

Вплив швидкості охолодження на формування первинної структури алюмінієвих сплавів, що деформуються

О. В. Ноговіцин, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу, alexey.nogovitsyn@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2929-5300>

В. Л. Лахненко, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, вчений секретар, lakhnenko@ptima.kiev.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3551-7635>

І. Р. Баранов, кандидат технічних наук, молодший науковий співробітник, ntc-technologies@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5692-5297>

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

Високоміцні алюмінієві сплави Al-Zn-Mg-Cu (наприклад, В95) та сплави з середньою Al-Mg (АМз5), Al-Si-Mg (АД35) та підвищеною міцністю Al-Cu-Mg (Д16) набули широкого використання в промисловості при виробництві авіакосмічної техніки, морських суден, залізничного транспорту та автомобілів. Найбільшим попитом користуються заготовки алюмінію у вигляді плоского прокату. Вирішальним щодо забезпечення якості продукції подальшого підвищення властивостей шляхом термомеханічної обробки є структура литої заготовки. Тому поглиблені дослідження окремих факторів, які безпосередньо впливають на формування литої структури, особливо при використанні у виробництві технології валкового лиття, необхідні для розробки та вдосконалення технологічних процесів виробництва алюмінієвих заготовок. В статті наведено експериментальні дані щодо зміни розміру зерна первинної фази алюмінієвих сплавів залежно від швидкості охолодження виливків різних сплавів алюмінію (АД35, В95, Д16, АМз5). Показано, що збільшення швидкості охолодження від 2-80 °С/с до майже 10000 °С/с, призводить до зменшення розміру зерна α -фази з 200 мкм до 10-40 мкм.

В результаті проведених експериментів визначено температурні інтервали тверднення досліджуваних алюмінієвих сплавів. Показано, що сплави, які містять в своєму складі мідь ($\geq 1\%$), мають значно більший інтервал кристалізації, зокрема – В95 (160 °С) та Д16 (132 °С). Аналіз отриманих даних зміни часового інтервалу кристалізації досліджуваних сплавів залежно від швидкості тепловіддачі свідчить про можливість використання у виробництві перспективної технології валкового лиття, яка характеризується високою швидкістю охолодження та малим часом контакту розплаву з кристалізатором, для отримання якісної продукції з високоміцних алюмінієвих сплавів, що є новою перспективою отримання прокату для конструкційних виробів. Використані в дослідженні зразки смуги з високоміцних алюмінієвих сплавів, отримані за допомогою валкової розливки, мають однорідну структуру з рівномірним розподілом фазових складових, що забезпечує високі технологічні властивості прокату з високоміцних термозміцнених сплавів систем Al-Cu та Al-Zn. Результати досліджень можуть бути рекомендовані до використання при розробці вітчизняної технології валкового розливання-прокатування високоміцних алюмінієвих сплавів.

Плавлення і кристалізація

Ключові слова: високоміцні деформівні алюмінієві сплави, валкова розливка, швидкість охолодження, час тверднення, диференційно-термічний аналіз, розмір зерна.

Широке використання в різних галузях промисловості виробів листового прокату з алюмінієвих сплавів зумовлене перш за все їх високими механічними та технологічними характеристиками. Алюмінієві сплави та металопрокат на їх основі є основними конструкційними матеріалами в авіаційній, аерокосмічній, автомобілебудівній та харчових галузях.

В Україні успішно використовується в авіабудуванні високоміцні алюмінієві сплави системи Al-Zn-Mg-Cu, що зміцнюються термічною обробкою та сплави середньої та підвищеної міцності системи Al-Mg-Cu. Вони виконують функцію основного конструкційного матеріалу для обшивки і внутрішніх силових елементів планера літака (фюзеляж, крило, тощо). Основна промислова технологія, яка застосовується для отримання листового прокату зі сплавів на основі алюмінію, полягає в отриманні зливка (заготовки) та його подальшої механічної та термічної обробки. Традиційні технології одержання виробів з алюмінієвих сплавів методами лиття або прокатування заготовок не забезпечують високих функціональних властивостей прокату.

