

Otrzymano: 19 czerwca 2017 / Zaakceptowano: 17 października 2017 / Zamieszczono na WWW: 17 listopada 2017

*stop aluminium, właściwości mechaniczne,  
ATND, modyfikacja, krystalizacja*

Jacek PEZDA<sup>1</sup>

## **ZASTOSOWANIE METODY ATND DO OCENY WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH OKOŁOEUTEKTYCZNEGO STOPU $\text{AlSi12Cu2(Fe)}$**

Struktura i właściwości mechaniczne siluminów są w dużym stopniu zależne od szybkości chłodzenia, składu oraz operacji modyfikacji i obróbki cieplnej. W artykule opisano badania doświadczalne dotyczące zastosowania metody ATND (analiza termiczno-napięciowo- różnicowa) oraz analizy regresji do oceny jakości stopu  $\text{AlSi12Cu2(Fe)}$  modyfikowanego strontem na etapie jego przygotowania. Uzyskane zależności pomiędzy wartościami temperatury i napięcia w punktach charakterystycznych krzywych metody ATND umożliwiają predykcję właściwości mechanicznych ( $R_{sp0,02}$ ,  $R_m$ ,  $A_5$ ) badanego stopu. Pozwala to już na etapie przygotowania stopu ocenić jego właściwości mechaniczne bez konieczności prowadzenia pracochłonnych badań i wprowadzić ewentualne działania korygujące, mające na celu poprawę jego właściwości.

### **1. WPROWADZENIE**

Stopy aluminium-krzem (siluminy) to typowe materiały odlewnicze wyróżniające się małym ciężarem właściwym, dobrą lejninością, stosunkowo niską temperaturą topnienia oraz wysokim stosunkiem wytrzymałości do ciężaru właściwego (większym niż dla stali). Znajdują zastosowanie w motoryzacji, przemyśle maszynowym i gospodarstwa domowego oraz w lotniczych aplikacjach. Produkcja odlewanych elementów z tych stopów stanowi 85-90% ogólnej ilości odlewów produkowanych w przemyśle samochodowym [1,2].

Siluminy charakteryzują się miękką osnową  $\alpha$  (Al) i twardymi wydzieleniami krzemu. Standardowo zawartość krzemu w stopach Al-Si mieści się w granicach od 5 do 23%. Poza krzemem w skład tych stopów mogą wchodzić niewielkie dodatki magnezu (0,2-1,5%), miedzi (0,5-5%), niklu (0,5-3%) i manganu (0,2-0,5%). Pierwiastki zawarte w siluminach wywierają wpływ na właściwości mechaniczne poprzez zmianę struktury i przebiegu procesu krystalizacji, co jest szeroko opisane w opracowaniach [3-5].

Podstawowym czynnikiem wpływającym na zakres zastosowania stopów Al-Si do wytwarzania odlewów są ich właściwości mechaniczne bezpośrednio determinowane kształtem, wielkością i rozmieszczeniem kryształów krzemu. Kryształy te, występujące w postaci zwartych wydzielen pierwotnych, jak również rozgałęzionych płytek w eutektyce

<sup>1</sup> Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji

\* E-mail: jpezda@ath.bielsko.pl

$\alpha(\text{Al})+\beta(\text{Si})$ , są niemal czystymi kryształami ścianowymi tego pierwiastka [6], które tworzą obszary koncentracji naprężeń i inicjacji mikropęknięć.

Poprawa właściwości mechanicznych stopów Al-Si w zakresie klasycznych metod wiąże się przede wszystkim ze zmianą morfologii wydzielen Si poprzez: zastosowanie modyfikacji stopu, utrzymanie odpowiedniej temperatury przegrzania i zalewania oraz doskonalenie procesów obróbki cieplnej.

Pojęcie modyfikowania interpretuje się jako wprowadzenie do ciekłego metalu nieznacznych dodatków w celu osiągnięcia zmiany struktury odlewu. Niekiedy przyjmuje się, że wprowadzenie modyfikatorów różni się od wprowadzania dodatków stopowych stężeniem tych pierwszych, które ogranicza maksymalna zawartość 0,1% masy [7].

Najczęściej obecność w ciekłym metalu pierwiastków w niewielkiej ilości (w postaci wolnej lub związanej) charakteryzuje się określonym czasem oddziaływania na proces krystalizacji. Jeżeli po przetopieniu – niekiedy kilkukrotnym, lub zastosowaniu innych zabiegów uszlachetniających ciekły metal, osiągnięty efekt zmiany struktury po pewnym czasie zanika, mówi się o modyfikacji; jeżeli efekt ten zachowuje określoną stabilność – dotyczy to wprowadzania dodatków stopowych. W wielu przypadkach pojęcie „modyfikator” utożsamia się z określeniem „mikrododatek” bądź „mikroskładnik” stopowy.

Wprowadzenie do ciekłego stopu niewielkich dodatków modyfikatora powoduje zmianę pierwotnie grubej, iglastej postaci kryształów Si w postać drobną i zwartą. Jakość modyfikacji struktury jest zależna od prawidłowego dozowania modyfikatora, temperatury metalu i czasu upływającego od modyfikacji do zakrzepnięcia stopu [5,6]. To właśnie modyfikacja, zapoczątkowana w 1921 przez Pacz'a [8], umożliwiła szerokie zastosowanie odlewniczych stopów aluminium, a przede wszystkim siluminów.

