

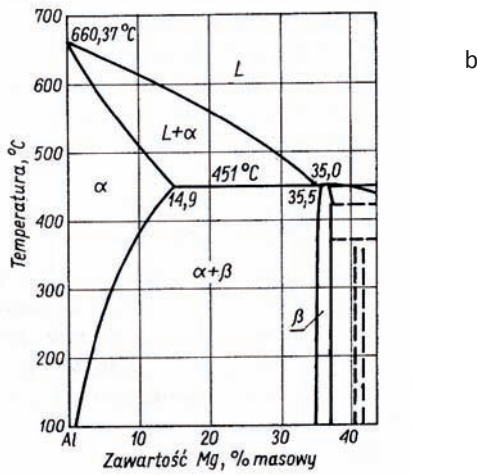
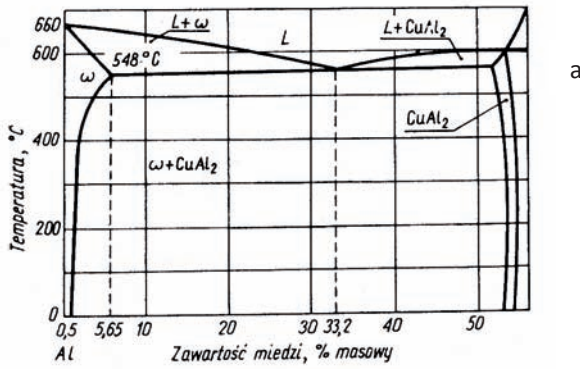
*Krzysztof Mrocza, Marcin Pezda, Zbigniew Zwolenik*

## **Badania wpływu różnych warunków obróbki cieplnej na właściwości mechaniczne stopu aluminium 2017A**

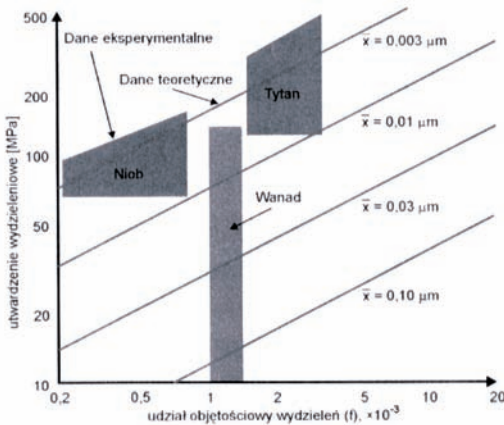
### **Wstęp**

Materiały metaliczne o małej gęstości są podstawowymi materiałami konstrukcyjnymi stosowanymi w wielu gałęziach przemysłu. Mają szerokie zastosowanie w przemyśle transportowym, szczególnie w lotnictwie [1] i przemyśle samochodowym [2]. Podstawowe materiały tej grupy to stopy na osnowie aluminium. Aluminium (nazwa chemiczna – glin) jest metalem, którego odkrycia w 1825 r. dokonał duński fizyk i chemik H.Ch. Oersted. Jest to metal o relatywnie małej gęstości  $2,7 \text{ Mg/m}^3$ . Jego temperatura topnienia, jako materiału konstrukcyjnego, również jest stosunkowo niska –  $660,4^\circ\text{C}$ , podobnie jak właściwości mechaniczne – mała twardość 18 HB, niska wytrzymałość na rozciąganie  $R_m = 47 \text{ MPa}$ , znaczna plastyczność – wydłużenie względne  $A = 30\text{--}45\%$  [3]. Z tych powodów aluminium czyste technicznie (99,9% Al) rzadko jest stosowane. Dynamiczny wzrost zastosowania aluminium w wyżej wymienionych gałęziach przemysłu nastąpił wraz z opracowaniem mechanizmów umacniania materiałów metalicznych – umocnienie: wydzieleniowe i dyspersyjne, dyslokacyjne, roztworowe i przez rozdrobnienie ziarna. W przypadku stopów aluminium stosowane są wszystkie wymienione mechanizmy umacniania, a szczególnie umocnienie wydzieleniowe. Jest to możliwe i szeroko technologicznie stosowane dzięki temu, że aluminium z niektórymi pierwiastkami tworzy roztwory o ograniczonej rozpuszczalności w stanie stałym. Zalicza się do nich głównie roztwory Al z Cu i Mg – na rysunku 1 przedstawiono układy równowagi faz Al-Cu i Al-Mg.

Optymalne umocnienie wydzieleniowe następuje jednak tylko wtedy, gdy powstające wydzielenia charakteryzują się dużą dyspersją, małymi wymiarami, równomiernym rozlokowaniem w sieci krystalicznej Al oraz koherentną granicą z osnową, tak aby możliwie duża ilość dyslokacji była zdolna do reakcji z wydzieleniami. Problemy, które towarzyszą osiągnięciu takiego stanu, to najczęściej metastabilny charakter wydzieleni, ich tendencja do koagulacji – a także w niektórych przypadkach – do segregacji po granicach ziaren, gdzie wydzielenia silnie przeciwdziałają zjawisku pełzania, ale w znacznie mniejszym stopniu umacniają materiał. Na rysunku 2 przedstawiono zależności teoretyczne oraz eksperymentalne wpływu wielkości cząstek umacniających oraz ich udziału w mikrostrukturze na wytrzymałość materiału.

