

## *Підвищення пластичності сплаву системи Al-Si зі зниженим вмістом кремнію шляхом деформаційно-термічної обробки*

**В. В. Каверинський**, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, [insamhlaithe@gmail.com](mailto:insamhlaithe@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6940-579X>

**Г. А. Баглюк**, доктор технічних наук, заступник директора, [gbag@ukr.net](mailto:gbag@ukr.net), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2392-2687>

**А. І. Троцан**, доктор технічних наук, професор, [don1945@ukr.net](mailto:don1945@ukr.net), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1435-5377>

**З. П. Сухенко**, член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, [hisie@ukr.net](mailto:hisie@ukr.net), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8578-5473>

Інститут проблем металознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ

*Розглянуто метод деформаційно-термічної обробки для сплаву Al-Si з 4,5 % кремнію, який складається з серії невеликих гарячих деформацій з проміжним відпадом. Запропонований спосіб дозволяє досягти подрібнення та сфероїзації кремнієвих включень, які у литому стані мають вигляд пластинчастих виділень на границях зерен та суттєво знижують пластичність матеріалу. Щоб запобігти зменшенню пластичності через появу мікроконцентраторів напружень у вигляді гострих кутів подрібнених кремнієвих включень, деформацію слід проводити у вигляді серії етапів з проміжним відпадом. Циклічна зміна температури в цьому режимі сприятиме сфероїзації фрагментів подрібнених включень кремнію шляхом зміни розчинності кремнію у твердому розчині від температури. Сфероїдизація, подрібнення та перемішування включень, які досягаються під час такої деформаційно-термічної обробки, призводять до значного збільшення пластичності сплаву без втрати твердості.*

*Сплави системи Al-Si широко використовуються як ливарний матеріал. Зазвичай це сплави з високим вмістом кремнію, які мають низьку пластичність і використовуються виключно в литому стані. У деформованих алюмінієвих сплавах кремній часто розглядається як небажана домішка, особливо коли його вміст становить більше 1 %. Однак алюмінієві сплави із вмістом Si 3 – 5 % мають досить помітну пластичність, хоча набагато меншу, ніж чистий алюміній та алюмінієві сплави, що деформуються. Процеси зміни структури при деформації алюмінієвих сплавів з низьким вмістом Si вивчені недостатньо. Зокрема, цікавила можливість збільшення пластичності таких матеріалів шляхом подрібнення та перемішування кремнієвих включень під час гарячої деформації.*

*Показано, що запропонований режим деформаційно-термічної обробки сплавів системи Al-Si дозволяє значно підвищити їх пластичність – критичну ступінь осадження (осадження до розтріскування) з 67,8 % у литому стані до 92,1 %.*

## Нові технологічні процеси і матеріали

*Твердість матеріалу може бути збільшена також шляхом наклепування при холодній пластичній деформації. Оскільки матеріал після деформаційно-термічної обробки є більш пластичним, він має більші резерви для зміцнення таким способом значень  $95 \pm 17$  HV. Твердість такого ж литого матеріалу може бути збільшена за рахунок наклепування до нижчих значень –  $67 \pm 12$  HV.*

**Ключові слова:** алюміній, сплав алюмінію, деформаційно-термічна обробка, кремнієві включення, пластичність, твердість.

Сплави системи Al-Si (силуміни) широко застосовуються в якості матеріалу для виливків [1]. Зазвичай це сплави з досить високим вмістом кремнію, що мають низьку пластичність і використовуються виключно в литому стані. У сплавах, що підлягають деформуванню, кремній часто розглядається як небажана домішка, яка робить матеріал більш крихким [2], особливо при його вмісті понад 1 %. Проте алюмінієві сплави з вмістом Si на рівні 3 – 5 % мають доволі помітну пластичність, хоча і меншу порівняно з чистим алюмінієм і алюмінієвими деформованими сплавами легованими марганцем, магнієм і міддю (дуралюмін, авіаль тощо.). Однак процеси зміни структури в ході деформації алюмінієвих сплавів з 3 – 5 % Si вивчені недостатньо. Зокрема, інтерес представляла можливість підвищення пластичності подібних матеріалів за рахунок подрібнення і перемішування включень кремнію в ході гарячої деформації (кування). При цьому для запобігання зниженню пластичності через наклепування і появу мікроконцентраторів напруження у вигляді гострих кутів подрібнених включень кремнію, деформація проводилася як серія етапів з проміжним відпалюванням. Передбачалося, що циклічна зміна температури при такому режимі сприятиме сфероїзації уламків подрібнених включень кремнію внаслідок підвищення розчинності кремнію у твердому розчині [3].

