

# Badania nad doborem parametrów obróbki cieplnej warstw powierzchniowych odlewniczych stopów aluminium odkształconych metodą PWPP

T. Knych<sup>1</sup>, P. Uliasz<sup>2</sup>, J. Wiecheć<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>AGH Kraków, Wydział Metali Nieżelaznych, Katedra Przeróbki Plastycznej i Metaloznawstwa Metali Nieżelaznych  
Kontakt korespondencyjny: jwiechec@agh.edu.pl

Otrzymano 22.10.2013; zaakceptowano do druku 12.12.2013

## Streszczenie

Stopy typu Al-Si-Mg o zawartości krzemu w przedziale 4 do 24 % mas. (siluminy) należą do jednych z najbardziej rozpowszechnionych tworzyw wykorzystywanych w odlewnictwie metali nieżelaznych. Ich wielka popularność spowodowana jest zestawem własności w postaci między innymi niskiej gęstości czy wysokich własności mechanicznych oraz własności odlewniczych. Z drugiej jednak strony charakterystyka procesu technologicznego wykorzystującego tę grupę materiałów sprzyja pojawianiu się w nich porowatości i rzadziny, które mogą stać się źródłem pęknięć. Metodą umożliwiającą eliminację negatywnych skutków tej grupy defektów jest Powierzchniowa Wysokotemperaturowa Przeróbka Plastyczna (PWPP). Modyfikacja warstwy wierzchniej odlewu za pomocą tego typu obróbki jest szczególnie pożądana w elementach konstrukcyjnych dla przemysłu transportowego, elektromaszynowego czy w budownictwie. Zastosowania te wymagają od odlewów spójnej, pozbawionej nieciągłości struktury warstwy wierzchniej oraz zwiększonych własności mechanicznych. Jednym ze sposobów polepszenia tych drugich jest obróbka cieplna, polegająca na przesycaaniu i sztucznym starzeniu. W pracy przedstawiono badania nad doborem optymalnych parametrów obróbki cieplnej w postaci czasu i temperatury starzenia sztucznego dla stopu AlSi7Mg0,3 po procesie PWPP.

**Keywords:** odlewnicze stopy aluminium, obróbka cieplna, twardość, metoda PWPP.

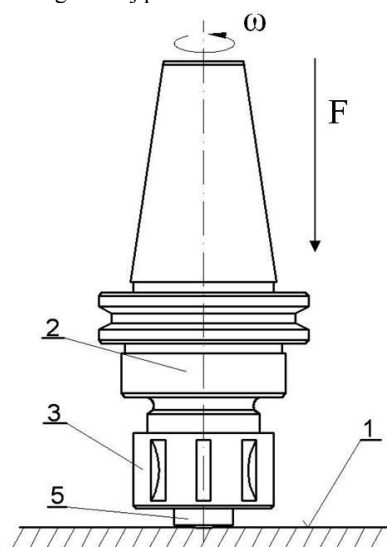
## 1. Wprowadzenie

Typowe odlewnicze stopy aluminium należące do grupy siluminów podeutektycznych – o zawartości do ok 10 % mas. Si – to materiały powszechnie stosowane w wielu obszarach nowoczesnego przemysłu (m.in. transport, budownictwo czy przemysł maszynowy) [1]. Tak wielka popularność tego typu materiałów spowodowana jest kombinacją wysokich własności mechanicznych, bardzo dobrych własności odlewniczych, niskiej gęstości oraz wysokiej odporności na działanie środowiska korozyjnego [2]. Jednak stopy te nie są pozbawione wad, z których

najczęstszymi są porowatości i rzadziny występujące z powodu zagazowania ciekłego metalu, braku procesów modyfikacyjnych czy nieodpowiednio zaprojektowanego układu zalewowego [3]. Wady te mogą podczas dalszych operacji wytwórczych inicjować pęknięcia prowadzące do konieczności wycofania takiego wyrobu z procesu produkcyjnego i zaliczenie go do braków. Jednym ze sposobów eliminacji negatywnych następstw takiego zjawiska jest metoda powierzchniowej wysokotemperaturowej przeróbki plastycznej (PWPP) [4], opartej na metodzie FSW.

Metoda ta umożliwia uzyskiwanie materiałów gradientowych, modyfikację struktury warstwy wierzchniej oraz naprawę wad

powierzchniowych. Technologia wykorzystuje zasadę nagrzewania tarcowego oraz jego wpływu na warstwę powierzchniową materiału poddanego takiej przeróbce.



