

## Структура, фазовий склад і властивості сплаву АК12М2МгН з підвищенням вмістом заліза, обробленого в рідкому стані електричним струмом

Пригунова А. Г., доктор технічних наук, завідувачка відділу, [adel\\_nayka@ukr.net](mailto:adel_nayka@ukr.net),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8030-9160>

Жидков Є. А., науковий співробітник, [ezh71@ukr.net](mailto:ezh71@ukr.net)

Бабюк В. Д., науковий співробітник, [vdbptima@ukr.net](mailto:vdbptima@ukr.net)

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

*Розглянуто можливість заміни поришневого евтектичного сплаву системи Al – Si – Cu АК12М2МгН, який вироблявся на ВАТ «Запорізький алюмінієвий комбінат» з первинного алюмінію, на АК12М2МгНЖ з підвищеним вмістом заліза, що дозволить розширити сировинну базу виробництва за рахунок використання брухту та відходів. Цю проблему пропонується вирішити введенням до технологічного процесу оброблення розплаву однополярним імпульсним електричним струмом при розливі за спеціально розробленими режимами.*

*Проведено експерименти з впливу електричного струму на мікроструктуру, фазовий склад сплавів АК12М2МгН і АК12М2МгНЖ та їх механічні властивості при температурах 20 °С і 300 °С. Оброблення розплаву електричним струмом здійснено за режимами: щільність електричного струму ( $j$ ) 100-400 А/см<sup>2</sup>, частота імпульсів ( $\nu$ ) 50-2000 Гц. Розглянуто фазовий склад сплавів. Показано, що основною залізовмісною фазою сплаву АК12М2МгН є  $(\text{Fe, Mn})_3\text{Si}_2\text{Al}_{15}$  ( $\alpha$ ) у вигляді розгалужених евтектичних кристалів. Голкоподібна фаза  $\beta\text{-FeSiAl}_5$  практично відсутня. До складу сплаву АК12М2МгНЖ, на відміну від АК12М2МгН, входять інтерметалід  $\beta\text{-FeSiAl}_5$  та первинні грубі кристали фази  $(\text{Fe, Mn})_3\text{Si}_2\text{Al}_{15}$ . Після оброблення сплавів в рідкому стані імпульсним електричним струмом за різними режимами збільшується ступінь диференціювання евтектичних складових. Зокрема, лінійний розмір евтектичних кристалів кремнію залежно від щільності та частоти електричного струму зменшується у 2-3 рази. У сплаві АК12М2МгН утворюються первинні кристали інтерметаліду  $(\text{Fe, Mn})_3\text{Si}_2\text{Al}_{15}$ , які у перерізі мають вигляд компактних, близьких до глобулярних, кристалів. Рентгеноспектральні дослідження показали, що при однаковій кристалографічній структурі евтектичних і первинних кристалів фази  $(\text{Fe, Mn})_3\text{Si}_2\text{Al}_{15}$  останні відрізняються більшою концентрацією в них заліза, марганцю, міді та нікелю. У складі сплаву АК12М2МгНЖ практично відсутній голкоподібний інтерметалід  $\beta\text{-FeSiAl}_5$ , утворення якого є однією з основних причин зниження механічних властивостей. Подібно до сплаву АК12М2МгН з'являються компактні кристали первинної фази  $(\text{Fe, Mn})_3\text{Si}_2\text{Al}_{15}$  та значна кількість фази  $\pi\text{-FeMg}_3\text{Si}_6\text{Al}_8$ . Такі структурні зміни забезпечили підвищення механічних властивостей при 20 і 300 °С як сплаву АК12М2МгН, так і АК12М2МгНЖ.*

Найбільш високі властивості обох сплавів досягаються при  $j = 100 \text{ А/см}^2$ ;  $\nu = 1000\text{-}2000 \text{ Гц}$ . Характеристики механічних властивостей зростають від 25 % до 40 %. Структурні та фазові зміни, зумовлені обробленням розплаву АК12М2МгНЖ електричним струмом за встановленими режимами, забезпечують йому механічні властивості на рівні сплаву АК12М2МгН при дещо більш високих показниках жароміцності. Крім того, обробка розплаву електричним струмом дозволяє скоротити витрати натрієво-калієвих флюсів на 15-50 %, час термічної обробки за Т1 з 10-12 год до 2-3 год.

**Ключові слова:** поршневі алюмінієві сплави, мікроструктура, фазовий склад, механічні властивості, оброблення розплаву електричним струмом.

Поршневі алюмінієві сплави широко використовуються в судно-, сільгосп- і автомобілебудуванні. Найбільш поширеним в Україні є сплав АК12М2МгН евтектичного типу системи Al – Si – Cu, який виплавляли на ПАТ «Запорізький алюмінієвий комбінат» (ПАТ «ЗАЛК») виключно з первинних матеріалів. Згідно з ДСТУ 2839-94 максимально допустима концентрація заліза в ньому не перевищує 0,8 мас. %. За додатковими угодами для деяких спеціалізованих машинобудівних підприємств з виробництва поршнів, зокрема «Харківтрактозапчасть» і «Київтрактородеталь», сплав АК12М2МгН виготовляли з вмістом заліза  $\leq 0,7$  мас. %.

