

УДК 669.715.018

DOI: 10.30838/P.CMM.2415.200418.173.26

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖАТОМНЫХ ПАРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ И ОПТИМИЗАЦИЯ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ ДОЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА АК7Ч

КУЦОВА В.З.¹ *д.т.н., проф.*,
АЮПОВА Т.А.² *к.т.н., доц.*

¹ кафедра материаловедения им. Ю.Н. Тарана-Жовнира, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепр, Украина, тел. +38 (056)3748936, e-mail kaf.material@metal.nmetau.edu.ua.

² кафедра материаловедения им. Ю.Н. Тарана-Жовнира, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепр, Украина, тел. +38 (056)3748266, e-mail kaf.material@metal.nmetau.edu.ua.

Аннотация. *Цель.* Прогнозирование эффективности влияния микролегирования стронцием и скандием на формирование структуры и свойств доэвтектического силумина АК7ч на основе анализа межатомного взаимодействия в исследуемом сплаве. *Методика.* Анализ парных межатомных взаимодействий проведен в соответствии с методикой Приходько Э.В. При анализе парных взаимодействий использован математический аппарат физико-химического моделирования. Особенности парных связей изучали с учетом изменений, вносимых кислородом в количестве 0,001% и микродобавками стронция и скандия в пределах: Sr 0,1, 0,2, 0,3%; Sc 0,2, 0,4, 0,6%. Данные структуры и свойств сплава определяли по стандартным методикам. *Научная новизна.* Разработка модели парных межатомных связей для сплава АК7ч со Sr и Sc в качестве микролегирующих добавок выполнена впервые. *Практическая значимость.* Проведенный анализ позволил показать адекватность расчета степени направленности парных связей (металлизации) в сплаве и экспериментальных данных об эффективности влияния указанных элементов, а также уточнить оптимальную концентрацию элементов-модификаторов для достижения высокого комплекса механических свойств материала.

Ключевые слова: межатомное взаимодействие, модифицирование, алюминиевые сплавы, стронций, скандий, металлизация

ФІЗИКО-ХІМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МІЖАТОМНИХ ПАРНИХ ВЗАЄМОДІЙ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ МІКРОЛЕГУВАННЯ ДОЕВТЕКТИЧНОГО СИЛУМІНУ АК7Ч

КУЦОВА В.З.¹ *д.т.н., проф.*,
АЮПОВА Т.А.² *к.т.н., доц.*

¹ кафедра матеріалознавства ім. Ю.М. Тарана-Жовніра, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056)3748936, e-mail kaf.material@metal.nmetau.edu.ua.

² кафедра матеріалознавства ім. Ю.М. Тарана-Жовніра, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056)3748266, e-mail kaf.material@metal.nmetau.edu.ua.

Анотація. *Мета.* Прогнозування ефективності впливу мікролегування стронцієм і скандієм на формування структури і властивостей доэвтектичний силуміну АК7ч на основі аналізу міжатомної взаємодії в досліджуваному сплаві. *Методика.* Аналіз парних міжатомних взаємодій проведено відповідно до методики Приходько Е.В. При аналізі парних взаємодій використано математичний апарат фізико-хімічного моделювання. Особливості парних зв'язків вивчали з урахуванням змін, внесених киснем в кількості 0,001% і мікрододатками стронцію і скандію в межах: Sr 0,1, 0,2, 0,3%; Sc 0,2, 0,4, 0,6%. Дані структури і властивостей сплаву визначали за стандартними методиками. *Наукова новизна.* Розробка моделі парних міжатомних зв'язків для сплаву АК7ч зі Sr і Sc в якості мікролегувальних добавок виконана вперше. *Практична значимість.* Проведений аналіз дозволив показати адекватність розрахунку ступеня спрямованості парних зв'язків (металізації) в сплаві і експериментальних даних про ефективність впливу зазначених елементів, а також уточнити оптимальну концентрацію елементів-модифікаторів для досягнення високого комплексу механічних властивостей матеріалу.