Rys. 1. Schemat procesu PWPP [5]

W ogólności PWPP polega na tym, że powierzchnię obrabianego materiału poddaje się nagrzewaniu w miejscu odkształcenia (styk narzędzie-materiał) poprzez równoczesne oddziaływanie dwóch zjawisk generujących wzrost temperatury tj. powstanie pracy sił tarcia oraz odkształcenia plastycznego pod działaniem siły nacisku obrotowego narzędzia na powierzchnię materiału [5]. Schemat procesu przedstawiono na rys. 1, na którym obrabiany materiał (1) odkształcany jest przez narzędzie (5), zamocowane w specjalnym uchwycie montażowym (2) za pomocą nakrętki mocującej (3).



Rys. 2. Widok stanowiska PWPP

Uzyskanie wyrobu pozbawionego wad powierzchniowych jest jedynie jednym z etapów pośrednich procesu wytwórczego. Kolejnym etapem niezbędnym do wytworzenia wysokiej jakości elementu jest polepszenie jego własności mechanicznych. Istnieje kilka sposobów na polepszenie własności z tej grupy, między innymi zmiana składu chemicznego, czy operacje modyfikacyjne strukturę. Jednak procesy te wykonuje się dla ciekłego metalu. Dla

wyrobu odlanego, po wstępnej obróbce mechanicznej, zwiększenie własności wytrzymałościowych najskuteczniej można osiągnąć przez operacje obróbki cieplnej, czyli przesykanie, gdzie na skutek dyfuzji następuje wyrównanie składu chemicznego stopu w jego objętości i przejście wydzielań do jednorodnego roztworu stałego oraz starzenie sztuczne, dzięki któremu w materiale przesyconym powstają drobnoziarniste równomiernie rozdystrybuowane wydzielenia wywołujące znaczny wzrost własności mechanicznych [6].

Europejska normalizacja, dotycząca odlewniczych stopów aluminium [7], określa wymagane własności mechaniczne (twardość, wytrzymałość na rozciąganie) w zależności stanu umocnienia stopu po konkretnych operacjach obróbki cieplnej. Szczegółowy opis poszczególnych stanów umocnienia przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1.

Oznaczenie stanów umocnienia stopów odlewniczych wg [7]

Oznaczenie	Typ operacji
F	Bez obróbki cieplnej
O	Wyżarzony
T1	Kontrolowane chłodzenie po odlewaniu i starzenie naturalne
T4	Przesykanie i starzenie naturalne
T5	Kontrolowane chłodzenie po odlewaniu i starzenie sztuczne lub przestarzenie
T6	Przesykanie i pełne starzenie sztuczne
T64	Przesykanie i podstarzenie
T7	Przesykanie i znaczące przestarzenie (stabilizacja)

Problematyka przedstawiona w niniejszym artykule obejmuje wyniki badań obróbki cieplnej na własności mechaniczne wybranego odlewniczego stopu aluminium EN AC-42100 o symbolu chemicznym AlSi7Mg0,3 [7].

## 2. Część eksperymentalna

Badaniom wpływu obróbki cieplnej na własności mechaniczne w postaci twardości poddano płytę odlaną w sposób grawitacyjny do metalowej kokili. Płyta została wykonana ze stopu o składzie zamieszczonym w Tabeli 2.

Tabela 2.

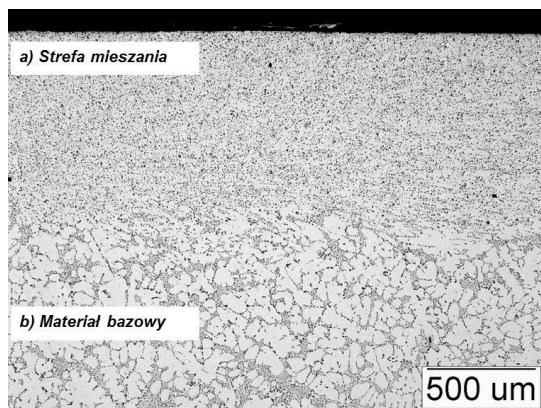
Skład chemiczny badanego materiału

Pierwiastek	Si	Mg	Fe	Cu	Ti	Al
Zawartość, % mas.	7,180	0,362	0,096	0,003	0,135	Reszta

Surowy odlew w postaci płyty został poddany procesowi PWPP w warunkach laboratoryjnych WMN AGH Kraków na specjalnie zaprojektowanym do tego celu stanowisku badawczym przedstawionym na rys. 2.