Після ліквідації у 2011 році на ВАТ «ЗАЛК» електролізного виробництва алюмінію первинні сплави, у тому числі АК12М2МгН, не виготовляють. Єдиним шляхом його одержання є закупівля за імпортом або виготовлення з брухту та відходів за удосконаленими технологіями, оскільки останні містять велику кількість шкідливих домішок, перш за все, залізо. Ефективним способом нейтралізації його шкідливої дії є оброблення розплаву електричним струмом, що приводить до зміни морфології залізовмісних фаз, взаємопов'язаної з механічними властивостями [1-4].

Метою роботи є дослідження можливостей одержання високоякісного сплаву типу АК12М2МгН з підвищеним вмістом заліза (далі – АК12М2МгНЖ) з рідкофазним обробленням однополярним імпульсним електричним струмом.

У роботі використано базовий сплав АК12М2МгН виробництва ВАТ «ЗАЛК». Сплав АК12М2МгНЖ виготовлено в лабораторних умовах розплавленням промислового сплаву АК12М2МгН в печі СШОЛ-1.1,6.12-МЗ-У4.2 з додаванням до нього заліза у вигляді Al-Fe лігатури марки ФА з 58-62 % Al, Fe – інше (ТУ 14-2Р-381-2004). Лігатуру вводили до розплаву при температурі 780 °С. Для запобігання ліквідації заліза здійснювали механічне перемішування протягом 5-7 хв. Хімічний склад сплавів наведено в таблиці 1.

Металографічні дослідження здійснено за стандартами ISO 4499-1:2020 та ISO 4499-3:2020 на мікроскопі «NEOPHOT-21». Травлення шліфів проведено в 0,5-відсотковому водяному розчині плавикової кислоти (HF). Для фіксації мікроструктур використано цифрові фотокамери «CANON EOS 350D», DCM-130. Хімічний склад фаз досліджено методом локального мікрорентгеноспектрального аналізу на нетравлених зразках з використанням мікрозонда MS-46 фірми Cameca при прискорюючій напрузі

Таблиця 1  
Хімічний склад дослідних сплавів

Table 1  
Chemical composition of experimental alloys

| Марка сплавів | Масова частка хімічних елементів, % |     |     |     |     |     |     |          |
|---------------|-------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------|
|               | Si                                  | Zn  | Cu  | Mg  | Mn  | Fe  | Ni  | Al       |
| AK12M2MgH     | 11,9                                | 0,4 | 2,1 | 1,0 | 0,3 | 0,6 | 0,9 | основа   |
| AK12M2MgHЖ    | 11,8                                | 0,3 | 2,0 | 0,9 | 0,4 | 1,1 | 0,9 | теж саме |

20 кВ. Тимчасовий опір розриву – короточасну міцність ( $\sigma_B$ ) визначено за ДСТУ EN10002-1:2006, на розривній машині UTM-100. Випробування проведено на коротких зразках діаметром 10 мм з ливарною скоринкою. Твердість за Брінеллем вимірювали за ДСТУ EN ISO 6506-1:2019 (EN ISO 6506-1:2014, IDT; ISO 6506-1:2014, IDT).

Оброблення розплаву однополярним імпульсним електричним струмом здійснено при його переміщенні по пласкій поверхні проточного реактора, нахиленого щодо горизонтальної поверхні під кутом 25°. Експерименти проведено при наступних режимах: щільність електричного струму ( $j$ ) 100-400 А/см<sup>2</sup>, частота імпульсів ( $\nu$ ) 50-2000 Гц. Рідкий метал, оброблений електричним струмом, потрапляв до графітового тигля, де він охолоджувався зі швидкістю 2 °С/с. Принципову схему процесу оброблення розплаву електричним струмом з одержанням виливків наведено на рис. 1.

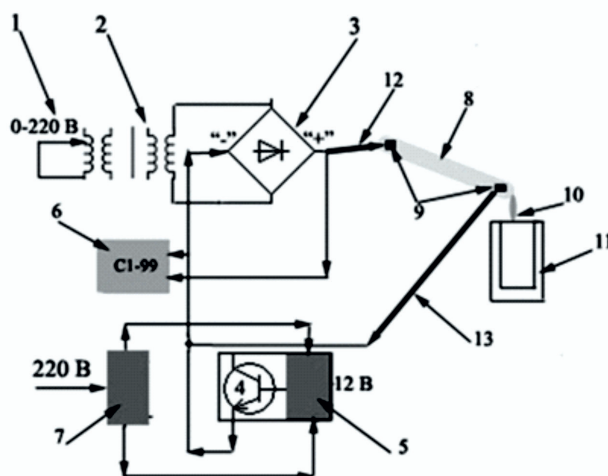


Рис. 1. Принципова схема оброблення розплаву імпульсним електричним струмом: 1 – регулюючий трансформатор 2 – роздільний автотрансформатор, 3 – діодний міст, 4 – регулюючий транзистор, 5 – високочастотний блок керування, 6 – осцилограф С1-99, 7 – адаптер, 8 – проточний реактор, 9 – графітові електроди, 10 – струмінь розплаву, 11 – тигель; 12, 13 – гнучкі струмопровідні кабелі, прикріплені до графітових електродів.

Fig. 1. Schematic diagram of the processing of the melt by pulsed electric current: 1 – regulating transformer, 2 – isolating autotransformer, 3 – diode bridge, 4 – regulating transistor, 5 – high frequency control box, 6 – oscilloscope S1-99, 7 – adapter, 8 – flow reactor, 9 – graphite electrodes, 10 – melt jet, 11 – crucible, 12, 13 – flexible conductive cables attached to graphite electrodes.