W siluminach pod- i okołoeutektycznych modyfikacja powoduje zmianę morfologii wydzielen kryształów krzemu z płatkowych do włóknistych i sferycznych oraz zmniejsza odległość międzyfazową w eutektyce  $\alpha(\text{Al})+\beta(\text{Si})$ , natomiast w siluminach nadeutektycznych, poprzez wprowadzenie aktywnych zarodków krystalizacji, powoduje rozdrobnienie pierwotnych kryształów krzemu. Spośród modyfikatorów praktyczne zastosowanie dla siluminów pod- i okołoeutektycznych znalazły: Na, Sr i Sb [5,9-12], jako modyfikatory długotrwałego działania wpływające na zmianę morfologii Si oraz Ti i B, wpływające na morfologię dendrytów Al, natomiast dla siluminów nadeutektycznych P, Bi i Ti [11,12].

Jedną z najbardziej rozpowszechnionych metod służących do oceny i oszacowania wielkości ziarna, stopnia zmodyfikowania stopu oraz temperatury przemian fazowych stopu jest analiza termiczna, polegająca na rejestracji temperatury w czasie procesu krzepnięcia stopu. Często jednak zwykła analiza termiczna nie jest wystarczająco czuła do określenia zachodzących procesów cieplnych i wówczas bardziej pomocna staje się równolegle wykreslana krzywa obrazująca pochodną  $dt/d\tau$ , która uwypukla mniej wyraźne zmiany występujące na krzywej stygnięcia  $t=f(\tau)$  [13] (metoda analizy termiczno-derywacyjnej – ATD). Oprócz tych metod są stosowane również inne metody oparte na efektach: termicznych (termiczna analiza różnicowa- DTA, różnicowa kalorymetria skaningowa – DSC [14,15]), termiczno-elektrycznych (połączenie metody termiczno-derywacyjnej z elektryczno-derywacyjną - ATD-AED [16,17]) oraz termiczno-napięciowych (ATND) [18,19].

Analiza ATND została opracowana w Katedrze Technologii Bezwiórowych ATH w Bielsku-Białej, jako nowatorska metoda analizy procesu krystalizacji. Powstała z połączenia metody ATD i pomiaru napięcia powstającego podczas krystalizacji i przemian fazowych badanych stopów odlewniczych, uzupełniając informacje o przemianach struktury stopu. Powstające napięcie mieści się w zakresie  $\pm 5$  mV. Sondy pomiarowe mierzą różnicę potencjałów w objętości badanej próbki. Połączenie tych dwóch metod daje wyraźniejszy obraz zmian zachodzących w czasie krystalizacji i krzepnięcia stopu.

W trakcie pomiaru rejestrowane jest powstające napięcie i temperatura badanej próbki. Przebieg procesu krystalizacji przedstawiony w postaci wykresu tworzonego w czasie krzepnięcia stopu w sposób szybki i dokładny odzwierciedla jego zmiany struktury w czasie krzepnięcia (powstawanie faz i eutektyk). W metodzie ATND krzywe termiczne ( $t$  i  $dt/d\tau$ ) są uzupełniane krzywymi napięciowymi ( $U$  i  $dU/d\tau$ ).

W przedstawionej pracy wykorzystano autorską metodę analizy termiczno-derywacyjno-napięciowej (ATND) oraz analizę regresji w celu uzyskania matematycznych zależności pozwalających na predykcję właściwości mechanicznych siluminu  $AlSi_{12}Cu_2(Fe)$  modyfikowanego zaprawą  $AlSr_{10}$ .