W pracy zamieszczono trzy wybrane prędkości obrotowe narzędzia: 500, 750 oraz 1000 obr/min. W wyniku procesu PWPP

wyeliminowano wady powierzchniowe materiału, uzyskując przy tym materiał składający się ze: strefy mieszania, niemodyfikowanej strefy materiału bazowego oraz niewielkiego obszaru przejściowego.



Rys. 3. Mikrostruktura warstwy wierzchniej odlewu: a) strefa mieszania, b) materiał bazowy

Rysunek 3 przedstawia widok typowej mikrostruktury warstwy wierzchniej materiału odlewane go który został odkształcony metodą PWPP.

Po zakończeniu procesu PWPP materiał został poddany operacjom obróbki cieplnej, polegającym na przesycaeniu stopu z temperatury 535 °C, w której wytrzymał materiał przez 8 godzin, do wody o temperaturze pokojowej oraz starzeniu sztucznemu i następnym schłodzeniu na wolnym powietrzu. Parametry operacji obróbki cieplnej dla poszczególnych wariantów prędkości obrotowej narzędzia pokazano w Tabeli 3.

Tabela 3.

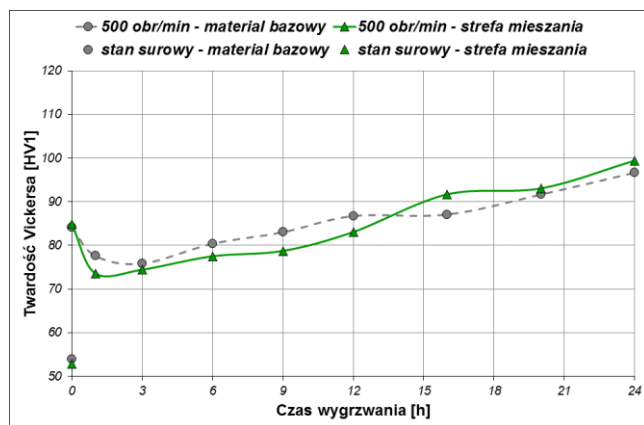
Zestawienie parametrów obróbki cieplnej dla poszczególnych wariantów procesu PWPP

Liczba obrotów narzędzia [obr/min]	Przesycanie		Starzenie sztuczne	
	Temp. [°C]	Czas [h]	Temp. [°C]	Czas [h]
500	535	8	140	1; 3; 6; 9; 12; 16; 20; 24
			160	1; 3; 6; 9; 12; 16; 20; 24
			180	1; 3; 6; 9; 12; 16; 20; 24
750	535	8	140	1; 3; 6; 9; 12; 16; 20; 24
			160	1; 3; 6; 9; 12; 16; 20; 24
			180	1; 3; 6; 9; 12; 16; 20; 24
1000	535	8	140	1; 3; 6; 9; 12; 16; 20; 24
			160	1; 3; 6; 9; 12; 16; 20; 24
			180	1; 3; 6; 9; 12; 16; 20; 24

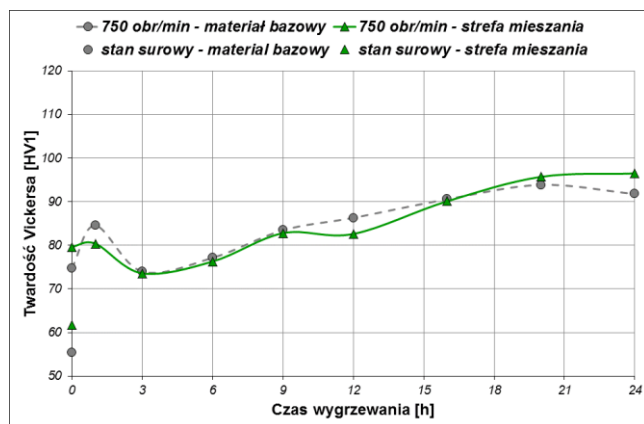
### 3. Wyniki oraz dyskusja

Poniżej przedstawiono wyniki pomiarów mikrotwardości Vikersa [HV1] w funkcji czasu wygrzewania dla poszczególnych temperatur starzenia sztucznego. Pomiaru wykonano na