Температуру потоку розплаву, попередньо нагрітого до 680 °С, вимірювали хромель-алюмелевою термопарою з діаметром дротів 0,3 мм із безперервним записом показників на комп'ютері. Це дозволяло здійснювати контроль температури під час експерименту, визначати час проходження електричного струму через розплав, який складав до 15 с (рис. 2).

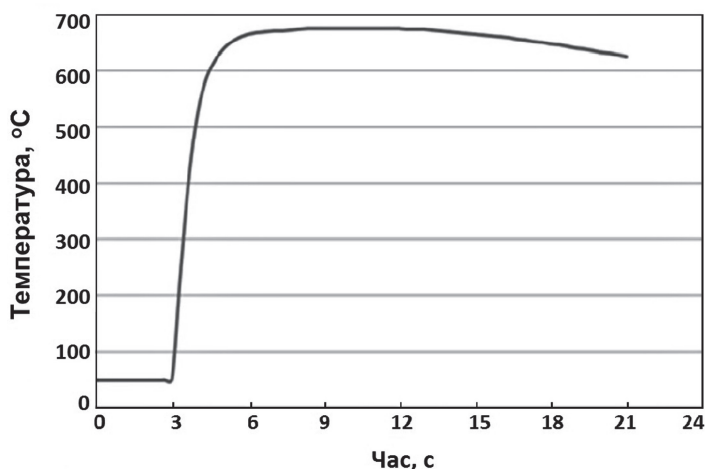


Рис. 2. Зміна температури розплаву в процесі його оброблення електричним струмом у проточному реакторі (горизонтальна ділянка – температура модуля перед початком експерименту).

Fig. 2. Change in melt temperature during electric current treatment in the flow reactor (horizontal section – temperature of the module before the start of the experiment).

Структуру сплавів АК12М2МгН і АК12М2МгНЖ у вихідному стані при швидкості охолодження 2 °С/с наведено на рис. 3.

Фазово-структурний стан сплаву АК12М2МгН досить складний [5]:  $Al_\alpha$ , Si,  $\alpha-(Fe, Mn)_3Si_2Al_{15}$  ( $\alpha$ ),  $FeNiAl_9$ ,  $\pi-FeMg_3Si_6Al_8$ ,  $(Cu, Ni)_2Al_3$ ,  $CuNiAl_6$ ,  $Mg_2Si$ ,  $W-CuSi_4Mg_3Al_4$ ,  $\theta-CuAl_2$ . Фаза  $\theta$  в більшості випадків легована нікелем, а  $\alpha$  – міддю, нікелем, хромом, які, як буде показано далі, можуть розчинятися в цій фазі в досить значній кількості. Майже усі інтерметалідні фази утворюються за евтектичними реакціями. Головними структурними складовими є первинні кристали твердого розчину алюмінію ( $Al_\alpha$ ) та алюмінієво-кремнієва евтектика  $Al_\alpha+Si$  з дисперсною структурою, характерною для модифікованого сплаву (рис. 3 а). Основною залізовмісною фазою сплаву АК12М2МгН є  $\alpha-(Fe, Mn)_3Si_2Al_{15}$  ( $\alpha$ ) у вигляді розгалужених евтектичних кристалів. Голкоподібна фаза  $\beta-FeSiAl_5$  практично відсутня (рис. 3 а).

Сплав АК12М2МгНЖ від АК12М2МгН відрізняється майже в 2 рази більшим вмістом заліза (табл. 1). Крім вище перерахованих фаз він містить кристали інтерметаліду  $\beta-FeSiAl_5$  (рис. 3 б, в, г) та первинні кристали фази  $(Fe, Mn)_3Si_2Al_{15}$  (рис. 3 г). Для відмінності від евтектичної фази  $\alpha$  позначимо її як  $\alpha^1$ .

Після оброблення сплавів в рідкому стані імпульсним електричним струмом за різними режимами їх мікроструктура і фазовий склад суттєво