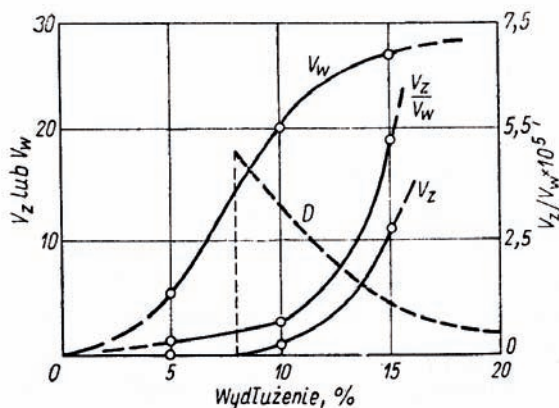


Rys. 1. Układ równowagi faz: a) Al-Cu, b) Al-Mg [4]



Rys. 2. Zależność utwardzenia wydzieleniowego od wielkości i udziału objętościowego wydzieli, według modelu Ashby-Orowana z naniesionymi danymi eksperymentalnymi [5, 6]

Proces umacniania materiału, po dobraniu właściwego składu chemicznego, wiąże się z jego obróbką. Są to głównie procesy obróbki cieplnej, choć w przypadku umocnienia przez rozdrobnienie ziarna [7, 8] materiałów, których osnową są metale, niewykazujące odmian alotropowych, konieczne jest zastosowanie odkształcenia plastycznego o kontrolowanym gnioście (znacznie przekraczającym zgniot krytyczny) tak, aby podczas wyżarzania uzyskać proces rekrytalizacji przebiegający przy dużej prędkości zarodkowania nowych ziaren (rys. 3).



Rys. 3. Zależności szybkości zarodkowania  $V_z$ , wzrostu zarodków  $V_w$  i wielkości ziarna  $D$  od stopnia odkształcenia [4]

Z kolei w przypadku umacniania wydzieleniowego konieczne jest przeprowadzenie stopu w stan roztworu przesyconego w odniesieniu do pierwiastka, którego wydzielania ulegają rozpuszczeniu w osnowie materiału [9]. Na przykładzie stopu Al-Cu pokazano to na rysunku 4. Taki stan stopu jest stanem metastabilnym, charakteryzującym się dążeniem układu (stopu) do obniżenia energii swobodnej przez pozbycie się (wydzielenie) z osnowy takiej ilości pierwiastka, aby uzyskać stężenie właściwe (stan nasycenia) dla danej temperatury, przy której znajduje się materiał [10]. Zdolność do dyfuzji danego pierwiastka zależna jest od kilku czynników i wyrażana ilościowo współczynnikiem dyfuzji  $D$ , przy czym:

$$D = D_0 \exp(-Q/RT),$$

gdzie

$D_0$  – stała,

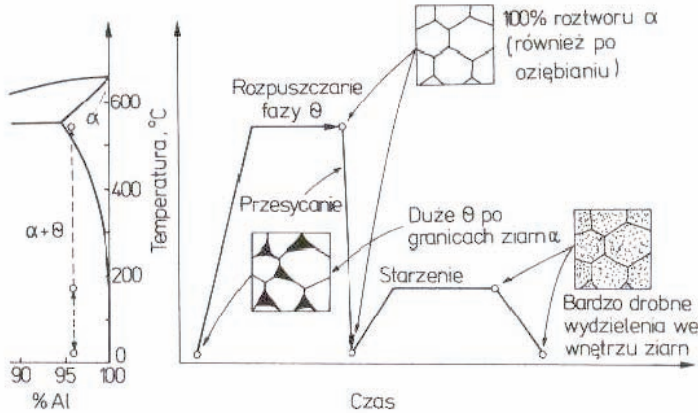
$Q$  – energia aktywacji dyfuzji [kJ/mol],

$R$  – stała gazowa,

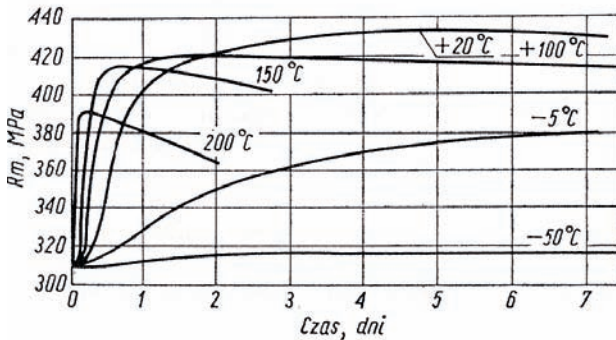
$T$  – temperatura [K].

Jak wynika z powyższego równania, zwiększenie intensywności dyfuzji następuje również przy wzroście temperatury. Większa intensywność dyfuzji skraca istotnie czas do utworzenia się wydzieleni umacniających, umożliwia również tworzenie się innego typu wydzieleni (bardziej stabilnych), ale o mniejszej dyspersji, co

zmniejsza efekt umocnienia. Na rysunku 5 pokazano wpływ temperatury i czasu na umacnianie się duralu<sup>1</sup>. Proces tworzenia się wydzieliń umacniających nazywany jest procesem starzenia sztucznego (przy podwyższonej temperaturze) lub naturalnego (przy temperaturze pokojowej).



