

Wpływ obróbki cieplnej na własności stopu AlSi11 konsolidowanego plastycznie z wiórów

Influence of heat treatment on properties of solid bonded AlSi11 alloys from chips

PIOTR NOGA
MARCEL WIEWIÓRA
AGATA WZOREK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.7.92>

Prezentowane wyniki badania prętów otrzymanych w procesie wyciskania współbieżnego z wiórów stopu AlSi11 pozostałych po procesie toczenia. Określono własności mechaniczne podczas jednoosiowej próby rozciągania oraz pomiaru twardości metodą Vickersa. Zbadano wpływ warunków starzenia na własności mechaniczne.

SŁOWA KLUCZOWE: AlSi11, utwardzanie wydzieleniowe, konsolidacja plastyczna, eksport złomu aluminium

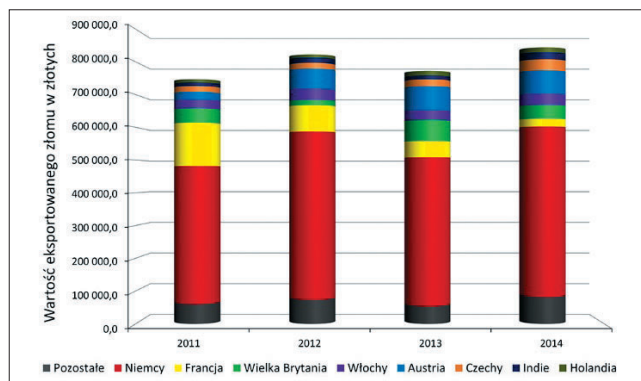
The paper presents study results on AlSi11 alloy, which was obtained by extruding chips obtained from turning process. Mechanical properties from uniaxial tensile test and Vickers hardness test were determined. The influence of aging conditions on mechanical properties was investigated.

KEYWORDS: AlSi11, precipitation hardening, solid bonding, export of aluminum scrap

Recykling metali lekkich prowadzony jest głównie metodą topienia. W przypadku recyklingu złomów silnie rozdrobnionych (np. wiórów po obróbce skrawaniem) straty materiału w trakcie przetopu są bardzo wysokie i niejednokrotnie można odzyskać tylko ok. 40% materiału wsadowego. Stąd można wysnuć wniosek, że z uwagi na niską opłacalność recyklingu tak wysoki jest eksport złomu aluminium z Polski do krajów europejskich i Indii (rys. 1). Przykładowo w 2014 r. wartość złomu aluminium eksportowanego z Polski wyniosła 844 157 zł. W celu uniknięcia strat można wykorzystać technologię konsolidacji plastycznej opartą na metodzie wyciskania [1–4].

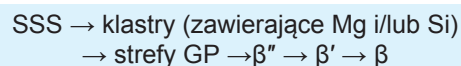
Popularność siluminów w branży odlewniczej jest naturalną konsekwencją ich wyjątkowych własności, takich jak dobra lejniść, odporność na pękanie czy też niewielki skurcz odlewniczy. Dzięki tym cechom stopy AlSi znalazły szerokie zastosowanie w branży motoryzacyjnej, gdzie wykonuje się z nich m.in. tłoki i głowice silników spalinowych oraz obudowy skrzyń biegów [5]. Te własności po części są wynikiem obecności krzemu w strukturze wewnętrznej, który pozytywnie wpływa na wytrzymałość stopu, redukując jednocześnie jego plastyczność. W komercyjnych zastosowaniach ilość tego pierwiastka nie przekracza 22% [6].