mikrotwardościomierzu Wolpert-Wilson TUKON 2500. Twardość zmierzono zarówno na powierzchni nieodkształconej przez narzędzie – materiale bazowym stopu oraz w strefie mieszania. Poniższe wyniki są uśrednionymi wartościami co najmniej 4 pomiarów. Rysunki 4-6 przedstawiają wyniki pomiarów twardości dla starzenia sztucznego w temperaturze 140 °C w czasie 0-24 h dla poszczególnych prędkości obrotowych narzędzia (kolejno 500, 750 i 1000 obr/min). Punkty w kształcie kół to wyniki pomiarów twardości dla materiału bazowego, z kolei trójkąty obrazują twardość materiału odkształconego. Rysunki 7-9 przedstawiają wyniki pomiarów twardości w funkcji czasu starzenia w temperaturze 160 °C dla różnych prędkości obrotowych narzędzia, z kolei rysunki 10-12 pokazują wyniki wpływu starzenia sztucznego na twardość dla temperatury 180 °C.



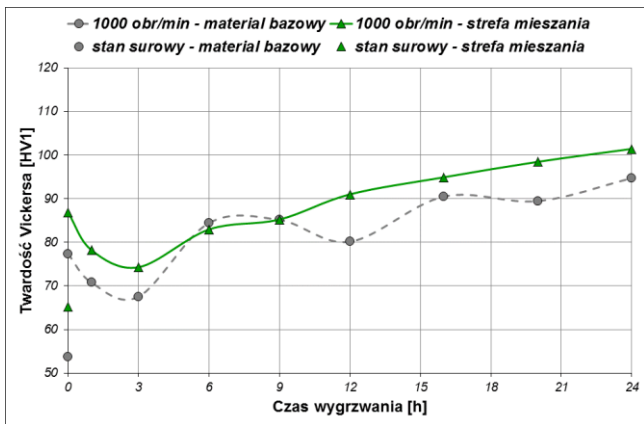
Rys. 4. Twardość w funkcji czasu wygrzewania w temperaturze 140 °C (500 obr/min)



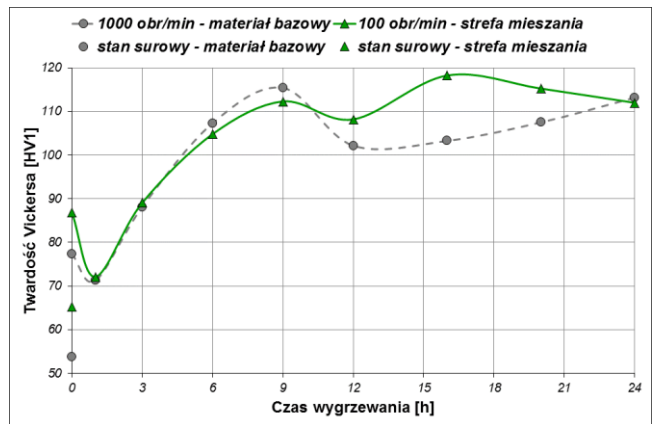
Rys. 5. Twardość w funkcji czasu wygrzewania w temperaturze 140 °C (750 obr/min)

### 4. Wnioski

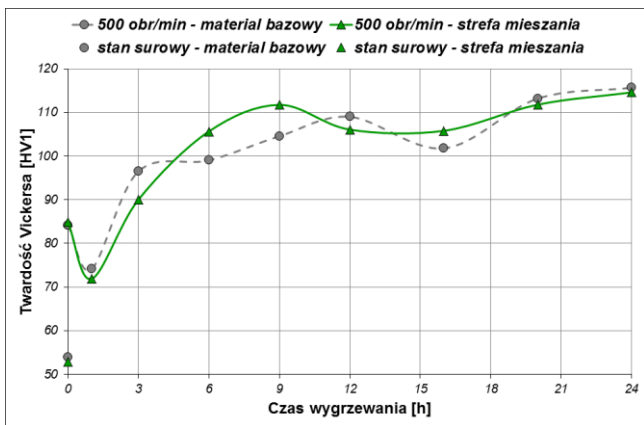
W celu podsumowania wyników uzyskanych z pomiarów twardości po operacjach przesycaenia i starzenia sztucznego stopu AlSi7Mg0,3 poddane go uprzednio procesowi PWPP, przygotowano zestawienie wartości twardości w trzech podstawowych stanach materiału: w stanie surowym (rys. 13), w stanie O – po przesycaeniu (rys. 14) oraz w stanie T6 - po przesycaeniu i starzeniu sztucznym