Ключові слова: міжатомна взаємодія, модифікування, алюмінієві сплави, стронцій, скандій, металізація

PHYSICO-CHEMICAL MODELING OF ATOMIC INTERACTIONS AND OPTIMIZATION OF THE HYPOEUTECTIC SILUMIN AK7CH MICRO-ALLOYING

KUTSOVA V.Z.¹ *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
AYUPOVA T.A.² *Ph. D., Assos.prof.*

Annotation. Purpose. Prediction of the strontium and scandium microalloying effect on the formation of the structure and properties of the hypoeutectic silumin AK7ch on the basis of an atomic interaction analysis of the investigated alloy. **Methodology.** The analysis of paired atomic interactions was carried out in accordance with E.V. Prikhodko's method. In the analysis of pair interactions, the mathematical tool of physico-chemical modeling was used. Peculiarities of pair bonds were studied taking into account the changes introduced by oxygen in an amount of 0.001% and micro additions of strontium and scandium in the range: Sr 0.1, 0.2, 0.3%; Sc 0.2, 0.4, 0.6%. The alloy structure and properties data was determined by standard methods. **Originality.** The development of a model of paired interatomic bonds for the AK7ch alloy with Sr and Sc as microalloying additives was carried out for the first time. **Practical value.** The analysis allows to show the adequacy of calculation of the degree of directivity of pair bonds (metallization) in the alloy and experimental data on the effectiveness of these elements, and also to specify the optimum concentration of modifier elements to achieve a high complex of mechanical properties of the material.

Keywords: interatomic interaction, modification, aluminum alloys, strontium, scandium, metallization

Введение

Силумины – распространенный конструкционный материал, обладающий уникальным комплексом свойств, который может меняться в широком диапазоне, в частности, за счет легирования и микролегирования. Таким образом становится актуальной необходимость прогнозирования влияния легирования на механические свойства сплава, например, расчетным путем. Использование ранее обычных методов статистического анализа не позволило выявить значимых связей между составом и свойствами сплавов системы Al-Si-Mg-Fe. Привлечение же методологии физико-химического моделирования позволило достаточно эффективно решить эту задачу.

Цель

Целью данной работы является прогнозирование эффективности влияния микролегирования стронцием и скандием на формирование структуры и свойств доэвтектического силумина АК7ч на основе анализа межатомного взаимодействия в исследуемом сплаве расчетным путем.

Материал

Объектом исследования являлись доэвтектические литейные силумины типа АК7ч (таблица 1).

Таблица 1

Расчетный состав сплавов для моделирования межатомного взаимодействия, % масс/ Estimated composition of alloys for the simulation of interatomic interaction, %mass

Si	Fe	Mg	Al
6,00	0,30	0,20	основа
7,00	0,65	0,30	
8,00	1,00	0,40	

Анализ парных межатомных взаимодействий проведен по методике Приходько Э.В. [1, 2]. При анализе парных взаимодействий использован математический аппарат физико-химического моделирования. Особенности парных связей изучали с учетом изменений, вносимых кислородом в количестве 0,001% и микродобавками стронция и скандия в пределах: Sr 0,1, 0,2, 0,3%; Sc 0,2, 0,4, 0,6%. Данные структуры и свойств сплава определяли по стандартным методикам

Методика и результаты

Теория физико-химического моделирования базируется на единой металлохимической трактовке элементарного акта межатомного взаимодействия. Это позволяет применить указанную методику для сплавов как в твердом, так и в жидком состоянии. Автором работы [1] была разработана физико-химическая модель структуры сплавов, базирующаяся на использовании уравнений системы неполяризованных ионных радиусов (СНИР) для вычисления параметров, сочетанием которых можно охарактеризовать свойства расплава как химически единого целого при любом числе компонентов в системе и различных соотношений между их концентрациями.

