

Paweł KAPŁON¹, Jacek PEZDA²

OBRÓBKA CIEPLNA ELEMENTU PRZELOTOWEGO UCHWYTU WAHLIWEGO

Streszczenie: W ramach badań będących przedmiotem niniejszej pracy przeprowadzono obróbkę cieplną nakładek wykonanych ze stopu aluminium-krzem (siluminu) AlSi7Mg zgodnie z przyjętym planem badań, przygotowanym w oparciu o ilość posiadanych odlewów. Następnie dokonano pomiaru twardości badanych odlewów. Na podstawie otrzymanych wyników dobrano optymalne parametry obróbki cieplnej nakładki gwarantujące uzyskanie istotnej poprawy jej twardości przy ograniczeniu czasów oraz temperatur przesycania i starzenia.

Słowa kluczowe: obróbka cieplna, twardość, analiza regresji, przesycanie, starzenie

HEAT TREATMENT OF A SWINGING THROUGH BRACKET

Summary: Within framework of the research being subject-matter of this study the heat treatment operation of an inserts made from aluminum-silicon alloy (silumin) of the AlSi7Mg grade was performed. The heat treatment was performed in accordance with adopted plan of the research, prepared basing on quantity of available castings. Based on obtained results, the optimal heat treatment parameters for the inserts were chosen to guarantee a significant improvement in the hardness with simultaneous reduction of times and temperatures of solutioning and ageing operations.

Keywords: heat treatment, hardness, regression analysis, solution heat treatment, aging

1. Wstęp

Aluminium i jego stopy są szeroko stosowanym materiałem konstrukcyjnym w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym, chemicznym, a także w budownictwie [1-3]. Za ich stosowaniem przemawia niski ciężar właściwy i dobre własności antykorozyjne, a także dobra odporność na kruche pękanie w niskich temperaturach. Ich atrakcyjność jest jednak ograniczona z powodu niskich parametrów mechanicznych w stanie surowym - bezpośrednio po procesie odlewania - takich jak np. twardość. Można temu zaradzić poprzez przeprowadzenie odpowiedniej obróbki cieplnej. Obróbka cieplna stopów aluminium jest powszechnie stosowanym procesem w praktyce przemysłowej. Szczególnie ważnym aspektem jest dobór takich

¹ inż., Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, pkaplon@ubb.edu.pl

² dr hab. inż., prof. UBB, Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, jpezda@ubb.edu.pl

parametrów procesu, które zapewnią uzyskanie optymalnych rezultatów przy minimum kosztów poniesionych na obróbkę cieplną

Typowa obróbka cieplna stosowana dla elementów odlewanych metodą grawitacyjną, wykonanych ze stopów aluminium to obróbka cieplna T6. Podstawę tej obróbki stanowi zmniejszający się zakres rozpuszczalności składników stopowych wraz z obniżeniem temperatury.

Obróbka ta składa się z następujących etapów:

- przesycanie - przeprowadza się je w celu rozpuszczenia faz zawierających Cu i Mg uformowanych podczas procesu krzepnięcia, homogenizacji składników stopowych oraz sferoidyzacji eutektycznych cząsteczek Si. Polega ono na nagrzaniu stopu do maksymalnej temperatury rozpuszczania drugiego składnika stopowego powyżej linii solvus (krzywa ogranicza obszar występowania roztworu stałego (α lub β)), wygrzewaniu w tej temperaturze przez okres wystarczający do przejścia do roztworu stałego nierozpuszczonych w aluminium składników stopowych (w ten sposób uzyskuje się przesycony roztwór stały, który jest metastabilny).
Podczas wygrzewania przesycającego stopów Al-Si zachodzi proces sferoidyzacji wydzieleni krzemu, czyli korzystna zmiana morfologii tych kryształów. Kryształy większe rosną kosztem mniejszych przy jednocześnie zachodzącej ich sferoidyzacji. Proces sferoidyzacji wydzieleni Si można podzielić na etap fragmentacji i rozpuszczania eutektycznych gałęzi silikonu oraz sferoidyzacji jego wydzieleni [4]. Związane jest to z dążeniem układu do obniżenia energii swobodnej Gibbsa. Rozrost cząstek jednej fazy prowadzi do obniżenia energii rozdziału faz, a kształt kulisty charakteryzuje się najniższą powierzchnią. Taki kształt kryształów eutektycznego Si zapewnia optymalny rozkład naprężeń podczas eksploatacji komponentów wykonanych z tego materiału, a także umożliwia tłumienie drgań. Przesycanie stopów aluminium odbywa się zazwyczaj w zakresie temperatur od 450°C do 575°C [5]. Odpowiedni dobór temperatury przesycań ma znaczenie w kontekście końcowych parametrów stopu, jakie otrzymuje się po obróbce. Im wyższa wartość temperatury przesycań stopu, tym wyższa jest jego twardość po zakończeniu obróbki. Dzieje się tak dlatego, że wraz ze wzrostem temperatury przesycań wzrasta rozpuszczalność substancji w osnowie. Wielkość temperatury przesycań jest jednak ograniczona obecnością pierwiastków Cu i Mg w stopie. Stopy zawierające dodatek miedzi muszą być przesycań w temperaturze niższej ze względu na ryzyko miejscowego stopienia niskotopliwych faz zawierających Cu [6]. Należy pamiętać, że aluminium jest materiałem, który topi się w stosunkowo niskiej temperaturze i wszelkie odchylenia względem zadanej temperatury obróbki cieplnej mogą mieć istotny wpływ na końcowe rezultaty. W przypadku stali różnice temperatur rzędu 30 - 50°C, w zależności od zakresu temperatur zastosowanej obróbki cieplnej, nie mają istotnego wpływu na końcowe parametry stali. Jednak w przypadku stopów aluminium odchylenia temperatury powyżej 10°C mogą już powodować istotne zmiany w strukturze takiego stopu i doprowadzić do sytuacji, gdy pożądane rezultaty obróbki staną się nieosiągalne [7].
- chłodzenie - zwykle do temperatury pokojowej, mające na celu spowodowanie zatrzymania w roztworze maksymalnej ilości elementów utwardzających oraz uzyskanie struktur charakteryzujących się jednorodnym rozkładem małych