Процеси деформування сплавів Al-Si є малодослідженими. Існують лише окремі роботи щодо механічної деформації силумінів [4, 5].

Мета даної роботи – дослідити зміну форми включень кремнію у сплаві алюмінію з 4,5 % Si за умов багатетапної гарячої деформації з проміжними відпалами та її вплив на механічні властивості даного сплаву.

Хімічний склад досліджуваного сплаву: Al – основа, Si – 4,5 %, Mn – 0,5 %, Cu – 0,7 %, Fe – 0,5 % (мас. %).

Розплав розливали у пісчано-глинисту висушену форму при температурі 700 – 720 °С. Розміри литих зразків після механічної обробки поверхні ~ 34×13,5×12,0 мм.

Литі зразки було піддано деформаційно-термічній обробці (ДТО) за режимом: 11 етапів деформації куванням (втяжка) з проміжними відпалами тривалістю 15-20 хв при температурі 540 °С, кінцевий відпал 30 хв. Початок кування при 540-520 °С, завершення кування при ~ 100-200 °С. Сумарний ступінь деформації ~ 70 %, подовження ~ 138 %. Ступені деформації по етапах зображені у вигляді діаграми на рис. 1.

Зразки досліджувалися також у литому стані. Для виявлення структури застосовувався 7 % розчин NaOH, підігрітий до 60-70 °С. Проводилося вимірювання мікротвердості металічної матриці і загальної

### Нові технологічні процеси і матеріали

твердості матеріалу за методом Вікерса. Для оцінки пластичності зразки осаджувалися до появи перших помітних тріщин, при цьому вимірювався ступінь досягнутого осадження.

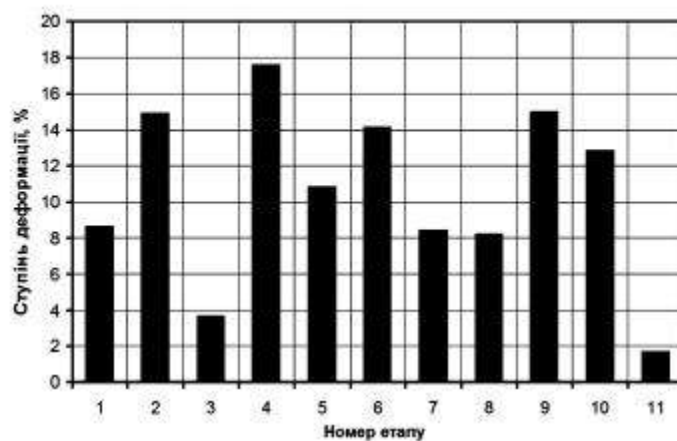


Рис. 1. Ступені деформації по етапах.

На рис. 2 а, б наведені мікроструктури досліджуваного матеріалу у литому стані.

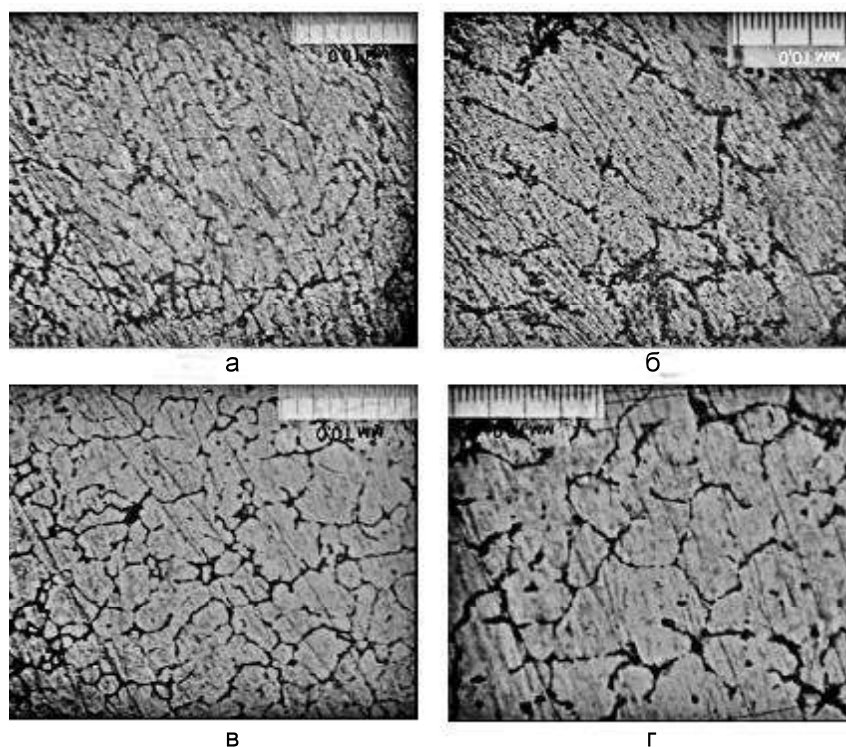


Рис. 2. Мікроструктура сплаву Al-Si з 4,5 % Si. а, б – литий стан; в, г – після ДТО; а, в –  $\times 40$ ; б, г –  $\times 100$ .