К основным параметрам СНИР относятся:

- z_y - число электронов, участвующих в образовании среднестатистической акцепторной связи; эта величина является интегральной характеристикой межатомного взаимодействия в многокомпонентной системе и может трактоваться как химический эквивалент заданного состава;

- d – соответствующее z_y межъядерное расстояние;

- $\text{tg}\alpha$ - тангенс угла наклона прямых в координатах R_n – n , где R_n – неполяризованный ионный радиус, n – число электронов на орбиталях атома.

Упомянутые параметры определяются на основании принятого допущения о том, что вероятности образования парных связей в расплаве $AXBYCZ\dots$, а

именно А-А, А-В, А-С, ..., В-В, В-С, ..., С-С... пропорциональны произведению соответствующих мольных концентраций. При этом любое отклонение от статистического определения можно учесть, варьируя вероятностями образования связей разного типа.

Чем сложнее сплав, чем он более многокомпонентен, тем в более широких пределах наблюдается изменение его состава, при этом возрастает диапазон изменения его свойств. Поэтому необходимо учитывать формы энергетического существования легирующих и модифицирующих добавок и примесей в сплавах, которые определяются зарядовым состоянием примесей и легирующих элементов. Влияние любых добавок на свойства расплава следует рассматривать с единых физико-химических позиций для оценки энергии взаимодействия добавок с окружающими их частицами как в первой так и во второй координационной сфере. При этом необходимо учесть, что в жидкости отсутствует стационарное окружение, а вероятность образования любой пары определяется, прежде всего, энергетическим состоянием партнеров.

Можно предположить, что вероятности образования парных связей типа А-В, А-С, А-Д..., В-С, В-Д... в системе А-В-С-Д... пропорциональны произведению соответствующих мольных концентраций последних.

Методика решения СНИР позволяет провести расчет параметров элементарного акта парного взаимодействия ионов элементов системы: степени ионности, зарядового состояния, степени направленности и т.д., позволяющих качественно оценивать состояние деформированных электронных оболочек при взаимодействии компонентов. Для вычисления эффективных зарядов (z) и радиусов взаимодействующих между собой ионов, а также соответствующего межъядерного расстояния d между ионами целесообразно воспользоваться системой уравнений неполяризованных ионных радиусов вида:

$$R_u^A + R_u^B = d \quad (1)$$

$$\lg R_u^A = \lg R_{u0}^A - (z_{\min} + \Delta e / 2) \operatorname{tg} \alpha \quad (2)$$

$$\lg R_u^B = \lg R_{u0}^B - (z_{\min} + \Delta e / 2) \operatorname{tg} \beta \quad (3)$$

где R_u^A , R_u^B – радиусы ионов с деформированными электронными оболочками; R_{u0}^A , R_{u0}^B – соответствующие неполяризованные ионные радиусы; z – зарядовая плотность; Δe – степень направленности связей в системе; $\operatorname{tg} \alpha$, $\operatorname{tg} \beta$ – параметры, характеризующие изменение плотности состояния у поверхности Ферми для А и В.

Одной из основных характеристик, учитывающей особенности металлохимии комплексного легирования в качественном аспекте, является величина, называемая степенью направленности связей при элементарном акте парного взаимодействия, Δe . Эта величина учитывает степень и направление смещения зарядовой плотности обобщенного электронного облака, и представляет собой алгебраическую сумму зарядов партнеров.

Указанный параметр можно рассчитать на основании решения системы уравнений (1), (2), (3) путем

потенцирования (2) и (3) и подстановки в (1), в результате чего получаем:

$$10^{\lg R_{uA}^0 - (z_{\min} + \Delta e / 2) \operatorname{tg} \alpha A} + 10^{\lg R_{uD}^0 - (z_{\min} + \Delta e / 2) \operatorname{tg} \alpha B} = d \quad (4)$$

Таким образом, задавая величину d , можно рассчитать значение Δe для каждой пары ионов, входящей в систему.

