

УДК 669.715.018:621.745

**ВПЛИВ ВОДНЕВОЇ ОБРОБКИ (ГІДРУВАННЯ) НА СТРУКТУРУ
ТА ВЛАСТИВОСТІ ПРОМИСЛОВОГО ПОРШНЕВОГО
ЗАЕВТЕКТИЧНОГО СИЛУМІНУ ТИПУ АК18**

В. З. Куцова, О. А. Носко, А. С. Шерстобитова

Національна металургійна академія України

Структурування в силумінах визначається кристалохімічною природою компонентів і фаз, типом і ступенем завершеності фазових перетворень. Закономірності фазових перетворень, як при твердінні, так і при перекристалізації в твердому стані в ливарних сплавах на основі алюмінію до цього часу вивчені недостатньо. Особливо це стосується різних способів впливу на розплав силумінів: гідроциркуляційної, водневої обробки [1] і тощо і наступного термічної обробки готових виробів. Ідея генетичного взаємозв'язку [2] структури металів і сплавів у розплавленому і твердому стані є основною в більшості сучасних моделей металевих розплавів. На цих уявленнях про вплив структури розплаву на процес кристалізації розроблена велика кількість методів зовнішнього впливу на розплави для управління структурою і властивостями литого металу. При дослідженні ефективності водневої обробки алюмінієвих сплавів газонасичення розплаву проводиться за рахунок його реакції з парами води.

Дослідження ефективності водневої обробки ливарних алюмінієвих сплавів для виключення впливу відхилень хімічного складу на результати кожної серії експериментів проведені на металі базового сплаву однієї плавки.

Промисловий сплав АК18 виплавляли в індукційні печі в графітовому тиглі об'ємом 5 кг. Як шихтові матеріали використовували технічний алюміній марки А5, технічний кремній КРО, лігатури Al–В та Al–Sn. Сплав виготовляли методом сплавлення основних компонентів, піддавали дегазації і рафінуванню. Лігатури вводили в розплав при температурах 750–780 °С, після введення модифікаторів упродовж 30 хвилин сплав ретельно перемішували і охолоджували.

Хімічний склад дослідного сплаву визначали спектральним аналізом на установці ARL-2400.

Середній вміст основних компонентів і легуючих елементів у дослідному модифікованому заевтектичному алюмінієвому сплаві АК18 (В–Sn) наведений у таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад дослідженого промислового поршневого заевтектичного силуміну

| Марка сплаву | Хімічні елементи, % | | | | | |
|--------------|---------------------|-----|-----|-----|------|--------|
| | Si | Fe | Mn | Mg | B-Sn | Al |
| AK18 | 18.0 | 0.3 | 0.2 | 0.3 | 0.05 | основа |

Водневу обробку розплаву проводили за методикою ФТІМС НАНУ [1] та відповідно до плану експерименту, наведеного в таблиці 2.

Таблиця 2

Параметри режимів водневої обробки сплаву АК18

| Обробка | Т печі, °С | Т заливання розривних зразків, °С | Т заливання металографічних зразків, °С | |
|-------------------------|------------|-----------------------------------|---|-------------------------------------|
| | | | Н = 2 мм Т _ф = 250 °С | Н = 10 мм Т _ф = 25 °С |
| Вихідний/ № зразка | 799 | - | 760 1 | 760 2 |
| Гідрування/ № зразка | 804 | 780 | 780 3 | 780 4 |
| Гідрування/ № зразка | 804 | 780 | 760 6 | |
| 20 хв/ № зразка | 803 | 789 | 789 7 | 789 8 |
| 20 хв/ № зразка | 803 | 798 | 790 9 | 790 11 |
| 40 хв/ № зразка | 800 | 680 | 680 13 | 680 14 |
| 40 хв/ № зразка | 800 | - | сплав, охолоджений у воді до 680 °С 16 | |
| 60 хв/ № зразка | 800 | 756 | 756 17 | 756 18 |
| 90 хв/ № зразка | 800 | 756 | сплав, охолоджений у воді до 755 °С 19 | |

Примітка. Зразки 10, 15 загартовані у воді.

У процесі проведення кожної експериментальної плавки порцію сплаву базового складу вагою $4 \pm 0,05$ кг розплавляли в лабораторній печі опору.

Методом експресного термічного аналізу визначали температуру ліквідус сплаву. Потім, після перегріву на 120 ± 10 °C над $T_{\text{лікв}}$, і витримки розплаву протягом 20 хвилин, відливали експериментальні зразки для дослідження структури, фізико-механічних і службових властивостей металу у вихідному стані. Після закінчення процесу водневої обробки розплаву через 20, 40, 60 і 90 хвилин проводили заливання дослідних зразків для вивчення впливу гідридної обробки на структуру і властивості литого металу.

У процесі експериментального дослідження ефективності водневої обробки алюмінієвих розплавів проводили також аналіз ряду параметрів рідкого металу за допомогою вдосконаленого методу термічного аналізу [3]. Проби металу для термічного аналізу відбирали безпосередньо із плавильної печі перед заливанням експериментальних зразків для дослідження структури й фізико-механічних характеристик литого металу.

У даному дослідженні методом термічного аналізу виконували аналіз стану розплаву за наступними параметрами:

- температура рідкого металу в момент відбору проби й температурних інтервалів кристалізації розплаву;
- хімічний склад сплаву за основними легуючими і домішковими елементами (за кремнієм, магнієм, марганцем, міддю, залізом, титаном і цинком);
- часові параметри процесу тверднення й охолодження металу дослідного зразка від моменту відбору проби й до досягнення температури 397 °C.

Мікроструктуру сплаву вивчали за допомогою металографічного мікроскопа типу НЕОРНОТ-21. Для виявлення загальної мікроструктури зразки піддавали травленню 0,5 % водним розчином плавикової кислоти впродовж 10–15 с з наступним промиванням у струмі проточної води.

Відповідно, структура вихідного сплаву АК18, що затвердів з різними швидкостями охолодження, наведена на рисунках 1 та 2 (зразки № 1 та № 2, див. таблицю 2).

Аналіз мікроструктур (рис. 1 та 2) свідчить, що зі збільшенням швидкості охолодження спостерігається зменшення розмірів первинних кристалів β -Si твердого розчину та їх істотне розгалуження, спостерігається також зменшення міжпластинчастої відстані в евтектиці α -Al + β -Si, морфологія евтектики зберігається пластинчастою.

