

А.В. Нарівський, член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, директор,
e-mail: av.narivskii@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1596-6401>

С.Л. Поливода, науковий співробітник, e-mail: sl.polivoda.opprs@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-8906-0693>

М.М. Ворон, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, заст. зав. відділу, e-mail: mi hail.voron@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0002-0804-9496>

В.О. Твердохвалов, кандидат технічних наук, науковий співробітник, e-mail: tverdokhvalovvo@nas.gov.ua,
<https://orcid.org/0000-0002-3756-7639>

А.Ю. Семенко, кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник,
e-mail: semenko.au@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0448-1636>

О.В. Сірий, головний конструктор, e-mail: ov.siryi.opprs@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-7721-5976>

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

Сучасні магнітодинамічні технології для виготовлення безперервно литих зливків з алюмінієвих сплавів

Алюмінієві деформівні сплави на основі системи Al-Mg є найбільш розповсюдженими в порівнянні зі сплавами інших систем легування. Зараз більше 90 % світового обсягу пресованих виробів виготовляють з таких сплавів. Це пояснюється високою їх технологічністю при обробці тиском, яка дозволяє одержувати пресовані вироби з якісною поверхнею та сприятливим поєднанням механічних і корозійних властивостей. Постійний ріст попиту споживачів до якості виробів, а також прагнення до зменшення витрат на їх виробництво призвели в останні роки до появи високих вимог до властивостей основної пресової заготовки — зливка, який виготовляють безперервним литтям.

В статті автори описують інноваційні рішення та сучасні підходи до виготовлення безперервно литих зливків з алюмінієвих сплавів, за допомогою створених магнітодинамічних (МГД) технологій та обладнання.

Показано, що використання магнітодинамічних (МГД) технологій забезпечує високу якість зливків за рахунок перемішування у вакуумі та фільтрації розплаву, зменшення розміру мікронеоднорідностей та зниження концентрації газів і оксидів у сплавах. Завдяки застосуванню електромагнітних і вакуумних впливів забезпечується рівномірний розподіл легуючих елементів в структурі зливків, що значно підвищує їх механічні властивості. Розглянуто методи захисту сплавів від окислення при безперервному литті.

Розроблені процеси мають суттєвий технологічний потенціал, який доцільно застосувати в промисловості з метою імпортозаміщення та підвищення конкурентоспроможності металопродукції з алюмінієвих сплавів, що орієнтовані на сучасний ринок.

Ключові слова: магнітодинамічне обладнання; безперервне лиття зливків; алюмінієві сплави; електромагнітні та вакуумні дії на метал.

Високу якість конструкційних матеріалів забезпечують сучасні способи приготування сплавів, що базуються на інтенсивних процесах взаємодії газових, рідких та твердих фаз в розплаві. Збільшити швидкість міжфазових взаємодій у сплавах можна накладанням електромагнітних, плазових, відцентрових, вакуумних та інших впливів на металеві системи. При використанні таких впливів відбуваються теплові та силові дії на рідкий метал на макрорівні (нагрівання,

перемішування розплаву), а також на мікрорівні (руйнуються мікронеоднорідності, неметалеві включення, окремі сполуки та інтерметаліди в сплавах). Під впливом фізичних дій диспергуються великі (>30 нм) мікронеоднорідності в алюмінієвому розплаві, який перемішують. Для руйнування в сплавах більш дрібних мікронеоднорідностей важливим є тривалість перемішування розплаву, а не його інтенсивність. В потоці рідкого металу на мікронеоднорідності вплива-

ють великі вихри, які, в свою чергу, породжують малі вихори і передають їм свою кінетичну енергію. Ця енергія витрачається на подолання сил внутрішнього тертя у розплаві та динамічних сил, що утворюються під впливом градієнта швидкості руху розплаву, та на руйнування мікронеоднорідностей. Найбільш дрібні мікронеоднорідності інтенсифікують процеси зародкоутворення α -твердого розчину, а великі — структурних фаз при кристалізації сплаву.

У Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України (ФТІМС НАН України) розроблено принцип та багатофункціональні магнітодинамічні (МГД) технології та обладнання, в яких реалізуються малоінерційний і безконтактний вплив електромагнітних полів на металеві розплави, регульовані індукційний нагрів сплавів та процеси їх перемішування, транспортування і розливання металу під дією електромагнітної сили та генерованого тиску. Застосування МГД-процесів у виробництві конструкційних матеріалів дозволяють створювати конкурентоспроможні зразки нової техніки і одержувати науково-технічну металопродукцію, що орієнтовані на ринок високих технологій та імпортозаміщення.