В первоначальном приближении характеристику Δe можно рассматривать как степень ковалентности соответствующих парных связей. С увеличением абсолютного значения Δe направленность связи возрастает, связь становится прочнее, в ней доминирует ковалентная составляющая. При уменьшении модуля Δe связь ослабляется, снижается ее направленность, и на определенном этапе доминирующее положение занимает металлическая составляющая химической связи. Следовательно, можно предположить, что на основании знания характера изменения степени направленности парных связей в системе, реальным становится качественное прогнозирование изменения физико-химических свойств системы при воздействии на нее извне, и, с достаточной степенью достоверности определение способа и направления воздействия с целью получения требуемого комплекса конечных характеристик материала.

Для изучения механизма модифицирования сплавов важно знать, что происходит с добавками модификаторов при введении их в расплав и какие возмущения они вызывают в этом расплаве. Очевидно, что эти возмущения связаны с взаимодействием атомов основных компонентов с модификатором, и, как следствие, изменением физико-химических свойств расплавов как в объеме, так и на поверхности. Применение методологии [1, 2] к исследованию процессов легирования и микролегирования позволяет развить и конкретизировать эту идею.

При анализе парных взаимодействий в сплаве АК7ч использовали математический аппарат физико-химического моделирования. Особенности парных связей в системе Al-Si-Mg-Fe изучали с учетом изменений, вносимых кислородом в количестве 0,001% и микродобавками элементов Sr и Sc в пределах:

- Sr – 0,1; 0,2; 0,3%;

- Sc – 0,2; 0,4; 0,6%.

Средние эффективные заряды элементов-модификаторов в парных связях для системы без кислорода и в присутствии кислорода представлены в таблице 2.

Авторы [3] объясняют эффект модифицирования эвтектического кремния изменением характера взаимодействия Al-Si в присутствии модифицирующих добавок. В то же время в работе [4] показано, что металлизация связей в β -Si твердом растворе достигается за счет уменьшения доли ковалентной связи в парах Si-X, O-X, Al-X, а не за счет усиления взаимодействия Al-Si.

Из таблицы 3 видно, что добавки стронция в малых количествах (0,1% масс.) практически не влияют на характеристики парного взаимодействия Al-Si; увеличение концентрации стронция до 0,2...0,3% масс.

ощутимо их изменяет. Влияние добавок скандия приводит к более заметным изменениям указанных параметров, но наиболее сильное влияние на них оказывает совместное микролегирование стронцием и скандием, причем зависимость такова: чем выше содержание элементов – модификаторов тем сильнее увеличиваются значение эффективного заряда z_y^{Si} , R_{Si} , R_{Al} , и уменьшается z_y^{Al} .

Таблица 2

Эффективные заряды элементов-модификаторов/The effective charges of modifier elements

Элемент		Средний заряд элемента в парных связях, z_y^{SP}	
		в системе Al-Si-Mg-Fe	в системе Al-Si-Mg-Fe-O
Sr	0,1	1,06293	1,06332
	0,2	1,06267	1,06261
	0,3	1,06195	1,06201
Sc	0,2	-0,46809	-0,46803
	0,4	-0,46926	-0,46879
	0,6	-0,46949	-0,46945

Анализ характеристик парных взаимодействий подтверждает предположение о необходимости в первую очередь обращать внимание на связи модификаторов с кремнием и кислородом. В большинстве соединений и молекул невозможно обосновать дифференциацию типов связей, но можно говорить о степени направленности, или металличности парных связей. В грубом приближении характеристику Δ_e можно рассматривать как степень ковалентности соответствующих парных связей. При уменьшении доли направленности связей предполагается, что они становятся все более металлическими, т.е. происходит все большее размывание электронных облаков ковалентных связей, хотя электроны еще не переходят в собственность всей кристаллической решетки.