Rys. 4. Schemat obróbki cieplnej, powodującej umocnienie wydzieleniowe stopu AlCu4 [10]



Rys. 5. Krzywe umocnienia duralu starzonego przy różnych temperaturach [4]

Nie zawsze jednak stopy uzyskują większą wytrzymałość w wyniku starzenia naturalnego. Lepsze efekty starzenia sztucznego mogą wynikać z konieczności wystąpienia wyższej temperatury niż pokojowa, aby doprowadzić do tworzenia się wydzieliń – najczęściej gdy skład chemiczny stopu jest bardziej złożony.

Dla większości stopów komercyjnych, tj. produkowanych masowo w różnym asortymencie, opracowano zalecenia obróbki cieplnej, dające najlepsze efekty umocnienia. Najczęściej jednak podane informacje dotyczą jedynie przedziału temperatur przesycania i starzenia, natomiast nie podaje się czasu procesu starzenia. Jest to o tyle istotne, że zbyt długie starzenie sztuczne może prowadzić do tzw. przestrzelenia, tj. spadku wytrzymałości i twardości materiału na skutek utraty koherencji

<sup>1</sup> Durale – stopy aluminium, najczęściej wieloskładnikowe, z udziałem Cu (do ok. 4,5% wag.).

z osnową i koagulacji wydzielen. Dlatego znajomość nie tylko zalecanych temperatur obróbki, ale i czasów jej prowadzenia jest ważna dla uzyskania optymalnych efektów umocnienia. W odniesieniu do zakresów temperatur obróbki cieplnej należy również wspomnieć o odstępstwach od podanych przedziałów i wpływie przeprowadzenia obróbki przy nieco wyższej lub nieco niższej temperaturze. Jest to istotne ze względu na praktykę przemysłową, a nawet laboratoryjną, gdyż trzeba brać pod uwagę np. bezwładność cieplną pieca – spadek temperatury po wprowadzeniu do pieca materiału o relatywnie większej masie oraz przegrzewanie powyżej zadanej temperatury, gdy sterowanie pieca stara się szybko podnieść temperaturę do zadanej wartości.

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu różnych temperatur przesycań i starzenia na umocnienie stopu aluminium 2017A.

## Metodyka badań

Materiał do badań to stop aluminium EN AW-2017A (PN-EN: 573-3:2009). Jest to stop przeznaczony do przeróbki plastycznej. Głównym dodatkiem stopowym jest miedź, dlatego jest zaliczany do grupy stopów serii 2XXX (durali). Skład chemiczny materiału przedstawia tabela 1. W tabeli 2 zawarto właściwości mechaniczne, natomiast w tabeli 3 właściwości fizyczne omawianego stopu.

Oznaczenia aluminium EN AW-2017A wg innych norm (odpowiedniki) [13]:

- Oznaczenie symbolami chemicznymi wg PN-EN: 573-3      AlCu4MgSi(A)
- Oznaczenie wg PN-79/H-82160      PA6
- Oznaczenie wg DIN      AlCuMg1
- Werkstoff Nr      3.1325

**Tab. 1.** Skład chemiczny materiału – stop EN AW-2017A

Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Cr
3,9	0,6	0,6	0,4	0,7	0,25	0,1

**Tab. 2.** Właściwości mechaniczne stopu EN AW-2017A dla określonego stanu obróbki

Stan	Re [MPa]	Rm [MPa]	A5 [%]	Twardość [HV]
0	70	180	13-20	50
T4	230-275	380-425	10-21	115
T6	250	400	10	130

0 – wyżarzony – dla wyrobów zyskujących ustalone własności po procesie wytwarzania na gorąco

T4 – obrabiany cieplnie – przesycony i naturalnie starzony do uzyskania stabilnego stanu

T6 – obrabiany cieplnie – przesycony, a następnie sztucznie starzony

**Tab. 3.** Własności fizyczne stopu EN AW-2017A

Nazwa parametru	Wartość	Jednostka
gęstość	2,79	kg/dm <sup>3</sup>
moduł sprężystości E	72500	MPa
moduł sprężystości poprzecznej G	27200	MPa
liczba Poissona	0,33	
temperatura krzepnięcia	510	°C
temperatura płynięcia	645	°C
współczynnik rozszerzalności cieplnej	22,9	μm/mK
przewodność cieplna	134	W/mK
ciepło właściwe	873	J/kgK
opór właściwy	51	nWm
przewodność elektryczna	34	%IACS

Stop aluminium AW-2017A charakteryzuje się dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi – wysoką wytrzymałością na rozciąganie oraz wysoką wytrzymałością zmęczeniową. Stop ten posiada krytyczną odporność na korozję w warunkach morskich, lepiej zachowuje się pod tym względem w atmosferze przemysłowej. Podczas obróbki stopu skrawaniem powstają dość długie wióry, dlatego też nie jest zalecane obrabianie go na tokarkach automatycznych. Stosowany jest głównie do produkcji elementów konstrukcji samolotów, części do budowy maszyn (śruby, sworznie), sprzętu wojskowego oraz na podzespoły dla przemysłu motoryzacyjnego.

