

<https://doi.org/10.15407/plit2022.04.022>

УДК 669.715:62-412:621.74.047

А. В. Нарівський, д-р техн. наук, чл. -кор. НАН України;

ORCID 0000-0002-1596-640,

С. Л. Поливода, наук. співроб. e-mail: etma@i.ua

М. М. Ворон, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.;

ORCID 0000-0002-0804-9496

О. В. Сірий, головний конструктор

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

МГД-ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗЛИТКІВ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

Представлено конструкцію і технологічні можливості багатофункціонального МГД-комплексу для приготування алюмінієвих сплавів та безперервного лиття з них зливків. Розроблена технологія приготування в МГД-установці лігатурного сплаву Al–2,5мас.%Zr та безперервного лиття з нього зливків. Показано, що застосування електромагнітного перемішування твердо-рідкої фази зливу при безперервному литті дозволяє диспергувати структуру в алюмінієвих лігатурах, що містять тугоплавкі елементи. Зі зливка сплаву Al–2,5мас.%Zr виготовлено лігатурний пруток для безперервного модифікування сплавів під час лиття зливків. Розроблено технологію безперервного лиття зливків з високоміцного алюмінієвого сплаву В96Ц1 з його модифікуванням лігатурним прутком, що дозволило зменшити величину зерна у 3,5 рази, підвищити міцність пресованих виробів на 6 % та відносне подовження на 35–40 % порівняно з виробами, виготовленими з безперервно литих зливків цього сплаву, відлитих без модифікування лігатурним прутком.

Ключові слова: МГД, високоміцні алюмінієві сплави, модифікування, зливков.

У Фізико-технологічному інституті металів і сплавів НАН України виготовлено й успішно експлуатується плавильно-заливний комплекс для приготування алюмінієвих сплавів та одержання з них високоякісних зливків [1]. До складу комплексу входять вакуумна МГД-установка та машина безперервного лиття (рис. 1).

Використання створеного комплексу у виробництві металопродукції з алюмінієвих сплавів забезпечує:

- постійне електромагнітне перемішування рідкого металу на всіх етапах приготування сплаву, що підвищує ступінь засвоєння легуючих елементів і рівномірність їх розподілу у литих виробках;

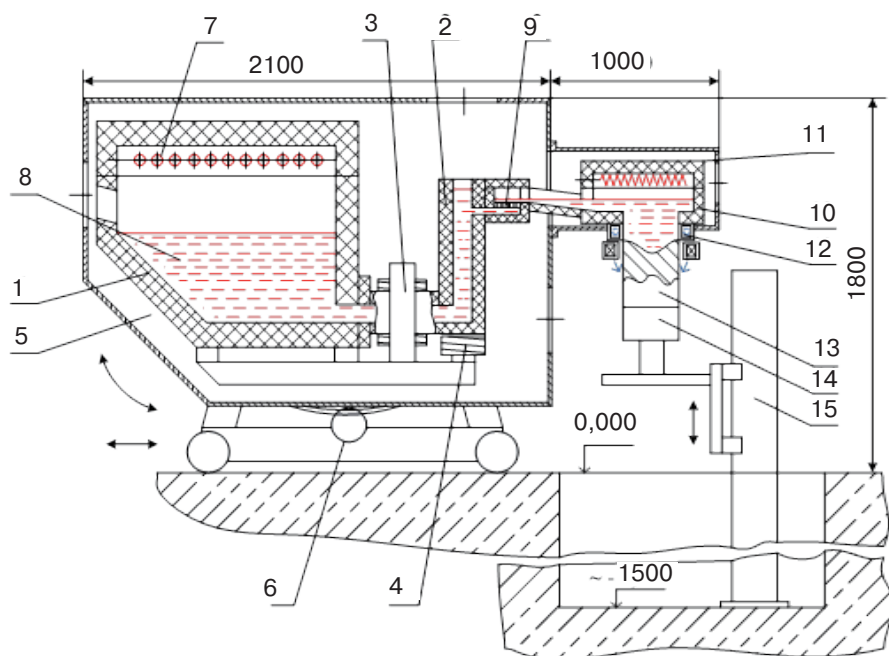


Рис. 1. Схема комплексу вакуумного МГД-обладнання для приготування високоміцних алюмінієвих деформівних сплавів і безперервного лиття зливоків: 1 – тигель; 2 – канал; 3 – індуктор; 4 – електромагніт; 5 – вакуумна камера; 6 – привід повороту вакуумної камери; 7 – нагрівальні елементи; 8 – рідкий метал; 9 – пінокерамічний фільтр; 10 – теплова насадка, що обігривається; 11 – заливальна камера; 12 – кристалізатор з системою охолодження зливка; 13 – зливкок; 14 – затравка; 15 – механізм вертикального переміщення кристалізатора