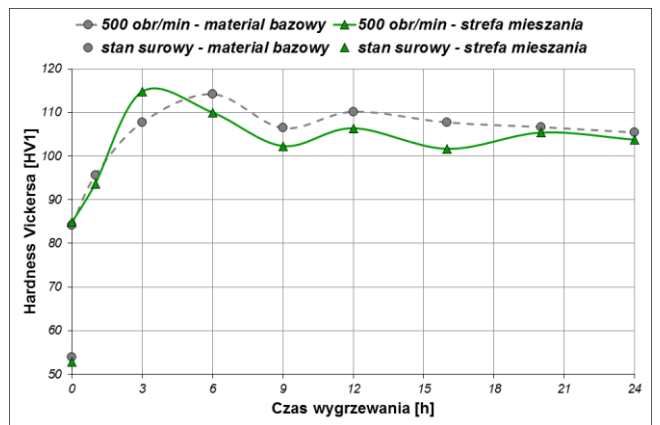
Rys. 6. Twardość w funkcji czasu wygrzewania w temperaturze 140 °C (1000 obr/min)



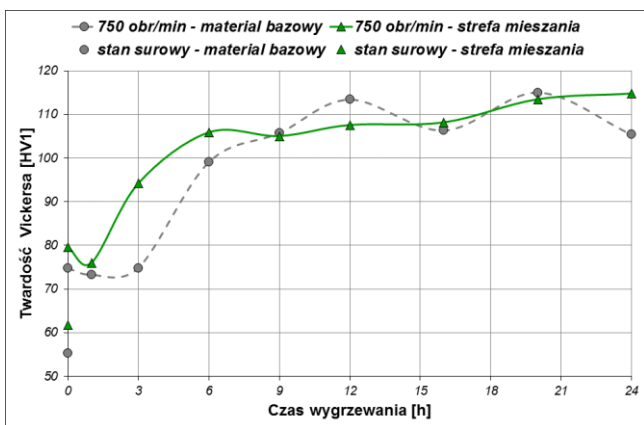
Rys. 9. Twardość w funkcji czasu wygrzewania w temperaturze 160 °C (1000 obr/min)



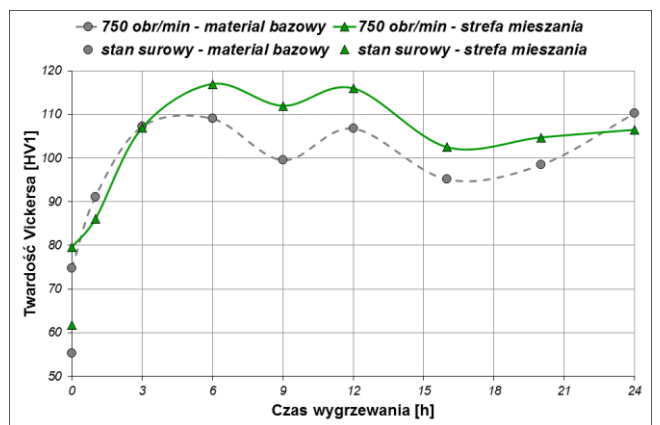
Rys. 7. Twardość w funkcji czasu wygrzewania w temperaturze 160 °C (500 obr/min)



Rys. 10. Twardość w funkcji czasu wygrzewania w temperaturze 180 °C (500 obr/min)

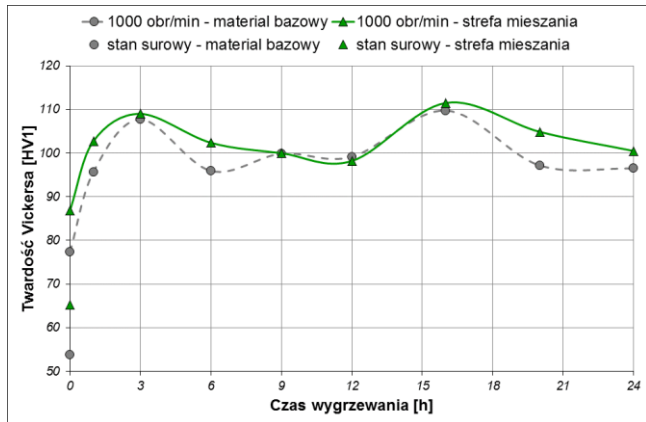


Rys. 8. Twardość w funkcji czasu wygrzewania w temperaturze 160 °C (750 obr/min)