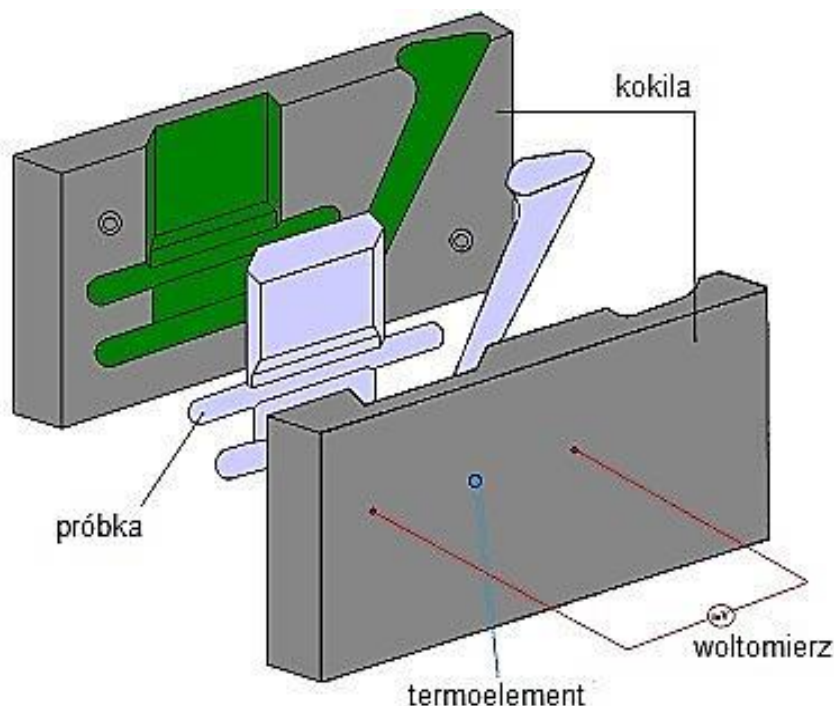
## 2. METODOLOGIA BADAŃ

Stop  $AlSi_{12}Cu_2(Fe)$  zaliczany jest do stopów wieloskładnikowych powszechnie wykorzystywanych w przemyśle odlewniczym. Nazywany jest stopem okołoeutektycznym, ponieważ krzem występuje w ilości bliskiej eutektycznej. W badaniach zastosowano stop, którego skład chemiczny podano w tabeli 1. Skład chemiczny stopu określono przy użyciu metody spektrometrycznej (spektrometr emisyjny ze wzbudzeniem jarzeniowym typ GDS 850A) w IMN OML w Skawinie.

Tabela 1. Skład chemiczny badanego stopu  
Table 1. Chemical composition of the investigated alloy

Skład chemiczny (% wag.)											
Si	Fe	Cu	Zn	Ti	Mn	Ni	Sr	Pb	Cr	Mg	Al
11,89	0,805	2,22	0,32	0,018	0,15	0,036	0,045	0,036	0,036	0,163	reszta

Badany stop topiono w elektrycznym piecu oporowym w temperaturze 740-760°C. Następnie przeprowadzono rafinację z zastosowaniem preparatu rafinującego (Rafal 1) w ilości 0,4% masy wsadu. Oczyszczony stop po usunięciu tlenków i żużla z lustra metalu modyfikowano zaprawą  $AlSr_{10}$  w ilości 0,6% masy wsadu. Temperaturę ciekłego stopu utrzymywano na poziomie 720-740°C. Odlewy doświadczalne (próbki do badania właściwości mechanicznych) odlewano do formy metalowej, którą przystosowano do kontroli przebiegu procesów krystalizacji metodą ATND (rys. 1).



Rys. 1. Schemat kokili do badań metodą ATND  
 Fig. 1. Scheme of metallic mould to tests with ATND method

Na rysunku 2 przedstawiono krzywe krystalizacji badanego stopu, zarejestrowane przy użyciu metody ATND, z zaznaczonymi punktami charakterystycznymi dla krzywej termicznej ( $t_1 - t_3$ ) i krzywej napięciowej ( $U_1 - U_3$ ).

Stacyczną próbę rozciągania badanego stopu przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej firmy Schenck zgodnie z normą EN ISO 6892-1:2010. Do pomiaru wydłużenia stosowany był Extensometr Schenck – DSA 25/10M, o parametrach: baza 24,9 mm, zakres pomiarowy wydłużenia  $\pm 2,5$  mm.

Pomiaru twardości metodą Brinella dokonano według PN-EN ISO 6506-1:2008 przy użyciu twardościomierza Brinella typu PRL 82, kulką o średnicy 10 mm przy obciążeniu 9800 N utrzymywanym przez 30 sekund.

Analiza regresji oparta na metodzie najmniejszych kwadratów, poprzez stosowanie różnych postaci funkcji, ma na celu liczbowe określenie wpływu zmiennych objaśniających (niezależnych) na zmienną objaśnianą (zależną). Formalnym zapisem tego wpływu są funkcje regresji, które określają sposób przyporządkowania wartości zmiennej zależnej określonym wartościom zmiennej niezależnej.

Jako funkcję obiektu badań przyjęto wielomian o postaci (1)

