

Міністерство освіти і науки України

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

**«МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО  
ТА ТЕХНОЛОГІЇ»**

**Міжнародна науково-технічна конференція**

**22–23 вересня 2022 р.**

**Харків  
ХНАДУ  
2022**

УДК 621.785.3:669.15-194:669.1.017+ УДК 621.017:669.14.018.294.083.133+УДК 666.11.01+  
УДК 669.715+ УДК 621.923.6:621.318.4:621.002.3+ УДК 621.9.048+ УДК 621.039.4+УДК  
669.715.018:621.745+ УДК 669.017+ УДК 669.1+ УДК 620.22+ УДК 378; 502.1+ УДК  
621.891+ УДК 669.245.018.044:620.193.53+ УДК 378; 502.1+ УДК 620.22.001.66+ УДК  
621.793+ УДК 621.791+ УДК 629.793+ УДК 621.5

**МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА ТЕХНОЛОГІЇ.** Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Харків : ХНАДУ, 2022. – 190 с.

#### **РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ**

*Глушкова Д.Б.* – професор, д.т.н., ХНАДУ;

*Калініна Н.Є.* – професор, д.т.н., ДНУ ім. О. Гончара;

*Луценко В.А.* – д.т.н., ст. н. с., Інститут чорної металургії імені

З.І. Некрасова НАН України;

*Дощечкіна І.В.* – професор, к.т.н., ХНАДУ;

*Лалазарова Н.О.* – доцент, к.т.н., ХНАДУ

## *Зміст*

<b>ВСТУП</b> .....	6
<b>Луценко В.А., Голубенко Т.М., Луценко О.В.</b> РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧА ПОМ'ЯКШУВАЛЬНА ТЕРМІЧНА ОБРОБКА ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ .....	7
<b>Hlushkova D.B., Bagrov V.A., Demchenko S.V., Volchuk V.M., Kalinin O.V., Kalinina N.E.</b> IMPLEMENTATION GAS-PLASMA COATINGS BASED ON NICKEL.....	13
<b>Подольський Р.В., Бабаченко О.І., Кононенко Г.А.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРСПЕКТИВНОЇ СТАЛІ З ВИСОКОЮ ПРОГАРТО- ВУВАНІСТЮ ДЛЯ ВИСОКОМІЦНИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК.....	23
<b>Шарагов В.А.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ СИЛКАТНИХ СТЕКОЛ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ СЕКЦІЙНОГО ТРАВЛЕННЯ РОЗЧИНОМ HF .....	34
<b>Калініна Н.Є., Цокур Н.І., Носова Т. В., Мороз Я.В.</b> НАНОТЕХНОЛОГІЯ - РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИЙ СПОСІБ ОДЕРЖАННЯ ВИСОКОЯКІСНОЇ ПРОДУКЦІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ .....	40
<b>Роїк Т.А., Гавриш О.А., Бровкин А.О.</b> ПАРАМЕТРИ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ КОМПОЗИТНИХ САМОЗМАЩУВАЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ ТЕРТЯ ДЛЯ ДРУКАРСЬКИХ МАШИН ПРИ АБРАЗИВНОМУ ШЛІФУВАННІ.....	45
<b>Гапонова О.П., Жиленко Т.І., Тарельник Н.В., Жиленко О.І.</b> МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ТЕПЛА В СТАЛЬНІЙ ДЕТАЛІ ПІД ЧАС ПОВЕРХНЕВОЇ МОДИФІКАЦІЇ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ.....	55
<b>Тарельник В.Б., Пирогов В.О.</b> КРИТЕРІЇ ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ БАБІТОВИХ ПОКРИТЬ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ РОТОРНИХ МАШИН .....	61
<b>Vahrusheva V.S., Hlushkova D.B., Volchuk V.M., Nosova T.V., Mamhur S.I., Tsokur N.I., Bagrov V.A., Demchenko S.V., Ryzhkov Yu.V., Scrypnikov V.O.</b> HE CORROSION RESISTANCE OF HEAT-RESISTANT ALLOYS FOR PARTS OF POWER EQUIPMENT .....	71

<b>Аюпова Т.А., Носко О.А., Красніков В.О., Чередник В.О.</b> СТРУКТУРА ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВУ АЛ9 В ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ЛАНЦЮЖКУ «МОДИФІКУВАННЯ-ОБРОБКА В РІДКОМУ СТАНІ» .....	78
<b>Аврунін Г.А., Глушкова Д.Б.</b> ДОСВІД ВИКОРИСТАННЯ ПАР ТЕРТЯ КОВЗАННЯ, УЩІЛЬНЕНЬ ТА РОБОЧИХ РІДИН В ОБ'ЄМНИХ ГІДРОПРИВОДАХ БУДІВЕЛЬНИХ ТА ДОРОЖНІХ МАШИН.....	91
<b>Князєв С.А., Князєва Г.О.</b> СТВОРЕННЯ ВИСОКОМІЦНОГО, ТЕРМОСТАБІЛЬНОГО СПЛАВУ З ТВЕРДОРОЗЧИННО-БОРИДНИМ ЗМІЦНЕННЯМ .....	104
<b>Кропівний В.М., Босий М.В., Кузик О.В., Кропівна А.В.</b> ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ТЕПЛООБМІНУ ОБРОБКИ МЕТАЛУ В НАГРІВАЛЬНИХ ПЕЧАХ .....	112
<b>Письменкова Т.О., Зіборов К.А.</b> ІНЖЕНЕРНО-ЕКОЛОГІЧНА КОМПЕТЕНТНІСТЬ – НЕОБХІДНА СКЛАДОВА СУЧАСНОЇ ПІДГОТОВКИ ТЕХНІЧНОГО ФАХІВЦЯ.....	118
<b>Кропівний В.М., Босий М.В., Кузик О.В., Кропівна А.В., Молокост Л.А.,</b> ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ЛІКВАЦІЇ ТА ЇЇ НАСЛІДКИ У ВИЛИВКАХ З ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУН .....	124
<b>Глотка О.А., Ольшанецький В.Ю., Хвостак В.В.</b> ЗБІЛЬШЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ ЗАВДЯКИ ОПТИМІЗАЦІЇ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ .....	130
<b>Зіборов К.А., Письменкова Т.О.</b> АПЦИКЛІНГ ЯК ІНСТРУМЕНТ ФОРМУВАННЯ КРЕАТИВНОСТІ І РАЦІОНАЛЬНОСТІ У ЗДОБУВАЧІВ ТЕХНІЧНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ .....	135
<b>Лалазарова Н.О, Омельченко В.В., Попова О.Г.</b> ПОКРАЩЕННЯ ОБРОБЛЮВАНOSTІ ВИСОКОХРОМИСТОГО ЧАВУНУ .....	142

## СТРУКТУРА ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВУ АЛ9 В ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ЛАНЦЮЖКУ «МОДИФІКУВАННЯ-ОБРОБКА В РІДКОМУ СТАНІ»