wtrąceń, co pozwala na uzyskanie wysokich parametrów wytrzymałościowych stopu [5]. Chłodzenie powinno być na tyle szybkie aby „zamrozić” rozpuszczony składnik i nie dopuścić do jego ponownego wydzielenia się z roztworu. Niezależnie od czynnika chłodzącego, sposób schładzania jest dobierany optymalnie dla produkowanego detalu, tak aby zmniejszyć nadmierne odkształcenia. Gdy szybkość schładzania jest wystarczająco wysoka, substancja rozpuszczona jest zatrzymana w roztworze stałym, a wysoka ilość wakansów jest również zatrzymana. Z drugiej strony, gdy chłodzenie jest zbyt wolne, cząstki wytrącają się heterogenicznie na ziarnach lub dyslokacjach (liniowych defektach sieci krystalicznej atomów), co powoduje redukcję w przesycaeniu substancji rozpuszczonej i towarzyszącą temu niższą granicę plastyczności po starzeniu. Wadą szybkiego chłodzenia są naprężenia termiczne indukowane w odlewie. Gdy wymagana jest wolniejsza prędkość chłodzenia, to media takie jak olej, kąpiele solne lub roztwory organiczne często znajdują zastosowanie [6].

- starzenie- przeprowadza się w celu poprawy właściwości mechanicznych obrabianego stopu, dzięki wygenerowaniu jednorodnej dystrybucji małych wytrąceń, uzyskania faz koherentnych związanych z osnową oraz wydzielenia składników znajdujących się w nadmiarze w przesyconym roztworze. Proces starzenia można przeprowadzić na dwa sposoby. W zależności od temperatury w jakiej starzony jest stop rozróżnia się starzenie naturalne oraz starzenie sztuczne. Starzenie przeprowadzane w temperaturze bliskiej temperatury otoczenia to starzenie naturalne natomiast starzenie przeprowadzane w temperaturze podwyższonej to starzenie sztuczne. Proces starzenia sztucznego rozpoczyna się od nagrzania stopu do zadanej temperatury z zakresu 150°C - 210°C. To do jakiej temperatury stop aluminium zostanie nagrzany ma znaczący wpływ na jego końcowe parametry mechaniczne po zakończonej obróbce. Im wyższa temperatura starzenia tym szybciej z roztworu wydziela się drugi składnik znajdujący się w nim w nadmiarze. Należy jednak pamiętać, że im szybciej cząsteczki drugiego składnika wydzielają się z roztworu tym wydzielili się ich więcej, co w konsekwencji prowadzi do zmniejszenia umocnienia stopu po obróbce cieplnej. Podczas przetrzymywania stopu w podwyższonej temperaturze, dochodzi do wydzielenia się z roztworu składnika przesycającego w postaci drobnych faz o określonym stopniu dyspersji. Sekwencja wtrąceń, podobnie jak czas potrzebny do osiągnięcia szczytowej twardości różni się w zależności od składu chemicznego stopu. W stopach Al-Si-Mg rozpoczyna się od formowania kulistych stref GP składających się ze wzbogaconych atomów Mg i Si. Strefy te rozszerzają się i wydłużają do koherentnej fazy β'' mającej igiełkowaty kształt. Igiełki te rosną, aby stać się semikoherentnymi prętami (faza β'') i na koniec niekoherentnymi płytkami (stabilna faza β). Wysoka koncentracja nadmiarowego krzemu po schłodzeniu skutkuje niską proporcją fazy β'' Mg do krzemu [8]. Wysoka frakcja dostępnego krzemu jest wtedy konsumowana przez formowanie się fazy β'' a niska koncentracja krzemu pozostaje w roztworze stałym w osnowie. Koncentracja ta jest zbyt niska dla wydzielenia Si aby uformowały się one podczas początkowego procesu starzenia. Szczytowa granica plastyczności stopu rośnie, gdy rośnie koncentracja Mg w stopie, przy czym wzrost wartości granicy plastyczności jest liniowy aż do koncentracji Mg mającej wartość około 0,5 wt.%, podczas gdy wzrost granicy plastyczności jest znacząco zredukowany dla wyższych koncentracji Mg [9].