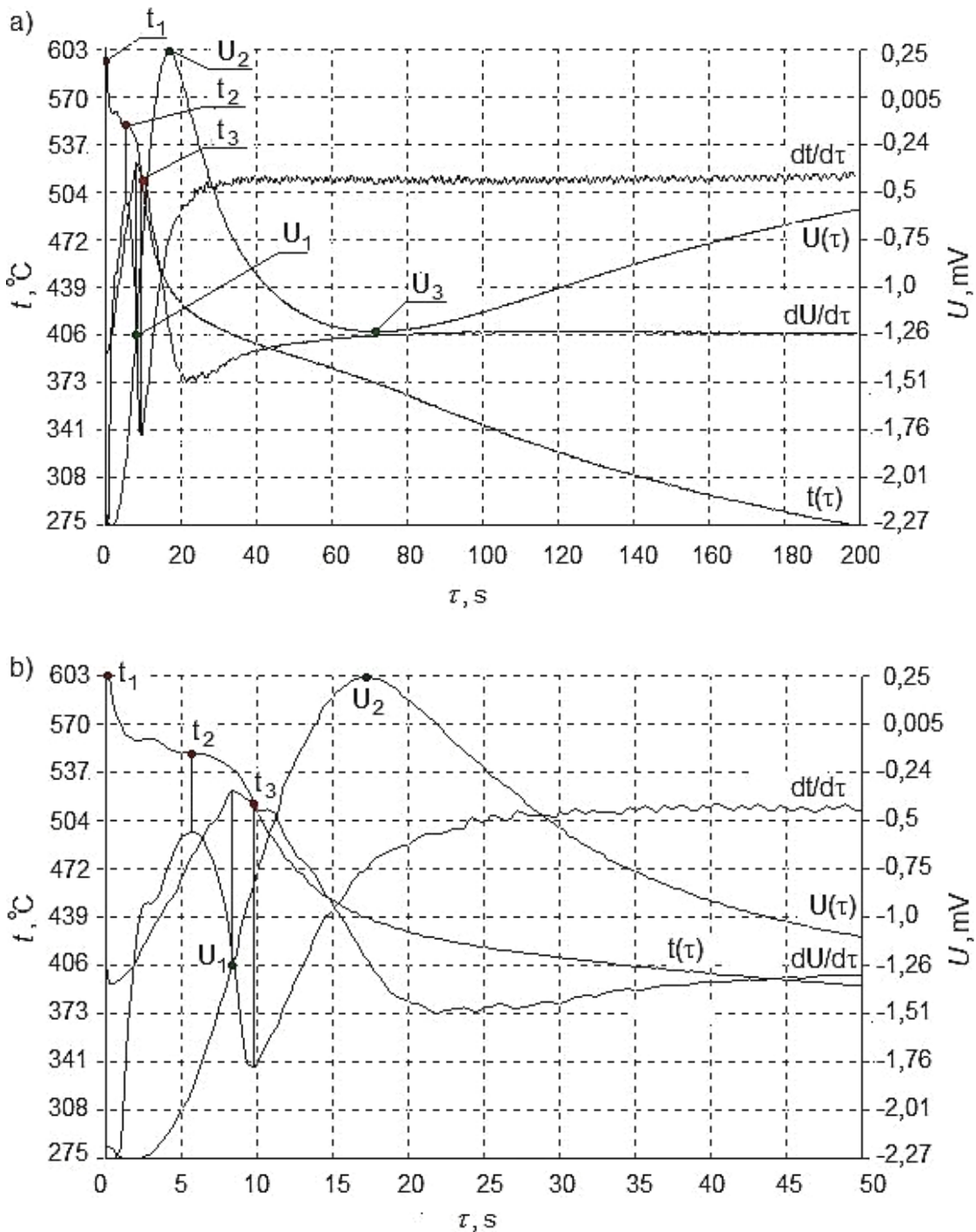
$$z = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_nx_n \pm \varepsilon \quad (1)$$

gdzie:  $z$  - zmienna zależna ( $R_{sp0,02}$ ,  $R_m$ ,  $A_5$ ),

$x_1, x_2, \dots, x_n$  - zmienne niezależne ( $t_1-t_4$ ,  $U_1-U_4$ ),

$b_0, b_1, \dots, b_n$  - estymatory regresji,

$\varepsilon$  - błąd standardowy estymacji.



Rys. 2. Krzywe metody ATND z zaznaczonymi punktami charakterystycznymi dla badanego stopu: a) pełny przebieg procesu krystalizacji, b) powiększenie początkowego fragmentu wykresu

Fig. 2. Curves from ATND method with marked characteristic points for the investigated alloy: a) complete course of crystallization, b) magnification of initial part of the graph

Na podstawie uzyskanych wartości punktów charakterystycznych z krzywych metody ATND (zmiennie niezależne) oraz określonych właściwości mechanicznych (zmiennie zależne) przeprowadzono analizę regresji przy użyciu komputerowego pakietu STATISTICA firmy StatSoft.

### 3. WYNIKI BADAŃ

W tabeli 2 przedstawiono uzyskane wartości właściwości mechanicznych dla stopu AlSi12Cu2(Fe) po przeprowadzonych zabiegach rafinacji i modyfikacji dla 51 próbek.

Tabela 2. Właściwości mechaniczne badanego stopu  
Table 2. Mechanical properties of the investigated alloy

$R_{sp0,02}$ , MPa	$R_m$ , MPa	$A_5$ , %
82-105	230-288	1,3-6

W wyniku przeprowadzonej analizy regresji uzyskano zależności (2-9), przedstawiające wpływ wartości punktów charakterystycznych na zmianę właściwości mechanicznych badanego stopu.