**Аюпова Т.А., доцент, к.т.н., Носко О.А., доцент, к.т.н.,  
Красніков В.О., студент, Чередник В.О., студент,  
Український державний університет науки і технологій**

***Анотація.** Метою дослідження є вирішення актуальної задачі задоволення потреби машинобудування в алюмінієвих сплавах, що деформуються, за одночасної фактичної відсутності їх вітчизняного виробництва за рахунок розробки деформованого сплаву на основі ливарного сплаву АЛ9. Для досягнення поставленої мети необхідно встановити закономірності впливу комплексної дії на розплав мікролегування стронцієм та скандієм та технологічних параметрів оброблення в рідкому стані на структуроутворення та формування комплексу механічних властивостей доевтектичного силуміну АЛ9 для розширення сфер його використання, зокрема для виготовлення продукції обробкою тиском.*

***Методи.** У роботі досліджували доевтектичні силуміни АЛ9 – вихідного складу та АЛ9 з добавками стронцію та скандію в оптимальній концентрації. Гідроциркуляційну та водневу обробку проводили при температурі 750°C на обладнанні ФТІМС НАНУ за методикою, розробленої на ФТІМС НАНУ під керівництвом член-кореспондента НАНУ Г. П. Борисова.*

*Мікроструктуру вивчали на оптичному мікроскопі "Axiovert - 200MAT". Ідентифікацію фаз проводили методом рентгеноструктурного аналізу на дифрактометрі ДРОН - 3М в  $Co_{K\alpha}$  фільтрованому випромінюванні за стандартною методикою. Випробування на розтягнення проводили на п'ятикратних зразках з діаметром робочої частини 10 мм на випробувальній машині INSTRON при навантаженні 2 кН.*

***Результати.** Наукова новизна. Встановлено закономірності структуроутворення та формування комплексу механічних властивостей при спільному впливі Sr, Sc в оптимальній концентрації та термо-часових параметрів гідроциркуляційної та водневої обробок. Під час гідроциркуляційної обробки протягом 5...15 хв та водневої обробки 20 хв, в обох випадках, спостерігається підвищення диференціювання евтектики, практично повне зникнення залізовмісних фаз, що в результаті обумовлює підвищення одночасно і міцносних, і пластичних властивостей. Перевищення оптимального часу обробки приводить до нівелювання отриманого ефекту – відновлення грубо диференційованої структури, виділення залізовмісних фаз та зниження комплексу властивостей. **Практична цінність.** Оптимізували термочасові параметри гідроциркуляційної та водневої обробок сплаву АЛ9 та АЛ9(Sr,Sc). Гідроциркуляційна обробка АЛ9(Sr,Sc) протягом 5...15 хвилин забезпечує підвищення механічних властивостей сплаву: - відносного подовження на 40%; межі плинності на 16%; межі міцності на 20%; воднева обробка протягом 20 хв забезпечує підвищення межі міцності на 5-10% та пластичності на 15%.*

***Ключові слова:** доевтектичний силумін, мікролегування, воднева обробка, гідроциркуляційна обробка.*

# AlSi7 ALLOY STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES IN THE TECHNOLOGICAL CHAIN «MODIFICATION- LIQUID STATE PROCESSING»

**Aiupova Tetyana, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Nosko Olha, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Krasnikov Vladyslav, Student, Cherednyk Volodymyr, Student,  
Ukrainian State University of Science and Technology**

***Abstract.** The purpose of the study is to solve the urgent problem of meeting the needs of mechanical engineering in deformable aluminum alloys, in the simultaneous actual absence of their national production, at the expense of the development of a deformed alloy based on the foundry alloy AlSi7. To achieve the goal, it is necessary to establish the regularities of the complex action on the melt of strontium and scandium microalloying influence with and the technological parameters of processing in the liquid state on the structure formation and the formation of a complex of mechanical properties of the hypo-eutectic silumin AlSi7 in order to expand the its use spheres, in particular for the products manufacture by pressure.*

***Methods.** Hypo-eutectic silumins AlSi7 - initial composition and AlSi7 with strontium and scandium additives in optimal concentration were studied. Hydrocirculation and hydrogen treatments were carried out at a temperature of 750°C on the equipment of the FTIMA of the National Academy of Sciences of Ukraine according to the methodology developed at the FTIMA of the National Academy of Sciences of Ukraine under the guidance of the correspondent member of the National Academy of Sciences of Ukraine H.P. Borisov. The microstructure was studied using an optical microscope "Axiovert - 200MAT". Phases identification of was carried out by X-ray analysis on a DRON-3M in Cok $\alpha$  filtered radiation. Tensile tests were performed on five-fold samples with a working part diameter of 10 mm on an INSTRON testing machine under a load of 2 kN.*

***The results.** Scientific novelty. The regularities of structure formation and the mechanical properties complex formation under the joint influence of Sr, Sc in the optimal concentration and thermo-time parameters of hydrocircular and hydrogen treatments were established. During hydrocircular treatment for 5...15 min and hydrogen treatment for 20 min, in both cases, there is an increase in eutectic differentiation, almost complete disappearance of iron-containing phases, which as a result leads to an increase in strength and plastic properties at the same time. Exceeding the optimal processing time leads to the leveling of the obtained effect - the restoration of a coarsely differentiated structure, the iron-containing phases precipitation and a decrease in the complex of properties. Practical value. In the course of the experiment, the thermo-time parameters of the hydrocirculation and hydrogen treatment of the AlSi7 and AlSi7 (Sr, Sc) alloys were optimized. Hydrocirculation treatment of AlSi7 (Sr, Sc) for 5...15 minutes provides an increase in the mechanical properties of the alloy: relative elongation by 40%; yield strength by 16%; ultimate strength by 20%; hydrogen treatment for 20 minutes provides an increase in ultimate strength by 5-10% and plasticity by 15%.*

***Key words:** hypo-eutectic silumin, microalloying, hydrogen treatment, hydrocircular treatment.*

## Вступ

Зміна економічної ситуації в Україні при одночасному зростанні необхідності використання легких сплавів з високою питомою міцністю, якими є силуміни, привела до необхідності розширення сфер використання силумінів –

для виготовлення виробів як методом лиття, так і пластичною обробкою тиском – пресуванням, штампуванням, прокаткою і т.д.

Силуміни широко застосовуються в машинобудуванні як конструкційні сплави завдяки гарним ливарним властивостям, зварюваності та високій корозійній стійкості. Проте, вони мають обмежене використання, експлуатуються в умовах незначних навантажень через низьку міцність і пластичність, що формується через наявність у структурі сплаву грубодиференційованої алюмінієво-кремнієвої евтектики та інтерметалідів несприятливої морфології.