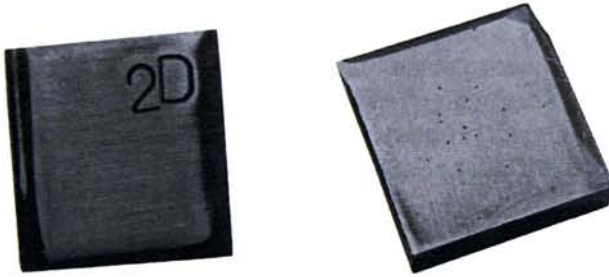
W celu określenia wpływu parametrów obróbki cieplnej badanego materiału na właściwości mechaniczne wykonano następujące eksperymenty i badania:

- przesykanie próbek od temperatur 470 do 530°C chłodzonych w wodzie,
- starzenie naturalne próbek przesykanych przy temperaturach 470 do 530°C,
- starzenie sztuczne próbek przy temperaturach 120, 140, 180°C przesykanych 500°C/woda,
- badania wytrzymałości (statyczna próba rozciągania),
- badania twardości.

Do badań została użyta blacha produkowana seryjnie ze stopu 2017A-T6 o grubości 6 mm. Próbki o wymiarach 20 x 20 mm zostały wycięte przy użyciu gilotyny i oznaczone mechanicznie poprzez nabicie numerów numeratorem (rys. 6).

Obróbkę cieplną (przesykanie i starzenie sztuczne) wykonano, nagrzewając próbki w laboratoryjnym piecu komorowym typu FCF 22P firmy CZYŁOK z grzałką elektryczną oporową ze sterowaniem cyfrowym. Pomiar twardości wykonano metodą Vickersa (wg PN-EN ISO 6507-1:2005) siłą obciążającą 10 (10 kG = 98,07 N), czas obciążenia 10–15 s. Przed przystąpieniem do pomiaru twardości próbki zostały poddane procesowi szlifowania, celem usunięcia warstwy tlenków powstałych podczas obróbki cieplnej. Zastosowano papiery ściernie suche o numerach 600, 800, 1200. Po uzyskaniu pożądanej powierzchni próbki płukano i osuszano (rys. 6).



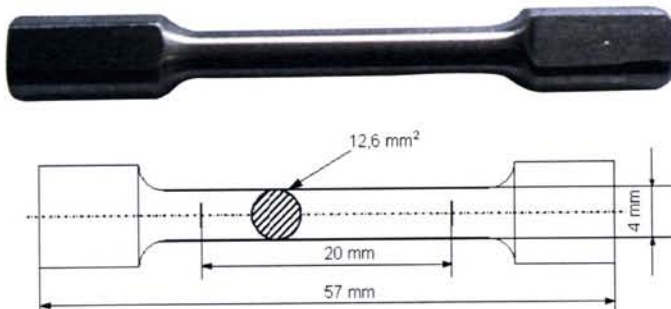


Rys. 6. Przykładowa próbka użyta do pomiarów twardości o wymiarach 20 x 20 x 6 mm

Statyczną próbę rozciągania wykonano na maszynie wytrzymałościowej INSTRON TT-DM 10 Ton ze sterowaniem cyfrowym. Próbki do badań wytrzymałościowych wycięto z blachy na kierunku równoległym do kierunku jej walcowania, o kształcie podanym na rysunku 7 i wymiarach  $l_0 = 20$  mm,  $l = 57$  mm,  $d = 4$  mm, zgodnie z normą dla próbek okrągłych. Próbki po osiowym zamocowaniu w uchwytach maszyny zostały poddane rozciąganiu z prędkością trawersy wynoszącą  $V_t = 0,01$  mm/s. Przy przyjętych parametrach próbki, prędkość odkształcenia wynosiła:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{l_0} \cdot V_t = \frac{1}{20} \cdot 0,01 = 0,0005 \left[ \frac{1}{s} \right]$$

Próbkę rozciągania przeprowadzono przy temperaturze otoczenia.



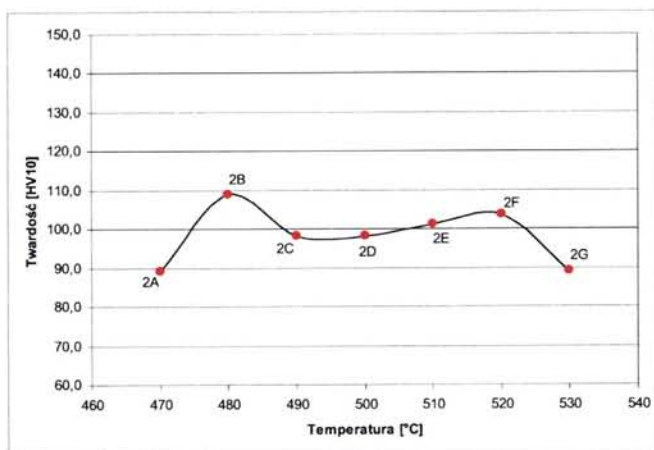
Rys. 7. Przykładowa próbka do statycznej próby rozciągania wraz z zaznaczonymi wymiarami

## Wyniki

Wyniki pomiarów twardości próbek po przesycaaniu z temperatur 470, 480, 490, 500, 510, 520 i 530°C przedstawiono na rysunku 8.