Тому впровадження перспективних технологій, зокрема валкового лиття-прокатування, яке без сумніву має економічні та технологічні переваги, а також забезпечує високі характеристики виробів, на сьогодні є актуальною задачею. До 90-х років XIX ст. в алюмінієвій промисловості світу працювало біля 160 ливарних машин з суміщенням лиття та прокатки. Основним оброблювальним матеріалом двовалкової розливки-прокатки є технічно чистий алюміній, який використовується у більшості випадків для виробництва харчової фольги. Для автомобілебудування та авіації найбільший інтерес становлять високоміцні термозміцнювані сплави систем Al-Cu та Al-Zn. Однак, технологія отримання смуг (листів) товщиною 2-4 мм з вказаних матеріалів методом валкової розливки - прокатки до теперішнього часу не розроблена. Це пов'язано з високою швидкістю охолодження (≥ 1000 °C/с) і великим (≥ 100 °C) інтервалом кристалізації сплавів цих систем.

Метою дослідження є вивчення впливу швидкості охолодження і величини інтервалу кристалізації деформівних алюмінієвих сплавів на формування структури литих заготовок.

Дослідження з встановлення впливу швидкості охолодження на формування структури високоміцних алюмінієвих сплавів було проведено на зразках, хімічний склад яких наведено в табл. 1. Зіставлення фактичного вмісту хімічних елементів із стандартними показниками виявило відповідність обраних матеріалів вказаним маркам сплавів. Визначення температурних параметрів фазових перетворень досліджуваних зразків сплавів проводилось на приладі Derivatograph Q-1500-D*.

Результати аналізу дозволили визначити температури солідусу ($T_{\text{сол}}$) і ліквідусу ($T_{\text{лік}}$), значення яких наведені в табл. 2. Отримані значення температур добре збігаються з літературними даними [1].

*Дослідження виконано М.В. Кошелевим

Плавлення і кристалізація

Таблиця 1

Хімічний склад досліджуваних сплавів

Сплав EN	Масова частка, %						
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn
B95 7075	0	0,15	1,7	0,24	2,82	-	6,61
AMg5 5056	0,08	0,44	0,07	0,65	4,43	-	<0,2
Д16 2024	0,36	0,45	4,61	0,72	0,94	-	-
АД35 6082	0,82	0,12	0,21	0,75	0,89	0	<0,3

Таблиця 2

Температури тверднення досліджуваних сплавів

Сплав ГОСТ	Аналог EN	Температура, °C		
		Ліквідус	Солідус	Інтервал кристалізації
B95	7075	630	470	160
AMg5	5086	632	567	35
Д16	2024	635	503	132
АД35	6082	641	564	77

Для забезпечення різної швидкості охолодження при отриманні зразків виливків застосовували ливарні форми з матеріалів з різною тепловідбірною здатністю (графіт, фторфлогопіт, кварцове скло). Зміни температури зразків під час твердіння вимірювали хромель-алюмелевими термопарами. За допомогою аналого-цифрового перетворювача WAD AIK BUS показники термопар фіксувались у цифровому вигляді з частотою 8Гц і передавались на комп'ютер для побудови кривих охолодження. Подальша обробка цих даних дозволила розрахувати швидкість охолодження сплаву у проміжок часу між температурою перегріву розплаву та температурою ліквідусу. Значення швидкостей охолодження отриманих в ході описаного експерименту показують, що вдалося охопити діапазон швидкостей від 2,5 до 154 °C/с. Для визначення впливу швидкостей охолодження на структуру алюмінієвих сплавів в більш широкому діапазоні були додатково відібрані зразки отримані валковим розливанням. Швидкість охолодження при валковому розливанні досягала ≈ 1000 °C/с.

Розмір зерна α -фази та твердість зразків, отриманих з різною швидкістю охолодження наведені в табл. 3. Фотографії мікроструктур алюмінієвих сплавів після кристалізації з різною швидкістю охолодження наведено на рис. 1.

Плавлення і кристалізація

Таблиця 3

Розмір зерна та твердість зразків залежно від швидкості охолодження при кристалізації

Сплав	Швидкість охолодження, $V_{ox}, \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$	Розмір зерна Z, мкм	Твердість, НВ
АД35	152	15 - 70	45
	7	20 - 150	47
	3	70 - 200	48
	1000	10 - 40	56
В95	154	20 - 60	80
	9	50 - 150	83
	6	60 - 160	95
	1000	10 - 60	103
АМг5	118	20 - 70	60
	8	20 - 120	52
	3	70 - 200	42
	1000	11 - 50	68
Д16	133	15 - 100	69
	7	25 - 120	80
	3	50 - 200	69
	1000	10 - 50	88