#### 3.1. GRANICA SPRĘŻYSTOŚCI $R_{sp0,02}$

Model kompletny dla parametru  $R_{sp0,02}$  przedstawiono równaniem (2).

$$R_{sp0,02} = 235,4 + 0,14t_1 - 0,18t_2 - 0,23t_3 + 2,4U_1 - 2,48U_2 + 0,62U_3 \pm 2,31 \text{ MPa} \quad (2)$$

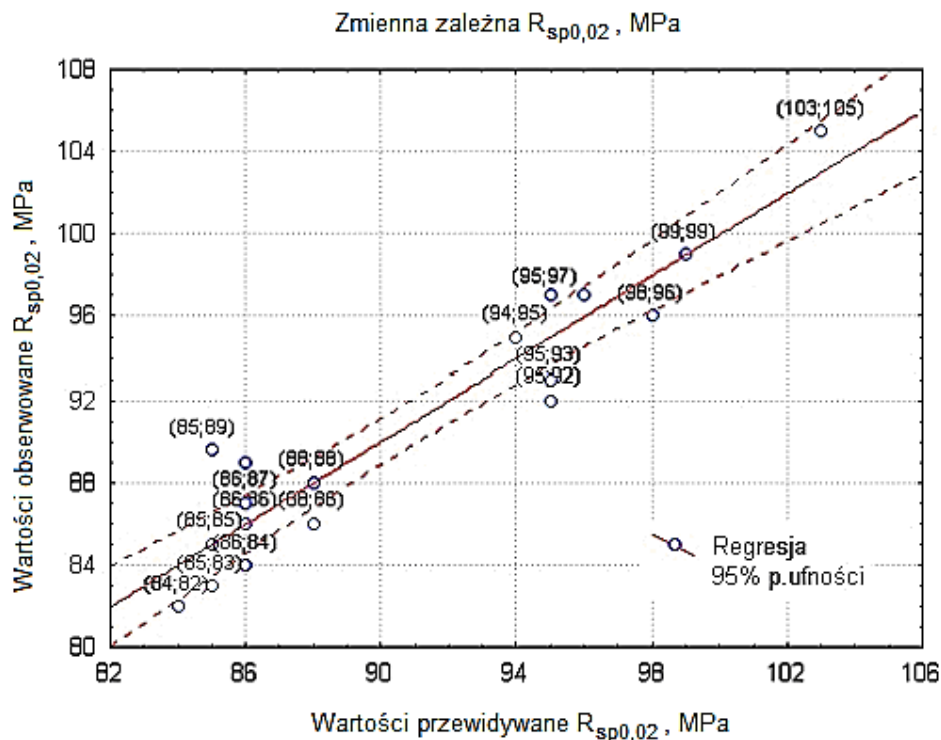
Uzyskano współczynnik determinacji  $R^2=0,91$  oznaczający, że aż 91% ogólnej zmienności  $R_{sp0,02}$  jest wyjaśnione przez model. W przedstawionym modelu tylko wyraz wolny i  $t_1$  spełniają warunek istotności, wszystkie pozostałe zmienne nie spełniają warunku istotności ( $p < \alpha = 0,05$ ). Przeprowadzona analiza wariancji potwierdza łączny efekt oddziaływania zmiennych niezależnych na zmienną zależną  $R_{sp0,02}$ , jako statystycznie istotny, ponieważ spełniony jest warunek –  $F_{obl} > F_{(\alpha; df1; df2)}$  ( $F_{obl} = 19,66 > F_{(0,05; 6; 11)} = 3,09$ ).

W celu wyeliminowania zmiennych o nieistotnym udziale wykonano analizę regresji krokowej wstecznej. Równanie regresji dla wartości  $R_{sp0,02}$ , po eliminacji zmiennych przyjmuje postać (3):

$$R_{sp0,02} = 181,1 + 0,1t_1 + 0,28t_2 \pm 2,27 \text{ MPa} \quad (3)$$

Otrzymano równanie zawierające tylko trzy zmienne (łącznie z wyrazem wolnym) spełniające warunek istotności. Współczynnik determinacji  $R^2$  uległ zmianie na 0,88. Analiza wariancji potwierdza, że łączny efekt oddziaływania zmiennych niezależnych (objaśniających) na zmienną zależną (objaśnianą) jest statystycznie istotny, ponieważ spełniony jest warunek –  $F_{obl} > F_{(\alpha; df1; df2)}$  ( $F_{obl} = 58,97 > F_{(0,05; 2; 15)} = 3,68$ ). Wartość testu jest wysoka sprawiając, że krytyczny poziom istotności  $p$  ma znikomą wartość. Rysunek 3

przedstawia jak kształtują się wartości przewidywane (z modelu) i wartości obserwowane (z próby) dla zmiennej zależnej  $R_{sp0,02}$ .



Rys. 3. Wykres wartości przewidywanych i obserwowanych zmiennej  $R_{sp0,02}$   
 Fig. 3. Diagram of anticipated and observed values of  $R_{sp0,02}$  variable

### 3.2. WYTRZYMAŁOŚĆ NA ROZCIĄGANIE $R_m$

Model kompletny dla parametru  $R_m$  przedstawia równanie (4)

$$R_m = -697 - 0,006t_1 + 4,08t_2 - 2,47t_3 + 1,31U_1 - 12,62U_3 \pm 4,84 \text{ MPa} \quad (4)$$

Uzyskano współczynnik determinacji  $R^2$ : 0,88 oznaczający, że 88% ogólnej zmienności wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  zostało wyjaśnione przez model. Poprawiony współczynnik determinacji  $R^2$  wynosi 0,82. W przedstawionym modelu kompletnym tylko dwie zmienne „temperaturowe” spełniają warunek istotności, oraz wyraz wolny. Pozostałe są zmiennymi o nieistotnym udziale, które nie spełniają warunku istotności ( $p < \alpha = 0,05$ ). Analiza wariancji potwierdza, że z ogólnej sumy kwadratów zmiennej  $R_m$  tylko 12% zmienności nie jest wyjaśnione regresją, a statystyczna istotność efektu oddziaływania zmiennych niezależnych na zmienną zależną  $R_m$  jest spełniona na poziomie  $p = 0,00014$  ( $F_{obl} > F_{(\alpha; df1; df2)}$  ( $F_{obl} = 14,0 > F_{(0,05; 6; 11)} = 3,09$ )).