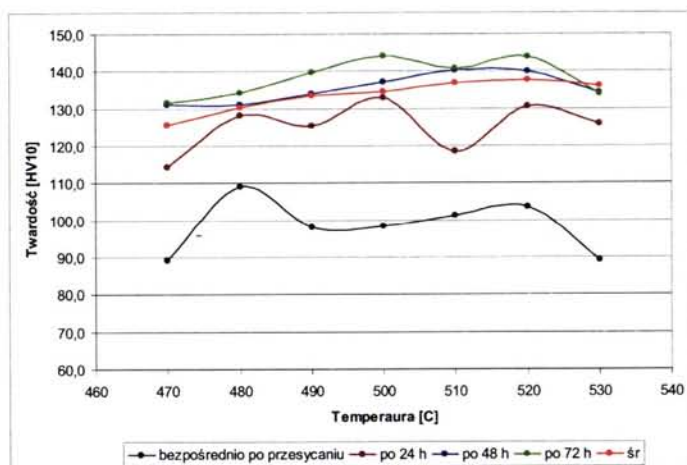
Analiza uzyskanych wyników przedstawionych na powyższym rysunku wykazała stosunkowo niewielką różnicę twardości poszczególnych próbek (89–109 HV10). Największą twardość uzyskała próbka przesycona z temp. 480°C

(109 HV10). Próbki przesycone z przedziału temp. 490–510°C uzyskały mniejszą twardość – ok. 98 HV10, co tłumaczy sugerowany w literaturze zakres temperatur przesycaenia 500–510°C [12]. Ponadto można stwierdzić po analizie wyników cząstkowych pomiarów twardości (zarówno wielkości przekątnych odcisków, jak i wyników twardości dla poszczególnych próbek) małe ich zróżnicowanie, co sugeruje jednorodną mikrostrukturę materiału na jego powierzchni.



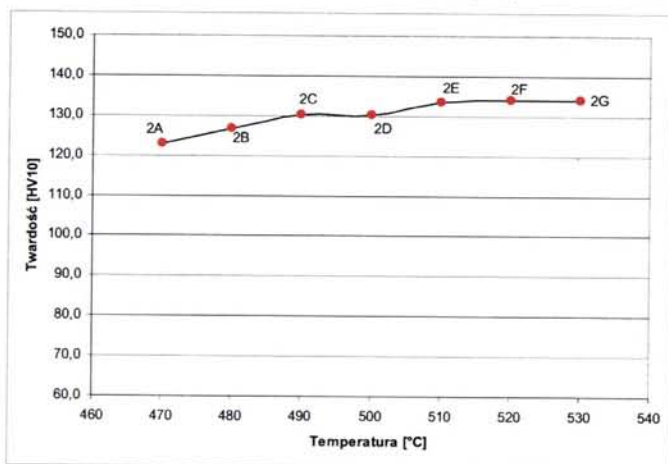
**Rys. 8.** Graficzne przedstawienie wyników pomiarów twardości próbek przesyconych przy temperaturze 470–530°C bezpośrednio po przesycaeniu

Na rysunkach 9 i 10 zamieszczono wyniki pomiarów twardości wyżej wymienionych próbek (po przesycaeniu z temperatur 470 do 530°C) wykonane po 24, 48, 72 godzinach, wartość średnią pomiarów po 96 i 120 godzinach oraz po 62 dniach od przesycaenia (temperatura starzenia ok. 20°C).



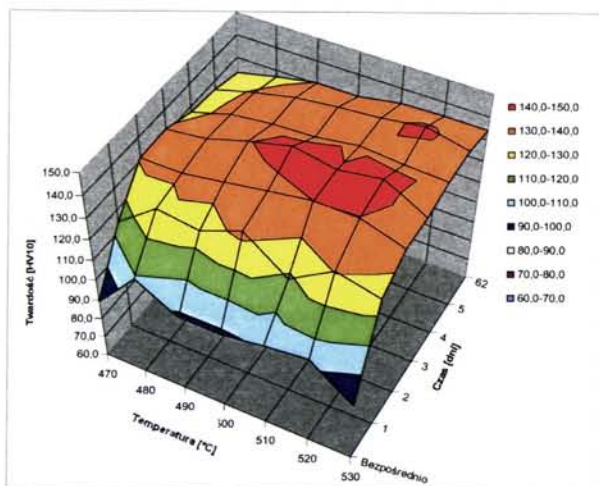
**Rys. 9.** Wyniki pomiarów twardości wykonane w różnym czasie starzenia naturalnego próbek przesyconych przy temperaturach od 470 do 530°C (śr – średnia z wyników pomiaru po 96 i 120 godzinach)





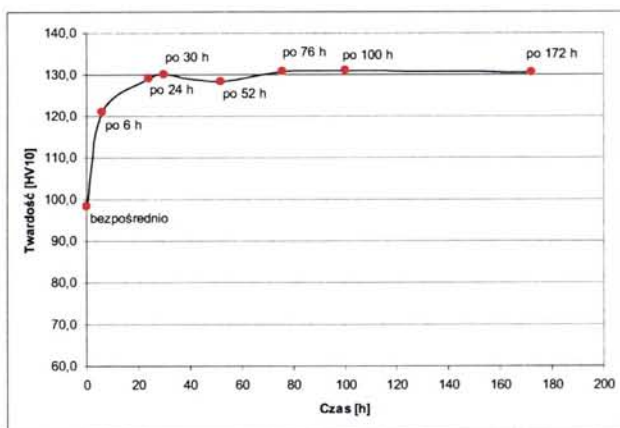
Rys. 10. Wyniki pomiarów twardości wykonane po 62 dniach starzenia naturalnego próbek przesycających przy temperaturach od 470 do 530°C