Властивості виливків можуть бути значно покращені при правильному виборі технології мікролегування, лиття, термічної обробки в рідкому та твердому стані та визначенні оптимального складу сплаву. Ідея генетичного взаємозв'язку [1-2] структури металів і сплавів у розплавленому та твердому стані є основою у більшості розроблених моделей розплавів. На цих уявленнях про вплив структури розплаву на реалізацію процесу кристалізації розроблено велику кількість методів зовнішнього впливу на розплави для управління структурою та властивостями литого металу.

### **Аналіз публікацій**

Мазур В.І., Куцова В.З., Мальцев М.В., Таран Ю.М., [3-7] визначили, що дієвим чинником, що визначає сприятливе структуроутворення промислових силумінів, забезпечуючи підвищення їх міцності і пластичності, є модифікування. При цьому Пархутіком П.А., Ганієвим І.М., Куцовой В.З. [5, 7] встановлено підвищення диференціювання евтектичного кремнію при модифікуванні стронцієм, що супроводжується зростанням пластичності сплаву. Проте, міцність такого сплаву залишається низькою. Незалежно від цього в роботах Іщенко А.І., Лабур Т.М. [8] показано, що при добавці скандію спостерігається підвищення механічних властивостей деформованих алюмінієвих сплавів. Нечисленні дані свідчать про вплив добавок скандію на підвищення міцності силумінов при одночасному зниженні пластичності. Куцовой В.З. і Аюповою Т.А. встановлено спільний позитивний вплив комплексу стронцій-скандій на структуроутворення, фазовий склад і властивості силумінів [9-10].

З точки зору підвищення фізико-механічних властивостей сплавів одним з найважливіших етапів є етап обробки їх розплавів. Неможливість ефективної обробки всього об'єму рідкого металу у великотоннажному агрегаті призвела до необхідності безперервного процесу позапечного рафінування розплаву в невеликих пристроях. Саме на цій стадії можна найбільш ефективно провести операції модифікування, рафінування розплавів від газів, шкідливих та зайвих інгредієнтів за допомогою різних впливів на розплав.

Чл.-кор. НАНУ Борисовим Г.П. розроблений метод лиття з водневою обробкою [11] розплавів дозволяє, поряд з кардинальним вирішенням проблеми скорочення в 2-3 рази (а в перспективі, до повного усунення прибутків) непродуктивних витрат рідкого металу, замінити усадкові дефекти у вигляді гострокутних рихлот, утяжин округлими газовими порами, що забезпечує:

- отримання якісних виливків при різкому скороченні витрат металу на прибутки, а в ряді випадків - без прибутків;
- заміну усадкових раковин і рихління газовими порами;
- незважаючи на 5-6 кратне зростання пористості забезпечення суттєвого (в 1,5-2 рази) підвищення пластичності литого металу.

Чл.-кор. НАНУ Борисовим Г.П. встановлений позитивний вплив водневої обробки [11] гідроциркуляційної обробки (ГЦО) та [12] на структуру та властивості доевтектичного силуміну АЛ9, проте даних за умови гідроциркуляційної та водневої обробки силуміну АЛ9, що містить комплекс стронцій-скандій, немає, що не дозволяє управляти його структурою і механічними властивостями.

Відсутність цих даних не дозволяє вибирати параметри цілеспрямованого впливу на структуру і фазовий склад сплаву, які забезпечують необхідний рівень його властивостей для подальшої переробки методами лиття та / або обробки тиском для виготовлення деталей з високою питомою міцністю. Тому встановлення закономірностей комплексного фізико-хімічної дії на розплав (мікролегування комплексом стронцій-скандій + ГЦО) та (мікролегування комплексом стронцій-скандій + воднева обробка) на структуру і фазовий склад силуміну АЛ9 з метою отримання виробів з підвищеним рівнем механічних властивостей (міцності та пластичності) є актуальною задачею.

Метою дослідження є встановлення закономірностей комплексної дії на розплав комплексу стронцій-скандій та технологічних параметрів оброблення в рідкому стані на структуроутворення та формування комплексу механічних властивостей доевтектичного силуміну АЛ9 для розширення сфер його використання, зокрема для виготовлення продукції обробкою тиском.

## Методика

Досліджували доевтектичні силуміни АЛ9 – вихідного складу та АЛ9 з добавками стронцію та скандію в оптимальній концентрації (таблиця 1).

Таблиця 1 - Середній хімічний склад досліджуваних сплавів

№ п/п	Марка сплаву	Хімічні елементи, % масс.						
		Si	Fe	Mn	Mg	Sr	Sc	Al
1	АЛ9	7.33	0.32	0.20	0.35	-	-	основа
2	АЛ9(Sr,Sc)	7.13	0.29	0.17	0.32	0.11	0.49	основа

Дослідження з впливу водневої та гідроциркуляційної обробки на структуроутворення сплавів типу АЛ9 проводили за методикою, розробленої на ФТІМС НАНУ під керівництвом член-кореспондента НАНУ Г. П. Борисова на лабораторних установках [11-12].

Визначення впливу гідроциркуляційної обробки досліджуваних сплавів проводили при швидкості обертання активатора під час обробки розплаву в 250

об/хв. при температурі  $750 \pm 3$  °С; час обробки розплаву склав 5; 15 і 30 хвилин відповідно до програми експерименту.

Зразки діаметром 20 мм для дослідження структури литого металу отримували литтям в розігрітій до температури  $250 \pm 5$  °С металеві форми з товщиною стінки 2 мм, а також форми з товщиною стінки 10 мм, температура яких становила 30 °С.

При дослідженні ефективності водневої обробки алюмінієвих сплавів газонасичення розплаву проводили безкисневим методом за допомогою введення в розплав препарату «PROBAT-FLUSS DEGASER T200», «SCHAFER» (Німеччина), виготовленого на основі гідриду титану.

Спочатку відливали експериментальні зразки для дослідження структури, фазового складу, механічних властивостей сплаву у вихідному стані. Після закінчення процесу водневої обробки розплаву через 4, 20, 40, 60 і 90 хвилин проводили заливку дослідних зразків для вивчення впливу водневої обробки на структуру і властивості литого металу.

Для виявлення загальної мікроструктури зразки травили 0,5% водним розчином плавикової кислоти протягом 15 секунд з наступним промиванням у струмені проточної води. Мікроструктуру сплавів вивчали за допомогою оптичного мікроскопа «Ахіоvert - 200МАТ». Кількість евтектичної складової, розміри кристалів евтектичного кремнію визначали за стандартними методиками. Ідентифікацію фаз проводили методом рентгеноструктурного аналізу на дифрактометрі ДРОН - 3М в  $\text{СоK}_\alpha$  фільтрованому випромінюванні за стандартною методикою. Мікротвердість алюмінієвого твердого розчину і евтектики вимірювали на приладі ПМТ - 3 по ГОСТ 9450-76 при навантаженні 20 г і збільшенні X485. Випробування на розтягнення проводили на п'ятикратних зразках з діаметром робочої частини 10 мм на випробувальній машині INSTRON при навантаженні 2 кН, у масштабі 10:1.