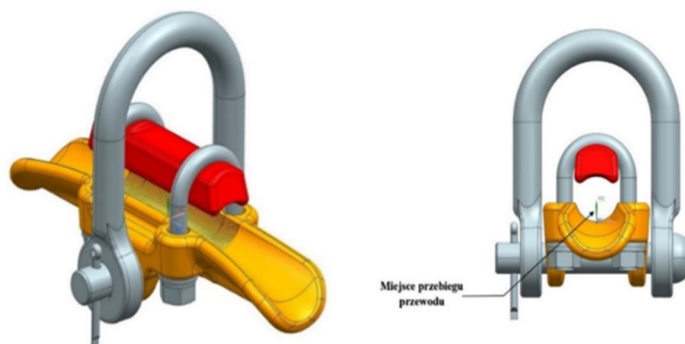
Powodzenie procesu starzenia zależy od tego czy prawidłowo przesycono stop, czyli czy uzyskano maksymalną koncentrację w roztworze stałym (w temperaturze otoczenia) pierwiastków tworzących fazy utwardzające podczas procesu starzenia. Twardość stopu jest pochodną zdolności wydzielenia do zatrzymywania mobilnych dyslokacji i jest zdeterminowana przez ich wielkość i dystrybucję oraz przez spójność tych wydzielenia z osnową. Małe i niezbyt twarde wydzielenia są zwykle ścinane przez ruchome dyslokacje. Wytrzymałość wydzielenia rośnie z ich wielkością w miarę jak są one ścinane przez dyslokacje. Dalszy rozrost wydzielenia sprawia, że proces ich ścinania staje się trudniejszy. Najwyższa twardość stopu jest generowana gdy istnieje równe prawdopodobieństwo, że dyslokacje przejdą do wytrącenia poprzez ścinanie i poprzez wyginanie linii dyslokacji, tworząc zamknięte pętle (mechanizm Orowana).

2. Obiekt badań

Obiektem badań był element (nakładka – rys. 1) przelotowego uchwytu wahliwego (rys. 2) stanowiącego osprzęt przesyłowych linii napowietrznych, służący do zawieszania przewodów na słupach trakcyjnych. Sposób prowadzenia tych linii w terenie naraża je na zmienne czynniki środowiskowe i klimatyczne (mróz, upał, szadź, deszcz), które oprócz parametrów wytrzymałościowych należy również uwzględnić w procesie ich projektowania.



Rysunek 1. Model CAD nakładki



Rysunek 2. Uchwyt przelotowy wahliwy

Zadaniem nakładki jest dociśnięcie jej dwiema obejmami zaciskowymi do przewodu i zablokowanie możliwości przesunięcia przewodu biegnącego pomiędzy dolną częścią nakładki a elementem przewodzącym, tzw. łódką. Długość nakładki w zależności od typu mieści się w zakresie 100-300 mm

Nakładka uchwytu wahliwego została odlana z odlewniczego stopu aluminium EN AC-42000 (AlSi7Mg). Stop ten cechuje się wysoką przewodnością cieplną,

umiarkowanie wysoką temperaturą topnienia oraz niezbyt wysoką przewodnością elektryczną [18]. W tabeli 1 przedstawiono skład chemiczny stopu.

Tabela 1. Skład chemiczny stopu EN AC-42000 (% wag.)

Si	Mg	Fe	Mn	Ti	Cu	Ni	Pb	Zn	Sn	Al
7.0	0.4	0.3	0.3	0.1	0.1	0.05	0.05	0.03	0.03	reszta

3. Przebieg i wyniki badań

Obróbka cieplna T6 składała się z przesycania po którym następowało chłodzenie (szybkie schłodzenie w wodzie o temperaturze 20°C), a następnie sztucznego starzenia z chłodzeniem na powietrzu. Wyrzewanie badanych elementów w trakcie operacji przesycania przeprowadzono w elektrycznym piecu oporowym, natomiast operację sztucznego starzenia przeprowadzono w suszarce laboratoryjnej SLN 53 pozwalającej na utrzymywanie temperatury wyższej niż temperatura otoczenia (maksymalnie 300°C). Przesycanie odlewów prowadzono w temperaturach 500°C, 520°C lub 540°C, w czasie 15, 30 lub 45 minut, natomiast starzenie sztuczne w temperaturze 170°C przez 1, 2 lub 3 godziny. Obróbce cieplnej T6 poddano 15 odlewów zgodnie z przyjętym planem badań Boxa-Behnkena (Tabela 2).