Po 24 godz. od momentu przesycaenia próbek obserwuje się znaczny przyrost twardości – od 17 HV10 dla próbki 510°C do 36 HV10 dla 530°C, średnio o 26 HV10. Kolejne pomiary, wykonane po 48 i 72 godz., wykazują mniejszą prędkość wzrostu twardości w stosunku do pierwszych 24 godz. Uzyskane twardości są porównywalne, jednak największe uzyskano po 72 godz. Analiza danych wykazała, że przesycaenie przy temp. 500°C powoduje wzrost twardości do największej wartości 144 HV10. Można jednak stwierdzić, że przesycaenie w przedziale temp. 490°C nawet do 520°C powoduje podobną twardość materiału po starzeniu powyżej 48 godz. Jest to więc zakres większy od zalecanego w literaturze (500–510°C [12]). Jako uzupełnienie powyższej analizy, zbiorcze wyniki wykonanych pomiarów przedstawiono w postaci wykresu przestrzennego na rysunku 11. Najwyższe twardości oznaczono kolorem czerwonym. Należy jednak pamiętać, że wykres powstał na podstawie danych dla poszczególnych temperatur i czasów. Można jedynie przypuszczać, że wartości pomiędzy poszczególnymi punktami pomiarowymi zmieniają się w przybliżeniu proporcjonalnie.

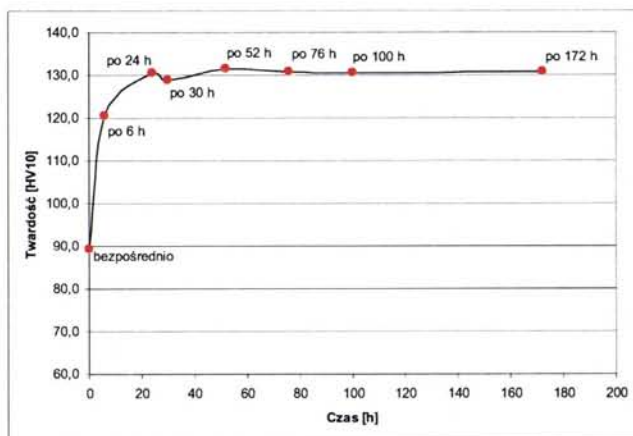


Rys. 11. Zbiorcze wyniki pomiarów twardości wykonane w różnym czasie starzenia naturalnego próbek przesycających przy temperaturach od 470 do 530°C

Kolejne wyniki, zaprezentowane na rysunkach 12 i 13, dotyczą badań starzenia naturalnego próbek przesyconych od temperatur 500 i 530°C (chłodzonych w wodzie), gdzie starano się scharakteryzować zmiany twardości po czasie krótszym niż 24 godziny. Wyniki dla próbki przesyconej z temp. 500°C wykazały, że już po 6 godz. starzenia naturalnego obserwuje się wzrost twardości o ok. 20 HV10. Natomiast pozostałe wyniki są podobne do uzyskanych wcześniej. Analiza wyników dla próbki przesyconej z temp. 530°C wykazuje tę samą twardość (120HV10) po 6 godz. starzenia naturalnego, ale większy przyrost twardości, gdyż twardość materiału po przesycaaniu była o 10 HV mniejsza (89,2 HV10). Dla pozostałych czasów starzenia (podobnie jak dla próbki 500°C) wyniki są podobne jak dla wcześniej opisanych badań.

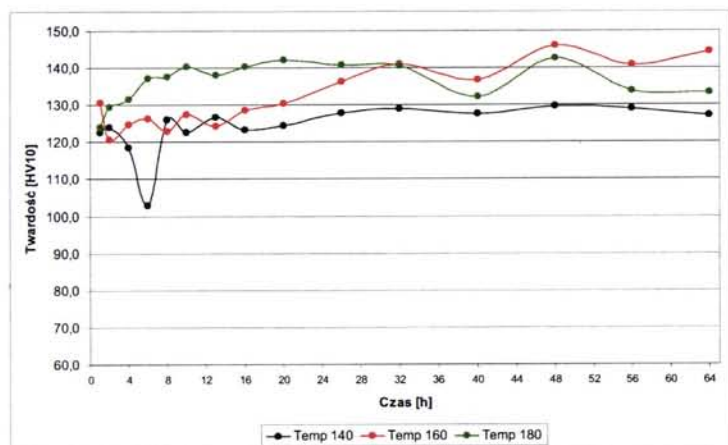


Rys. 12. Wyniki pomiarów twardości próbki przesyconej od temperatury 500°C i starzonej naturalnie