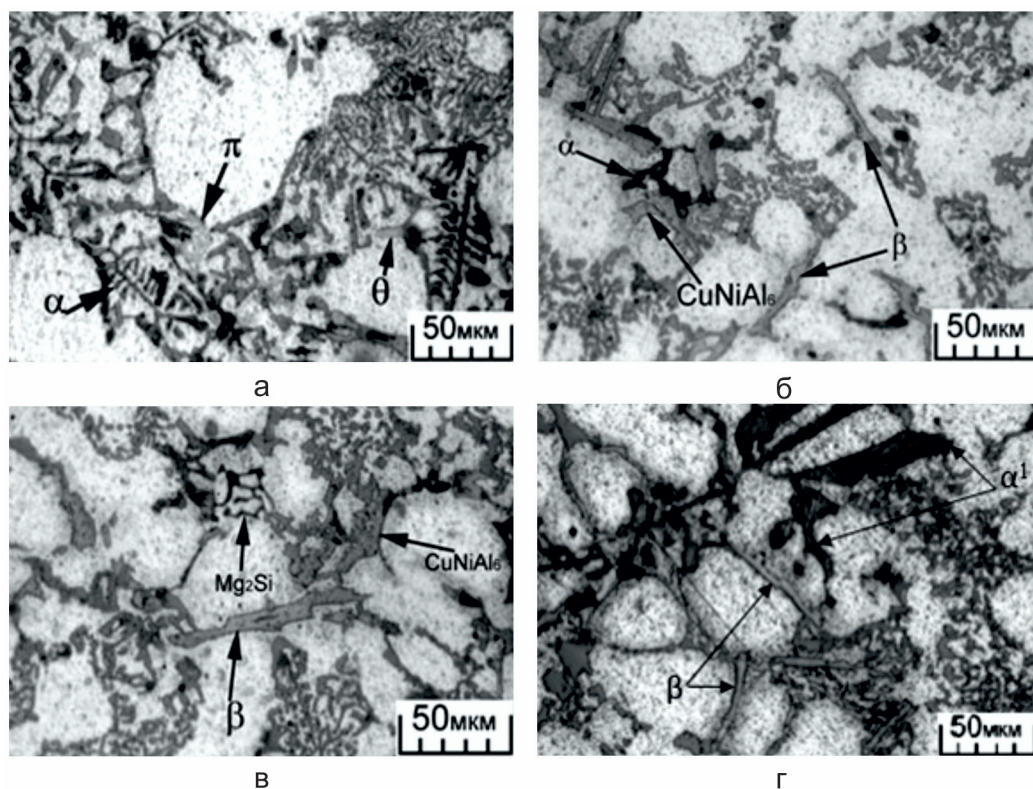


Рис. 3. Вихідна структура сплавів AK12M2MgN (а) і AK12M2MgNЖ (б, в, г).

Fig. 3. Initial structure of AK12M2MgN alloys (a) and AK12M2MgNZH (б, в, г).

змінюються (рис. 4 – 6). Збільшується ступінь диференціювання евтектичних складових. Зокрема, лінійний розмір евтектичних кристалів кремнію залежно від щільності та частоти електричного струму зменшується у 2-3 рази.

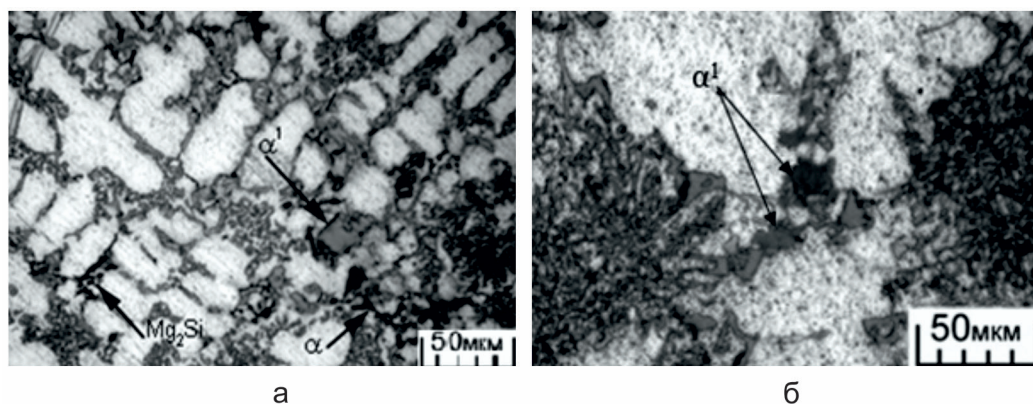


Рис. 4. Структура сплаву AK12M2MgN після оброблення розплаву електричним струмом за режимами:  $j = 100 \text{ A/cm}^2$ ;  $v = 50 \text{ Гц}$  (а),  $j = 300 \text{ A/cm}^2$ ;  $v = 1000 \text{ Гц}$  (б).

Fig. 4. Structure of the AK12M2MgN alloy after processing the melt with an electric current according to the modes:  $j = 100 \text{ A/cm}^2$ ;  $v = 50 \text{ Hz}$  (a),  $j = 300 \text{ A/cm}^2$ ;  $v = 1000 \text{ Hz}$  (б).