До складу МГД-обладнання, що успішно експлуатується, входять вакуумний міксер та машина безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) з кристалізатором (рис. 1). Для приготування сплавів у МГД-міксері використовується принцип перетворення електричної енергії в теплову, в якому первинною обмоткою є індуктор, а вторинною — виток рідкого металу в каналі та тиглі. В міксері метал нагрівається індуктором. При одночасному вмиканні електромагніту та індуктора утворюється електромагнітна сила (ЕС) за рахунок взаємодії струму в рідкому металі з магнітним полем електромагніту. Величину ЕС регулюють зміною електричних параметрів індуктора і електромагніту. Під впливом ЕС рідкий метал циркулює по каналу і тиглю міксера,

а також заливається в кристалізатор з регульованою швидкістю. При цьому на сплав у МГД-міксері діють електричний струм, магнітне поле, гідродинамічні та вихрові пульсації в розплаві. Під впливом таких дій інтенсифікуються процеси розчинення і засвоєння легуючих і модифікуючих елементів сплавом, та усе-реднюються його хімічний склад і температура.

Канал і тигель з електромагнітною системою та МГД-міксер розміщені у вакуумній камері, де рафінують сплави від газів при постійному перемішуванні розплаву. Незалежно від початкового вмісту водню в алюмінієвому розплаві, вакуумне рафінування дозволяє знизити його залишкову концентрацію в сплавах до $0,05 \dots 0,1 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ металу. Із сплавів з таким вмістом водню одержують безперервним литтям зливки без газової поруватості. Сплави для литих виробів відповідального призначення рафінують за допомогою накладання послідовних вакуумних імпульсів на розплав, що забезпечує залишковий вміст водню у зливках на рівні $0,01 \dots 0,03 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ металу [1]. Для вакуумного рафінування алюмінієвих сплавів з високим (більше 4 % за масою) вмістом цинку розроблена технологія їх приготування, яка дозволяє усунути втрати цинку випаровуванням [2].

Приготований сплав із МГД-міксера під регульованим електромагнітним тиском пропускають через керамічний фільтр, що розміщений у вакуумній камері. Після фільтрування залишкова концентрація оксидів у сплаві не перевищує 0,05 % об. Очищений від оксидів сплав електромагнітними силами подають в кристалізатор через металоприймач, який герметично з'єднаний з вакуумною камерою фільтрування. Таке з'єднання дозволяє додатково вакуумувати розплав на шляху до кристалізатора. При цьому в ділянці каналу з металом, яка розташована між полюсами електромагніту, утворюється «активна зона». В активній зоні на сплав діє максимальний



Рис. 1.

Вакуумне МГД-обладнання для приготування алюмінієвих сплавів та безперервного лиття з них зливок

магнітодинамічний вплив, який інтенсифікує процеси розчинення легуючих елементів у сплавах при менших температурах перегріву всього розплаву [3; 4]. Внаслідок цього знижуються газонасичення і окислення розплаву та витрати електроенергії на приготування сплавів.

Формування зливків при МГД-безперервному литті відбувається у низькому ($h = 30$ мм) кристалізаторі, на внутрішню поверхню якого нанесено теплоізоляційний шар футеровки. Наявність такого шару дозволяє усунути або сповільнити інтенсивність радіального тепловідведення від зливка по висоті кристалізатора. В результаті цього значно зменшується ширина двофазної зони у сплаві при його твердненні, що позитивно впливає на структуру і властивості закристалізованих зливків.

Кристалізатор оснащений системою електромагнітного перемішування рідкої фази в зливку при його формуванні (рис. 2).