Таблица 3

Характеристики парного взаимодействия Al-Si/ Characteristics of the Al-Si pair interaction

Элемент		z_y^{Si} , e	z_y^{Al} , e	R_{Si} , Å	R_{Al} , Å
Исходная система					
Sr	0,1	-3,0383	0,4622	1,7578	1,2435
	0,2	-3,0391	0,4614	1,7581	1,2439
	0,3	-3,0399	0,4606	1,7584	1,2442
Sc	0,2	-3,0389	0,4616	1,7581	1,2437
	0,4	-3,0404	0,4601	1,7586	1,2445
	0,6	-3,0419	0,4587	1,7591	1,2451
Sr +Sc	0,1Sr+0,2Sc	-3,0398	0,4608	1,7584	1,2442
	0,2Sr+0,4Sc	-3,0421	0,4585	1,7582	1,2452
	0,3Sr+0,6Sc	-3,0443	0,4563	1,7601	1,2462

Рисунок 1 иллюстрирует изменение степени направленности связей Si-X, O-X, где X – Sr и Sc, в зависимости от их среднего эффективного заряда $z_{y\text{ ср}}$. Общая закономерность такова: с увеличением эффективности заряда элемента степень направленности связи с кремнием и кислородом уменьшается. Т.е. элементам с максимальным зарядом соответствует максимальная металлизация парных связей.

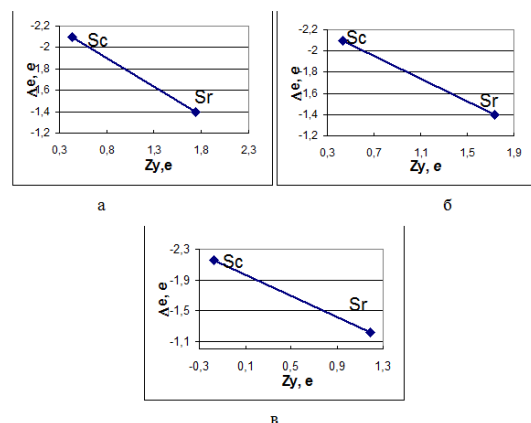


Рис. 1. Изменение степени направленности Δ_e парных связей Si-X (а, б) и O-X (в) в сплаве АК7ч Al-Si-Mg-Fe (а) и Al-Si-Mg-Fe-O (б, в), где X – Sr и Sc/ The change in the degree of directionality of the Δ_e pair bonds Si-X (а, б) and OX (c) in the alloy АК7ch Al-Si-Mg-Fe (а) and Al-Si-Mg-Fe-O (б, в), where X - Sr and Sc

Для более корректного качественного определения состояния «ковалентности» или «металличности» всей системы вводится понятие средней степени направленности парных связей всей системы $\Delta\bar{e}_c$:

$$\Delta\bar{e}_c = \frac{\sum \Delta e_i}{n} \tag{5}$$

где: Δe_i – степень направленности i-й парной связи; n – количество парных связей в системе.

$\Delta\bar{e}_c$ учитывает тенденцию к общему снижению степени направленности связей в системе между ионами химических элементов. Элемент, введение которого в определенном количестве приводит к максимально возможному снижению $\Delta\bar{e}_c$, и будет являться наиболее эффективным модификатором. Так, выбор эффективного элемента-модификатора для конкретного сплава сводится к расчету величины средней степени направленности связей в системе, $\Delta\bar{e}_c$, с учетом в ней микролегирующих элементов.

Зависимости $\Delta\bar{e}_c$ от содержания в сплаве АК7ч стронция, скандия, а также стронция со скандием при совместном микролегировании представлены на рисунках 2 и 3.