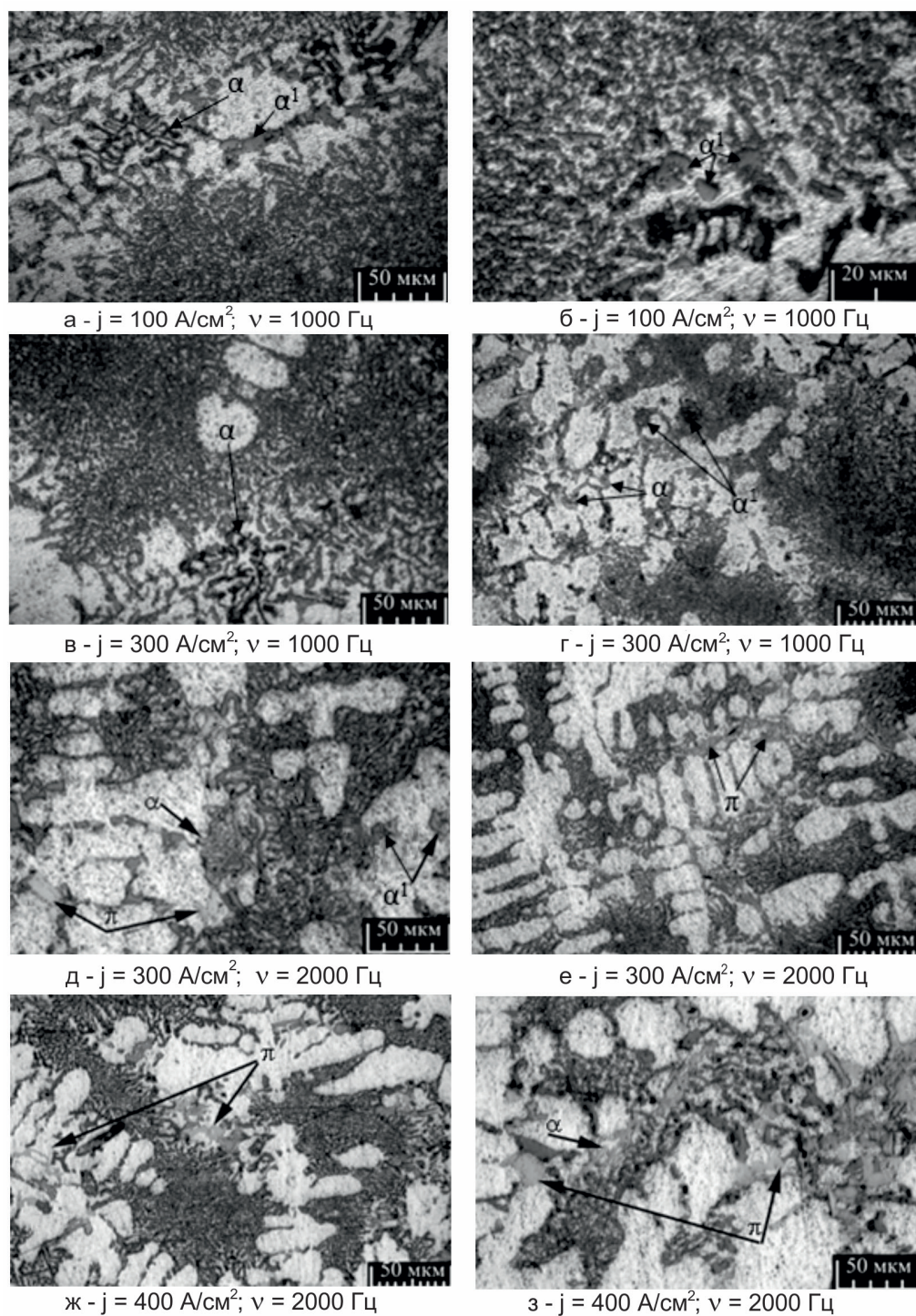


Рис. 5. Мікроструктура сплаву АК12М2МгНЖ після оброблення розплаву імпульсним електричним струмом.

Fig. 5. Microstructure of the AK12M2MgNZH alloy after processing the melt with a pulsed electric current.

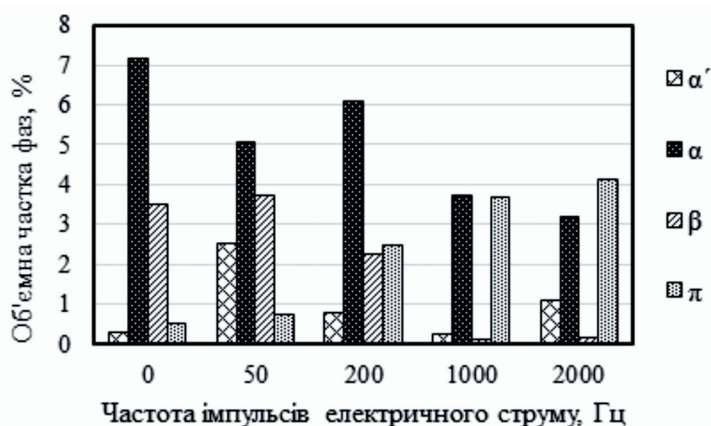


Рис. 6. Фазовий склад сплаву AK12M2MgNH до (0) і після оброблення розплаву імпульсами різної частоти при щільності електричного струму  $j = 100 \text{ A/cm}^2$ .

Fig. 6. Phase composition of AK12M2MgNH alloy before (0) and after treatment of the melt with pulses of different frequencies at electric current density  $j = 100 \text{ A/cm}^2$ .

У сплаві AK12M2MgH утворюються первинні кристали інтерметаліду  $\alpha^1\text{-(Fe, Mn)}_3\text{Si}_2\text{Al}_{15}$ , позначеного на фотографіях мікроструктур символом  $\alpha^1$ , які у перерізі мають вигляд компактних кристалів (рис. 4). За кристалографічною структурою фази  $\alpha^1$  і  $\alpha$  однакові, але, як показали дослідження, відрізняються за складом (табл. 2).

Таблиця 2

Склад евтектичної ( $\alpha$ ) та первинної ( $\alpha^1$ ) фаз  $(\text{Fe, Mn, Cr})_3\text{Si}_2\text{Al}_{15}$

Table 2

The composition of the eutectic ( $\alpha$ ) and primary ( $\alpha^1$ ) phase  $(\text{Fe, Mn, Cr})_3\text{Si}_2\text{Al}_{15}$

| Фаза       | Масова частка хімічних елементів, % |      |       |      |       |       | Сума   |
|------------|-------------------------------------|------|-------|------|-------|-------|--------|
|            | Fe                                  | Ni   | Al    | Cu   | Mn    | Si    |        |
| $\alpha$   | 13.94                               | 0.86 | 55.89 | 0.68 | 16.42 | 12.22 | 100.01 |
| $\alpha^1$ | 14.60                               | 0.97 | 56.61 | 0.53 | 16.89 | 10.39 | 99.99  |

Порівняно з евтектичною фазою  $\alpha$  сумарний вміст елементів Fe, Mn, Ni, Cu у первинному інтерметаліді  $\alpha^1$  дещо більший (табл. 2). Аналогічний ефект спостерігали на доевтектичному сплаві  $\text{Al} - 8 \% \text{ Si} - 0,9 \% \text{ Fe}$ , легovanому марганцем і обробленому імпульсним електричним струмом [6] – вміст марганцю і заліза в первинній фазі  $\alpha^1$  перевищував їх кількість в фазі  $\alpha$  евтектичного походження.