Гідрування розплаву (рис. 3 та 4) призводить до зміни форм росту первинних кристалів β -Si твердого розчину: поряд з п'ятипроменевими кристалами спостерігаються *n*-подібні кристали, морфологія евтектики зберігається пластинчастою, міжпластинчаста відстань зменшується.

Збільшення часу водневої обробки від 20 до 90 хвилин (рис. 5–10; зразки № 6–19 див. табл. 2) призводить до подрібнення первинних кристалів β -Si твердого розчину, до формування компактних кристалів правильної форми, появи псевдопервинних дендритів α -Al твердого розчину, появи обідка α -Al твердого розчину навколо надлишкових кристалів β -Si твердого розчину, а

також до формування більш тонкодиференційної евтектики не тільки пластинчастої, а і стрижневої морфології.

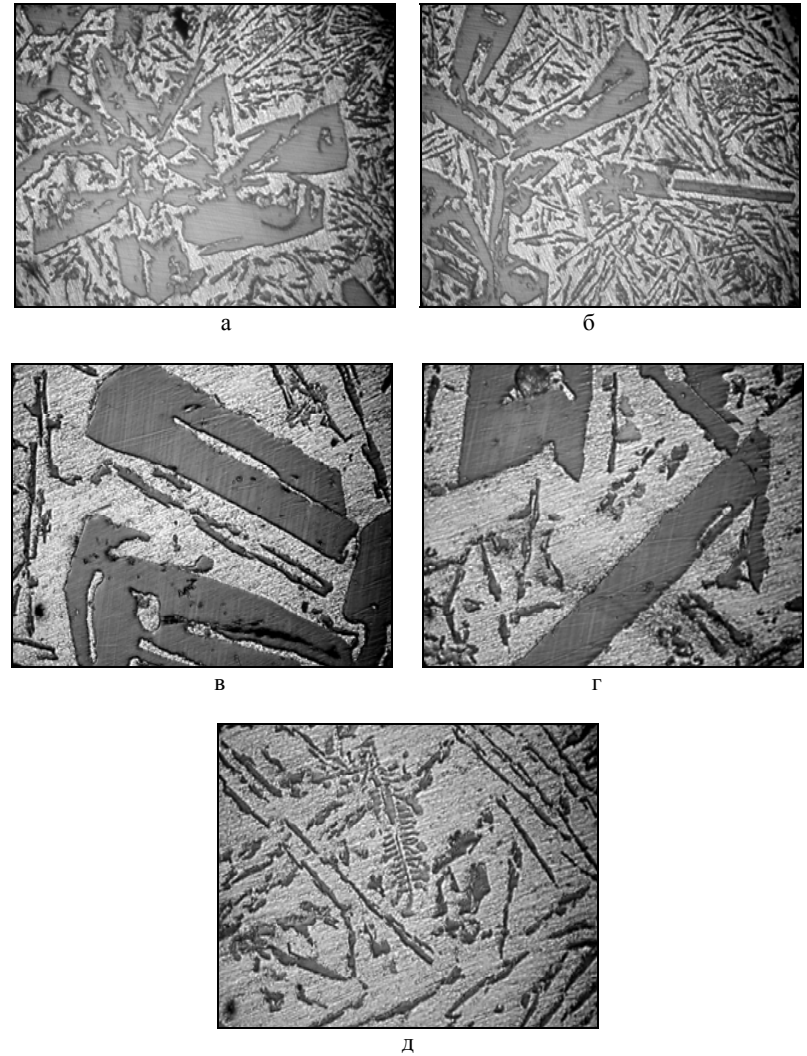


Рис. 1. Структура вихідного сплаву АК18 (повільне охолодження);
а, б – х 100; в, г, д – х 400.

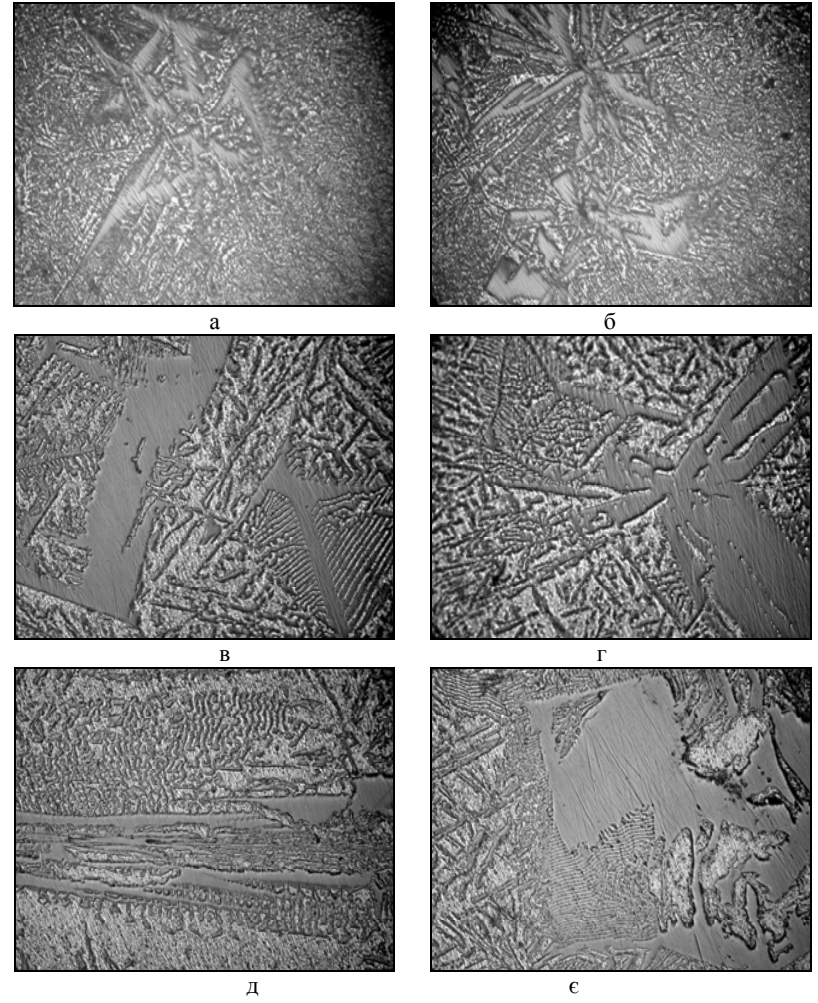
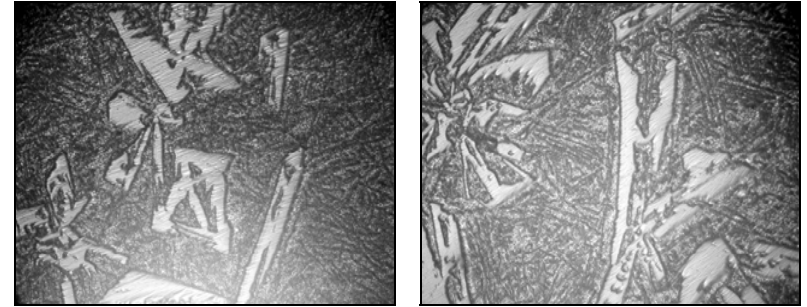
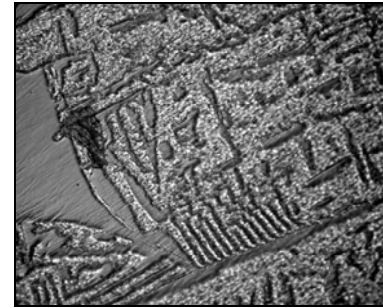


