 8 Hz nie obserwowano wydzielań powodujących umocnienie. Wydzielenia  $\beta''$ , które uznawane są za najsilniej umacniające stopy serii 6xxx pojawiły się dopiero po 2-godzinnym starzeniu w temperaturze 165°C odkształconego materiału. Analizując krzywe DSC podczas izotermicznego grzania zaobserwowano, że maksima pochodzące od procesu wydzielania nie są obecne dla wariantu 2,5 Hz, natomiast występują dla 8 Hz. Wyniki uzyskane za pomocą TEM i DSC potwierdziły, że uzyskany stan wydzielań po procesie KoBo, jest główną przyczyną podatności materiału na proces starzenia. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono że odpowiednim doбором parametrów metody KoBo możliwe jest sterowanie mikrostrukturą, a tym samym właściwościami mechanicznymi stopów aluminium.

## **Abstract**

In the following dissertation, effects caused by plastic deformation of aluminum and its alloys via axially symmetrical extrusion with additional oscillation of die using KoBo method were extensively studied. Oscillation of die causes change in the plastic deformation scheme leading to different state of stress than in case of conventional extrusion. Materials selected to research were as follows: high purity Al6N aluminum, technical purity AA1070 and precipitation hardening AA6013 alloy. Research performed on the first two metals allowed to observe that the KoBo deformation with the same parameters can lead to different microstructural response. For Al6N the microstructure was partially recrystallized whereas for the AA1070 it was similar to cold extruded aluminium.

In the further part of dissertation a thesis has been proposed that microstructure and mechanical properties may be controlled by changing the extrusion parameters owing to impose

of plastic deformation effects and dynamic microstructure renewal, what may have the influence on subsequent precipitation processes for AA6013 alloy. Two oscillations of the die were chosen: 2.5 Hz and 8 Hz. The chosen parameters caused that material behavior during post-deformation ageing was different. For a low oscillation frequency material was stable, results obtained from static tensile tests and hardness measurements showed almost constant values, independently of the ageing time. For a higher oscillation frequency, an alloy remained driving force responsible for ageing process, obtaining peak strength after 2 hours of ageing at 165°C. In order to explain mechanisms causing different behavior of aluminum alloy numerous research techniques were used. Using electron backscattered diffraction (EBSD) in scanning electron microscope (SEM) parameters such as grain size, grain boundary density and local texture were analyzed. Transmission electron microscopy (TEM) was used to identify precipitates in the alloy. Differential scanning calorimetry (DSC) was used to study phase transformations during heating. Attempts to identify the phases in the material were done by means of X-ray phase analysis. The results showed that for a higher frequency the microstructure showed crystal structure renewal. Further studies on the precipitation process led to the determination of the type of precipitates for materials deformed with different frequencies. The KoBo 2.5 Hz variant led to achievement of stable Q-type precipitates in the alloy, while extrusion with die oscillation frequency caused that after plastic deformation the material had a low strengthening, however, it exhibits the ability to precipitation strengthening. After the 8 Hz KoBo deformation strengthening precipitates were not observed. The  $\beta''$  phase, which is considered to be the strongest strengthening phase of the 6xxx series, appeared during aging. Analysis of the DSC curves during isothermal heating showed that peaks from the precipitation process were not present for the 2.5 Hz variant, but occurred at 8 Hz. The results obtained from TEM and DSC confirmed that the material state after the KoBo process is the main reason of its susceptibility to aging process. Based on conducted research, it was concluded that by the appropriate choice of KoBo method parameters it is possible to control the microstructure and thus the mechanical properties of aluminum alloys.

[Recenzja - Prof. M. Lewandowska](#)

[Recenzja - Prof. M. Wróbel](#)