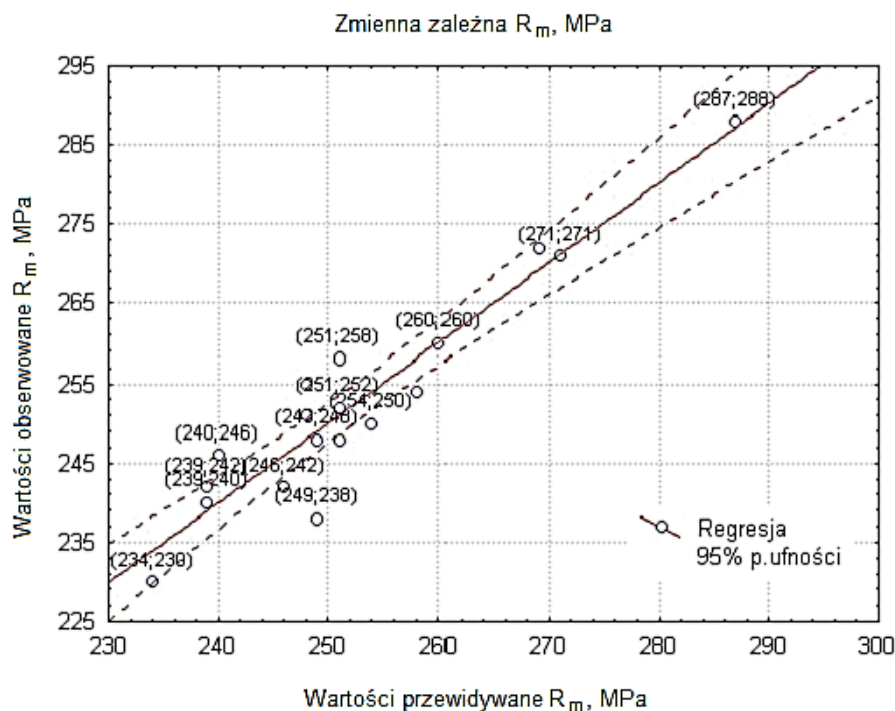
W modelu kompletnym znajdują się zmienne o udziale nieistotnym, które podlegają eliminacji. Analizę zakończono po wyeliminowaniu dwóch zmiennych: temperaturowej –  $t_1$  i napięciowej –  $U_2$ . Zaprezentowana równaniem (5), zależność dla wytrzymałości na

rozciąganie  $R_m$  zawiera pięć zmiennych (w tym wyraz wolny), spełniających warunek istotności ( $p < \alpha = 0,05$ ).

$$R_m = -703,8 + 4,16t_2 - 2,54t_3 + 11U_1 - 12,23U_3 \pm 5,4 \text{ MPa} \quad (5)$$

Współczynnik determinacji  $R^2$  pozostał bez zmiany i wynosi 0,88, a poprawiony współczynnik  $R^2$ , będący miarą porównawczą dla modeli z różną ilością zmiennych wynosi 0,84.

Analiza wariancji potwierdza statystyczną istotność łącznego efektu oddziaływania zmiennych niezależnych na zmienną zależną przy śladowym poziomie krytycznym  $p = 0,000006 < \alpha = 0,05 - F_{\text{obl}} > F_{(\alpha; df1; df2)}$  ( $F_{\text{obl}} = 24,65 > F_{(0,05; 4; 13)} = 3,17$ ). Łączne oddziaływanie jest nie tylko istotne, ale i bardzo silne. Rysunek 4 przedstawia jak kształtują się wartości wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  przewidywane i wartości obserwowane (z próby).



Rys. 4. Wykres wartości przewidywanych i obserwowanych zmiennej  $R_m$

Fig. 4. Diagram of anticipated and observed values of  $R_m$  variable

### 3.3. TWARDOŚĆ HBS10/1000/30

Model kompletny dla parametru  $HBS10/1000/30$  przedstawia równanie (6)

$$HBS10/1000/30 = -34 + 0,04t_1 + 0,66t_2 - 0,51t_3 + 0,61U_1 + 1,8U_2 + 2,58U_3 \pm 1,61 \quad (6)$$

Pomimo występowania w modelu tylko dwóch zmiennych, których poziom istotności jest zadawalający, uzyskano wysoki współczynnik determinacji  $R^2 = 0,95$  oznaczający, że aż



95% ogólnej zmienności  $HBS10/1000/30$  zostało wyjaśnione przez model. Poprawiony współczynnik determinacji  $R^2$  wynosi 0,92. Analiza wariancji potwierdza, że tylko 5% zmienności nie jest wyjaśnione regresją. Statystyczna istotność efektu oddziaływania zmiennych niezależnych na zmienną zależną  $HBS10/1000/30$  jest spełniona  $p=0,000001 < \alpha=0,05$  ( $F_{obl} > F_{(\alpha; df1; df2)}$ ) ( $F_{obl}=36,23 > F_{(0,05; 6; 11)}=3,09$ ).