Рис. 2. Структура вихідного силуміну АК 18 (прискорене охолодження);
а, б – х 100; в, г, д, є – х 400.

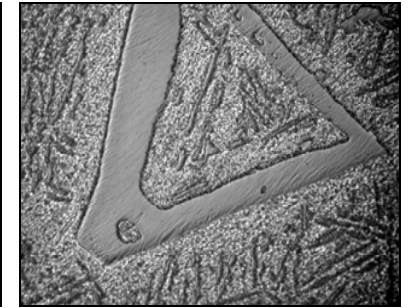


а

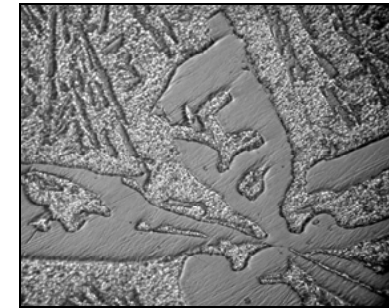
б



в

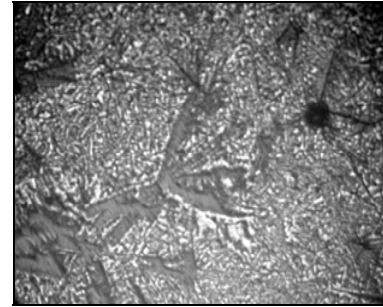


г

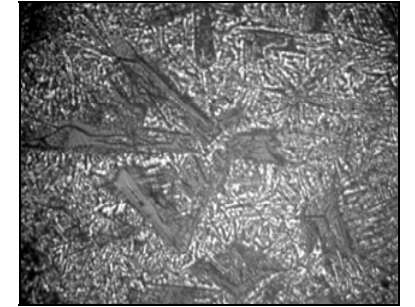


д

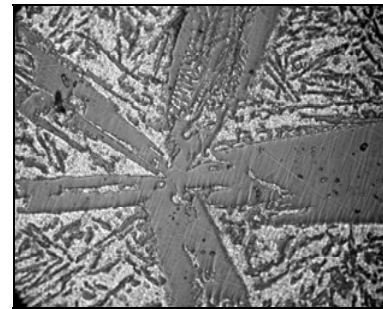
Рис. 3. Структура сплаву АК18 після гідрування (повільне охолодження);
а, б – х 100; в, г, д – х 400.



а



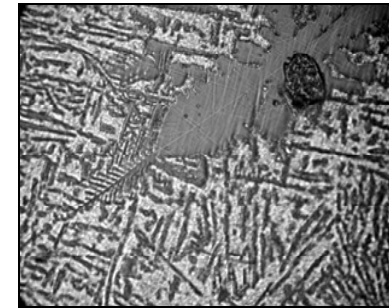
б



в



г



д

Рис. 4. Структура сплаву АК18 після гідрування (прискорене охолодження);
а, б – х 100; в, г, д – х 400.