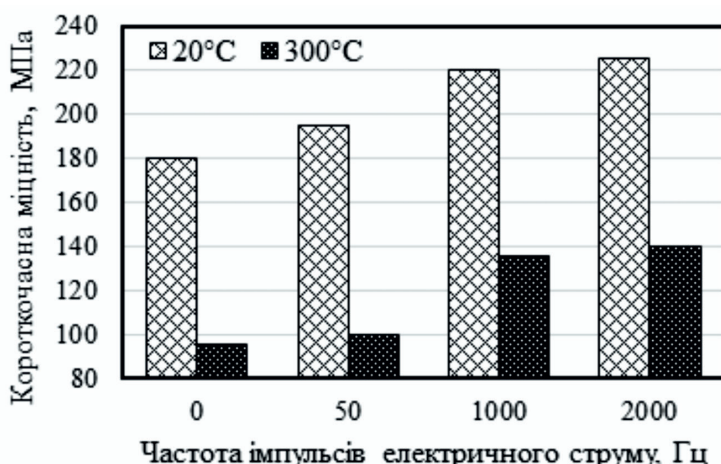
У сплаві AK12M2MgNH під дією електричного струму на розплав відбувається модифікування структури, зміна фазового складу і об'ємної частки фаз, кількісні показники яких, перш за все, залежать від режимів рідкофазного оброблення електричним струмом (рис. 5, 6).

Встановлено, що зміна частоти імпульсів електричного струму є більш суттєвим фактором впливу на структуру, фазовий склад і відповідно

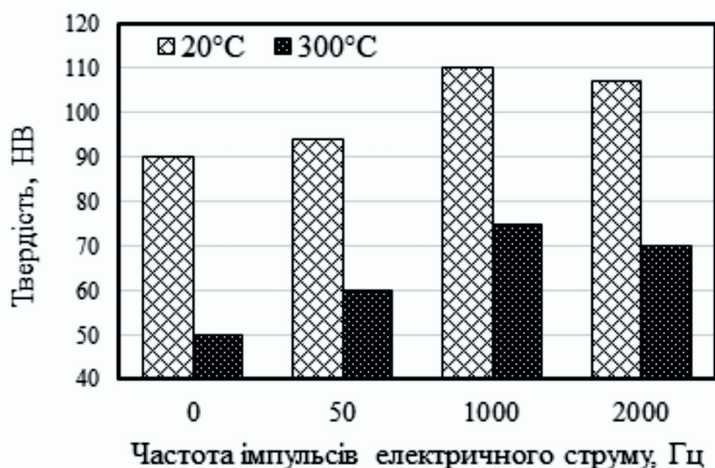
механічні властивості виливків, ніж його щільність (рис. 5, 6). З підвищенням частоти імпульсів до 1000-2000 Гц у складі сплаву АК12М2МгНЖ практично відсутній голкоподібний інтерметалід  $\beta$ -FeSiAl<sub>5</sub>, утворення якого є однією з основних причин зниження механічних властивостей.

Подібно до сплаву АК12М2МгН з'являються компактні кристали первинної фази  $\alpha'$  та значна кількість фази  $\pi$ -FeMg<sub>3</sub>Si<sub>6</sub>Al<sub>8</sub>. Такі структурні зміни забезпечили підвищення механічних властивостей при 20 і 300 °С як сплаву АК12М2МгН (рис. 7), так і АК12М2МгНЖ (рис. 8).

Аналіз результатів, наведених на рис. 7 – 8, свідчить, що найбільш високі властивості обох сплавів – АК12М2МгН і АК12М2МгНЖ досягаються при наступних параметрах оброблення розплаву електричним



а



б

Рис. 7. Вплив частоти імпульсів електричного струму на механічні властивості сплаву АК12М2МгН ( $j=100 \text{ A/cm}^2$ ): а – короткочасна міцність; б – твердість за Брінеллем.

Fig. 7. The influence of the frequency of electric current pulses on the mechanical properties of the АК12М2МгН alloy ( $j=100 \text{ A/cm}^2$ ): а – short-term strength; б – Brinell hardness.