### Результати досліджень та їх обговорення

Мікроструктура сплаву АЛ9 0,1% Sr 0,5% Sc в литому стані та після гідроциркуляційної обробки за різними режимами, представлена на рис. 1.

Структура сплаву представлена первинними кристалами  $\alpha$ -Al, евтектикою  $\alpha$ -Al+ $\beta$ -Si і інтерметалідними фазами компактної форми, які розташовані на межах первинних  $\alpha$ -Al кристалів і евтектики (див. рис. 1, а-д). Гідроциркуляційна обробка призводить до зміни кількісного співвідношення первинних кристалів  $\alpha$ -Al, евтектики  $\alpha$ -Al+ $\beta$ -Si, до зміни розмірів і параметра форми кристалів евтектичного кремнію і відстані між кристалами евтектичного кремнію (див. рис.1, б-д, таблиця 2). Аналіз даних таблиці 2 свідчить про те, що вплив гідроциркуляційної обробки на структуру евтектики сплаву АЛ9(Sr,Sc) є незначним. Вплив гідроциркуляційної обробки на розмір кристалів евтектичного кремнію проявляється протягом 15 хв - розмір часток евтектичного кремнію зменшується в 1,5-2 рази, а починаючи з 30 хвилин - збільшується в

1,5-1,7 разів (див. рис. 1, табл.2). Розмір і параметр форми кристалів евтектичного кремнію зменшується практично в 2 рази під впливом гідроциркуляційної обробки протягом 15 хвилин, а потім збільшується в 2 рази при обробці протягом 30 хвилин і практично в 4 рази у разі 30 хвилин витримки після обробки.

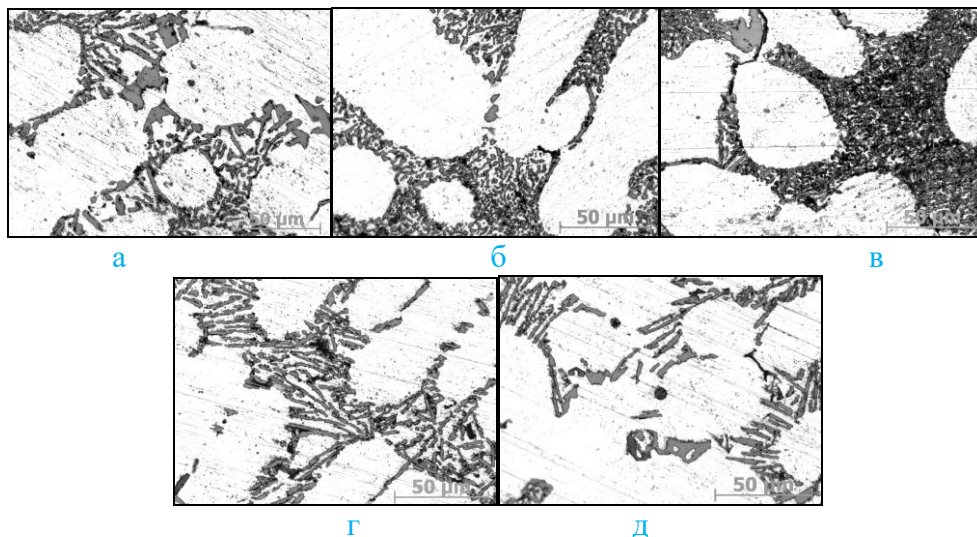


Рисунок 1 - Мікроструктура сплаву АЛ9(Sr,Sc): а- в литому стані; і після гідро циркуляційної обробки при 750°C: б – 5 хв, в -15 хв, г – 30 хв, д – витримка 30 хв після обробки

Таблиця 2 – Кількісні характеристики структури і механічні властивості сплаву АЛ9(Sr,Sc), в залежності від режимів гідроциркуляційної обробки

Режим	E, %	D, мкм	A	L, мкм	H <sub>ц</sub> , МПа	H <sub>ц<math>\alpha</math></sub> , МПа	НВ	$\delta$ , %	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа
Литий	26,7	5,7	2,5	2,1	262	240	59,0	5,95	109,0	167,2
ГЦО 5 хв	27,3	3,6	1,7	1,35	275	243	62,0	8,50	135,5	196,5
ГЦО 15 хв	27,5	3,0	1,5	1,0	267	202	62,4	5,94	136	179
ГЦО 30хв	27,0	7,2	3,6	1,6	248	201	57,0	5,00	125	158
Витримка 30хв	23,0	8,0	4,9	1,45	230	205	52,0	5,95	135	178

Відстань між кристалами евтектичного кремнію зменшується в 2 рази під час гідроциркуляційної обробки протягом 15 хвилин, незначно збільшуючись (на 0,2 мкм) протягом 30 хв і витримки після обробки 30 хв.

Таким чином, з аналізу кількісних даних параметрів структури комплексного сплаву АЛ9 необхідно зробити висновок, що гідроциркуляційна обробка ефективно впливає на мікроструктуру сплаву протягом 15 хвилин обробки, після чого вплив гідроциркуляційної обробки припиняється.

Результати фазового рентгеноструктурного аналізу сплаву АЛ9(Sr,Sc) в литому стані та після гідроциркуляційної обробки, представлені на рисунку 2.