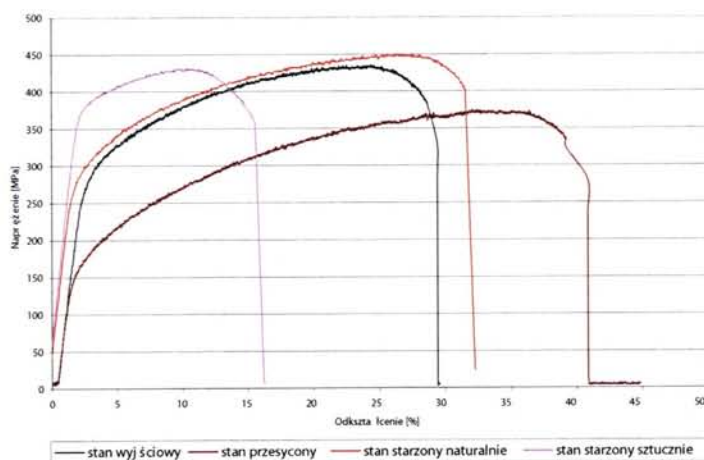
Rys. 13. Wyniki pomiarów twardości próbki przesyconej od temperatury 530°C i starzonej naturalnie

Starzenie sztuczne wykonano przy temperaturach 140, 160 i 180°C próbek przesyconych od 500°C (chłodzenie w wodzie). Pomiary twardości wykonywano na kolejno wyjmowanych z pieca próbkach po czasie starzenia: 1, 2, 4, 6, 8, 10, 13, 16, 20, 26, 32, 40, 48, 56, 64 godziny. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 14.



Rys. 14. Wyniki pomiarów twardości próbek starzonych w czasie 1 do 64 godzin

Dla wszystkich trzech temperatur starzenia obserwuje się przyrost twardości materiału, przy czym w przypadku próbek starzonych przy 140°C i 160°C przyrost twardości jest wolniejszy oraz niejednostajny – po ok. 8 godzinach następuje spadek twardości próbek, po czym ponowny przyrost (rys. 14). Najszybszy wzrost twardości obserwuje się dla próbki starzonej przy temp. 180°C, co można wyjaśnić najintensywniejszą dyfuzją ze względu na najwyższą temperaturę. Największą jednak twardość, choć po stosunkowo długim czasie (52 godz.), uzyskała próbka starzona przy temp. 160°C. Badania wykazują ponadto, że w przypadku ośmiogodzinnego starzenia (często stosowany czas starzenia technologicznie) temperatura procesu powinna wynosić 180°C, gdyż dla tej temperatury i po tym czasie uzyskuje się już porównywalną twardość jak dla dłuższych czasów obróbki. Można również stwierdzić, że dla tej temperatury starzenia wystarczający czas do uzyskania odpowiedniej twardości to 6 godz.



Rys. 15. Wykresy uzyskane w statycznej próbie rozciągania dla materiału w stanie: wyjściowym, po przesycaeniu, po starzeniu naturalnym i sztucznym



Na rysunku 15 przedstawiono zbiorcze wyniki próby rozciągania dla próbek w stanach wyjściowym, przesyconym, starzonym naturalnie i starzonym sztucznie. Analiza krzywych pozwala stwierdzić podobny sposób płynięcia materiału i jego umacnianie się dla wszystkich próbek z wyjątkiem próbki starzonej sztucznie. Krzywa dla tej próbki wykazuje dużo mniejszą jej plastyczność. Zgodnie z oczekiwaniami, największą plastyczność oraz najmniejszą umowną granicę plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie wykazała próbka w stanie po przesycaeniu. Materiał w tym stanie powinien w większości być roztworem przesyconym, bez znaczącej ilości wydzieleni umacniających, ale częściowo będzie umocniony roztworowo, ponieważ nadmiar miedzi występujący w roztworze z aluminium będzie powodował podwyższone naprężenia w sieci krystalograficznej aluminium, które utrudniają ruch dyslokacji podczas odkształcenia plastycznego. Ten rodzaj umocnienia jest jednak znacznie mniej efektywny niż umocnienie wydzieleniowe fazami wydzielającymi się z przesyconego roztworu. Efekty takiego umocnienia (wydzieleniowego, drobnodyspersyjną fazą samorzutnie tworzącą się z roztworu przesyconego) widoczne są dla próbki starzonej naturalnie, której wytrzymałość ( $R_{0,2} - 270$  MPa,  $R_m - 449$  MPa) jest znacznie większa od próbki w stanie przesyconym (rys. 15, tab. 4). Porównanie krzywych próbek w stanie wyjściowym i po starzeniu naturalnym wykazuje bardzo zbliżony ich kształt, choć próbka starzona naturalnie wykazuje większą wytrzymałość i większą plastyczność. Jest to zgodne z oczekiwaniami, gdyż stan wyjściowy materiału to stan T6, czyli po starzeniu sztucznym. Nie udało się jednak uzyskać informacji od producenta blachy o dokładnych parametrach obróbki cieplnej tego materiału, podczas procesu technologicznego jego wytwarzania. Wyniki przeprowadzonych prób wytrzymałościowych zestawiono w tabeli 4. Uzyskane wyniki dotyczące badań wytrzymałościowych korelują z wynikami badań twardości próbek w poszczególnych stanach.