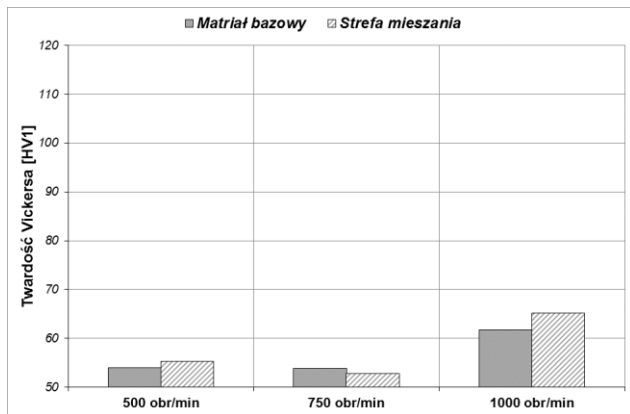


Rys. 11. Twardość w funkcji czasu wygrzewania w temperaturze 180 °C (750 obr/min)

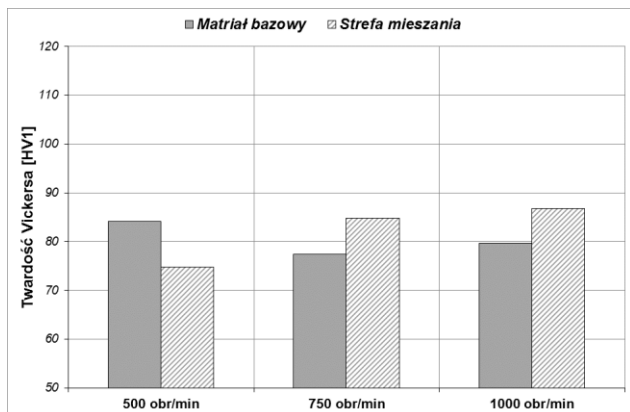
dla dwóch wariantów: niższej temperatury i dłuższego czasu wygrzewania - 160 °C przez 20 h (rys. 15) oraz wyższej temperatury i krótszego czasu wygrzewania - 180 °C przez 6 h (rys. 16).



Rys. 12. Twardość w funkcji czasu wygrzewania w temperaturze 180 °C (1000 obr/min)



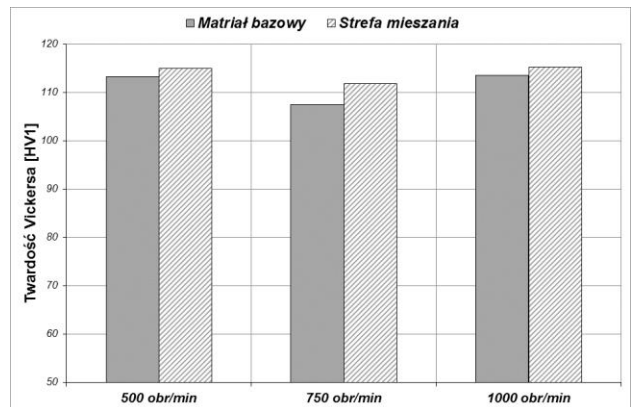
Rys. 13. Własności mechaniczne stopu AlSi7Mg0,3 po procesie PWPP (stan F)



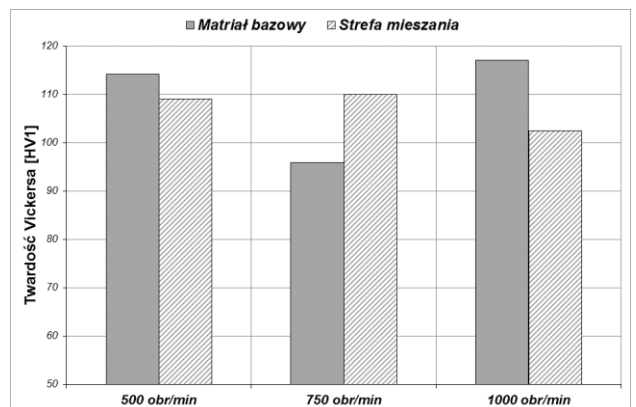
Rys. 14. Własności mechaniczne stopu AlSi7Mg0,3 po procesie PWPP (stan O)