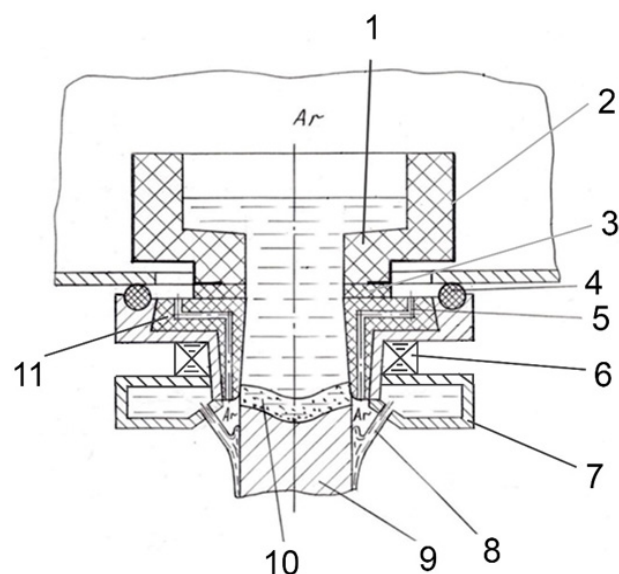


Рис. 2. Схема кристалізатора з аргоновим захистом сплаву: 1 — рідкий метал; 2 — металоприймач; 3 — теплоізолятор; 4 — ущільнювач; 5 — канал для подачі аргону; 6 — електромагніт; 7 — водоохолоджувач; 8 — канали для подачі води; 9 — рідко-тверда зона у зливку; 10 — зливков; 11 — футеровка

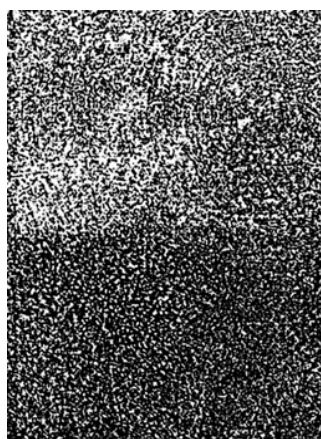


Рис. 3. Макроструктура сплаву по висоті зливка: верх — без перемішування сплаву в кристалізаторі; низ — з електромагнітним перемішуванням

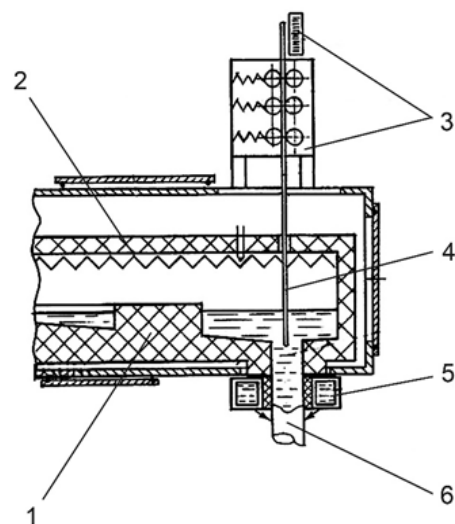


Рис. 4. Схема легування сплаву лігатурним прутком при безперервному литті зливка діаметром — 90 мм: 1 — металоприймач; 2 — елементи нагрівальні; 3 — пристрій для переміщення прутка; 4 — прутков із лігатури; 5 — кристалізатор; 6 — зливков

Використання електромагнітного перемішування під час безперервного лиття дозволяє вирівнювати ширину фронту кристалізації сплаву, що зменшує анізотропію властивостей та внутрішніх напружень у зливку. При цьому подрібнюється структура у зливках (рис. 3), та підвищуються їх механічні властивості.

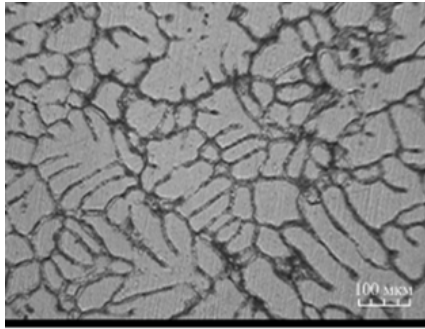
Перемішувати розплав доцільно при введенні в нього модифікаторів, що інтенсифікує процес розчинення добавок в сплаві та сприяє рівномірному їх розподілу в зливках.

Створене МГД-обладнання дозволяє легувати або модифікувати сплави в міксері за звичайною технологією, а також за допомогою прутків, які виготовляють з потрібної лігатури. Лігатурний прутков доцільно вводити з регульованою швидкістю у верхню частину зливка (рис. 4). При такому введенні прутка інтерметалідні та зміцнюючі фази сплаву рівномірно розподіляються у зливку (рис. 5).

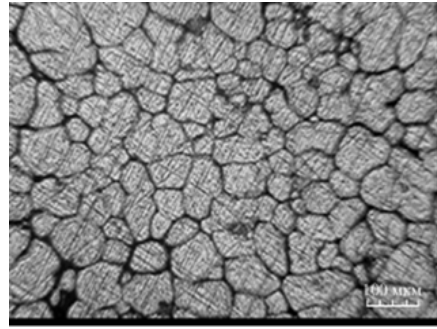
Із модифікованого різними способами сплаву одержували гарячепресовані заготовки. Після гомогенізаційного відпалу та термічної обробки за стандартними режимами для сплаву B96Ц1 із заготовок виготовляли зразки для механічних випробувань (табл. 1).