Tabela 2. Plan badań obróbki cieplnej nakładki

Numer układu	Temperatura przesycania, °C	Czas przesycania, min.	Czas starzenia, godz.
1	500	15	2
2	540	15	2
3	500	45	2
4	540	45	2
5	500	30	1
6	540	30	1
7	500	30	3
8	540	30	3
9	520	15	1
10	520	45	1
11	520	15	3
12	520	45	3
13	520	30	2
14	520	30	2
15	520	30	2

Pomiar temperatury w trakcie procesu obróbki wykonano za pomocą termoelementu Ni-NiCr (typ K) z dokładnością pomiarową $\pm 5^\circ \text{C}$ bezpośrednio w komorze pieca oporowego oraz w komorze suszarki. Pomiar i rejestracja temperatury wewnątrz komory pieca i komory suszarki oraz temperatura badanych elementów mierzone były w sposób ciągły. Pomiar twardości wykonano przed obróbką cieplną dla trzech odlewów (odlew surowy) oraz dla wszystkich 15 odlewów bezpośrednio po

wykonanej obróbce starzenia sztucznego. Pomiar Twardości Brinella wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 6506-1:2014-12 [10] przy pomocy twardościomierza Brinella typ PRL 82 pokazanego na rysunku 3, z kulką stalową o średnicy 10 mm, próbę przeprowadzono pod obciążeniem 9807 N utrzymywanym przez 30 sekund.



Rysunek 3. Twardościomierz Brinella PRL 82

Pomiar polegał na wykonaniu 3 odcisków w materiale odlewu (na sfrezowanej powierzchni) za pomocą metalowej kulki a następnie pomiarze długości dwóch średnic tego odcisku we wzajemnie prostopadłych kierunkach. Na podstawie średniej arytmetycznej długości zmierzonych w dwóch prostopadłych kierunkach dla średnic odcisków odczytano z tablic zawartych w normie PN-EN ISO 6506-1:2014-12 wartości twardości HBS 10/1000/30, które zestawiono w tabeli 3. Twardość próbki wyjściowej (nieobrobionej cieplnie) wynosiła 69 HBS 10/1000/30.

Tabela 3. Twardość odlewów HBS10/1000/30

Numer układu	Średnica odcisku, mm	Twardość HBS 10/1000/30
1	37,6	86,8
2	35,6	97,2
3	40,0	76,3
4	36,0	95
5	47,7	79,3
6	35,5	97,7
7	36,3	94,4
8	34,5	106
9	38,7	81,7
10	38,2	83,9
11	36,6	92
12	36,0	95
13	37,0	89,7
14	36,7	91,2
15	37,0	89,7

4. Wpływ parametrów obróbki cieplnej T6 na twardość stopu

Porównując otrzymane wartości twardości HB dla badanych odlewów, bezpośrednio po obróbce cieplnej T6 oraz odlewów w stanie surowym stwierdzono 53% wzrost twardości dla układu 8 (temperatura przesycania 540°C, czas przesycania 30 minut, temperatura starzenia sztucznego 170°C, czas starzenia sztucznego 3 godziny). Jest to rezultat powyżej średniej wartości obliczonej dla pozostałych odlewów. Średnia wartość twardości po obróbce T6 wynosiła 90 HBS 10/1000/30 czyli około 30% w stosunku do wartości wejściowej dla odlewu nieobrobionego cieplnie (69 HBS 10/1000/30). Najmniejszy wzrost twardości po obróbce T6 wystąpił dla układu numer 3 (temperatura przesycania 500°C, czas przesycania 45 minut, temperatura starzenia sztucznego 170°C, czas starzenia sztucznego 2 godziny). Twardość tego odlewu miała wartość 79 HBS 10/1000/30, co daje wzrost o około 14% w stosunku do twardości odlewu wyjściowego.

4.1. Analiza regresji

Uzyskane wartości twardości HBS 10/1000/30 po przeprowadzonej obróbce cieplnej T6 nakładki ze stopu AlSi7Mg oraz odpowiadające im parametry obróbki cieplnej wprowadzono do pakietu Statistica ver. 13 firmy StatSoft. Pozwoliło to na uzyskanie modeli w formie wielomianów drugiego stopnia opisujących wpływ parametrów obróbki cieplnej na twardość HBS 10/1000/30 badanego odlewu. Najczęściej stosowaną metodą aproksymacji i wyznaczania współczynników regresji jest metoda najmniejszych kwadratów. Jako zmienne niezależne przyjęto parametry obróbki cieplnej (tabela 2), a wyznaczana funkcja aproksymująca przyjęła następującą formę ogólną (1):

$$\hat{y} = \beta_0 - b_1 t_p + b_2 t_p^2 - b_3 \tau_p - b_4 \tau_p^2 + b_5 \tau_s + b_6 \tau_s^2 + b_7 t_p \tau_p - b_8 t_s \tau_s + b_9 \tau_p \tau_s \quad (1)$$

gdzie:

\hat{y} – aproksymowana wartość zmiennej zależnej (twardość HBS 10/1000/30),

β_0 – wyraz wolny,

t_p – temperatura przesycania, °C,

τ_p – czas przesycania, minuty,

τ_s – czas starzenia sztucznego, godzin,

b_i – współczynniki regresji ($i = 0, 1, \dots, 9$).