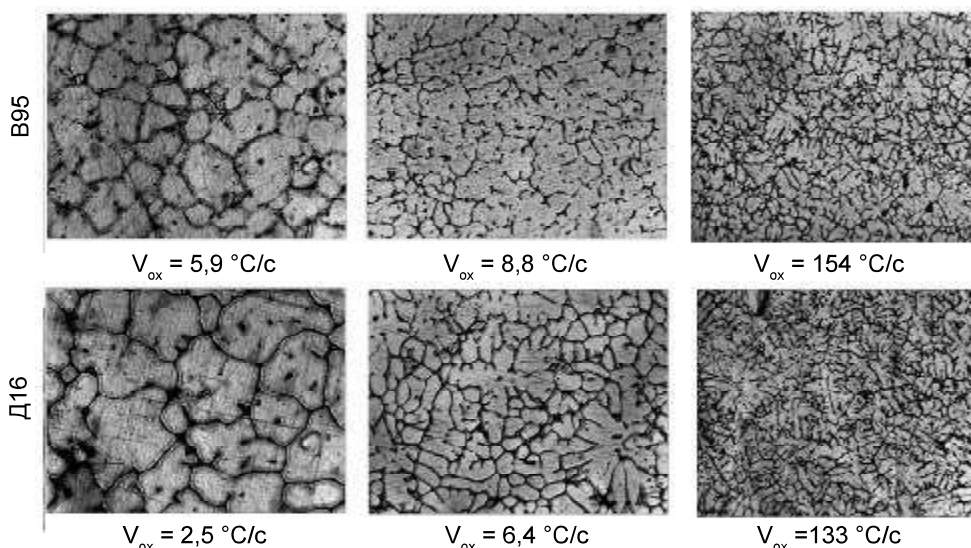


Рис. 1. Мікроструктура зразків алюмінієвих сплавів отриманих з різною швидкістю охолодження під час кристалізації. $\times 200$.

Структура зразків, що досліджувались складається з первинних кристалів α -фази різної дисперсності: кристали, з перетином в полі зору

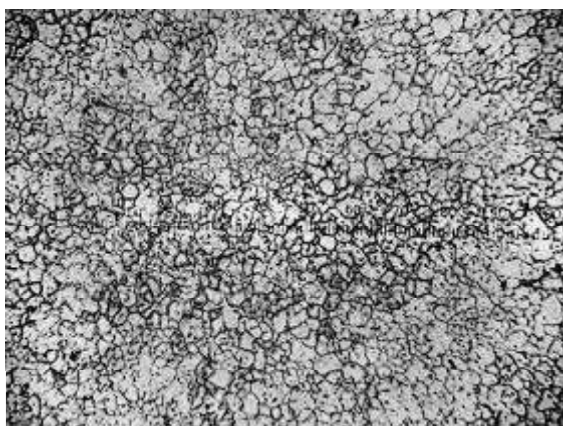


Рис. 2. Мікроструктура зразка алюмінієвого сплаву Д16 отриманого методом валкового лиття – прокатування, $\times 100$.

шліфа 180-250 мкм і середнім розміром дендритів 50 мкм; кристали з перетином 25-50 мкм і дендритів не більше 8 мкм. Також в структурі присутні інтерметаліди. Важливо відмітити, що зразок зі смуги, отриманої валковим розливанням, має однорідну структуру з рівномірним розподілом фазових складових по перетину (рис. 2).

Встановлено, що по мірі підвищення швидкості охолодження розмір зерна α -фази в алюмінієвих сплавах

зменшується від 120-200 мкм при швидкості охолодження 2-8 $^{\circ}\text{C}/\text{c}$ до 10-40 мкм при швидкості охолодження 1000 $^{\circ}\text{C}/\text{c}$.

Вплив швидкості охолодження сплавів АД35, АМг5, Д16 та В95 на час їх тверднення добре описується ступеневою функцією. Характер залежностей ідентичний для усіх чотирьох досліджених сплавів. Тверднення сплавів у графітовій формі триває 2,6-6,8 с, у фторфлогопітовій 22-42 с, у кварцовій трубці 170-360 с. Екстраполяція результатів у бік більш високих швидкостей охолодження характерних для валкового розливання показує (рис. 3), що при швидкості охолодження, характерної для валкової розливки, час тверднення усіх досліджених сплавів становить доли секунди, що є прийнятним для забезпечення стабільного технологічного процесу.