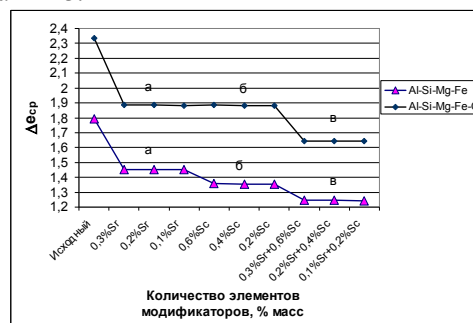
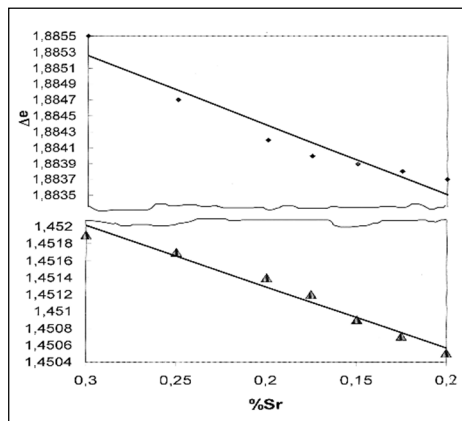


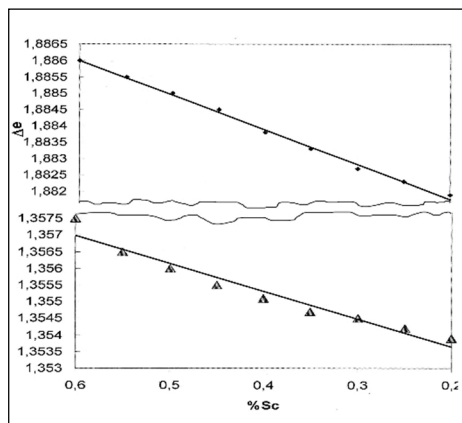
Рис. 2. Δ_e в зависимости от содержания в сплаве АК7ч элементов-модификаторов - Sr и Sc - в системах Al-Si-Mg-Fe и Al-Si-Mg-Fe-O: общий вид/ Δ_e depending on the content of Sr and Sc - in the Al-Si-Mg-Fe and Al-Si-Mg-Fe-O systems in the АК7ch alloy: general view

Минимальное значение степени направленности межатомных связей (максимальная металлизация) достигается при введении в сплав комплекса Sr-Sc в соотношении 1:2.

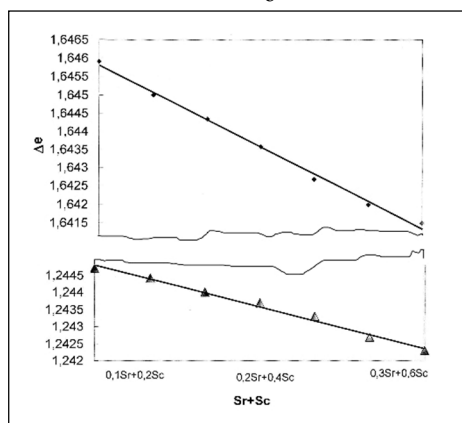
Следует также отметить уменьшение направленности связи Si-X в присутствии кислорода.



а



б



в

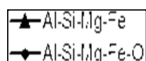
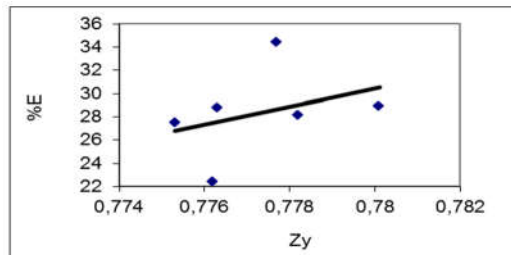
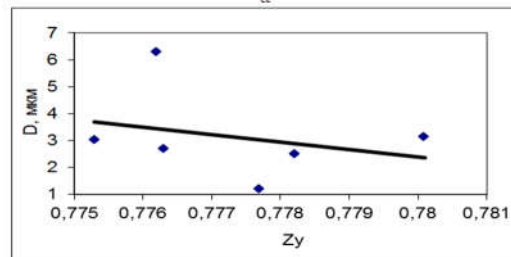