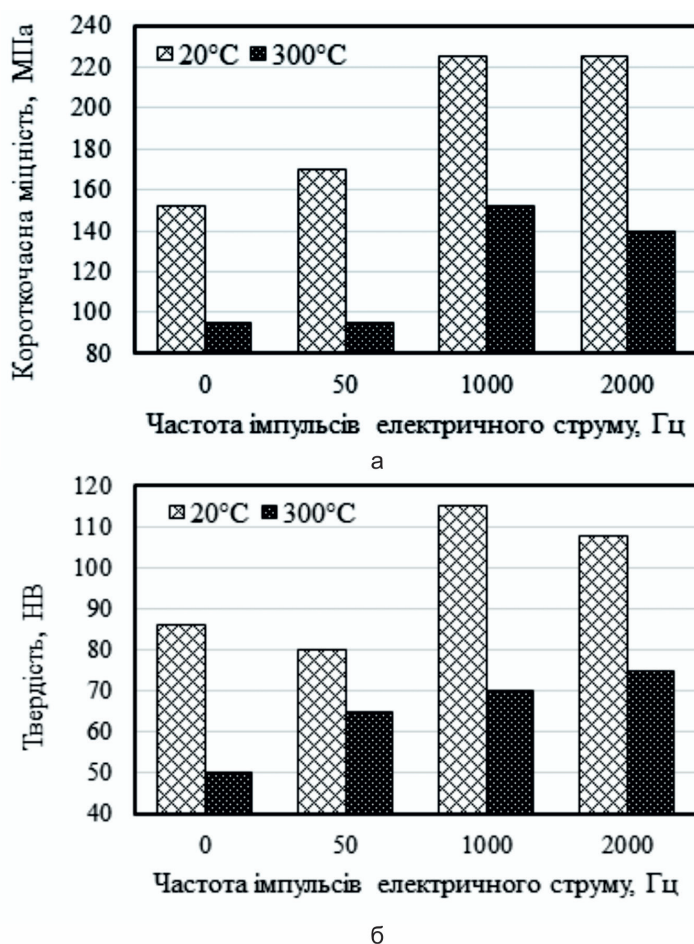


Рис. 8. Вплив частоти імпульсів електричного струму на механічні властивості сплаву АК12М2МгНЖ ( $j=100 \text{ A/cm}^2$ ): а – короткочасна міцність; б – твердість за Бринеллем.

Fig. 8. The effect of the frequency of electric current pulses on the mechanical properties of the AK12M2MgNZH alloy ( $j=100 \text{ A/cm}^2$ ): а – short-term strength; б – Brinell hardness.

струмом:  $j = 100 \text{ A/cm}^2$ ;  $\nu = 1000 - 2000 \text{ Гц}$ . При цих оптимальних режимах рідкофазного оброблення електричним струмом характеристики механічних властивостей зростають від 25 % до 40 %.

Структурні та фазові зміни, зумовлені обробленням розплаву АК12М2МгНЖ електричним струмом за експериментально встановленими режимами, забезпечують йому механічні властивості на рівні сплаву АК12М2МгН при дещо більш високих показниках жароміцності при  $\nu = 1000 \text{ Гц}$  (рис. 7, 8). Для поршнів, які експлуатуються в теплонапруженому стані, ця характеристика є особливо важливою.

Ефект від впливу оброблення розплаву електричним струмом на мікроструктуру і фазовий склад виливків зберігається після повторного переплаву та витримки в рідкому стані при температурах від  $680^\circ\text{C}$  до  $700^\circ\text{C}$  протягом 3 – 4 годин. При традиційному модифікуванні натрієво-калієвими флюсами демодифікування структури відбувається після 30-хвилинної

витримки в рідкому стані. Отримання сплаву АК12М2МгНЖ з обробленням розплаву електричним струмом за оптимальними режимами, зміна його фазового складу і одержання більш однорідної структури дозволяє: використовувати для його виробництва брухт та відходи з підвищеним вмістом заліза; скоротити тривалість термічної обробки поршнів за режимом Т1 з 10-12 год до 2-3 год, знизити витрати натрієво-калієвих флюсів на 15-50 %.

Таким чином, оброблення алюмінієвих сплавів у рідкому стані однополярним імпульсним електричним струмом є ефективним інструментом підвищення їх властивостей. Застосування такої обробки при одержанні поршневого сплаву типу АК12М2МгН з підвищеним вмістом заліза (АК12М2МгНЖ) розкриває перспективи розширення сировинної бази його виробництва за рахунок використання брукху та відходів без втрати експлуатаційних властивостей виробу.

## Література

1. Таран Ю.Н. А.Г. Пригунова, И.Е. Казимилова [и др.] Модифицирование интерметаллидных фаз обработкой расплава электрическим током // ДАН СССР. – 1986. – Т. 289. – № 3. – С. 668-670.
2. Prigunova A.G., Koshelev M.V., Borisov A.G. Effect of unipolar pulsed electric current treatment of the melt of Al – 8 wt-% Si – 0.7 wt-% Fe alloy on iron-containing phases formation and mechanical properties of castings // Materials Science and Technology. – 2022. – Vol. 38. – P. 246-253. <https://doi.org/10.1080/02670836.2022.2037059>
3. Деев В.Б., Башмакова Н.В., Приходько О.Г., Селянин И.Ф. Исследование влияния электрического тока на кристаллизацию алюминиевых сплавов с различным содержанием железа // Ползуновский альманах. – 2008. – № 3. – С. 77-81.
4. Пригунова А.Г. Фазові перетворення при кристалізації сплаву АК7, нейтралізація шкідливого впливу заліза обробленням розплаву імпульсним електричним струмом // Науково-технічний журнал «Металознавство та обробка металів». – 2020. – № 4. – С.17-29. <https://doi.org/10.15407/mom2020.04.017>
5. Пригунова А.Г., Белов Н.А., Таран Ю.Н., Золоторевский В.С., Напалков В.И., Петров С.С. Силумины. Атлас микроструктур и фрактограмм промышленных сплавов: Справ. изд. – М. : МИСиС, 1996. – 175 с.
6. Пригунова А.Г. Роль марганцю і рідкофазного оброблення електричним струмом на формування залізовмісних фаз у доєвтектичних сплавах системи Al-Si-Fe-Mn // Процеси лиття. – 2020. – № 4. – С 13-25. <https://doi.org/10.15407/plit2020.04.013>

## References

1. Taran Yu.N., Prigunova A.G., Kazimirova I.E. [et al.], *DAN SSSR*, 1986, Vol. 289, No. 3, pp. 668-670. [in Russian].
2. Prigunova A.G., Koshelev M.V., Borisov A.G., *Materials Science and Technology*, 2022, Vol. 38, pp 246-253 [in English] <https://doi.org/10.1080/02670836.2022.2037059>