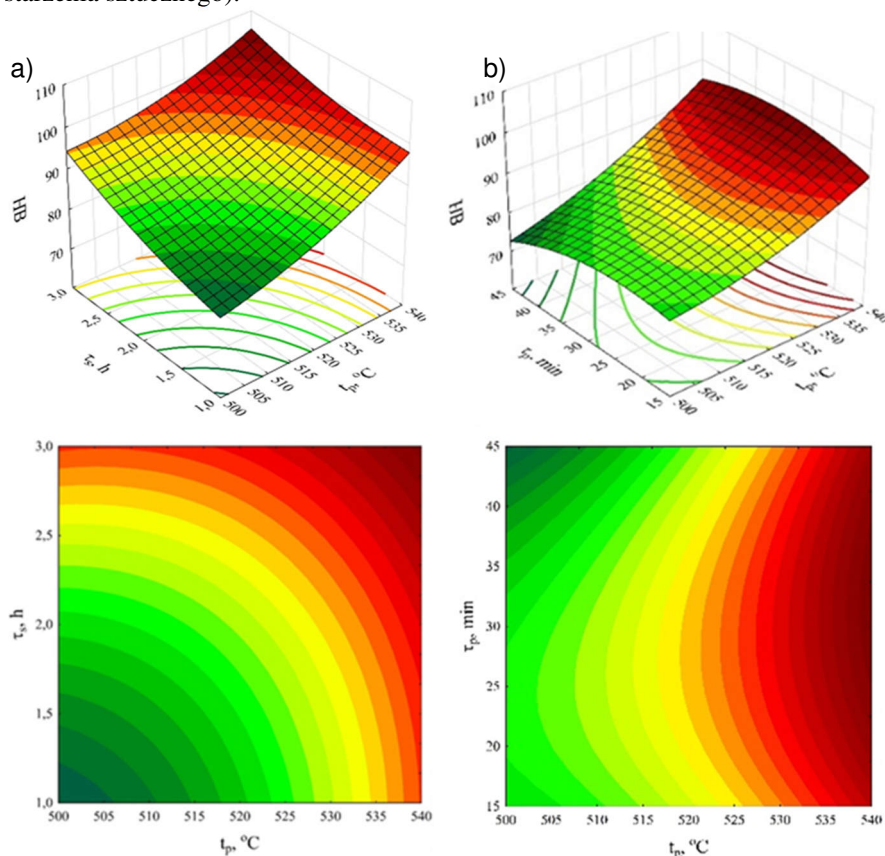
Uzyskane wyniki badań pozwoliły na sformułowanie zależności (2) w formie wielomianu stopnia drugiego, określającego wpływ parametrów procesu obróbki cieplnej na zmianę twardości HBS 10/1000/30 badanego odlewu.

$$\text{HBS } 10/1000/30 = 1531,50 - 5,94 t_p + 0,006 t_p^2 - 2,676 \tau_p - 0,017 \tau_p^2 + 42,450 \tau_s + 1,737 \tau_s^2 + 0,007 t_p \tau_p - 0,085 t_s \tau_s + 0,013 \tau_p \tau_s \quad (2)$$

Współczynniki: korelacji $R = 0,97$; determinacji : $R^2 = 0,95$; popr. $R^2 = 0,86$

Stopień korelacji (dopasowania) pomiędzy założonym modelem a danymi otrzymanymi z wykonanych pomiarów twardości został określony za pomocą

współczynnika korelacji liniowej R . W przypadku, gdy wartość współczynnika R jest bliska lub równa 1 to można stwierdzić, że praktycznie cała zmienność zmiennej zależnej może być objaśniona przez zmienne niezależne znajdujące się w modelu. Współczynnik determinacji R^2 , mierzy jaka część zmienności zmiennej zależnej \hat{y} została wyjaśniona przez funkcję regresji. Wartość współczynnika determinacji R^2 mieści się w przedziale $\langle 0;1 \rangle$. Poprawiony R^2 uwzględnia, że współczynnik determinacji R^2 jest obliczany z próby i jest trochę „za dobry”, jeśli uogólnimy wyniki obliczania regresji na populację. Poprawiony R^2 wskazuje jak dobrze dopasowane byłoby równanie regresji do innej próby z tej samej populacji wyników pomiarów. Wpływ wartości temperatur i czasów operacji przesycania, starzenia sztucznego na twardość HB 10/1000/30 badanych odlewów przedstawiono w formie graficznej na wykresach przestrzennych (rys.4-5) wygenerowanych przy pomocy pakietu Statistica ver. 13 firmy StatSoft. Wykresy otrzymane na bazie równania (2), pokazują jak wartości twardości HBS 10/1000/30 zmieniają się w zależności od parametrów obróbki cieplnej T6 (temperatur i czasów przesycania oraz czasu starzenia sztucznego).