Przeprowadzone badania pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- 1) W przypadku odlewniczego stopu AlSi7Mg0,3 zastosowanie procesu PWPP pozwala uzyskać materiał gradientowy, którego właściwości charakteryzują się strukturalnymi i mechanicznymi zmianami
- 2) Po procesie PWPP odlewnicza struktura stopu AlSi7Mg0,3 zostaje mechanicznie zmodyfikowana.
- 3) Materiał ma jednorodną strukturę, a poszczególne fazy są ujednorodnione.
- 4) Stop AlSi7Mg0,3 charakteryzuje się podatnością na operacje obróbki cieplnej, zarówno w obszarze materiału bazowego, jak i w strefie mieszania
- 5) Zróżnicowanie w pomiarach twardości pomiędzy strefą mieszania a materiałem bazowym zawiera się w przedziale od 0 do 15 HV
- 6) Zwiększenie zarówno temperatury jak i czasu starzenia sztucznego prowadzi do podwyższania twardości materiału, zarówno w strefie mieszania jak i materiale bazowym



Rys. 15. Własności mechaniczne stopu AlSi7Mg0,3 po procesie PWPP (stan T6 – materiał przesycony i starzony sztucznie w 160 °C przez 20 h)



Rys. 16. Własności mechaniczne stopu AlSi7Mg0,3 po procesie PWPP (stan T6 – materiał przesycony i starzony sztucznie w 180 °C przez 6 h)



- 7) Prędkość obrotowa narzędzie nie ma wyraźnego wpływu na własności mechaniczne stopu po obróbce cieplnej
- 8) Za najefektywniejsze parametry procesu starzenia można uznać wygrzewania w 160 °C przez 12-24 godzin oraz 180 °C przez 3-12 godzin.

## Podziękowanie

Badania zostały zrealizowane dzięki dofinansowaniu Unii Europejskiej nr projektu: POIG.01.01.02-00-015/09-00

## Literatura

- [1] Polmear, I. (2007). *Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals*, Elsevier, Amsterdam.
- [2] Zolotarevsky, V.S., Belov, N.A., Glazoff, M.V. (2006). *Casting Aluminum Alloys*, Elsevier, Amsterdam.
- [3] Knych, T., Mamala, A., Uliasz, P. (2010). Badania nad procesem usuwania wad odlewniczych w wyrobach ze stopów aluminium za pomocą metody PWPP, *Rudy i Metale Nieżelazne* nr 7, s. 431–435.
- [4] Uliasz, P., Blicharski, M., Knych, T. (2011). Zastosowanie mieszania tarcowego materiału do obróbki warstwy wierzchniej wyrobu, *Inżynieria Materiałowa R. 32*, nr 4, s. 781–784.
- [5] Uliasz, P., Knych, T., Mamala, A., Smyrak, B. (2010). Sposób naprawy powierzchni odlewów i konstrukcja urządzenia do naprawy powierzchni odlewów, A1-386573, *Biuletyn Urzędu Patentowego* 12, s. 5-6.
- [6] Praca zbiorowa: *Aluminium*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1967.
- [7] PN-EN 1706 *Aluminium i jego stopy. Odlewy. Skład chemiczny i własności mechaniczne*, czerwiec 2006.

# Research on the Selection of Parameters of Heat Treatment of the Surface Layers of Aluminum Cast Alloys Deformed by PWPP Method

## Abstract

Al-Si-Mg cast alloys with a silicon content in the range of 4 to 24 % by weight (silumins) are among the most common materials used in the casting of non-ferrous metals. Their popularity is due to a large set of properties, inter alia, low density or high mechanical properties and casting properties. On the other hand, that uses characteristics of the technological process of this group of materials in the emergence of their porosity and microshrinkage which can be a source of cracks. The method allows the elimination of the negative effects of this group of defects is Surface High-Temperature Plastic Processing (PWPP method). Modification of the surface layer of the cast with this type of treatment is particularly desirable for the structural components of the transport industry, electrical engineering or in the building industry. These applications require a coherent castings, devoid of discontinuity of the surface layer of the structure and increased mechanical properties. One way to improve on the second properties is heat treatment, which consists of oversaturation and artificial aging. The paper presents research on the selection of optimal parameters of heat treatment time and temperature for the AlSi7Mg0,3 alloy after PWPP method.