3. Deev V.B., Bashmakova N.V., Prikhodko O.G., Peasant I.F., *Polzunovskiy almanach*, 2008, No. 3, pp. 77-81. [in Russian].
4. Prigunova A.G., *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, 2020, No. 4, pp.17-29. [in Ukrainian] <https://doi.org/10.15407/mom2020.04.017>
5. Prigunova A.G., Belov N.A., Taran Yu.N, Zolotarevsky V.S., Napalkov V.I., Petrov S.S. *Siluminy. Atlas mikrostruktur i fraktogramm promyshlennykh splavov: Sprav. Izd.* (Silumins. Atlas of microstructures and fractograms of industrial alloys: Ref. ed.), M. : MISiS, 1996, 175 p. [in Russian].
6. Prigunova A.G., *Protsesy lyttya*, 2020, No. 4, pp.13-25. [in Ukrainian] <https://doi.org/10.15407/plit2020.04.013>

Одержано 13.06.23

A. G. Prigunova, Y. A. Zhydkov, V. D. Babiuk

**The structure, phase composition and properties of the AK12M2MgN alloy with increased iron content treated in the liquid state with an electric current**

**Summary**

The possibility of replacing the piston eutectic alloy of the Al – Si – Cu system AK12M2MgN, which was produced at OJSC "Zaporizhsky Aluminum Combine" from primary aluminum, with AK12M2MgNZH with an increased iron content, which will allow expanding the raw material base of production due to the use of scrap and waste. It is proposed to solve this problem by introducing into the technological process of processing the melt with a unipolar pulsed electric current during pouring according to specially developed modes.

To investigate this possibility, experiments were conducted on the effect of electric current on the microstructure, phase composition of AK12M2MgN and AK12M2MgNZH alloys and their mechanical properties at temperatures of 20 °C and 300 °C. The melt was treated with an electric current in the following modes: electric current density ( $j$ ) 100-400 A/cm<sup>2</sup>, pulse frequency ( $\nu$ ) 50-2000 Hz. The phase composition of alloys is considered. It is shown that the main iron-containing phase of the AK12M2MgN alloy is (Fe, Mn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>Al<sub>15</sub> ( $\alpha$ ) in the form of branched eutectic crystals. The acicular  $\beta$ -FeSiAl<sub>5</sub> phase is practically absent. Unlike AK12M2MgN, the composition of AK12M2MgNZH alloy includes  $\beta$ -FeSiAl<sub>5</sub> intermetallic and primary coarse crystals of (Fe, Mn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>Al<sub>15</sub> phase. After treatment of alloys in the liquid state with pulsed electric current in different modes, their microstructure and phase composition change significantly. The degree of differentiation of eutectic components increases. In particular, the linear size of eutectic silicon crystals, depending on the density and frequency of the electric current, decreases by 2-3 times. Primary crystals of the intermetallic (Fe, Mn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>Al<sub>15</sub> are formed in the AK12M2MgN alloy, which in cross-section have the appearance of compact, close to globular crystals. X-ray spectral studies have shown that despite the same crystallographic structure, eutectic and primary crystals of the (Fe, Mn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>Al<sub>15</sub> phase differ in the higher concentration of iron, manganese, copper and nickel in the latter. In the composition of the AK12M2MgNZH alloy, there is practically no acicular intermetallic  $\beta$ -FeSiAl<sub>5</sub>, the formation of which is one of the main reasons for the decrease in mechanical properties. Similar to the

AK12M2MgN alloy, compact crystals of the primary phase  $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2\text{Al}_{15}$  and a significant amount of the  $\pi\text{-FeMg}_3\text{Si}_6\text{Al}_8$  phase appear. Such structural changes ensured an increase in the mechanical properties at 20 and 300 °C of both the AK12M2MgN alloy and AK12M2MgNZH. The highest properties of both alloys are achieved at  $j = 100 \text{ A/cm}^2$ ;  $\nu = 1000\text{-}2000 \text{ Hz}$ . The characteristics of mechanical properties increase from 25 % to 40 %. The structural and phase changes caused by the processing of the AK12M2MgNZH melt with an electric current according to experimentally established modes provide it with mechanical properties at the level of the AK12M2MgN alloy with several higher heat resistance indicators. In addition, treatment of the melt with electric current allows to reduce the consumption of sodium-potassium fluxes by 15-50 %; time of heat treatment for T1 from 10-12 hours. up to 2-3 hours.

**Keywords:** piston aluminum alloys, microstructure, phase composition, mechanical properties, melt treatment with electric current.

Журнал **МОН** внесено до Переліку наукових фахових видань України згідно з наказом Міністерства освіти і науки України №409 від 17.03.2020.

Повна назва журналу  
**"Науково-технічний журнал  
"Металознавство та обробка металів"**

Вартість одного номера журналу - 150 грн.  
Перед оплатою необхідно узгодити потрібну кількість номерів з редакцією.

Оплата здійснюється на розрахунковий рахунок Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України.

Доступні архівні номери журналу з 1995 р. по 2022 р. включно.

**Розрахунковий рахунок для замовників,  
спонсорів і рекламодавців:**  
р/р UA828201720313251001201012215,  
банк ДКСУ в м. Києві код банку 820172  
Отримувач - ФТІМС НАН України, код ЄДРПОУ 05417153,  
з посиланням на журнал "МОН"

Копію документа оплати та відомості про отримувача  
**просимо надсилати до редакції,**  
вказавши номер і дату платіжного документа.