Після безперервного модифікування сплаву лігатурним прутком, що одержаний з використанням електромагнітного перемішування металу в кристалізаторі, величина зерна в заготовках зменшується у 3,5 рази. Межі міцності при розриві (σ_B) та плинності ($\sigma_{0,2}$) пресованих виробів підвищуються на 5—6 %, відносно подовження — на 35—40 % в порівнянні з заготовками зі сплаву, який модифікували звичайним способом.

Властивості зливків з деформівних алюмінієвих сплавів суттєво залежать від концентрації оксидних включень в них. Оксидна плівка, що утворюється на поверхні розплавлених сплавів, має низьку міцність і руйнується при перемішуванні рідкого металу. Тому



а



б

Рис. 5. Структура безперервно литих зливків діаметром 150 мм із сплаву В96Ц1, який модифікували: а — розчиненням цирконію в рідкому металі; б — прутком із лігатури Al2,5 %мас. Zr

Таблиця 1

Механічні властивості гарячепресованих заготовок зі сплаву В96Ц1

Спосіб модифікування	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Прутком з лігатури Al-2,5 %мас. Zr	669	642	7,2
Розчиненням цирконію у рідкому металі	634	611	4,5

під час приготування сплавів з вмістом магнію більше 1 %мас., поверхнева плівка не захищає розплав від окислення. Для захисту таких сплавів від окислення в розплав вводять малі добавки берилію, які утворюють на поверхні рідкометалевої ванни щільну плівку. Ця плівка значно знижує окислення сплавів та вміст неметалевих включень у зливках. Однак, берилій та його сполуки — отруйні, а використання його при одержанні сплавів є небезпечним.

Для усунення (зменшення) окислення рідкого металу всі вузли МГД-комплексу (міксер, фільтрувальна камера, металоприймач та кристалізатор) герметично з'єднані між собою [4]. Це дозволило захищати інертними газами сплав на всіх етапах одержання зливків від плавлення до заливання в кристалізатор. Створення захисного середовища особливо актуально при приготуванні сплавів, які містять легкоокислювані магній, цинк та інші елементи, наприклад, сплави 1560, 1575, 1545.

Визначили ефективність способів захисту розплаву від окислення при безперервному литті зливків (діаметр 90 мм) із сплаву 1545, що містить 4,5 % магнію за масою (табл. 2). Видно, що у зливків, одержаних з незахищеного розплаву (плавка № 1), межа міцності при розриві на 30 %, а відносне подовження у 2,5 рази менше, ніж у зливків із сплаву, який захищали від окислення аргоном або легували берилієм.

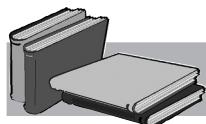
Висновки

Представлені в статті результати досліджень підтверджують широкі технологічні можливості створених МГД-технологій. Розроблені технічні рішення можна ефективно використовувати у процесах приготування складнолегованих алюмінієвих сплавів та одержання з них литих і пресованих виробів відповідального призначення. Застосування таких технологій у промисловості дозволяє вирішити багато проблем з імпортозаміщенням деформівних алюмінієвих сплавів (замість російських) та одержувати конкурентоспроможну металопродукцію з них.

Таблиця 2

Механічні властивості безперервно литих зливків із сплаву 1545

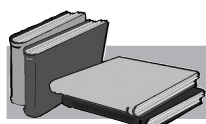
Номер плавки	Спосіб захисту сплаву від окислення	Механічні властивості		
		$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
1	Без захисту розплаву	132	215	5
2	Введенням у розплав лігатури Al-5 % Be з розрахунку концентрації берилію в сплаві ~0,0003 % за масою	207	290	13
3	Створенням аргонного середовища над розплавом	203	294	12