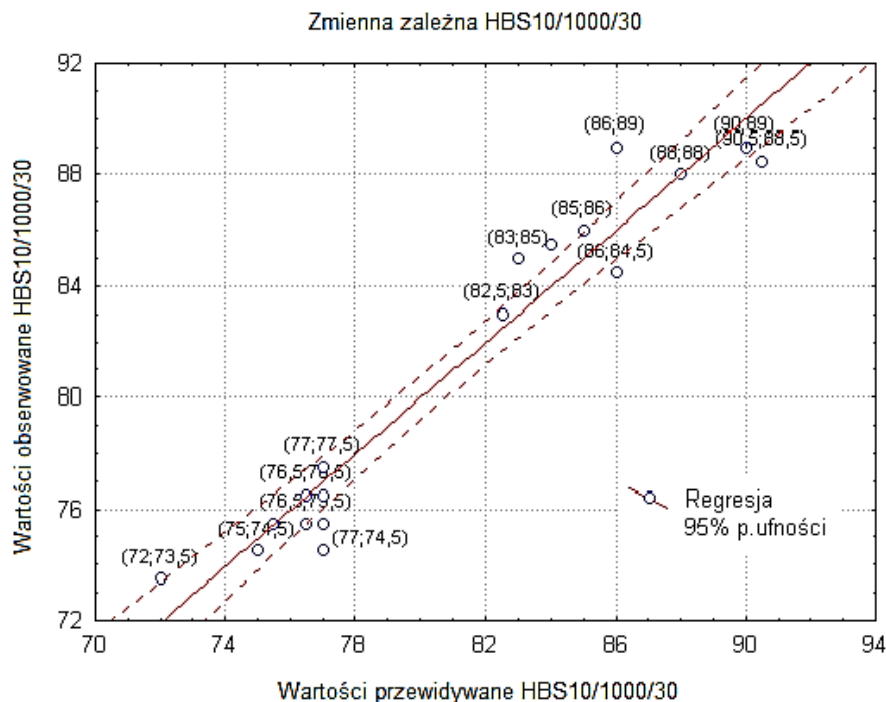
Eliminację zmiennych o nieistotnym udziale zakończono po usunięciu dwóch zmiennych. W uzyskanym równaniu (7) znalazło się pięć zmiennych (łącznie z wyrazem wolnym), z których tylko wyraz wolny przekroczył krytyczny poziom istotności  $\alpha=0,05$ .

$$HBS10/1000/30 = -38,6 + 0,78t_2 - 0,58t_3 + 2,85U_2 + 3,62U_3 \pm 1,63 \quad (7)$$

Analiza wariancji potwierdza, że tylko 6% zmienności nie jest wyjaśnione regresją oraz statystyczną istotność efektu oddziaływania zmiennych niezależnych na zmienną zależną  $HBS10/1000/30$  na znikomym poziomie krytycznym  $p=0,000001 < \alpha=0,05$  ( $F_{obl} > F_{(\alpha; df1; df2)}$ ) ( $F_{obl}=52,5 > F_{(0,05; 4; 13)}=3,17$ ).

Przyjmując dla zmiennych objaśniających średnie arytmetyczne wartości zmiennych niezależnych na podstawie równania (7) oszacowano procentowy względny półprzedział ufności dla oczekiwanej wartości twardości  $HBS10/1000/30$  wynoszący  $\delta_{yi}=0,5\%$  ( $< 5\%$ ), informujący o możliwości wnioskowania o twardości  $HBS10/1000/30$  równaniem (7). Odchylenie standardowe, jako procent średniej, wynoszące 1,9% wskazuje na możliwość szacowania wartości twardości  $HBS10/1000/30$ .

Rysunek 5 przedstawia jak kształtują się wartości twardości  $HBS10/1000/30$  przewidywane i wartości obserwowane (z próby).



Rys. 5. Wykres wartości przewidywanych i obserwowanych zmiennej  $HBS10/1000/30$

Fig. 5. Diagram of anticipated and observed values of  $HBS10/1000/30$  variable

#### 4. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań potwierdzono istnienie korelacji pomiędzy wartościami temperatury i napięć punktów charakterystycznych z krzywych metody ATND a właściwościami mechanicznymi ( $R_{sp0,02}$ ,  $R_m$  i  $HBS10/1000/30$ ) stopu  $AlSi12Cu2(Fe)$ , modyfikowanego strontem. Uzyskane zależności (3,5,7) umożliwiają predykcję właściwości mechanicznych badanego stopu przy poziomie istotności  $\alpha=0,05$ . Pozwala to na szybką kontrolę jakości stopu na etapie jego przygotowania.