Як видно з рис. 2 а, б дендритна будова у даному матеріалі виражена слабо. Гілки дендритів близькі за формою до рівновісних зерен. Середня щільність структури становить  $102 \text{ мм}^{-1}$ , середній умовний розмір зерна становить 111 мкм. Форма і розміри кремнієвих включень в складі Al-Si евтектики наведено на рис. 3.

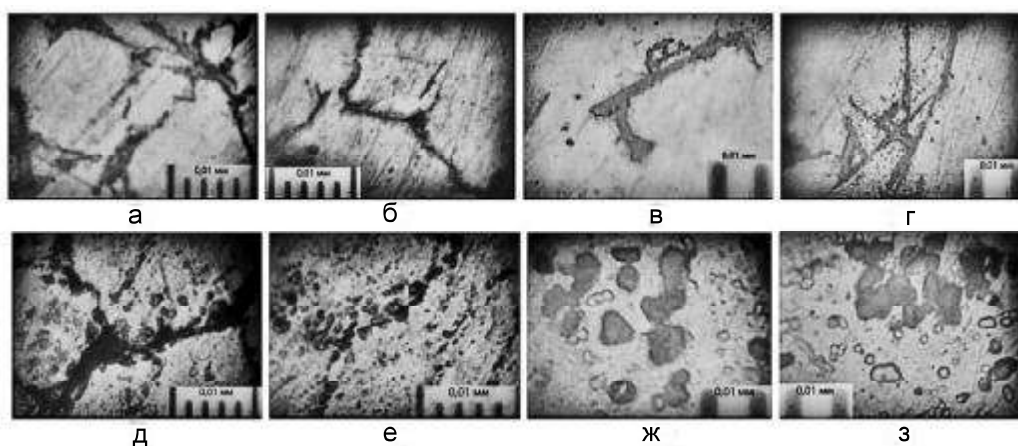


Рис. 3. Включення кремнію в структурі сплаву Al-Si з 4,5 % Si. а, б, в, г – литий стан; д, е, ж, з – після ДТО; а, б, д, е –  $\times 400$ ; в, г, ж, з –  $\times 1000$ .

З рис. 3 а-г видно, що включення кремнію в матеріалі у литому стані являють собою тонкі, витягнуті голки, розташовані у межах зерен. Внаслідок низького вмісту кремнію їх кількість невелика, а розміри малі. Проте вони здатні знижувати пластичність матеріалу. Середній поздовжній розмір включень становить 15 мкм, поперечний розмір – 3,4 мкм. Ступінь витягнутості включень приблизно 4,4.

На рис. 4 а, б наведено гістограми розподілу включень за розмірами в литих зразках. Основна маса включень має довжину до 25 мкм і товщину від 1 до 6 мкм. Мікроструктура зразків після деформаційно-термічної обробки демонструє досить крупну зеренну структуру, менш дисперсну порівняно з литим станом. Щільність структури становить  $51 \text{ мм}^{-2}$ , середній розмір зерна становить 168 мкм. Варіативність розмірів зерна досить висока, але макроскопічних ділянок зразка, де спостерігається більш або менш щільна структура не виявлено.

Характерні включення кремнію після деформаційно-термічної обробки (рис. 3 д-з) подрібнюються і набувають форми, близької до сферичної. Включення розташовані не тільки у межах зерна, а й у прилеглих до границь зонах (рис. 3 – д, е). Середній поздовжній розмір включень становить 4 мкм, поперечний розмір – 3 мкм. Ступінь витягнутості включень приблизно 1,3, тобто витягнуті включення в структурі відсутні.

На рис. 4 в, г наведено гістограми розподілу включень за розмірами в зразках після ДТО. З наведених гістограм видно, що варіативність як поздовжніх, так і поперечних розмірів невелика, і досить близька між собою.

У таблиці наведені результати вимірювань зазначених механічних характеристик зразків.