ЛІТЕРАТУРА

1. Спосіб рафінування алюмінієвого сплаву у вакуумі: пат. 108781 Україна: МПК C22B 21/00, C22B 9/04. № а201310432; заявл. 27.08.2013; опубл. 10.06.2015, Бюл. 11. 4 с.
2. Спосіб приготування високоміцних алюмінієвих деформівних сплавів з вмістом цинку: пат. 101343 Україна: МПК C22C 21/06, C22C 21/02, C22B 9/04, C22B 21/00. № а201007359; заявл. 14.06.2010; опубл. 25.03.2013, Бюл. 6. 5 с.
3. Спосіб напівбезперервного лиття зливків з алюмінієвих сплавів, які містять легкоокислювані компоненти: пат. на корисну модель 131180 Україна: МПК B22D 11/14, B22D 21/04. № u201806809; заявл. 15.06.2018; опубл. 10.01.2019, Бюл. 1. 5 с.
4. Спосіб приготування алюмінієвих лігатур у магнітогідродинамічних установках: пат. на корисну модель 131179 Україна: МПК C22B 21/00. № u201806805; заявл. 15.06.2018; опубл. 10.01.2019, Бюл. 1. 6 с.

Надійшла 15.08.2024



REFERENCES

1. Puzhailo, L. P., Siryi, O. V., & Polivoda, S. L. (2015). *Sposib rafinuvannia aliuminiievoho splavu u vakuumi* [Method for vacuum refining of aluminium alloy]. Patent No. 108781 Ukraine [in Ukrainian].
2. Puzhailo, L. P., Polyvoda, S. L., & Siryi, O. V. (2013). *Sposib pryhotuvannia vysokomitsnykh aliuminiievkykh deformivnykh splaviv z vmistom tsynku* [Method for producing high-strength aluminum wrought alloys containing zinc]. Patent No. 101343 Ukraine [in Ukrainian].
3. Puzhailo, L. P., Polyvoda, S. L., Siryi, O. V., & Gordynia, O. M. (2019). *Sposib napivbezperervnoho lyttia zlyvkiv z aliuminiievkykh splaviv, yaki mistiat lehkokysliuvani komponenty* [The method of semi-continuous casting of ingots from aluminum alloys containing easily oxidizable components]. Utility model patent No. 131180 Ukraine [in Ukrainian].
4. Puzhailo, L. P., Polyvoda, S. L., Siryi, O. V., & Gordynia, O. M. (2019). *Sposib pryhotuvannia aliuminiievkykh lihatur u mahnitohidrodynamichnykh ustanovkakh* [The method of preparing aluminum ligatures in magnetohydrodynamic installations]. Utility model patent No. 131179 Ukraine [in Ukrainian].

Received 15.08.2024

Summary

A.V. Narivskiy, Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Director, e-mail: av.narivskii@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1596-6401>

S.L. Polyvoda, Researcher, e-mail: sl.polivoda.opprs@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-8906-0693>

M.M. Voron, PhD (Engin.), Senior Research Scientist, Deputy Head of the Department, e-mail: mihail.voron@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0804-9496>

V.O. Tverdokhvalov, PhD (Engin.), Researcher, e-mail: tverdokhvalovvo@nas.gov.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3756-7639>

A.Yu. Semenko, PhD (Engin.), Senior Research Scientist, Senior Researcher, e-mail: semenko.au@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0448-1636>

O.V. Siryi, Senior Designer, e-mail: ov.siryi.opprs@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-7721-5976>

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

Modern magnetodynamic technologies for the production of continuously cast ingots from aluminum alloys

Deformable aluminum alloys based on the Al-Mg system are the most widespread in comparison with alloys of other alloying systems. Now more than 90 % of the world volume of pressed products is made from such alloys. This is explained by their high manufacturability during pressure processing, which allows to obtain pressed products with a high-quality surface and a favorable combination of mechanical and corrosion properties. The constant growth of consumer demand for the quality of products, as well as the desire to reduce the costs of their production, have led in recent years to the appearance of high requirements for the properties of the main press blank – an ingot made by continuous casting.

In the article, the authors describe innovative solutions and modern approaches to the production of continuously cast ingots from aluminum alloys, using the created magnetodynamic (MHD) technologies and equipment.

It is shown that the use of magnetodynamic (MHD) technologies ensures high quality of ingots due to mixing in a vacuum and filtration of the melt, reducing the size of microinhomogeneities and reducing the concentration of gases and oxides in alloys. Thanks to the application of electromagnetic and vacuum influences, a uniform distribution of alloying elements in the structure of ingots is ensured, which significantly increases their mechanical properties. Methods of protecting alloys from oxidation during continuous casting are considered.

The developed processes have significant technological potential, which should be applied in industry for the purpose of import substitution and increasing the competitiveness of metal products made of aluminum alloys, which are oriented to the modern market.

Keywords

Magnetodynamic equipment; continuous ingot casting; aluminum alloys; electromagnetic and vacuum effects on metal.