- рафінування розплаву у вакуумі (розрідження ~ 1 мм. рт. ст.) при постійному електромагнітному його перемішуванні та зменшення вмісту водню до $0,05\text{--}0,12 \text{ см}^3 / 100 \text{ г}$;
- фільтрування розплаву через пористий керамічний фільтр і ефективне видалення оксидних включень до остаточної їх концентрації у сплаві $\leq 0,05$ об. %;
- можливість створення захисної атмосфери над розплавом під час приготування сплаву в МГД-установці та при подачі в кристалізатор [2], що виключає додаткове його газонасичення і окислення;
- регульоване електромагнітне перемішування сплаву в кристалізаторі під час лиття зливоків, що дозволяє керувати процесом структуроутворення в них;
- можливість забезпечення плоского фронту кристалізації зливка завдяки конструкції низького кристалізатора ($h \sim 30$ мм) з тепловою насадкою [3], що сприяє формуванню однорідної дисперсної структури в зливках.

Для підвищення властивостей безперервно литих зливоків з алюмінієвих сплавів вдосконалено конструкції каналу і робочої зони МГД-установки [4, 5]. В результаті цього збільшилися швидкості процесів розчинення тугоплавких легуючих і модифікуючих елементів при знижених температурах розплаву. Для вакуумного рафінування алюмінієвих сплавів з високим вмістом цинку розроблено технологію їх приготування [6], яка дозволила усунути втрати цього легуючого елемента випаровуванням та знизити вміст водню в литому металі до $0,05 \text{ см}^3 / 100 \text{ г}$. Також розроблено спосіб рафінування алюмінієвих сплавів [7] за допомогою послідовних вакуумних імпульсів, що забезпечує залишкову концентрацію водню у зливках на рівні $0,0\text{--}0,03 \text{ см}^3 / 100 \text{ г}$ металу. Створено методи оперативного контролю вмісту водню у рідкому металі [8, 9], які дозволили автоматизувати процес приготування сплавів в МГД-установці.

Можливості комплексу МГД-обладнання застосовували при розробці технологій одержання безперервно литих зливоків з лігатурного сплаву $\text{Al}\text{--}2,5\%\text{мас.}\text{Zr}$ та високоміцного алюмінієвого сплаву В96Ц1.

Технологія приготування лігатурного сплаву Al–2,5%мас.Zr з первинних матеріалів (алюміній марки А85 і цирконій марки КТЦ) полягала в розчиненні в алюмінії подрібненої шихти цирконію в активній зоні МГД-установки [10] при температурі 820 °С з наступним її підвищенням до 1000 °С та витримкою протягом 20 хв. Для уникнення окиснення сплаву плавку проводили в захисній атмосфері аргону. Методом безперервного лиття відливали зливки Ø50 мм. Одна частина зливка відливалася без електромагнітного перемішування, друга – з перемішуванням при струмовому навантаженні 160 А, величину якого було встановлено в результаті фізичного моделювання [11]. Макро- і мікроструктуру обох частин зливка зображено на рис. 2.

Після відпалу при температурі 250 °С впродовж 30 хвилин зі зливка лігатурного сплаву Al–2,5%мас.Zr було відпресовано прутки Ø 10 мм, який використовували для безперервного модифікування сплаву В96Ц1.