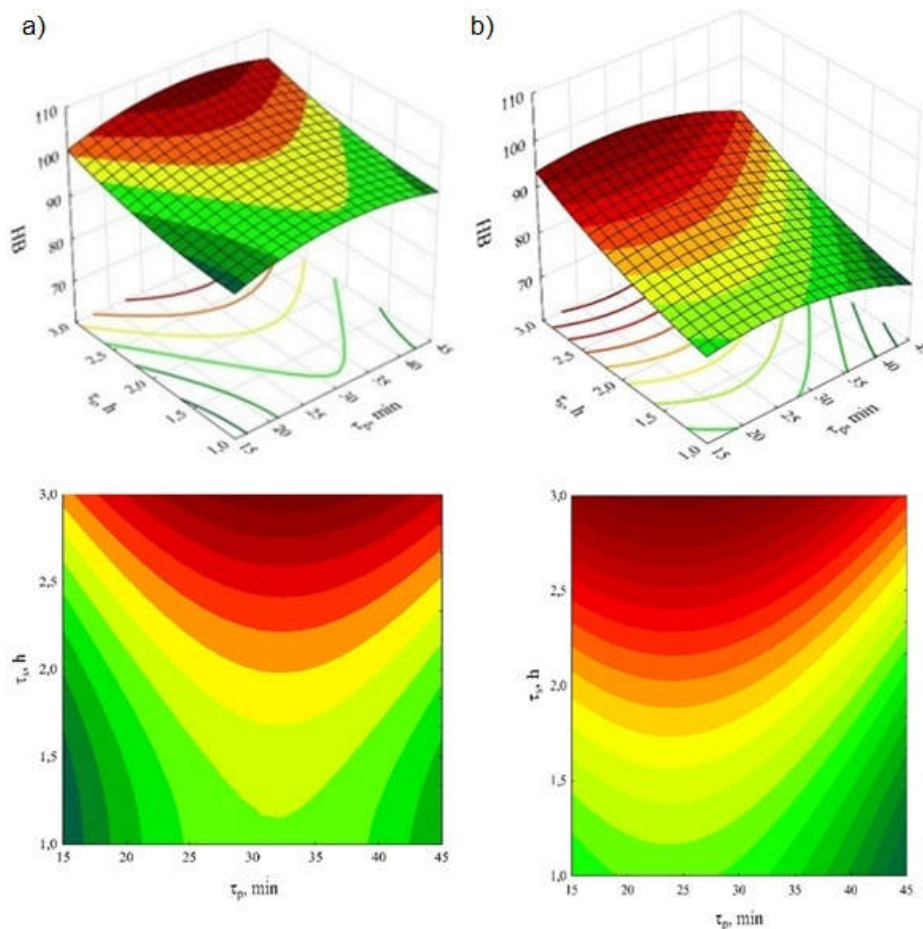


Rysunek 4. Wpływ parametrów operacji przesycania i starzenia na twardość HBS 10/1000/30 odlewu: a) t_p i τ_s , b) τ_p i t_p

Wraz ze wzrostem temperatury przesycaenia i czasu starzenia sztucznego (rys. 4a) wzrasta wartość twardości HB 10/1000/30. W przypadku przesycaenia trwającego 30 minut maksymalna wartość twardości występuje przy najdłuższym czasie sztucznego starzenia wynoszącym trzy godziny i najwyższej temperaturze przesycaenia wynoszącej 540°C (106 HBS 10/1000/30). Jest to twardość większa od typowej wartości uzyskiwanej dla stopu AlSi7Mg po obróbce cieplnej T6 [11].

Wzrost temperatury przesycaenia i czasu przesycaenia (rys. 4b) powoduje również podniesienie wartości twardości badanego odlewu. W przypadku starzenia trwającego 1 godzinę maksymalna wartość twardości HBS 10/1000/30 występuje przy czasie przesycaenia trwającym 30 minut i najwyższej temperaturze przesycaenia wynoszącej 540°C; (powyżej 97 HBS 10/1000/30).

Na rysunku 5 przedstawiono wpływ czasu przesycaenia i czasu starzenia na twardość HBS 10/1000/30 po przesycaeniu w temperaturach 500°C i 540°C.



Rysunek 5. Wpływ czasu przesycaenia i starzenia na twardość HBS 10/1000/30 odlewu dla temperatury przesycaenia: a) 540°C, b) 500°C