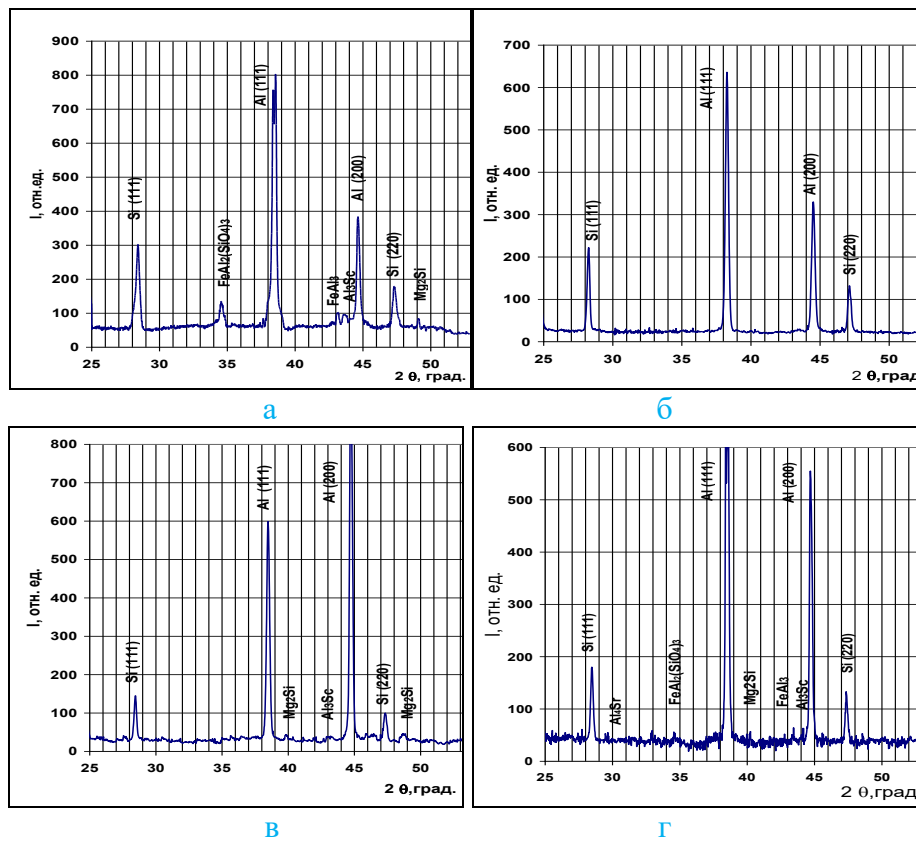


Рисунок 2 - Дифрактограма сплаву AL9(Sr,Sc): а – литий, б – ГЦО 5 хв, в – ГЦО 15 хв, г – ГЦО 30 хв, д – витримка після ГЦО 30 хв

У вихідному сплаві AL9(Sr,Sc) присутні інтерметалідні фази  $Mg_2Si$ ,  $FeAl_3$ ,  $Al_4Sr$ ,  $Al_3Sc$  і оксиди  $FeAl_2(SiO_4)_3$ ,  $Al_2O_3$  (див. рис. 2,а). Гідроциркуляційна обробка впродовж 5...15 хвилин (див. рис. 2, б) призводить до спочатку часткового, потім – й повного – зникнення в структурі інтерметалідів  $Mg_2Si$ ,  $Al_4Sr$ ,  $Al_3Sc$  і  $FeAl_3$ , про що свідчить відсутність відповідних максимумів.

При гідроциркуляційній обробці 30 хвилин (див. рис. 2, в) відбувається утворення  $Mg_2Si$  і збільшення вмісту  $Al_3Sc$  в твердому стані. Витримка впродовж 30 хвилин після 30 хвилинної гідроциркуляційної обробки (див. рис. 2, г) призводить до збільшення кількості  $Mg_2Si$ ,  $Al_4Sr$ ,  $Al_3Sc$  і утворенню великої кількості фази  $FeAl_3$  в твердому стані. Це, ймовірно, пов'язано з перерозподілом легуючих елементів в розплаві і зміною кількісного співвідношення і складу мікрогрупувань атомів в розплаві, подібних до інтерметалідних фаз, присутніх в структурі сплаву AL9 в твердому стані.

Експериментальні дані про вплив гідроциркуляційної обробки на мікроструктуру та фазовий склад сплаву AL9(Sr,Sc) підтверджуються випробуваннями механічних властивостей: мікротвердості (Нц, МПа), твердості НВ, межі міцності ( $\sigma_B$ , МПа), межі плинності ( $\sigma_T$ , МПа), відносного подовження ( $\delta$ ,%) (рисунок 3, табл. 2).

Гідроциркуляційна обробка протягом 5...15 хвилин забезпечує збільшення відносного подовження на 40%, мікротвердості евтектики на 13 МПа

(5%), твердості на 3НВ (5%) межі плинності на 26,5 МПа (16%), межі міцності на 29,3 МПа (на 20%) (табл. 2, рис. 3).

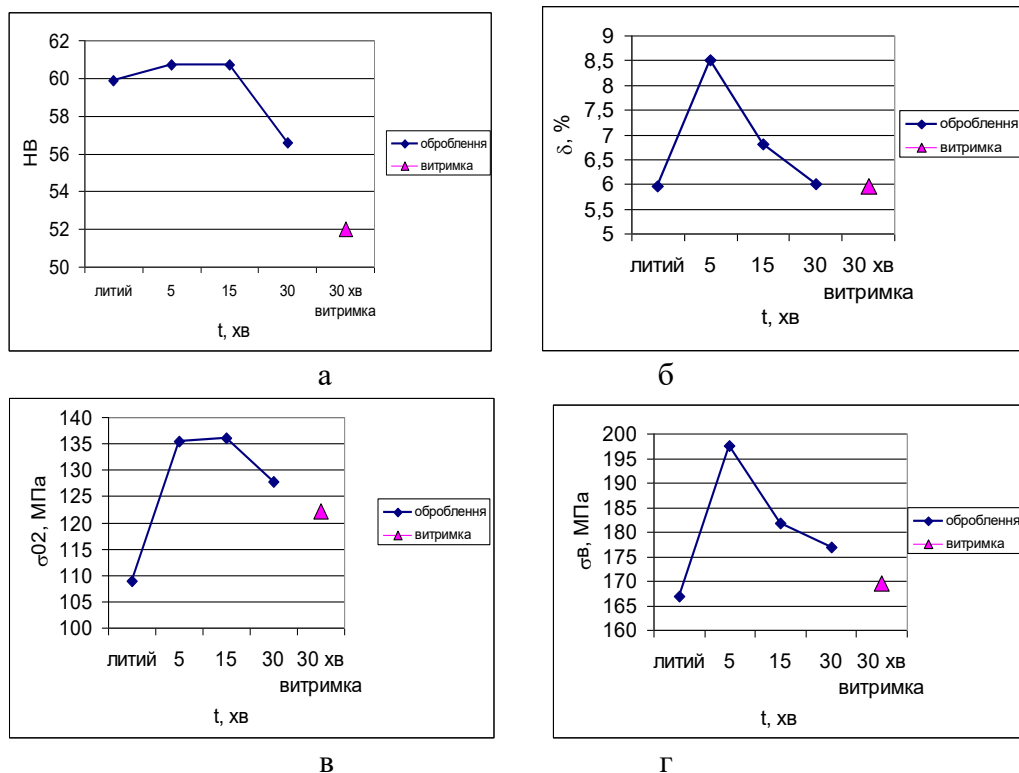


Рисунок 3 – Вплив гідроциркуляційної обробки на механічні властивості сплаву АЛ9(Sr,Sc): а - твердість, б - відносне подовження; в – межу плинності; г - межу міцності

Обробка протягом 30 хвилин забезпечує підвищення межі плинності на 26,0 МПа, межі міцності на 10,8 МПа без зміни відносного подовження.

Таким чином можна рекомендувати гідроциркуляційну обробку сплаву АЛ9(Sr,Sc) протягом 5...15 хв.

Структура сплавів АЛ9 та АЛ9(Sr,Sc) в литому стані та після водневої обробки а різними режимами представлена первинними кристалами  $\alpha$ -Al, тонкодиференційованою евтектикою  $\alpha$ -Al+ $\beta$ -Si та компактними інтерметалідними сполуками, які розташовані по межах первинних  $\alpha$ -Al кристалів та евтектики (рис. 4).