Рис. 3. Δε в зависимости от содержания в сплаве АК7ч модификаторов - Sr и Sc - в системах Al-Si-Mg-Fe и Al-Si-Mg-Fe-O: а – Sr, б – Sc, в – Sr+Sc/Δε, depending on the content of the modifiers in the АК7ch alloy Sr and Sc, in the Al-Si-Mg-Fe and Al-Si-Mg-Fe-O systems: a-Sr, b-Sc, c-Sr + Sc

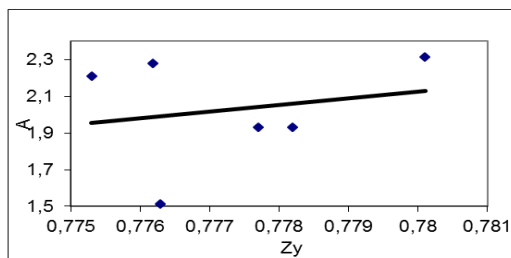
Для уточнения пределов варьирования основных компонентов анализировали выборку результатов количественного металлографического анализа и механических испытаний сплава АК7ч (рисунки 4, 5) [5, 6]. Анализ этих данных показал, что изменение механических свойств сплава коррелирует с величиной z_y . Использование параметра z_y позволяет комплексно учитывать межатомное взаимодействие в многокомпонентных сплавах при изучении влияния их состава на комплекс механических свойств.



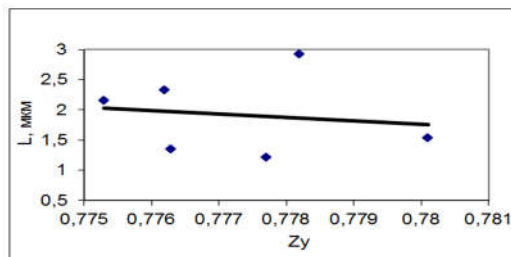
а



б

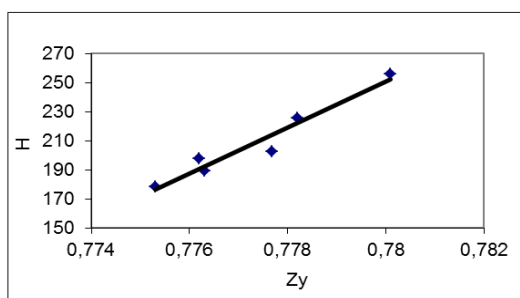


в

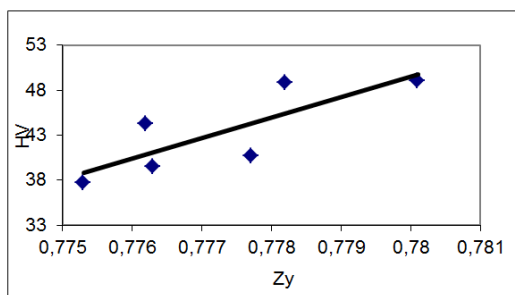


г

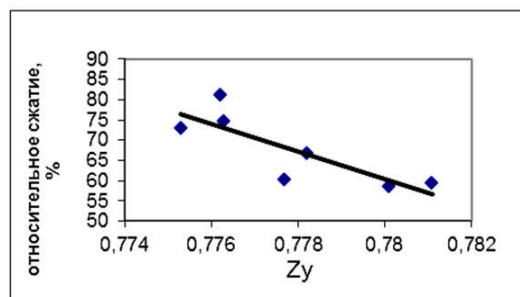
Рис. 4. Зависимость значений характеристик структуры - количества эвтектики E (а), размера кристаллов эвтектического кремния D (б), параметра формы кристаллов эвтектического кремния A (в), межчастичного расстояния в эвтектике L (г), от z_y сплава/ Dependence of the structure characteristics - the amount of eutectic E (a), the size of eutectic silicon crystals D (б), the shape parameter of eutectic silicon crystals A (в), the interparticle distance in the eutectic L (г), of the alloy