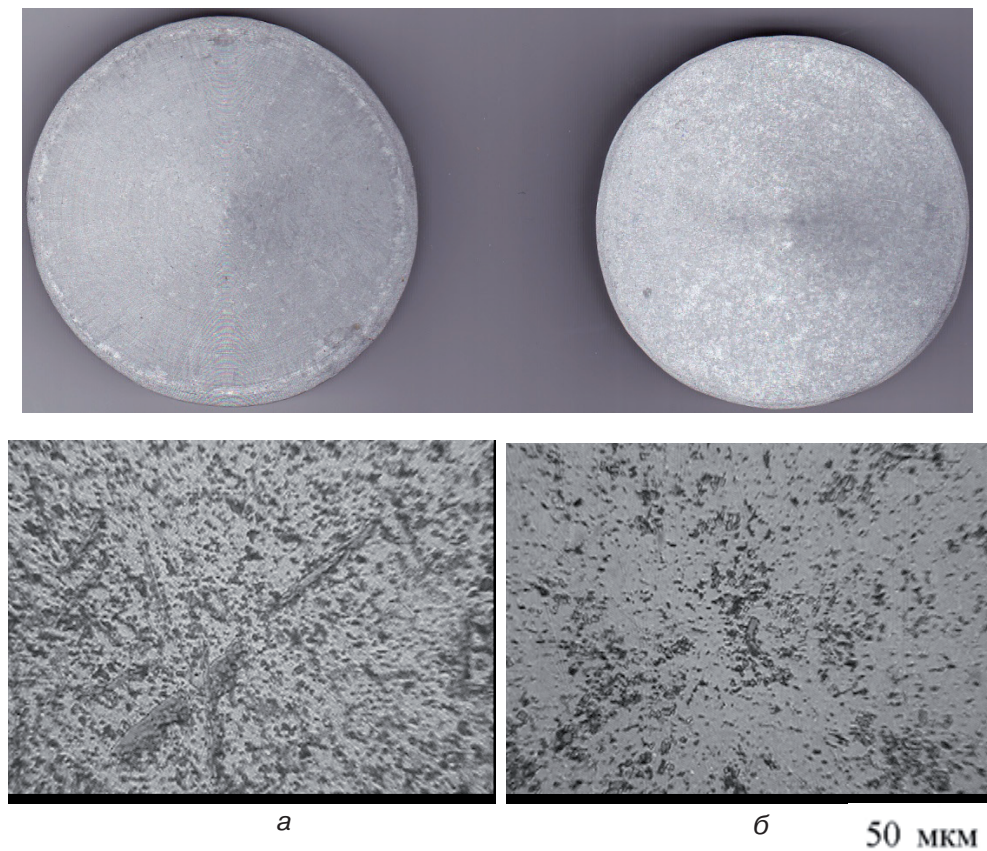


Рис. 2. Макро- і мікроструктура зливка діаметром 50 мм з лігатурного сплаву Al–2,5%мас.Zr: а – без перемішування сплаву в кристалізаторі; б – з електромагнітним перемішуванням сплаву в кристалізаторі

Сплав В96Ц1 готували з первинних матеріалів за технологією [6, 12], що передбачає введення цинку в рідкий сплав після першого етапу вакуумного рафінування з наступним другим етапом рафінування протягом 5 хвилин при залишковому тиску у вакуумній камері МГД-установки 0,133 кПа (1 мм рт.ст). Вміст водню в сплаві не перевищував 0,10 см³/100 г. Було приготовлено сплав з вмістом цирконію 0,10 %мас.

З приготовленого сплаву відливали два зливки Ø 150 мм. Перший з них відливали з безперервним модифікуванням лігатурним прутком Al–2,5мас.%Zr, отриманим із застосуванням електромагнітного перемішування в процесі кристалізації лігатурного

зливка. Подачу прутка проводили з розрахунку додаткового введення в сплав 0,03 %мас. цирконію. Лігатурний пруток подавався в розплав в тепловій насадці роздавальної камери машини безперервного лиття.

По закінченню лиття першого зливка в сплав, що залишився в тиглі МГД-установки дошихтовувався цирконій до вмісту $\sim 0,13$ %мас. і відливали другий зливков за штатною технологією без модифікування лігатурним прутком. Найбільш типові структури отриманих зливків наведено на рис. 3. Середня величина зерна в зливку, отриманому за штатною технологією складала ~ 280 мкм, а в зливку, модифікованому лігатурним прутком, становила ~ 80 мкм.

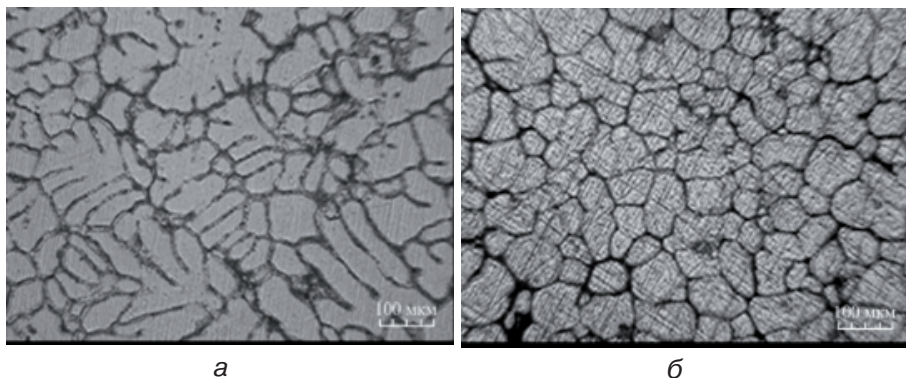


Рис. 3. Мікроструктура безперервно литих зливків з немодифікованого (а) та модифікованого лігатурним прутком Al–2,5%мас.Zr (б) сплаву В96Ц1

Гомогенізаційний відпал зливків сплаву В96Ц1 проводили за стандартним режимом при температурі 460 °С протягом 24 годин з охолодженням на повітрі. З гомогенізованих злитків виготовляли дослідні циліндричні заготовки шляхом їх пресування при температурі 380 °С. Після пресування проводили термічну обробку заготовок за режимами: загартування у воді від температури 470 °С та штучне старіння при 140 °С протягом 16 годин. Результати механічних випробувань заготовок представлено у таблиці.