W ostatnim czasie szczególnie dużym zainteresowaniem cieszą się stopy AlSi umacniane wydzieleniowo. Dodatki stopowe, takie jak Cu oraz Mg, znacząco podnoszą wytrzymałość tych stopów. Przesycanie prowadzone w temperaturze około eutektycznej powoduje rozpuszczenie się nierównowagowych, bogatych w Cu i Mg cząstek, podczas gdy skład samego stopu ulega ujednorodnieniu. Dodatkowo w trakcie przesycania krzem ulega sferoidyzacji, co przekłada się na końcowe własności mechaniczne. Kluczowym parametrem procesu przesycania jest właściwy dobór temperatury. Zbyt niska temperatu-



Rys. 1. Główne kierunki i wartość złomu aluminium eksportowanego z Polski w latach 2011–2014 [4]

ra może powodować zaledwie częściowe rozpuszczenie nierównowagowych cząstek i tym samym osłabienie późniejszego efektu umocnienia. Osobnym problemem są cząstki zawierające w składzie żelazo (np. $Al_8Mg_3FeSi_6$, $Al_5Cu_2Mg_8Si_6$), które są szczególnie trudne do rozpuszczenia [7]. W przypadku stopów AlSiMg sekwencją wydzielenia w trakcie procesu starzenia można przedstawić następująco [8]:

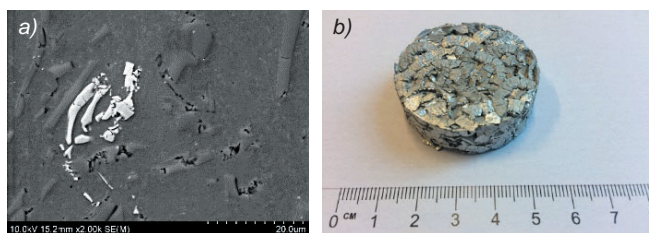


W wyniku starzenia w przesyconym roztworze powstają klastry bogate w Si oraz Mg, które następnie ulegają przekształceniu kolejno w strefy GP oraz metastabilne, iglaste wydzielenia β'' . Cząstki te są odpowiedzialne za znaczący wzrost wytrzymałości w procesie umocnienia wydzieleniowego. Dalsze wygrzewanie może prowadzić do przestarzenia stopu i wytworzenia metastabilnych faz β' . W stopach czteroskładnikowych, takich jak AlSiCuMg, mogą występować ponadto wydzielenia Q oraz Θ' [9].

Metodyka badań

Materiał wyjściowy do badań stanowiły wióry stopu AlSi11 (rys. 2a), które otrzymano w procesie toczenia bez użycia środka chłodzącego na tokarce TUM 35 (skład chemiczny stopu przedstawiono w tabl. I). Proces skrawania prowadzono z prędkością obrotową wrzeczona 315 obr/min, przy posuwie noża 0,2 mm/s w kierunku osi materiału. Otrzymane wióry oznaczono symbolem AlSi11 TM. Kolejnym etapem przygotowawczym było wstępne zagęszczenie wiórów w prasie hydraulicznej o maksymalnym nacisku tłoka 100 tf. Wióry w formie 25 g naważki umieszczono w cylindrycznej komorze prasy, a następnie tłok za pomocą stempla spęcał materiał z naciskiem 30 tf. W ten sposób otrzymano osiem wyprasek o średnicy $\varnothing 38$ mm i wysokości 10 mm, które stanowiły wsad do procesu wyciskania (rys. 2b).

* Mgr Piotr Noga (pinoga@agh.edu.pl), mgr Marcel Wiewióra (marcelw@edu.pl) – Wydział Metali Nieżelaznych AGH w Krakowie; mgr Agata Wzorek (aga.wzorek@gmail.com) – Wydział Zarządzania AGH w Krakowie



Rys. 2. Mikrostruktura wióra stopu AlSi11 (a), wypraska wykonana z wiórów stopu AlSi11 (b)

TABLICA I. Skład badanego stopu, % masowy

Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Cr	Ni	Zn	Ti	Zr	Al
10,58	0,28	0,38	0,51	0,24	0,03	0,12	0,10	0,011	0,06	reszta

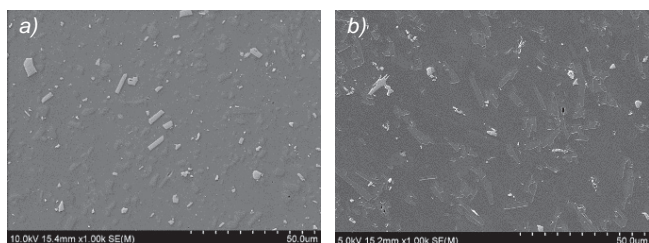
Wyciskanie sposobem współbieżnym przeprowadzono w temperaturze 450°C z prędkością wyciskania 1 mm/s. Dla porównania, w takich samych warunkach wyciśnięto lity wlewek ze stopu aluminium, który oznaczono symbolem AlSi11 IM. Wyciśnięte pręty miały średnicę $\varnothing 8$ mm.