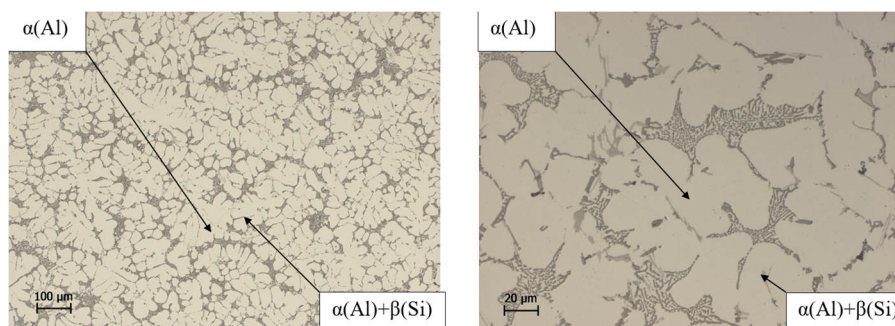
W przypadku temperatury przesycania 500°C (rys. 5b) największy wpływ na wzrost wartości twardości HBS 10/1000/30 ma czas trwania operacji starzenia sztucznego. W tym przypadku najwyższą twardości HBS 10/1000/30 otrzymano dla czasu przesycania 30 minut i czasu starzenia sztucznego 3 godziny (powyżej 94 HBS/10/1000/30). Krótsze czasy przesycania w tej temperaturze w połączeniu z krótszymi czasami operacji starzenia sztucznego skutkują mniejszymi wartościami otrzymanej twardości HBS 10/1000/30. W przypadku temperatury przesycania 540°C (rys. 5a) czas operacji starzenia sztucznego wpływa w mniejszym stopniu na wzrost twardości badanego stopu. Maksymalna wartość twardości HBS 10/1000/30 występuje po starzeniu przez 3 godziny gdy przesycanie trwało 20-30 minut (106 HB10/1000/30).

4.2. Analiza metalograficzna

Analiza metalograficzna wykonana została w celu oceny, jak zmieniła się mikrostruktura badanego stopu po przeprowadzonej obróbce cieplnej. Próbkę do analizy metalograficznej wycięto z odlewów nakładek w stanie bez obróbki cieplnej i po wykonanej obróbce cieplnej T6. Zdjęcia o powiększeniu 100x oraz 500x zostały wykonane za pomocą mikroskopu ZEISS Imager.M1m AX10 w Instytucie OBR BOSMAL w Bielsku-Białej.

Analizę metalograficzną wykonano dla odlewu nieobrobionego cieplnie oraz odlewów, które po obróbce cieplnej T6 który uzyskały najwyższą i najniższą twardość.

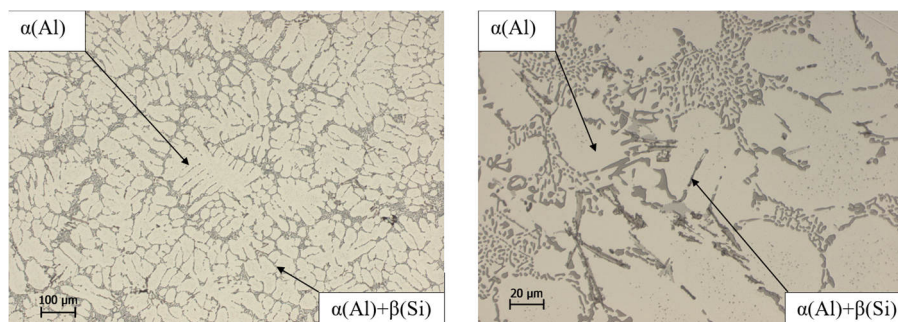
Na rysunku 7 przedstawiono strukturę stopu AlSi7Mg nieobrobionego cieplnie.



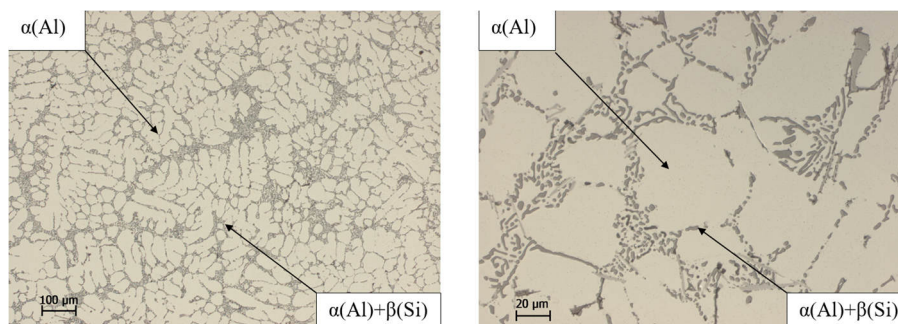
Rysunek 7. Mikrostruktura stopu AlSi7Mg nieobrobionego cieplnie

Mikrostruktura stopu AlSi7Mg w stanie surowym charakteryzuje się obecnością eutektycznych kryształów fazy β (Si) osadzonych w międzycendrycznych obszarach roztworu stałego fazy α (Al), który stanowią osnowę stopu.

Na rysunku 8 przedstawiono mikrostrukturę stopu AlSi7Mg dla odlewu po obróbce cieplnej T6 ($t_p=500^\circ\text{C}$, $\tau_p=45$ minut, $t_s=170^\circ\text{C}$, $\tau_s=2$ godziny) charakteryzującego się najmniejszą twardością (76 HBS 10/1000/30). Natomiast rysunek 9 przedstawia mikrostrukturę stopu AlSi7Mg po obróbce cieplnej T6 ($t_p=540^\circ\text{C}$, $\tau_p=30$ minut, $t_s=170^\circ\text{C}$, $\tau_s=3$ godziny), który uzyskał największą twardość (106 HBS 10/1000/30).