Механічні властивості гарячепресованих заготовок з сплаву В96Ц1

Сплав	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Модифікований лігатурним прутком Al–2,5%мас.Zr	669	642	7,2
Без модифікування	632	611	4,5

Висновки

- Застосування електромагнітного перемішування твердо-рідкої фази зливку при безперервному литті дозволяє диспергувати структуру в алюмінієвих лігатурах, що містять тугоплавкі елементи.

- Після безперервного модифікування прутком лігатури Al–2,5%мас.Zr, що одержаний із застосуванням електромагнітних дій на розплав, величина зерна в зливках зі сплаву В96Ц1 зменшується у 3,5 рази, міцність (σ_b) пресованих виробів підвищується на 6 %, відносно подовження – на 35–40 % порівняно з виробами, одержаними з безперервно литих зливків, відлитих без модифікування лігатурним прутком.

Список літератури

- 1 Плавильно–ливарний комплекс для напівбезперервного лиття зливків з алюмінієвих сплавів. Патент України на корисну модель № 119406 від 25.09.2017 р. / Пужайло Л. П., Сірий О. В., Поливода С. Л., Гординя О. М.
- 2 Кристалізатор для безперервного лиття зливків з алюмінієвих сплавів. Патент України на корисну модель № 118018 від 07.2017 р. / Пужайло Л. П., Сірий О. В., Гординя О. М., Поливода С. Л.
- 3 Спосіб напівбезперервного лиття зливків з алюмінієвих сплавів, які містять легкоокислювані компоненти. Патент України на корисну модель № 131180. від 10.01.2019 р. / Пужайло Л. П., Поливода С. Л., Сірий О. В., Гординя О. М.
- 4 Установа для приготування та електромагнітного розливання алюмінієвих сплавів у ливарні форми. Патент України на винахід № 99307 від 10.08.2012 р. / Пужайло Л. П., Сірий О. В., Поливода С. Л.
- 5 Установа для приготування та електромагнітного розливання алюмінієвих сплавів у ливарні форми. Патент України на винахід № 100231 від 10.12.2012 р. / Пужайло Л. П., Сірий О. В., Поливода С. Л.
- 6 Спосіб приготування високоміцних алюмінієвих деформівних сплавів з вмістом цинку. Патент України на винахід № 101343 від 25.03.2013 р. / Пужайло Л. П., Поливода С. Л., Сірий О. В.
- 7 Спосіб рафінування алюмінієвого сплаву у вакуумі. Патент України на винахід № 108781 від 18.06.2015 р. / Пужайло Л. П., Сірий А. В., Поливода С. Л.
- 8 Спосіб визначення вмісту во у рідкому металі. Патент України на винахід № 115590 від 27.11.2017 р. / Пужайло Л. П., Поливода С. Л., Сірий О. В., Гординя О. М., Поливода М. О.
- 9 Спосіб визначення вмісту водню у рідкому металі. Патент України на винахід № 115591 від 27.11.2017 р. / Пужайло Л. П., Поливода С. Л., Сірий О. В., Гординя О. М.
- 10 Пужайло Л. П., Гаврилюк В. П., Серый А. В., Поливода С. Л., Гордыня А. Н. Моделирование магнитогидродинамических процессов электромагнитного перемешивания алюминиевого сплава в кристаллизаторе и тепловой насадке при полунепрерывном литье слитков. Процессы литья. 2012. № 5. С. 54–60.
- 11 Спосіб приготування алюмінієвих лігатур у магнітогідродинамічних установках. Патент України на винахід № 131179 від 10.01.2019 р. / Пужайло Л. П., Поливода С. Л., Сірий О. В., Гординя О. М.
- 12 Пужайло Л. П., Гаврилюк В. П., Серый А. В., Поливода С. Л., Гордыня А. Н. Особенности приготовления в вакуумной МГД–установке высокопрочных алюминиевых сплавов, содержащих цинк. Металл и литье Украины. 2012. № 1. С. 32–34.