Pręty poddano badaniom twardości metodą Vickersa według normy PN-EN ISO 6507-1, stosując obciążenie 19,61 N (HV2). Próbki do badań, przygotowane z wyciśniętego pręta, umieszczono w piecu nagrzanym do 525°C. Trzymano je w tej temperaturze przez 30 min, po czym przesycono w wodzie. Następnie prowadzono starzenie sztuczne w temperaturze 160°C i 180°C z różnymi czasami starzenia. Po obróbce cieplnej wykonano pomiar twardości sposobem Vickersa. Dla materiału starzonego w temperaturze 160°C przez 4 h wykonano jednoosiową próbę rozciągania w temperaturze otoczenia według normy EN ISO 6892-1.

Wyniki badań

TABLICA II. Mechaniczne i fizyczne własności badanych materiałów po procesie wyciskania

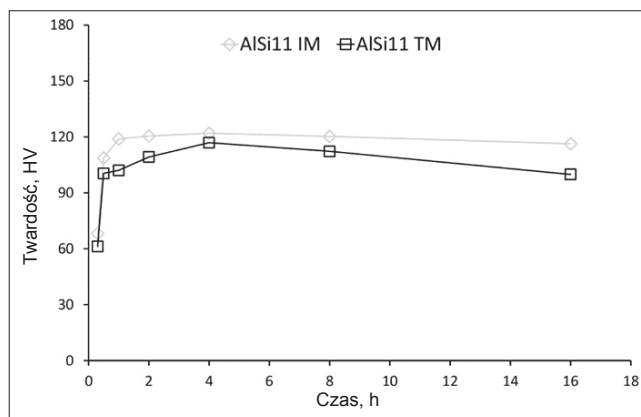
Materiał	Wytrzymałość na rozciąganie R_m , MPa	Granica plastyczności $R_{p0,2}$, MPa	Wydłużenie A , %	Twardość, HV	Gęstość, g/cm ³
AlSi11 IM	189	85	14,5	72	2,66
AlSi11 TM	200	87	17,5	67	2,65



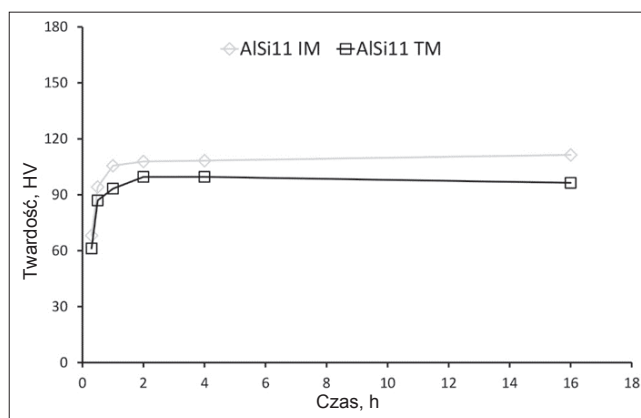
Rys. 3. Mikrostruktura pręta z wiórów stopu AlSi11 (a), mikrostruktura pręta z litego wlewka stopu AlSi11 (b)

TABLICA III. Własności mechaniczne badanych materiałów po obróbce cieplnej, wyznaczone na podstawie rys. 6