Tab. 4. Uzyskane wyniki badania wytrzymałości próbek w różnym stanie

Stan próbki	$R_{0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$R_u$ [MPa]	A [%]	Z [%]
wyjściowy	250	436	622	22	39
po przesycaeniu	150	374	596	28	44
po starzeniu naturalnym	270	449	680	24	41
po starzeniu sztucznym	361	431	609	13	41

$R_u$  – naprężenie rzeczywiste zerwania próbki

## Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów oraz badań sformułowano następujące wnioski:

- przedział temperatur dla procesu przesycaenia to 490–520°C, optymalnie 500°C,
- największa twardość materiału (144 HV10) po procesie starzenia naturalnego została uzyskana dla próbki przesycaanej z temperatury 500°C i starzonej przez 72 godziny,

- największy przyrost twardości (do 146 HV10) w wyniku starzenia sztucznego występuje, gdy temperatura procesu wynosi 160°C, lecz dopiero po 48 godzinach wyżarzania,
- najszybszy przyrost twardości (maksimum twardości (142 HV10) po 20 godzinach wyżarzania) wystąpił dla materiału starzonego przy temperaturze 180°C,
- dla typowego czasu obróbki w celu starzenia sztucznego (8 godzin) największy przyrost twardości uzyskano dla materiału starzonego przy temperaturze 180°C (137 HV10),
- 6 godzin to wystarczający czas starzenia przy temperaturze 180°C dla uzyskania twardości ok. 138HV10,
- największą wytrzymałość na rozciąganie (449 MPa) oraz największe naprężenie zrywające materiał (680 MPa) uzyskano dla materiału starzonego naturalnie; umowna granica plastyczności dla tego materiału wynosi 270 MPa,
- materiał starzony sztucznie przy optymalnych parametrach (180°C/8 godz.) wykazał podobną wytrzymałość na rozciąganie jak materiał w stanie wyjściowym (431 MPa), lecz znacznie większą umowną granicę plastyczności (361 MPa),
- najmniejsza wytrzymałość na rozciąganie (374 MPa) i umowną granicę plastyczności (150 MPa) oraz największą plastyczność (28%) materiał uzyskał w stanie po przesycaeniu.

## Literatura

- [1] de Rijck J.J.M., Homan J.J., Schijve J., Benedictus R., *The driven rivet head dimensions as an indication of the fatigue performance of aircraft lap joints*, International Journal of Fatigue 29 (2007), s. 2208–2218
- [2] Francesconi A., Pavarin D., Giacomuzzo C., Angrilli F., *Impact experiments on low-temperature bumpers*, International Journal of Impact Engineering 33 (2006), s. 264–272
- [3] Bylica A., Furmanek W., Walat W., *Świat metali*, Wyd. Wyższej Szkoły Pedagogicznej, Rzeszów 2000
- [4] Przybyłowicz K., *Metaloznawstwo*, Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996
- [5] Gladman T., *Structure-Property Relationships In High-Strength Microalloyed Steels*, Microalloying 75, s. 32
- [6] Tasak, *Spawalność stali*, Fotobit, Kraków 2002
- [7] Han B.Q., Mohamed F.A., Lavernia E.J., *Tensile behavior of bulk nanostructured and ultra-fine grained aluminum alloys*, Journal of Materials Science 38 (2003), s. 3319–3324
- [8] Rodak K., Pawlicki J., *Microstructure of ultrafine-grained Al produced by severe plastic deformation*, Archives of Materials Science and Engineering, Vol. 28, Issue 7, July 2007, s. 409–412
- [9] Markandeya R., Nagarjuna S., Sarma D.S., *Precipitation hardening of Cu-Ti-Cr alloys*, Materials Science and Engineering A 371 (2004), s. 291–305
- [10] Starink M.J., Gao N., Yan J.L., *The origins of room temperature hardening of Al-Cu-Mg alloys*, Materials Science and Engineering A 387–389 (2004), s. 222–226
- [11] Blicharski M., *Wstęp do inżynierii materiałowej*, Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003

[142]

Krzysztof Mrocza, Marcin Pezda, Zbigniew Zwolenik

[12] Dobrzański L.A., *Metaloznawstwo opisowe stopów metali nieżelaznych*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008

[13] Dobrzański L.A. (red.), *Leksykon materiałoznawstwa*, Wyd. Verlag Dashofer, 2005

## **Studies on the influence of various heat treatment conditions on mechanical properties of 2017A aluminum alloy**

### **Abstract**

Properly carried out a heat treatment of the aluminium alloy 2017A allows the considerable hardening (by precipitation). This paper presents the results of the effect of supersaturation, natural and artificial aging on mechanical properties of the aluminium alloy 2017A. The most proper temperature for supersaturation of this alloy is 500°C. However, the acceptable temperature range of this process is 490°C to 520°C. The maximum hardness as a result of natural aging of this alloy obtained after 72 hours. Artificial aging at 180 °C causes a sufficient increase of hardness after 6 hours. The highest ultimate tensile strength of the material obtained after natural aging. Natural aging of the material causes increases the ultimate tensile strength of 20% (compared to the super saturation state of the material).

Keywords: 2017A aluminum alloy, hardening, heat treatment

Krzysztof Mrocza, Marcin Pezda, Zbigniew Zwolenik

Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie

Instytut Techniki

ul. Podchorążych 2

30-084 Kraków