Аналіз мікроструктур, наведених на рис. 4, свідчить, що воднева обробка розплаву призводить до подрібнення структури і зміни кількісного співвідношення структурних складових для обох сплавів: збільшення часу водневої обробки особливо істотно впливає кількісне співвідношення первинних кристалів  $\alpha$ -Al і евтектики: кількість  $\alpha$ -Al кристалів збільшується, а кількість евтектики зменшується (див. рис. 4, г...ж).

Кількісні характеристики структури (кількість евтектики % E, розмір кристалів евтектичного кремнію D, параметр форми кристалів евтектичного

кремнію  $A$ , відстань між кристалами кремнію в евтектиці  $L$ , ступінь розгалуженості дендритів  $\alpha$ -алюмінієвого твердого розчину  $R$ ) і механічні властивості сплавів АЛ9 та АЛ9(Sr,Sc) в залежності від режимів водневої обробки наведені в табл. 3.

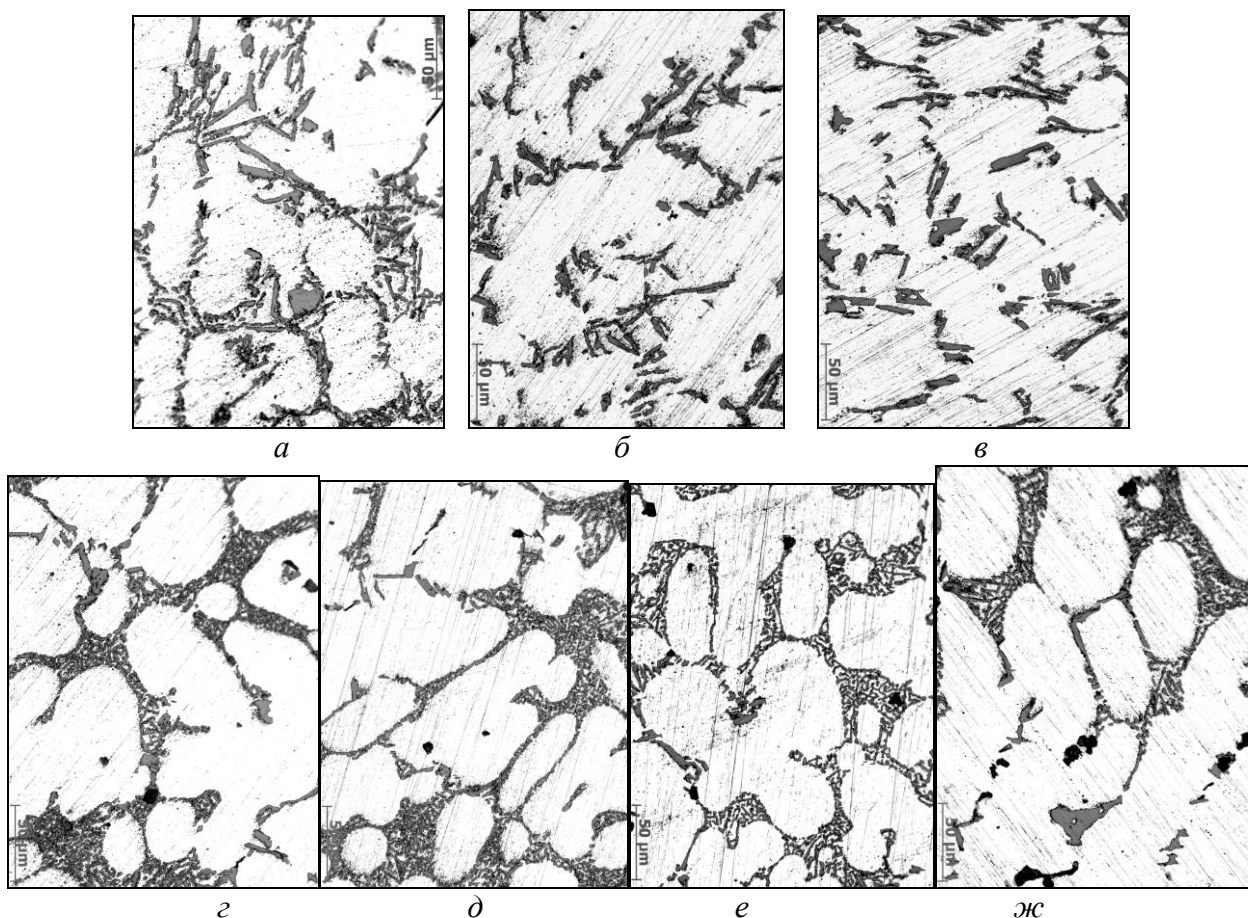


Рисунок 4 - Мікроструктура сплаву АЛ9: а,б,в – вихідного складу; г, д, е, ж – АЛ9, що містить комплекс Sr-Sc; а,г – литий стан; б,в, д, е, ж – воднева обробка за різними режимами

Таблиця 3 – Кількісні характеристики структури та механічних властивостей сплавів АЛ9 та АЛ9 (Sr, Sc) в залежності від режиму водневої обробки

Спл ав	Режим обробки	$E$ , %	$D$ , мкм	$A$	$L$ , мкм	$R$ , мкм	$H_{\mu}$ , МПа	$H_{\mu\alpha}$ , МПа	$HB$
АЛ9	Литий	25	10,4	3,53	3,10	34,7	204	181	54,3
	$H_2$	30,1	9,9	3,60	3,04	34,8	254	213	54,3
	90 хв	27,0	12,6	4,46	3,11	34,7	234	210	51,9
АЛ9 (Sr, Sc)	Литий	27,0	4,03	1,98	1,54	32,9	277	233	59,5
	$H_2$	29,6	3,71	1,96	1,62	28,3	252	219	62,4
	20 хв	26,15	4,05	2,10	2,11	33,7	286	268	59,5
	60 хв	25,5	5,32	2,46	1,96	34,2	268	240	62,4

Дані таблиці 3 свідчать про зростання ступеню евтектичності обох сплавів при проведенні водневої обробки - на 5 ... 25% для сплаву АЛ9, та на 6 ... 27% для АЛ9 (Sr, Sc).

Розмір кристалів евтектичного кремнію, а також відстань між кристалами кремнію в евтектиці при гідруванні зменшуються в порівнянні з вихідним станом на 6%, параметр форми кристалів незначно збільшується (на 1,5%) для сплаву АЛ9. Витримка протягом 120 хв після гідрування призводить до огрубіння евтектичного кремнію - його розміри збільшуються на 18 ... 22% в порівнянні з вихідним станом.

Для сплаву АЛ9 (Sr, Sc) спостерігається незначне подрібнення евтектичного кремнію при гідруванні (на 14%) і зменшення параметра форми евтектичних кремнієвих кристалів (на 2%). Витримка після гідрування протягом 20 хв призводить до збільшення розмірів і параметра форми кристалів кремнію на 7 ... 14%, а збільшення часу витримки до 90 хв призводить до збільшення розмірів і параметра форми кристалів евтектичного кремнію на 20% в порівнянні з вихідним станом. Спостерігається монотонне збільшення відстані між кристалами кремнію в евтектиці при проведенні гідрування і подальшій витримці протягом 20 ... 90 хв (див. табл.3).