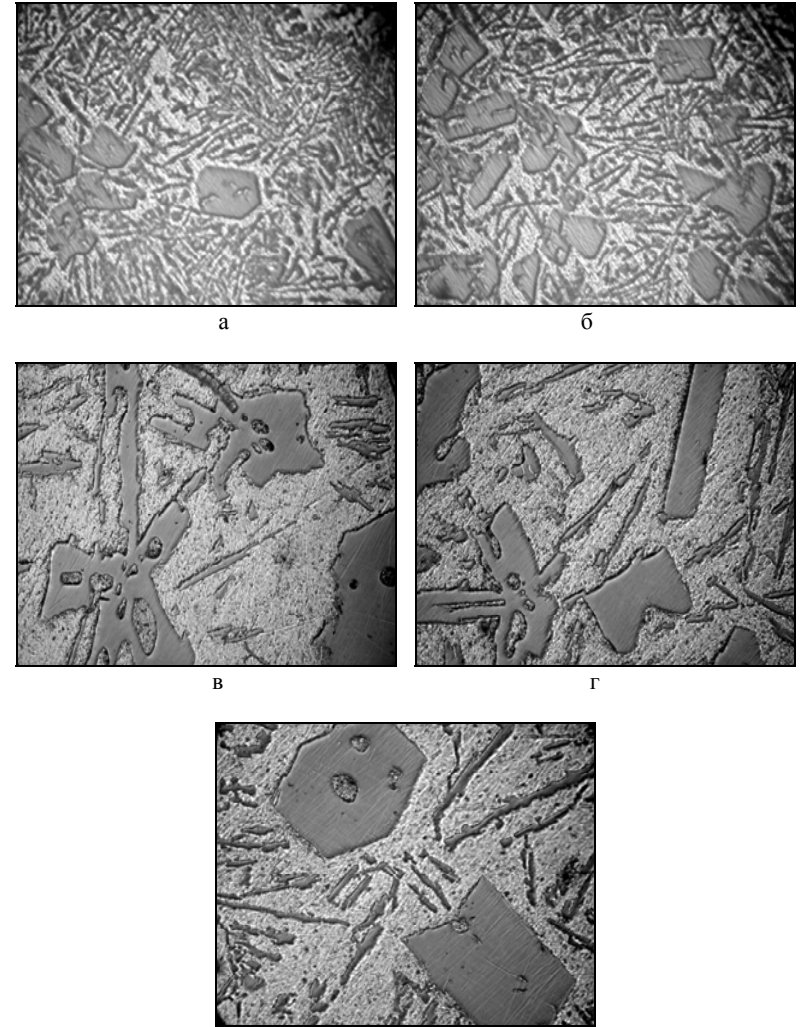
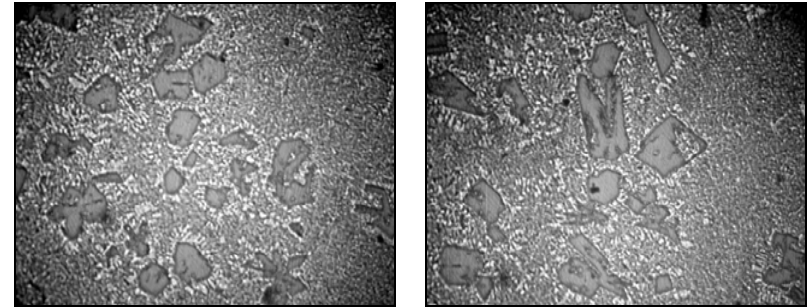
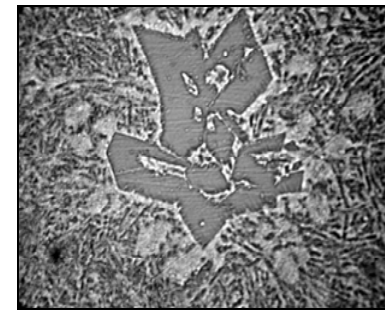


Рис. 5. Структура сплаву АК18 після гідрування (повільне охолодження);
а, б – х 100; в, г, д – х 400.

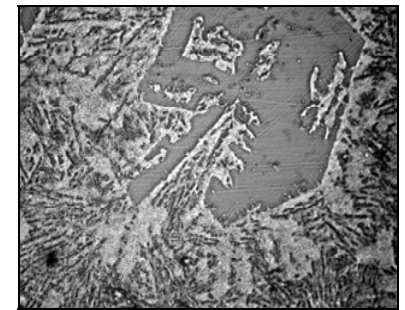


а

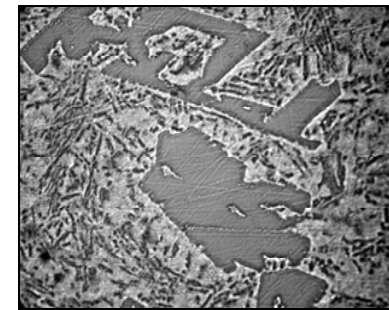
б



в

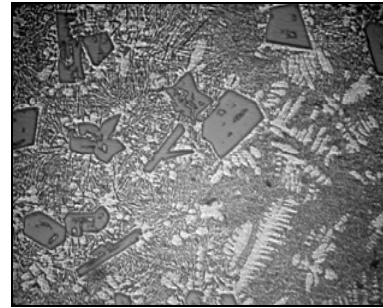


г

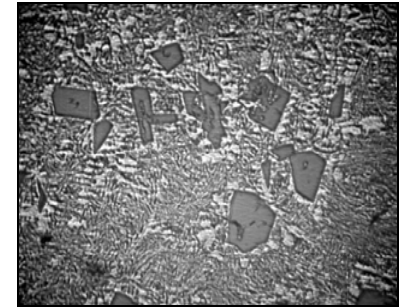


д

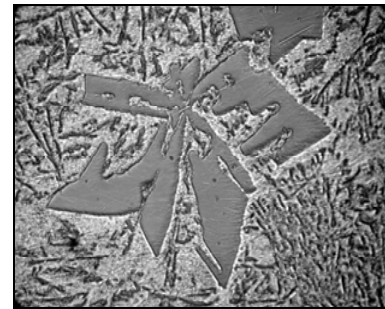
Рис. 6. Структура сплаву АК18 після гідрування впродовж 20 хв із подальшим загартуванням у воді; а, б – х 100; в, г, д – х 400.



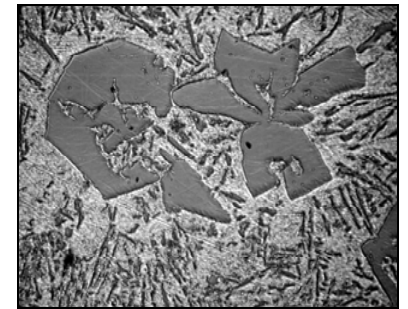
а



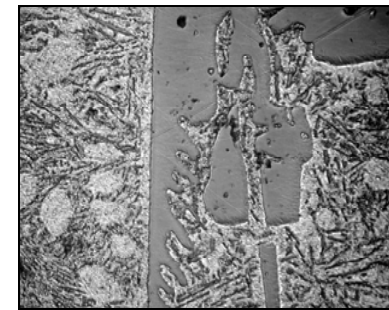
б



в



г



д

Рис. 7. Структура сплаву АК18 після гідрування впродовж 20 хв (прискорене охолодження): а, б – х 100; в, г, д – х 400.