Надійшла 26.10.2022

References

- 1 Method for obtaining a composite material. Patent 2024558: RF, C1, C08J 11/12. / A. B. Korzhenevskij, V. A. Burmistrov, I. A. Ovechkin / Publ. 15.12.1994. [in russian].
- 2 Method for maintaining a polymer composite material. Patent 82838 Ukrayina: MPK S08J 11/04. / O. J. Shinskij, A. O. Stryuchenko, V. S. Doroshenko, I. O. Shinskij et al. / Publ. 12.08.2013, Bull. 15. [in Ukrainian].
- 3 Shinskij O. I., Tihonova O. A., Stryuchenko A. A., Doroshenko V. S. (2011) Study of the processes of thermal compaction of polystyrene waste. *Tverdye bytovye othody*. No 4. P. 48–50. [in russian].
- 4 Uttaravalli A. N., Dinda S. & Gidla B. R. (2020) Scientific and Engineering Aspects of Recycling and Reuse of Expanded Polystyrene Waste for Various Potential Applications: A Review. *Process Safety and Environmental Protection*, 137, 140–148.

- 5 Trunilina A. V., Baurova N. I. Polymer composites with biodegradation properties. Vse materialy. Enciklopedicheskij spravochnik. 2019. No 1. P. 9–13. [in russian].
- 6 The method of refining aluminum alloy in vacuum. Patent of Ukraine for an invention UA108781 (from 18.06.2015) / Puzhailo L. P., Siriy A. V., Polyvoda S. L. [in Ukrainian].
- 7 Method for determining the content of ω in liquid metal. Patent of Ukraine for an invention UA115590 (from 27.11.2017) / Puzhailo L. P., Polyvoda S. L., Siriy O. V., Gordynia O. M. Polyvoda M. O. [in Ukrainian].
- 8 Method for determining the content of hydrogen in liquid metal. Patent of Ukraine for an invention UA115591 (from 27.11.2017) / Puzhailo L. P., Polyvoda S. L. Siriy O. V., Gordynia O. M. [in Ukrainian].
- 9 Method for determining the content of hydrogen in liquid metal. Patent of Ukraine for an invention UA115591 (from 27.11.2017) / Puzhailo L. P., Polyvoda S. L. Siriy O. V., Gordynia O. M. [in Ukrainian].
- 10 Puzhailo L. P., Gavriluk V. P., Sery A. V., Polyvoda S. L., Gordynia A. N. (2012) Modeling of magnetohydrodynamic processes of electromagnetic mixing of an aluminum alloy in a crystallizer and thermal nozzle during semi-continuous casting of ingots. *Casting Processes*. No. 5. pp. 54–60. [in russian].
- 11 The method of preparing aluminum ligatures in magnetohydrodynamic installations. Patent of Ukraine for an invention UA131179 (from 10.01.2019) / Puzhailo L. P., Polyvoda S. L., Siriy O. V., Gordynia O. M. [in Ukrainian].
- 12 Puzhaylo L. P., Gavriluk V. P., Sery A. V., Polyvoda S. L., Gordynia A. N. (2012) Features of preparation in a vacuum MHD-installation of high-strength aluminum alloys with zinc. *Metal and Casting of Ukraine*. No. 1. pp. 32–34. [in russian].

Received 26.10.2022

A. V. Narivskiy, Dr. Sci. (Engin.), *Corresponding Member of the NAS of Ukraine;*
ORCID 0000-0002-1596-6401

S. L. Polyvoda, *Research scientist; e-mail: etma@i.ua*

M. M. Voron, PhD (Engin.), *Senior research scientist;*
ORCID 0000-0002-0804-9496

O. V. Siriy, *Senior constructor*

Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

MHD-PROCESSES AND EQUIPMENT FOR CONTINUOUS CASTING OF ALUMINUM ALLOY INGOTS

The design and technological capabilities of the multifunctional MHD-complex for the preparation of aluminum alloys and their continuous casting ingots are presented. Technology of preparing Al-2.5 wt. % Zr master-alloy in the MHD installation and continuous casting of ingots from it has been developed. It is shown that the use of electromagnetic stirring of a solid-liquid phase inside ingot during continuous casting allows to disperse the structure in aluminum master-alloys with refractory elements. Master-alloy bar was made from Al-2.5 wt. % Zr alloy ingot for continuous modification during ingot casting. The technology of medicated ingots continuous casting from high-strength aluminum alloy B96L1 with its modification with master-alloy bar was developed, which allowed to reduce the grain size by 3.5 times and to increase the strength of pressed products by 6% and relative elongation by 35-40%, compared to products made from continuously casted ingots of this alloy and casted without modification with overviewed master-alloy.

Keywords: *MHD, high-strength aluminum alloys, modification, ingot.*