Воднева обробка протягом 20 ... 40 хвилин призводить до незначного збільшення товщини дендритних гілок  $\alpha$ -Al твердого розчину і зменшення їх розгалуженості для обох сплавів, причому для сплаву АЛ9 (Sr, Sc) цей процес інтенсивніший у порівнянні з АЛ9.

Результати фазового рентгеноструктурного аналізу впливу водневої обробки на фазовий склад сплаву АЛ9(Sr, Sc) представлені на рисунку 5.

Фазовий склад сплаву АЛ9(Sr, Sc) характеризується наявністю інтерметалідів  $Mg_2Si$ ,  $FeAl_3$ ,  $Al_4Sr$ ,  $Al_3Sc$ , що підтверджується присутністю на дифрактограмі відповідних дифракційних максимумів (див. рис 5, а). Гідрування призводить зникнення в структурі інтерметалідів  $Al_4Sr$  і  $Al_3Sc$ , про що свідчить відсутність відповідних їм дифракційних максимумів, а також зменшення кількості фаз  $Mg_2Si$  і  $FeAl_3$ , на що вказує зменшення інтенсивності дифракційних максимумів (див. рис.5, б). Витримка протягом 20 хв після гідрування (див. рис. 5, в) призводить до зникнення в структурі інтерметалідів  $Mg_2Si$  і  $FeAl$ . Це, ймовірно, пов'язано з перерозподілом легуючих елементів в розплаві і зміною співвідношення і складу мікроугруповань атомів в розплаві, подібних інтерметалідним фазам, присутнім в структурі сплаву АЛ9(Sr, Sc) в твердому стані.

Збільшення часу витримки після гідрування до 60 хв (див. рис. 5, г) нівелює отриманий ефект: фазовий склад сплаву характеризується наявністю  $Mg_2Si$ ,  $Al_4Sr$ ,  $Al_3Sc$ , і - особливо -  $FeAl_3$ , про що свідчить наявність відповідних дифракційних максимумів. Це негативно може позначитися на міцності і, особливо, пластичності сплаву.

Дані механічних випробувань дослідного сплаву (таблиця 4) добре корелюють з результатами мікроструктурного та рентгеноструктурного аналізу.

Таким чином, воднева обробка обох сплавів - АЛ9 та АЛ9 (Sr, Sc) призводить до збільшення розгалуженості дендритів  $\alpha$ -алюмінієвого твердого розчину, збільшення диференціювання евтектики.

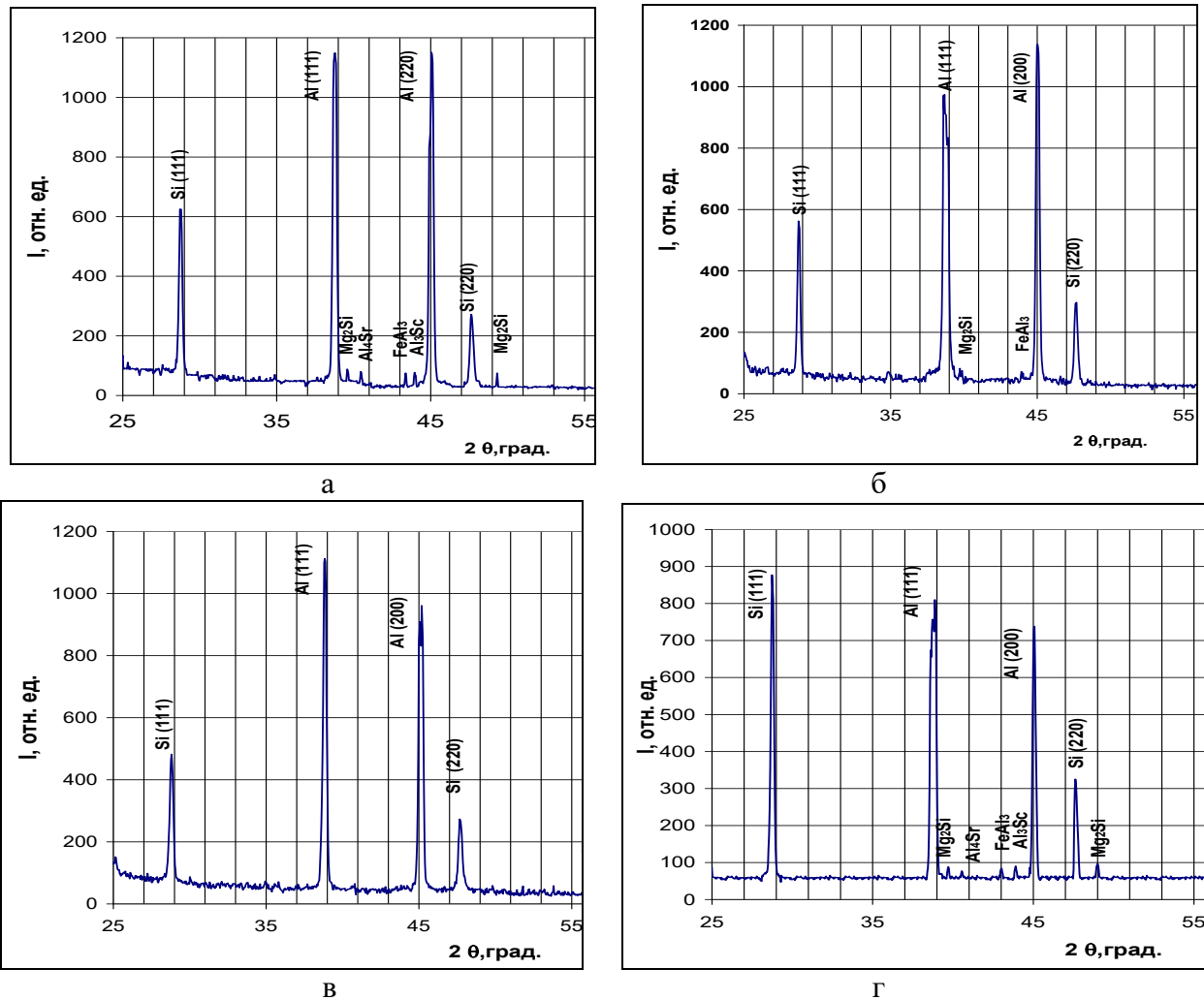


Рисунок 5 - Дифрактограми сплаву АЛ9(Sr, Sc) в залежності від режиму водневої обробки: а - литий; б - гідрування; в - 20 хв витримки; г - 60 хв витримки

Таблиця 4 - Механічні властивості сплавів АЛ9 та АЛ9 (Sr, Sc) при випробуванні на розтягнення в залежності від режиму водневої обробки