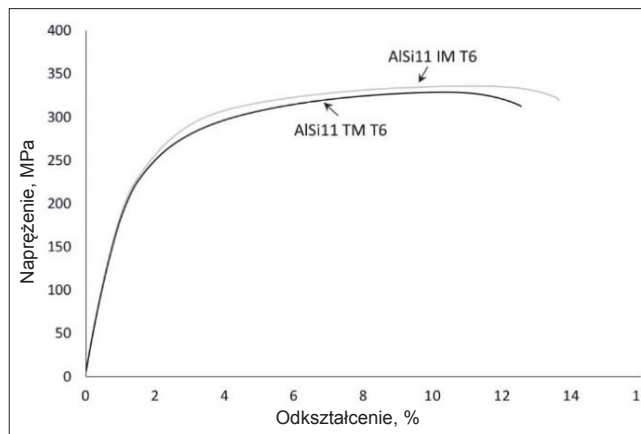
Materiał	Wytrzymałość na rozciąganie R_m , MPa	Granica plastyczności $R_{p0,2}$, MPa	Wydłużenie A , %
AlSi11 IM T6	336	190	11,9
AlSi11 TM T6	329	188	10,9



Rys. 4. Zmiana twardości stopów AlSi11 (TM i IM) starzonych w temperaturze 160°C



Rys. 5. Zmiana twardości stopów AlSi11 (TM i IM) starzonych w temperaturze 180°C



Rys. 6. Krzywe rozciągania stopów AlSi11 (IM i TM) po obróbce cieplnej na stan T6 –przesykanie połączone ze starzeniem sztucznym (starzenie w temperaturze 160°C przez 4 h)

Analiza wyników

Niska skuteczność przerobu drobnych złomów metodą przetapiania prowadzi do dużych strat materiałowych. Koncepcja recyklingu oparta na procesie konsolidacji plastycznej daje szansę na zmniejszenie tych strat oraz znaczne ograniczenie energochłonności procesu. Konsolidacja wiórów ze stopu AlSi11 metodą wyciskania w podwyższonej temperaturze umożliwia otrzymanie prętów o gładkiej, błyszczącej powierzchni, porównywalnej z wyciśniętym litym materiałem. Dobór odpowiednich parametrów procesu konsolidacji plastycznej (temperatura 450°C i prędkość wyciskania 1 mm/s) pozwolił na wytworzenie materiału, który charakteryzuje się brakiem wad powierzchniowych (pęknięć, rozwarstwień).

W strukturze pręta wyciśniętego z wiórów zaobserwowano obecność kruchych, pierwotnych kryształów krzemu o ostrych krawędziach oraz kruchych faz międzymetalicznych AlFeSi. Pręt wyciśnięty z wiórów charakteryzuje się znacznym rozdrobnieniem faz Si i AlFeSi w porównaniu z fazami widocznymi na mikrostrukturze pręta wyciśniętego z litego wlewka (rys. 3). Świadczy to o tym, że krzem został rozdrobniony w trakcie procesu skrawania. Wydzielenia krzemowe istotnie wpływają na poprawę własności wytrzymałościowych stopów AlSi.

Własności mechaniczne wyciśniętych prętów badano w próbie rozciągania oraz próbie twardości. Pręty po procesie wyciskania charakteryzują się podobnymi własnościami wytrzymałościowymi z zachowaniem nieznacznie większej wartości wydłużenia dla stopu AlSi11 TM (tabl. II). Twardość AlSi11 IM wyniosła 72 HV, natomiast AlSi11 TM – 67 HV (tabl. II).

Materiał wyciśnięty z wiórów ma porównywalną gęstość z materiałem wyciśniętym z litego wlewka. Dodatki stopowe (Si, Mg) poprawiają własności wytrzymałościowe oraz wpływają korzystnie na podatność tego materiału na obróbkę cieplną. Optymalne warunki czasowo-temperaturowe dla procesu utwardzania wydzieleniowego wyznaczono, starząc sztucznie materiały w temperaturze 160°C i 180°C (rys. 4, 5). Po starzeniu w temperaturze 180°C przez 4 h twardość materiałów wyniosła 108 HV dla AlSi11 IM i 100 HV dla AlSi11 TM oraz nie uległa zmianie nawet po starzeniu sztucznym przez 16 h (brak widocznego efektu przestarzenia). Z punktu widzenia maksymalizacji własności wytrzymałościowych materiału otrzymanego z wiórów za najkorzystniejsze warunki obróbki cieplnej można uznać starzenie sztuczne w temperaturze 160°C przez 4 h, co pozwala na osiągnięcie twardości 117 HV (rys. 4). Twardość ta stanowi maksimum na krzywej starzenia, a po przekroczeniu tej wartości następuje spadek własności wytrzymałościowych związany z efektem przestarzenia.