Rysunek 8. Mikrostruktura stopu AlSi7Mg po obróbce cieplnej charakteryzującego się najmniejszą twardością HB 10/1000/30



Rysunek 9. Mikrostruktura stopu AlSi7Mg po obróbce cieplnej charakteryzującego się najwyższą twardością HB 10/1000/30

Porównując mikrostruktury stopu można dostrzec bardziej rozbudowane kryształy krzemu. Obróbka cieplna stopu AlSi7Mg spowodowała zmiany w jego kształcie w porównaniu do odlewu w stanie surowym. W mikrostrukturze odlewu po obróbce cieplej widoczne są rozbudowane dendryty fazy $\alpha(\text{Al})$. Wydzielenia krzemu eutektycznego uległy koagulacji i częściowej sferoidyzacji, co wpłynęło na wzrost twardości [13].

5. Wnioski

Przeprowadzone badania potwierdzają, że obróbka cieplna T6 znacząco wpływa na zwiększenie twardości badanych odlewów; z poziomu 69 HBS 10/1000/30 dla odlewów bez obróbki cieplnej, do poziomu 80 - 106 HBS 10/1000/30 dla odlewów po przeprowadzonej obróbce cieplnej. Twardość odlewu po obróbce T6 wzrasta wraz ze wzrostem temperatury przesycania przy jednoczesnej możliwości skrócenia tej operacji obróbki cieplnej.

Uzyskana zależność (2) w formie wielomianu stopnia drugiego, opisuje wpływ parametrów obróbki cieplnej (temperatur oraz czasów przesycania i starzenia) na zmianę twardości analizowanego stopu. Wysoki współczynnik $R^2=0,95$ wskazuje na możliwość prognozowania twardości HBS 10/1000/30, uzyskiwanej w wyniku obróbki cieplnej T6, co pozwala zawęzić zakres parametrów tej obróbki na etapie jej

projektowania. Przesycając stop w temperaturze 500°C przez 15 minut i następnie starząc go w temperaturze 170°C przez 2 godziny możemy uzyskać twardość na poziomie 90 HBS 10/1000/30, czyli typową dla stopu AlSi7Mg po obróbce cieplnej T6.

Istotnym aspektem badań jest właściwe dostosowanie parametrów obróbki cieplnej w celu uzyskania optymalnych rezultatów przy minimalnych kosztach.

Analiza mikrostruktury odlewu surowego i odlewów po przeprowadzonej obróbce cieplnej T6 potwierdza, że w wyniku przesycania nastąpiła częściowa sferoidyzacja wydzielen krzemu, wpływająca pozytywnie na jego twardość.

LITERATURA

1. LUO A. A.: Recent advances in light metals and manufacturing for automotive applications. *CIM Journal* **12**(2021)3, 79-87. DOI: 10.1080/19236026.2021.1947088
2. LI S-S et. al: Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry. *Journal of Materials Research and Technology* **27**(2023), 944-983. DOI:10.1016/j.jmrt.2023.09.274
3. WANG Z. et al: Structural fire behaviour of aluminium alloy structures: Review and outlook. *Engineering Structures* **268**(2022), 114746. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114746
4. PEZDA J.: Heat treatment of a casting element of a through clamp to suspension of electric cables on line post insulators. *Archives of Foundry Engineering* **16**(2016)3, 89-94.
5. Serwis internetowy BODYCOTE Polska Sp. z .o.o.: <https://www.bodycote.com/pl/uslugi/obrobka-cieplna/przesycanie-i-starzenie/przesycanie-i-starzenie-stopu-aluminium/>, dostęp 10.05.2022
6. SHIVKUMAR, S., RICCI Jr., S., KELLER, C., APELIAN, D.: Effect of solution treatment parameters on tensile properties of cast aluminum alloys. *Journal of Heat Treating* **8**(1990)3, 63-70. DOI: 10.1007/BF02833067
7. Serwis internetowy Gleich Aluminium: <https://gleich.de/pl/produkty-2/en-aw-5083/>, dostęp 10.11.2023
8. ZHANG, D.L., ZHENG, L.: The quench sensitivity of cast Al-7 wt pct Si-0.4 wt pct Mg alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A* **27**(1996), 3983-3991. DOI: 10.1007/BF02595647
9. TAYLOR, J.A., ST JOHN, D.H., BARRESI, J., COUPER, M.J.: An empirical analysis of trends in mechanical properties of T6 heat treated Al-Si-Mg casting alloys. *International Journal of Cast Materials* **12**(2002), 419-430. DOI: 10.1080/13640461.2000.11819379
10. PN-EN ISO 6506-1:2014-12. Metale - Pomiar twardości sposobem Brinella - Część 1: Metoda badania.
11. MINFORD J. D.: *Handbook of Aluminum Bonding Technology and Data*, CRC Press, 1993.
12. POŁOCZEK Ł., DYBOWSKI B., RODAK K., JAROSZ R., KIEŁBUS A.: Wpływ parametrów utwardzania wydzieleniowego na strukturę i właściwości stopu AlSi7Mg. *Archives of Metallurgy and Materials* **60**(2015)4, 3035-3041.