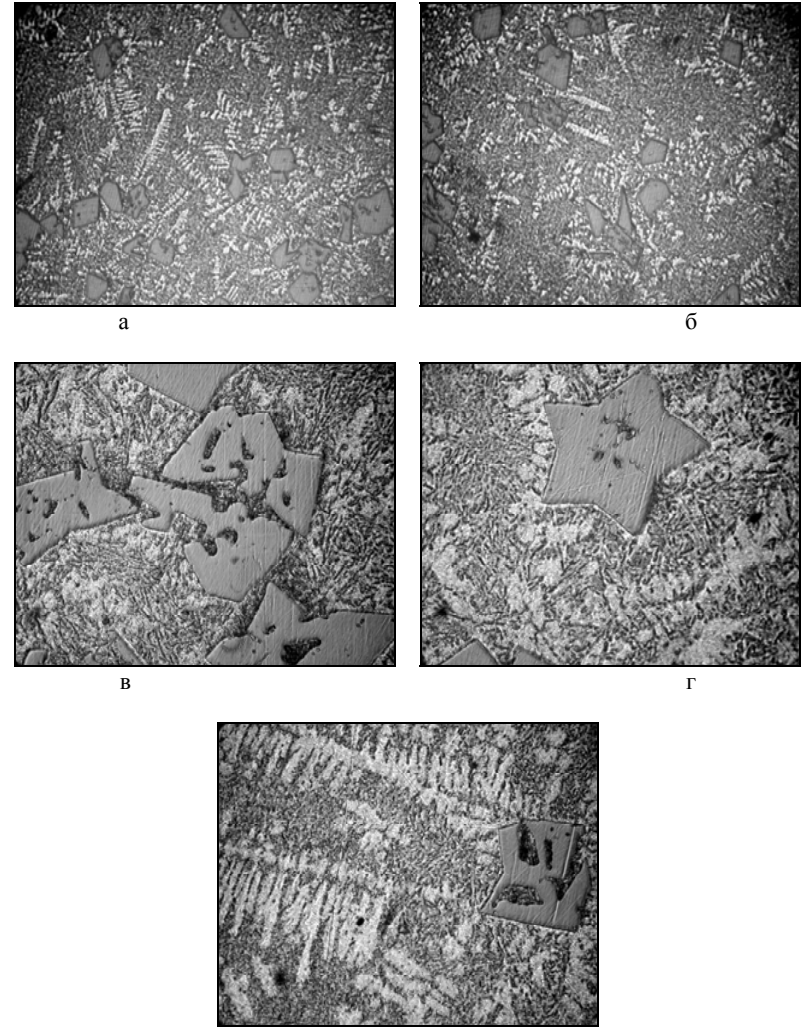
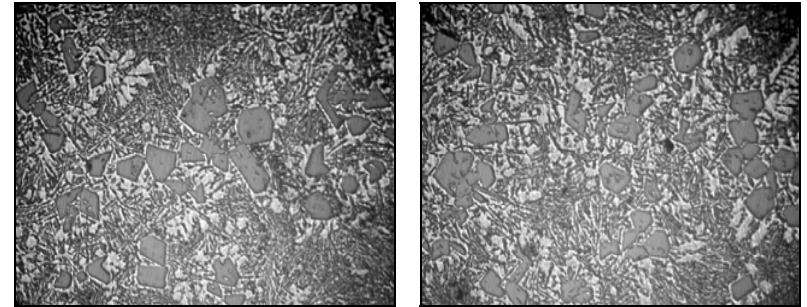


Рис. 8. Структура сплаву АК18 після гідрування впродовж 40 хв із подальшим загартуванням у воді; а, б – х 100; в, г, д – х 400.

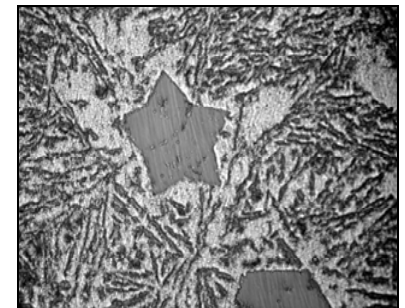


а

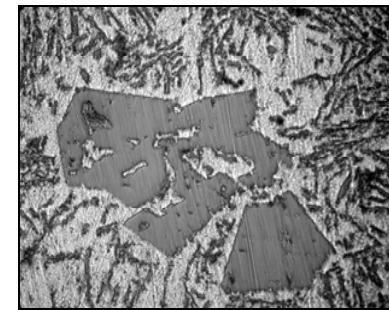
б



в



г



д

Рис. 9. Структура сплаву АК18 після гідрювання впродовж 60 хв із подальшим загартуванням у воді; а, б – х 100; в, г, д – х 400.

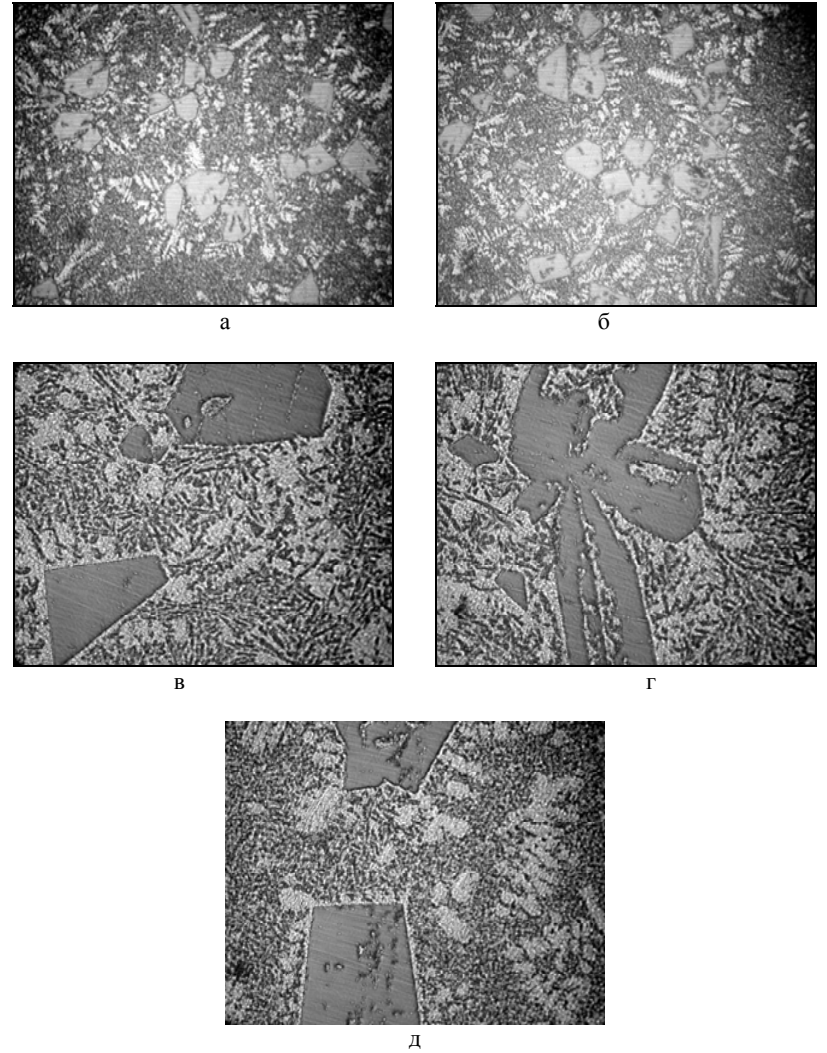


Рис. 10. Структура сплаву АК18 після гідрування впродовж 90 хв із подальшим загартуванням у воді; а, б – х 100; в, г, д – х 400.