#### LITERATURA

- [1] HURTALOVÁ L., TILLOVÁ E., CHALUPOVÁ M., 2013, *The structure analysis of secondary (Recycled) AlSi9Cu3 cast alloy with and without heat treatment*, Engineering Transactions, 61/3, 197-218.
- [2] MUELLER M.G., FORNABAIO M., ZAGAR G., MORTENSEN A., 2016, *Microscopic strength of silicon particles in an aluminium-silicon alloy*, Acta Materialia, 105, 165-175.
- [3] PIETROWSKI S., SZYMCZAK T., SIEMIŃSKA-JANKOWSKA B., JANKOWSKI A., 2010, *Selected characteristic of silumins with additives of Ni, Cu, Cr, Mo, W and V*, Archives of Foundry Engineering, 10/2, 107-126.
- [4] RZADKOSZ S., STASZCZAK L., 2007, *Effect of selected microadditives on mechanical properties of aluminum alloys*, Archives of Foundry Engineering, 7/1, 85-88. BIAŁOBRZESKI A., PEZDA J., CIUĆKA T., 2007, *Registration of crystallization process of ultra-lightweight Mg-Li alloys with use of ATND method*, Archives of Foundry Engineering, 7/3, 17-20.
- [5] WASILEWSKI P., 1993, *Siluminy - modyfikacja i jej wpływ na strukturę i właściwości*, Krzepnięcie Metali i Stopów, 21, Katowice.
- [6] PONIEWIERSKI Z., 1988, *Krystalizacja, struktura i właściwości siluminów*, WNT, Warszawa.
- [7] SOBCZAK J., 1997, *Podstawy syntezy stopów*, Instytut Odlewnictwa, Kraków.
- [8] PACZ A., 1921, US Patent No. 1387900.
- [9] MAKHLOUF M.M., GUTHY H.V., 2001, *The aluminum-silicon eutectic reaction: Mechanisms and crystallography*, Journal Light Metals, 2/1, 199-218.
- [10] PAN E.N., CHERNG Y.G., LIN C.A., CHIOU H.S., 1994, *Roles of Sr and Sb on silicon modification of A356 aluminum alloys*, AFS Transactions, 70, 609-617.
- [11] PIETROWSKI S., 2001, *Siluminy*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź.
- [12] SIGWORTH G.K., 1983, *Theoretical and practical aspects of the modification of Al-Si Alloys*, AFS Transactions, 91, 7-16.
- [13] JURA S., STUDNICKI A., PRZYBYŁ M., JURA Z., 2001, *Zastosowanie metody ATD do oceny jakości żeliwa sferoidalnego*, Archiwum Odlewnictwa, 1/1, 93-102.
- [14] LIU M., WU Z., YANG R., WEI J., YU Y., SKARET P.C., ROVEN H.J., 2015, *DSC analyses of static and dynamic precipitation of an Al-Mg-Si-Cu aluminum alloy*, Progress in Natural Science: Materials International, 25/2, 153-158.
- [15] SIKORA M., PIĄTKOWSKI J., 2007, *Zastosowanie analizy termicznej ATD i skaningowej DSC w badaniach topnienia i krzepnięcia stopów Al-Si*, Rudy i Metale Nieżelazne, 52/6, 317-321.
- [16] PEZDA J., DUDYK M., CIUĆKA T., WASILEWSKI P., 1998, *Wielomianowe modele właściwości mechanicznych stopów aluminium*, Krzepnięcie Metali i Stopów, 38, 131-136.
- [17] WASILEWSKI P., 2003, *Porównanie metod badania krzepnięcia i krystalizacji stopów metali*, Archives of Foundry, 3/10, 323-337.
- [18] BIAŁOBRZESKI A., PEZDA J., CIUĆKA T., 2007, *Registration of crystallization process of ultra-lightweight Mg-Li alloys with use of ATND method*, Archives of Foundry Engineering, 7/3, 17-20.
- [19] PEZDA J., 2013, *Determination through use of ATND method of impact strength of 359.0 alloy modified with strontium*, International Journal of Computational Engineering Research, 3/2, 82-85.

APPLICATION OF THE ATND METHOD TO ASSESSMENT OF MECHANICAL PROPERTIES OF  
NEAR EUTECTIC AlSi12Cu2(Fe) ALLOY

Structure and mechanical properties of silumins are highly dependent on cooling rate, composition and operations of modification and heat treatment. The present article describes experimental research concerning use of the ATND method (thermal-voltage-derivative analysis) and regression analysis to assessment of quality of AlSi12Cu2(Fe) alloy modified with strontium at the stage of its preparation. Obtained relationships between values of temperature and voltage in characteristic points on curves from ATND method enable prediction of mechanical properties ( $R_{0,02}$ ,  $R_m$ ,  $A_5$ ) of the investigated alloy. This allows, as early as in preparation stage of the alloy, to evaluate its mechanical properties without need of labour consuming tests, and to introduce possible corrective measures aimed at improvement of its properties.

Keywords: *aluminum alloy, mechanical properties, ATND, modification, crystallization*