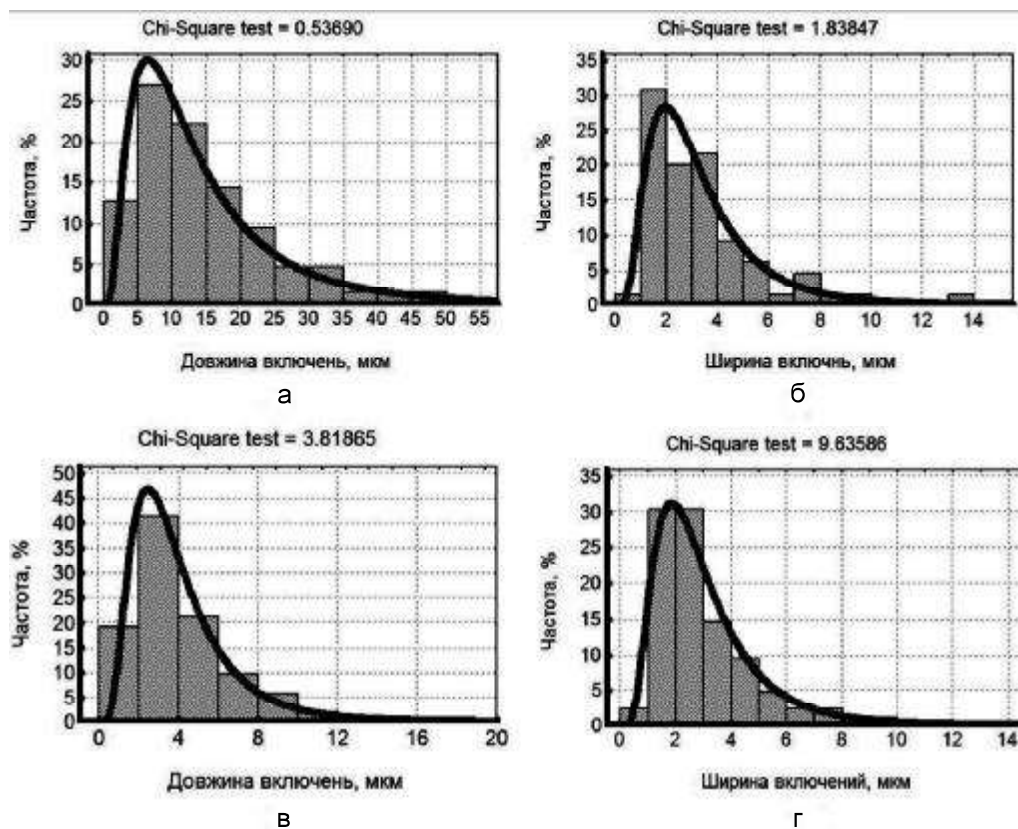


Рис. 4. Гістограми розподілу включень кремнію за розмірами. а – литий стан, поздовжній розмір; б – литий стан, поперечний розмір; в – після ДТО, поздовжній розмір; г – після ДТО, поперечний розмір.

Порівняння механічних властивостей зразків в литому стані і після ДТО

Стан матеріалу	Мікротвердість металевої матриці, кгс/мм <sup>2</sup>	Твердість, НV	Ступінь осаджування до появи тріщин (при 20 °C)
Литий	33	36	67,8
ДТО	30	35	92,1

Пластичність досліджуваного матеріалу є значно більшою, ніж у силумінів, які містять зазвичай більшу кількість кремнію. Але вона не досить висока порівняно з чистим алюмінієм або його сплавами, що піддаються пластичній деформації. Деформація з проміжними відпалами, яка веде до глобуляризації включень кремнію помітно підвищила пластичність матеріалу. Тріщини в зразках після ДТО з'явилися тільки після суттєвого їх осаджування.

Твердість матеріалу після ДТО практично не змінилася і залишилася на рівні литого стану. Твердість металевої матриці при цьому дещо нижче. Такий режим гарячої деформаційно-термічної обробки працює швидше як своєрідний відпал і не веде до наклепування матеріалу.

Після холодної деформації до появи тріщин твердість зразків литого матеріалу за рахунок наклепування зросла до 67 HV. Для зразків після ДТО цей показник склав 95 HV. Деформаційно-термічна обробка за розглянутим режимом не тільки не змінює твердість при підвищенні пластичності матеріалу, а й за рахунок більшого запасу пластичності дозволяє подальше отримати більший ступінь деформаційного зміцнення, який не вдається створити для аналогічного матеріалу у литому стані.