Режим	АЛ9						АЛ9 (Sr, Sc)				
	Литий	H <sub>2</sub>	20хв	40хв	60хв	90хв	Литий	H <sub>2</sub>	20хв	40хв	60хв
$\sigma_{0,2}$ , МПа	90	96	100	93	99	94	114	115	121	115	108
$\sigma_B$ , МПа	153	170	180	172	178	165	185	182	184	190	188
$\delta$ , %	4,5	6,3	6,5	5,75	7,0	6,3	8,8	8,5	9,8	10,0	9,5

Воднева обробка АЛ9 призводить до збільшення  $\sigma_{0,2}$  на 10%,  $\sigma_B$  на 15-20%,  $\delta$  на 30-50%. Воднева обробка сплаву АЛ9 (Sr, Sc), практично не впливає на межу текучості ( $\sigma_{0,2}$ ), межу міцності ( $\sigma_B$ ) незначно підвищує на 5%, а від-

носне подовження ( $\delta, \%$ ) на 25%. Оптимальний час водневої обробки становить 20 ... 40 хв.

## Висновки

1. Експериментально встановлені закономірності впливу параметрів гідроциркуляційної обробки розплаву силуміну АЛ9 (Sr, Sc), на структуру, фазовий склад і властивості матеріалу. Отримані дані дозволяють рекомендувати гідроциркуляційне оброблення на протязі 5...15 хвилин при температурі розплаву 750°C для підвищення механічних властивостей сплавів: межі міцності сплаву на 10...20% (з 167 МПа до 196МПа), межі плинності – на 16...26% (з 108МПа до 136МПа), відносного подовження – до 40% ( з 6% до 8%) в порівнянні з литим станом.

2. Експериментально встановлені закономірності впливу параметрів водневої обробки розплавусилуміну АЛ9(Sr, Sc), що містить стронцій та скандій, на структуру, фазовий склад і властивості матеріалу. Воднева обробка практично не впливає на межу плинності, межу міцності підвищує незначно (на 5%), а відносне подовження на 25% (з 8,8% до 9,8%). Оптимальний час водневої обробки складає 20...40 хвилин.

3. Позитивний вплив гідроциркуляційної та водневої обробок розплаву на властивості силуміну АЛ9(Sr, Sc), в обох випадках досягається за рахунок підвищення розгалуженості первинних кристалів  $\alpha$ -Al диференціювання евтектики  $\alpha$ -Al+ $\beta$ -Si. Гідроциркуляційна обробка протягом 5-15 хвилин, а також воднева обробка протягом 20...40 хвилин призводить до зникнення у структурі сплаву магній-, скандій та залізовмісних інтерметалідів що, ймовірно, пов'язано з перерозподілом легуючих елементів у розплаві і зміною співвідношення і складу мікрогруповань атомів в розплаві, подібних інтерметалідним фазам, що присутні у структурі сплаву в твердому стані.

Перевищення оптимального часу зазначеної обробки розплаву нівелює отриманий ефект.

## Література

1. Никитин В.И. Наследственность в литых сплавах / В.И. Никитин, К.В. Никитин. - [Изд. 2-е, перераб. и доп.]. - М.: Машиностроение – 1, 2005 476 с
2. Пригунова А.Г. Наследственное влияние расплава на структуру и свойства силуминов / А.Г. Пригунова, С.С. Петров // Цветные металлы.- 1992. №2. С.59-63.
3. Мазур В.И. Фазовые равновесия и структура расплава в модифицированных сплавах Al-Si / В.И. Мазур // Стабильные и метастабильные равновесия. – М.: Наука, 1985. – С. 181-185.
4. Куцова В.З. Модифікування алюмінієвих сплавів / В.З. Куцова, О.В. Швець, Т.А. Аюпова // «МОМ». 2001. №1-2. С. 99-109.

5. Модифицирование силуминов стронцием / И.Н. Ганиев, П. А. Пархунтик, А.В. Вахобов, И. Ю. Куприянова. Минск: Наука и техника, 1985. 143с.
6. Мальцев М. В. Модифицирование структуры металлов и сплавов / Мальцев М. В. М.: Металлургия, 1964. 213 с.
7. Куцова В.З. Теория и практика управления структурой и свойствами литейных сплавов на основе алюминия и титана: дис. ... доктора технических наук: 05.16.01 / Куцова Валентина Зиновьевна. Днепропетровск, 1993. – 878 с.
8. Ищенко А.И. Свариваемые алюминевые сплавы со скандием / А.И. Ищенко, Т.М. Лабур. К.: Квіц, 1999. 116 с.
9. Куцова В.З. Влияние микролегирования Sr и Sc на структуру сплава АК7ч / В.З. Куцова, Т.А. Аюпова // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научн. тр. вып. 36, ч.1. Днепропетровск, ПГАСиА. 2006. С. 201-209.
10. Куцова В.З. Влияние микролегирования Sr и Sc на фазовый состав и свойства АК7ч / В.З. Куцова, Т.А. Аюпова, М.Ю. Амбражей // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научн. тр. вып. 41, ч.1. Днепропетровск, ПГАСиА. 2007. С. 18-30.
11. Борисов Г.П. Водородная обработка расплава – как метод снижения водородной пористости отливок из алюминиевых сплавов / Г.П. Борисов, Ф.М. Котлярский // Водородная обработка материалов. Донецк, ДонГТУ, 2001. С.202-204.
12. Исследование эффективности гидроциркуляционной обработки Al-Si расплавов/ [Борисов Г.П., Костюк А.И., Семенченко А.И. и др.] // Производство стали в XXI веке, прогноз, процессы, технология, экология. -Киев- Днепродзержинск, 2000. С. 12-18.

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА ТЕХНОЛОГІЇ. МАТЕРІАЛИ  
МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ.**

Конференцію проведено згідно з планом проведення міжнародних, всеукраїнських науково-практичних і науково-методичних конференцій і семінарів Харківського національного автомобільно-дорожнього університету у 2022 р. (посвідчення УкрІНТІ №928 від 23 листопада 2021 р.).

Відповідальний за випуск д.т.н., проф. Глушкова Д.Б.

Науковий редактор д.т.н., проф. Глушкова Д.Б.

Технічний редактор к.т.н., доц. Лалазарова Н.О.

Формат 60×84/8. Ум. друк. арк 9,9. Тир. 100 прим. Зам. №  
Підписано до друку ... Папір офсетний.

Гарнітура Times New Roman. Віддруковано на ризографі.

**Видавництво ХНАДУ, 61200, Харків-МСП, вул. Петровського, 25.  
Тел./факс: (057)700-38-72; 707-37-03, e-mail: rio@khadi.kharkov.ua**

*Свідоцтво Державного комітету інформаційної політики, телебачення  
та радіомовлення України про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів  
видавничої продукції, серія ДК №897 від 17.04.2002 р.*