Кількісні параметри структури сплаву АК18 після водневої обробки наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Кількісне співвідношення первинних кристалів β -Si твердого розчину та евтектики α -Al- β -Si (за методом Глаголева) і лінійні розміри первинних кристалів β -Si твердого розчину та кристалів Si в евтектиці

| Сплав | Зразок | Середній % структурних складових | | Лінійні розміри первинних кристалів β -Si твердого розчину, мкм | Лінійні розміри кристалів Si в евтектиці α -Al- β -Si, мкм |
|------------|--------|--|-------------------------------------|---|---|
| | | первинні кристали β -Si твердого розчину | евтектика α -Al- β -Si | | |
| АК18(B-Sn) | 1 | 26,2 | 73,8 | 463,7 | 159,9 |
| | 2 | 15,8 | 84,2 | 339,8 | 56,25 |
| | 3 | 25,8 | 74,2 | 367 | 109,8 |
| | 4 | 18,3 | 81,7 | 193 | 59,4 |
| | 6 | 19,7 | 80,3 | 138,4 | 117,4 |
| | 10 | 17,5 | 82,5 | 73,5 | 18,75 |
| | 11 | 14 | 86 | 74,8 | 34,4 |
| | 15 | 13,1 | 86,9 | 49,7 | 18,75 |
| | 16 | 18,2 | 81,8 | 43,5 | 21,2 |
| | 19 | 15,6 | 84,4 | 43,5 | 15,6 |

Аналіз даних таблиці 3 свідчить, що воднева обробка розплаву незалежно від швидкості охолодження веде до зменшення кількості первинних кристалів β -Si твердого розчину в 1,5–2 рази, збільшення кількості евтектичної складової на 20 %, подрібнення первинних кристалів β -Si твердого розчину в 10 разів, зменшення лінійних розмірів кристалів евтектичного β -Si твердого розчину в 3–10 разів. Такі зміни структури повинні забезпечувати збільшення міцності і пластичності сплаву в процесі водневої обробки розплаву.

Слід також відзначити, що комплексна обробка – модифікування та гідрування – забезпечує подрібнення первинних кристалів β -Si твердого розчину в 10–20 разів та збільшення кількості евтектичної складової на 20 % порівняно з немодифікованим станом [4].

Дослідження мікротвердості первинних кристалів β -Si твердого розчину (рис. 11–21) свідчить про суттєву неоднорідність кристалів, про утворення двох, а іноді і трьох твердих розчинів в об'ємі кристалів, а також про суттєву неоднорідність евтектичної складової α -Al + β -Si. В цілому воднева обробка призводить до збільшення мікротвердості первинних кристалів β -Si твердого розчину при повільному охолодженні (20 хв обробки) та при швидкому охолодженні при збільшенні часу обробки від 40 до 90 хвилин.

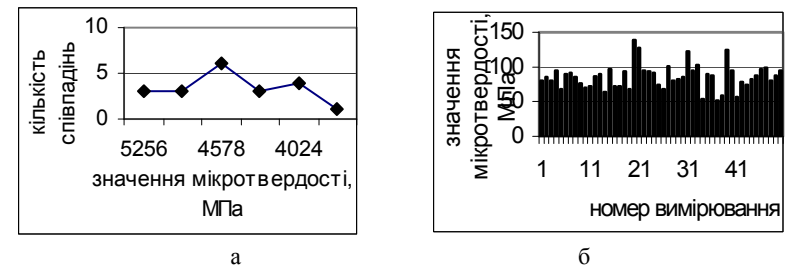


Рис. 11. Мікротвердість первинних кристалів β -Si твердого розчину (а) та евтектичної складової (б) вихідного сплаву АК18 (повільне охолодження).

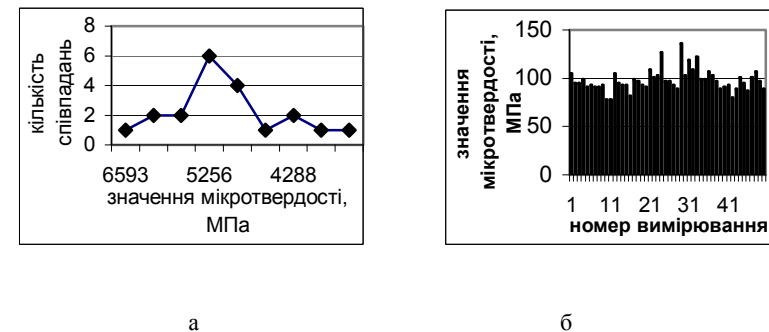
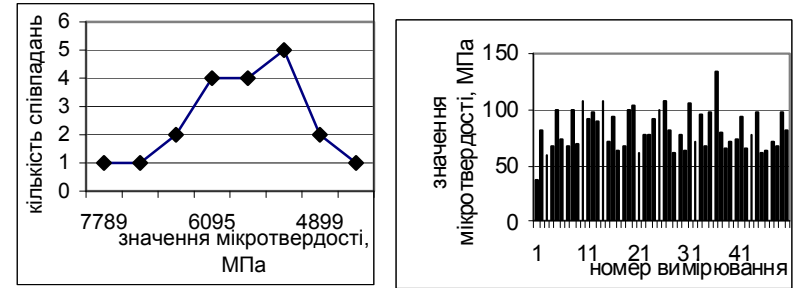
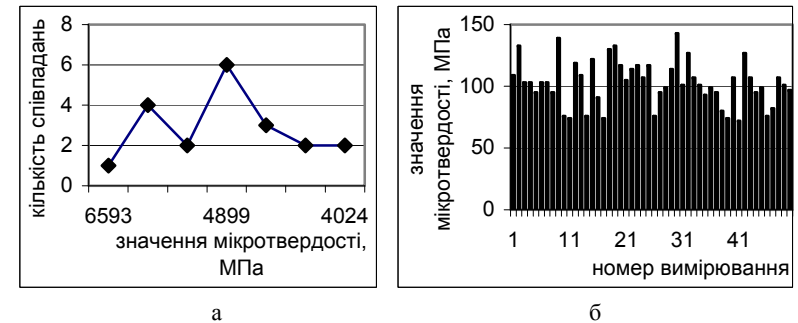