Таким чином, визначено вплив швидкості охолодження при кристалізації алюмінієвих сплавів В95, АМг5, Д16, АД35 на структуру, розмір зерна первинної α -фази, твердість зразків сплавів. Встановлено,

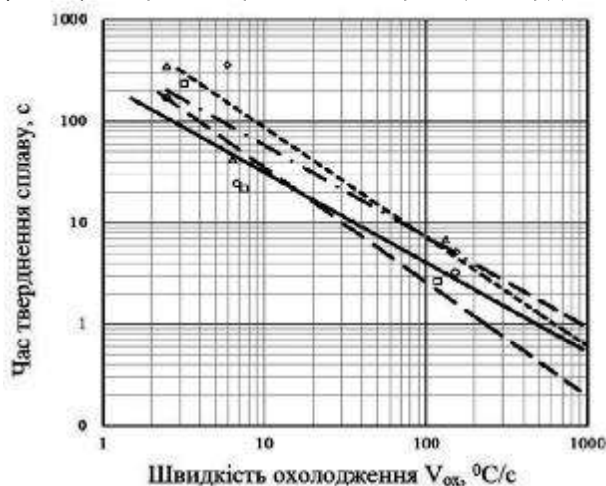


Рис. 3. Екстраполяція даних часу тверднення зразків (\circ – АД35, \square – В95, \diamond – АМг5, Δ – Д16).

що із зростанням швидкості охолодження розплаву розмір зерна α -фази зменшується з 120-200 мкм (при швидкості 2-8 $^{\circ}\text{C}/\text{c}$) до 10-40 мкм (при швидкості 1000 $^{\circ}\text{C}/\text{c}$); час тверднення у різних ливарних формах триває: 2,6-6,8 с (графітова); 22-42 с (фторфлогопітова); 170-360 с (кварцева); підвищується твердість сплавів від 45 до 56 НВ (сплав АД35), від 80 до 103 НВ (сплав В95), від 60 до 68 НВ (сплав АМг5), від 69 до 88 (сплав Д16).

Отримані результати дозволяють розраховувати швидкісні режими роботи валкових ливарних машин для отримання бездефектного прокату алюмінієвих сплавів з широким інтервалом кристалізації (≥ 100 °C), а також прогнозувати структуру прокату та механічні властивості за різних режимів охолодження литої заготовки.

Література

1. MacKenzie D. S. *Aluminum and Aluminum Alloys. Physical Metallurgy and Processes.* – New York - Basel: Marcel Dekker, INC., 1993. – Vol. 1, 1309 p.

References

1. MacKenzie D. S. *Aluminum and Aluminum Alloys. Physical Metallurgy and Processes*, New York – Basel, Marcel Dekker, INC., 1993, Vol. 1, 1309 p. [in English].

Одержано 28.09.20

A. V. Nogovitsyn, V. L. Lakhnenko, I. R. Baranov

Influence of cooling rate on the formation of the primary structure of deformable aluminum alloys

Summary

Today, in the world, it is widely used in the production of aerospace equipment, sea vessels, railway transport and cars have high-strength aluminum alloys Al-Zn-Mg-Cu (for example, B95) and alloys of medium Al-Mg (AMg5), Al-Si-Mg (AD35) and increased strength Al-Cu-Mg (D16). An in-depth study of individual factors that directly affect the structure of the work piece can be crucial for improving product quality during further thermomechanical processing. The article defines data on the grain size of the primary phase of aluminum alloys depending on the cooling rate of castings of various aluminum alloys (AD35, B95, D16, AMg5). It is shown that an increase in the cooling rate from 2-8 °C/s to almost 1000 °C/s leads to a decrease in the grain size of the α -phase from 200 μm to 10-40 μm . As a result of the experiments carried out in the work, the intervals of hardening of the investigated aluminum alloys were determined. It is shown that aluminum alloys containing copper in the chemical composition (≥ 1 %) have a significantly wider crystallization range, in particular, B95 (160 °C) and D16 (132 °C). The samples of strip used in this work from high-strength aluminum alloys obtained by roll casting, to expand the range of investigated cooling rates, have a homogeneous structure with a uniform distribution of phase components, which ensures high functional properties of rolled products from high-strength, heat-strengthened alloys of the Al-Cu and Al-Zn systems. The obtained data of the research results can be recommended for use in the development of the domestic technology of roll casting of high-strength aluminum alloys.

Keywords: High-strength aluminum alloys, roll casting, cooling rate, solidification time, differential thermal analysis, grain size.