Uzyskane wyniki twardości dla pręta otrzymanego z wiórów są zbliżone do tych dla pręta wyciśniętego z materiału litego. Starzenie sztuczne w temperaturze 160°C przez 4 h pozwala osiągnąć wytrzymałość na rozciąganie 329 MPa dla AlSi11 TM i umowną granicę plastyczności 188 MPa. Warto zaakcentować, że wyniki te są nieznacznie gorsze od tych dla stopu AlSi11 IM (rys. 6, tabl. III). Proces utwardzania wydzieleniowego doprowadził do znacznego wzrostu własności wytrzymałościowych zarówno materiału wyciśniętego z litego wlewka, jak i z wiórów. Zastosowana metoda recyklingu wiórów stopu AlSi11 umożliwiła otrzymanie materiału o własnościach mechanicznych porównywalnych do własności materiału wyciśniętego z litego wlewka.

Wnioski

- Ze względu na duże straty podczas recyklingu złomu aluminium silnie rozdrobnionego jego eksport z Polski jest dosyć wysoki.
- Wstępne prasowanie wiórów oraz dobór odpowiednich parametrów wyciskania pozwoliły na otrzymanie materiału charakteryzującego się dobrą spójnością i brakiem porowatości.
- Wyciśnięte materiały – zarówno z litego wlewka, jak i z wiórów – charakteryzują się twardością na poziomie 60 HV. Pręty mają dużą wytrzymałość na rozciąganie (ok. 200 MPa) oraz wydłużenie na poziomie 15%.
- Sztuczne starzenie odlewniczych stopów aluminium AlSi11 ma istotny wpływ na własności wytrzymałościowe.

Obróbka cieplna na stan T6 (przesycanie i starzenie sztuczne) prowadzi do wysokiego umocnienia materiałów przy niewielkim obniżeniu plastyczności w stosunku do materiału wyjściowego.

- Poprzez konsolidację plastyczną wiórów ze stopu AlSi11 otrzymano pręt charakteryzujący się własnościami porównywalnymi własnościami pręta wyciśniętego z litego wlewka.

LITERATURA

1. Green J. „Aluminum recycling and processing for energy conservation and sustainability”. Cleveland: ASM International, 2007, ISBN: 978-0-87170-859-5.
2. Dybiec H. „Plastic consolidation of metallic powders”. *Archive of Metall.&Mater.* 52 (2007): s. 161–170.
3. Chmura W., Gronostajski J. „Mechanical and tribological properties of aluminum – based composites produced by the recycling of chips”. *J.Mat.Procc.Technology.* 106 (2000): s. 23–27.
4. Opracowanie własne na podstawie danych z GUS.
5. Jarco A. „Poprawa plastyczności stopu AlSi11 przez zastosowanie wyżarzania zmiękczającego” („Improvement of plasticity of the AlSi11 alloy due to soft annealing treatment”). *Prace Instytutu Odlewnictwa.* LVI, 3 (2016): s. 261–266, DOI: 10.7356/ioid.2016.18.
6. Zolotarevsky V.S., Belov N.A., Glazoff M.V. „Casting aluminum alloys”. Elsevier Science. 2007, ISBN 9780080453705.
7. Moustafa M.A., Samuel F.H., Doty H.W. „Effect of solution heat treatment and additives on the microstructure of Al-Si (A413.1) automotive alloys”. *Journal of Materials Science.* 38 (2003): s. 4507–4522.
8. Colley L.J., Wells M.A., Poole W.J. „Microstructure-strength models for heat treatment of Al.-Si-Mg casting alloys I: microstructure evolution and precipitation kinetics”. *The Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science.* 53, 2 (2014): s. 125–137.
9. Tavitias-Medrano M.A., Samuel F.H., Doty H.W. „Effect of solution heat treatment and additives on the microstructure of Al-Si (A413.1) automotive alloys”. *Journal of Materials Science.* 38 (2003): s. 4507–4522. ■