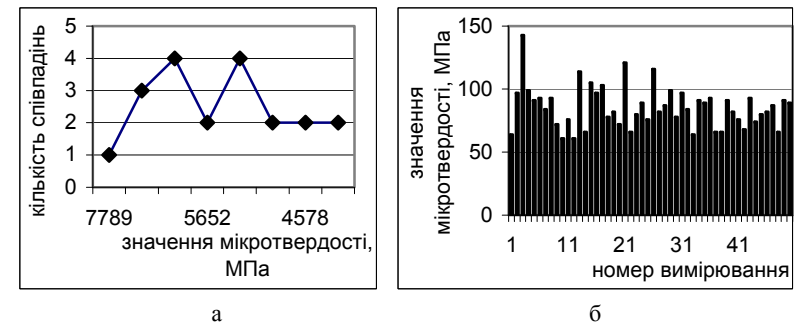
Рис. 12. Мікротвердість первинних кристалів β -Si твердого розчину (а) та евтектичної складової (б) вихідного силуміну АК 18 (прискорене охолодження).



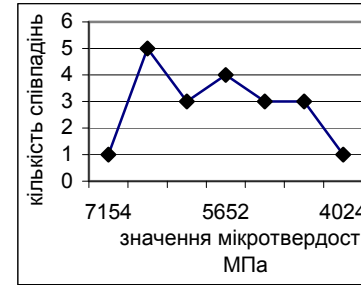
а
б
Рис. 13. Мікротвердість первинних кристалів β -Si твердого розчину (а) та евтектичної складової (б) сплаву АК18 після гідрування (повільне охолодження).



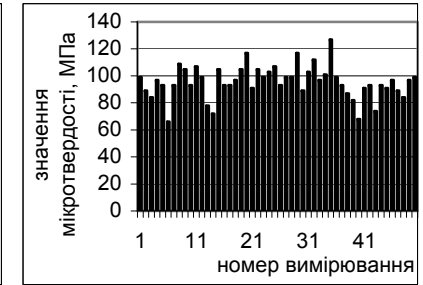
а
б
Рис. 14. Мікротвердість первинних кристалів β -Si твердого розчину (а) та евтектичної складової (б) сплаву АК18 після гідрування (прискорене охолодження).



а
б
Рис. 15. Мікротвердість первинних кристалів β -Si твердого розчину (а) та евтектичної складової (б) сплаву АК18 після гідрування (повільне охолодження).

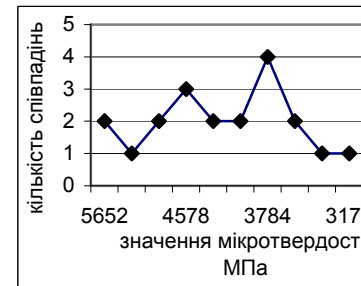


а

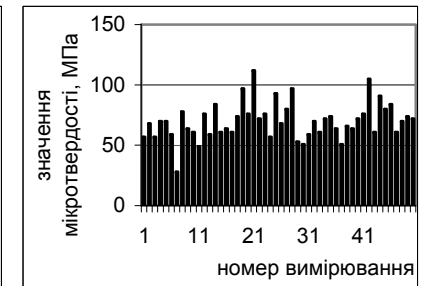


б

Рис. 16. Мікротвердість первинних кристалів β -Si твердого розчину (а) та евтектичної складової (б) сплаву АК18 після гідрування впродовж 20 хв з подальшим загартуванням у воді.

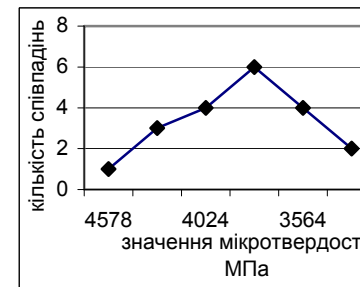


а

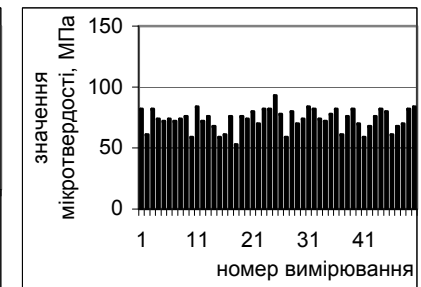


б

Рис. 17. Мікротвердість первинних кристалів β -Si твердого розчину (а) та евтектичної складової (б) сплаву АК18 після гідрування впродовж 20 хв (прискорене охолодження).



а



б

Рис. 18. Мікротвердість первинних кристалів β -Si твердого розчину (а) та евтектичної складової (б) сплаву АК18 після гідрування впродовж 40 хв з подальшим загартуванням у воді.

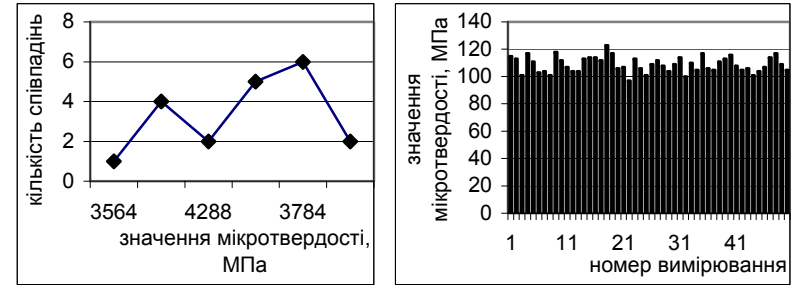


Рис. 19. Мікротвердість первинних кристалів β -Si твердого розчину (а) та евтектичної складової (б) сплаву АК18 після гідрування впродовж 60 хв з подальшим загартуванням у воді.