Таким чином на основі проведених досліджень розроблено метод деформаційно-термічної обробки сплавів системи Al-Si з низьким вмістом кремнію, що полягає в серії малих гарячих деформацій (початок деформації при 520 – 540 °С) з проміжними відпалами при температурі вище 500 °С протягом 15 – 20 хв кожен. Це дозволяє отримати ступені деформації понад 70 % для даного класу сплавів, що характеризуються зниженою пластичністю в литому стані.

Метод деформаційно-термічної обробки сплавів системи Al-Si призводить до суттєвого подрібнення включень кремнію і їх сфероїдизації.

Запропонований режим деформаційно-термічної обробки зазначених сплавів системи Al-Si дозволяє значною мірою збільшити їх пластичність практично без зміни твердості. Так, критичний ступінь осаджування (осаджування до появи тріщин) для литого склала 67,8 %, а після деформаційно-термічної обробки – 92,1 %.

Твердість матеріалу можна підвищити за рахунок наклепування при холодній пластичній деформації. Оскільки матеріал після деформаційно-термічної обробки виявляється більш пластичним, він має більші резерви для зміцнення даним способом. Показано, що за рахунок наклепування при холодній деформації твердість матеріалу зразків після деформаційно-термічної обробки, може зростати до значень 95 HV. Твердість (та, імовірно, міцність) аналогічного литого матеріалу може бути підвищена за рахунок наклепування, але до менших значень – 67 HV.

## Література

1. Захаров А. М. Промышленные сплавы цветных металлов. Фазовый состав и структурные составляющие. – М.: Металлургия, 1980. – 256 с.
2. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. Пер с англ. – М.: Металлургия, 1979. – 640 с.
3. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник. Т. 1. / под ред. Якишева Н. П. – М.: Машиностроение, 1996. – 992 с.

## References

1. Zaharov, A. M. *Proмышlennyye splavy coetnyh metallov. Fazovyy sostav i strukturnyye sostavlajushhie (Industrial alloys of non-ferrous metals. Phase composition and structural components)*, Moscow: Metallurgija, 1980, 256 p. [in Russian].
2. Mondolfo, L.F. *Aluminium alloys structure and properties*, London-Boston: Butterworths & Co. Ltd., 1976. [in English].

3. Ljakishev, N. P. *Diagrammy sostojanija dvojnyh metallicheskih sistem: spravocnik (State diagrams of binary metal systems: handbook)*, Moscow: Mashinostroenie, 1996, Vol. 1., 992 p. [in Russian].

Одержано 29.10.20

V. V. Kaverinsky, G. A. Baglyuk, A. I. Trotsan, Z. P. Sukhenko

**Increasing the ductility of the Al-Si alloy with low silicon content by deformation-heat treatment**

**Summary**

A method of deformation-heat treatment is considered for Al-Si alloy with 4.5 % silicon, which consists in a series of small hot deformations with intermediate annealing. The proposed method allows one to achieve grinding and spheroidization of silicon inclusions, which in the cast state have the form of lamellar excreta at the grain boundaries and significantly reduce the plasticity of the material. Spheroidization, grinding and mixing of inclusions that are achieved during this deformation-heat treatment lead to significantly increase the ductility of the alloy without loss of hardness.

The processes of structure change during the deformation of aluminum alloys with low Si content are insufficiently studied. In particular, of interest was the possibility of increasing the ductility of such materials by grinding and mixing silicon inclusions during hot deformation. In this case, to prevent a decrease in ductility due appearance of microconcentrators of stress in the form of acute angles of the crushed silicon inclusions, the deformation was carried out as a series of stages with intermediate annealing. In addition, it was assumed that the cyclic change of temperature in this mode will contribute to the spheroidization of fragments of crushed silicon inclusions by changing the solubility of silicon in solid solution from temperature.

It is shown that the proposed mode of deformation-heat treatment of these alloys of the Al-Si system allows to significantly increase their ductility – the critical degree of deposition (deposition before cracking) from 67.8% in the cast state to – 92.1 %.

The hardness of the material can be increased by hardening under cold plastic deformation. In this case, since the material after deformation-heat treatment is more plastic, it has greater reserves for hardening in this way. It is shown that owing to hard plastic deformation, the hardness of the material of samples with 4.5 % Si, which has undergone deformation-heat treatment, can increase to values of  $95 \pm 17$  HV, which is significantly higher than in the cast state. At the same time, the hardness (and, probably, strength) of a similar cast material can also be increased due to hardening, but to lower values –  $67 \pm 12$  HV.

**Keywords:** aluminum, aluminum-based alloy, deformation-heat treatment, silicon inclusions, plasticity, hardness.