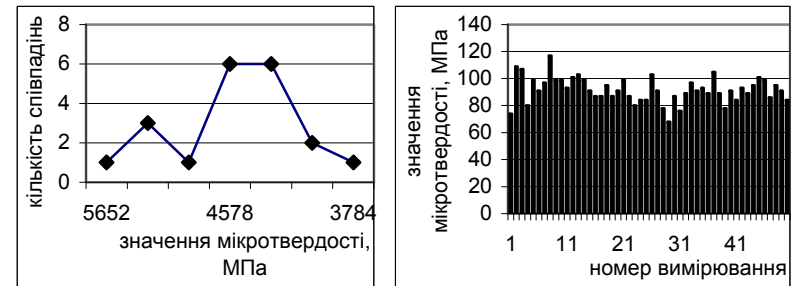


Рис. 20. Мікротвердість первинних кристалів β -Si твердого розчину (а) та евтектичної складової (б) сплаву АК18 після гідрування впродовж 90 хв з подальшим загартуванням у воді.

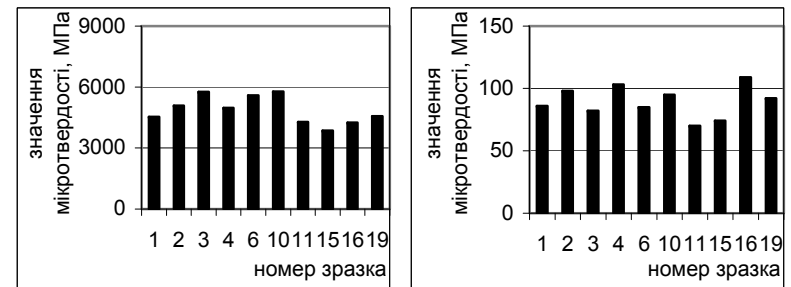


Рис. 21. Середні значення мікротвердості первинних кристалів β -Si твердого розчину (а) та евтектичної складової (б) досліджуваних зразків.

Середні значення мікротвердості первинних кристалів β -Si твердого розчину коливаються в межах від 4000 до 5500 МПа, а евтектики від 65 до 110 МПа (рис. 21).

Твердість сплаву АК18 залежно від параметрів водневої обробки змінюється в межах від 70 до 90 НВ (рис. 22, табл. 4).

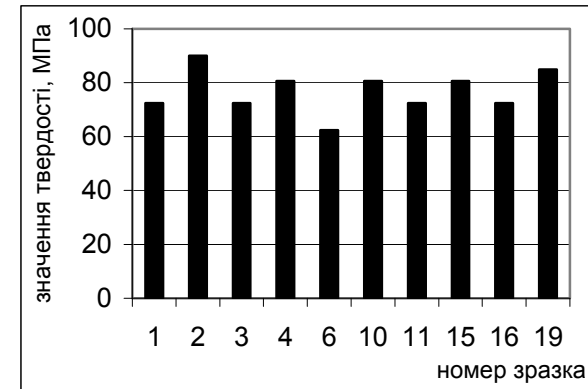


Рис. 22. Твердість досліджуваних зразків сплаву АК18(В-Sn).

Таблиця 4

| № | 1 | 2 | 3 | 4 | 6 | 10 | 11 | 15 | 16 | 19 |
|---------|------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| НВ, МПа | 72,5 | 90 | 72,5 | 80,6 | 62,4 | 80,6 | 72,5 | 80,6 | 72,5 | 84,9 |

Механічні властивості сплаву АК18, який піддавали водневій обробці наведені в таблиці 5. Аналіз даних таблиці 5 свідчить, що воднева обробка спільно з підвищеною швидкістю охолодження зростання як характеристик міцності (на 20–30 %), так і пластичних властивостей (в 1,5 раза).

Таблиця 5

| № | δ_s , % | $\sigma_{0,2}$, МПа | σ_{B_s} , МПа |
|----|----------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 2,7 | 74 | 110,8 |
| 5 | 1,9 | 69,5 | 102,1 |
| 6 | 2,2 | 63,7 | 101,6 |
| 7 | 2,3 | 78,7 | 107,05 |
| 8 | 2,4 | 74 | 101,7 |
| 12 | 2,3 | 71,45 | 123,05 |
| 13 | 2,8 | 71,4 | 102,3 |
| 14 | 2,4 | 94,95 | 123,05 |
| 17 | 3,5 | 94,1 | 134,6 |
| 18 | 2,6 | 90,7 | 130,35 |

ВИСНОВКИ

1. Воднева обробка розплаву АК18(B-Sn) незалежно від швидкості охолодження обумовлює зменшення кількості первинних кристалів β -Si твердого розчину в 1,5–2 рази, збільшення кількості евтектичної складової на 20 %, подрібнення первинних кристалів β -Si твердого розчину у 10 разів, зменшення лінійних розмірів кристалів евтектичного β -Si твердого розчину у 3–10 разів.
2. Середні значення мікротвердості первинних кристалів β -Si твердого розчину коливаються в межах від 4000 до 5500 МПа, а евтектики від 65 до 110 МПа.
3. Воднева обробка спільно з підвищеною швидкістю охолодження спричинює до зростання характеристик міцності сплаву АК18(B-Sn) на 20–30 %, пластичних властивостей в 1,5 раза.
4. Комплексна обробка – модифікування та гідрування – забезпечують подрібнення первинних кристалів β -Si твердого розчину в 10–20 разів та збільшення кількості евтектичної складової на 20 % порівняно з немодифікованим станом.

Література

1. Отчет НИР: «Исследование закономерностей влияния комплексного теплосилового воздействия на процессы структурообразования и структурную наследственность в литых алюминиевых сплавах» № гос. регистр. 0196U022433.
2. Ершов Г.С., Черняков В.А. Строение и свойства жидких и твердых металлов. – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
3. Смутьский А.А. Установка для экспрессного определения структуры, химического состава, неметаллических включений и водорода в алюминиевых сплавах // Литье Украины. – 2003. – № 3. – С.14–15.
4. Куцова В.З., Носко О.А. Структура и свойства модифицированных заэвтектических силуминов // ОТТОМ-7. – 2006. – С. 122–128.