а



б



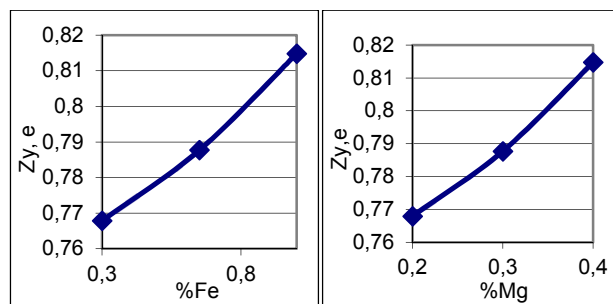
в

Рис. 5. Зависимость значений твердости эвтектики H (а), твердости HV (б) относительного сжатия (в) сплава АК7ч от z_y сплава/ Dependence of eutectic hardness H (a), hardness HV (б) relative compression (в) of АК7ч alloy from z_y of alloy

В ходе исследования выявлены следующие закономерности: железо (0,30...1,0%), магний (0,2...0,4%) и кремний (6,0...8,0%) ощутимо влияют на величину химического эквивалента и зависящие от него свойства (рисунок 6).

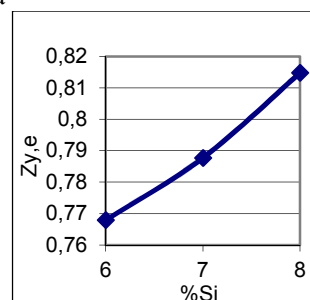
Выводы

1. Изучено атомное взаимодействие в системах Al-Si и Al-Si-Fe-Mg с кислородом и без него. Показано, что анализ соответствующих парных взаимодействий дает возможность прогнозировать эффективность модифицирования тем или иным элементом сплавов конкретного состава; максимальным модифицирующим эффектом обладают элементы с минимальной направленностью связей Si-X и O-X, где X – Sr, Sc.



а

б



в

Рис. 6. Влияние содержания железа (а), магния (б) и кремния (в) на величину z_y сплава АК7ч/ The effect of the content of iron (a), magnesium (b) and silicon (c) on the value z_y of the alloy АК7ч

2. Показано, что критерий $\Delta\bar{\epsilon}_c$ (средняя степень направленности связей в системе) целесообразно использовать для качественного определения металлизированного состояния системы в целом. Это позволяет с достаточно высокой степенью вероятности прогнозировать характер воздействия легирующих и микролегирующих добавок на комплекс механических свойств сплава, а также концентрационные пределы содержания указанных добавок в сплаве.

3. Установлено, что модифицирующее влияние элементов проявляется в изменении характеристик связей основных элементов – Al и Si, а также кремния и кислорода со стронцием, скандием. Максимальный модифицирующий эффект сплава АК7ч достигается при введении в сплав комплекса стронций-скандий. Металлизация связей в сплаве достигается за счет уменьшения доли ковалентной связи в парах Si-X и O-X, где X – Sr, Sc, и за счет усиления взаимодействия Al – Si.

4. Методом физико-химического моделирования определена степень направленности связей ($\Delta\bar{\epsilon}_c$) при введении стронция, скандия и комплекса стронций-скандий для сплава АК7ч. Расчетом показано, что минимальное значение степени направленности межатомных связей (максимальная металлизация) достигается при введении в сплав комплекса Sr-Sc в соотношении 1:2.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Приходько Э.В. Металлохимия многокомпонентных систем / Эдуард Васильевич Приходько. - М.: Металлургия, 1995. - 320 с.
2. Приходько Э.В. Металлохимия комплексного легирования / Эдуард Васильевич Приходько. - М.: Металлургия, 1983. - 184 с.
3. Исследование процессов модифицирования Al-Si сплавов. Кимстач Г.В., Муховецкий Ю.П., Борисов В.Д. [и др.] // МиТОМ. - 1984. - №8. - С. 57-59.
4. Ковальчук М.Г. Закономерности структурообразования, разработка и внедрение технологии модифицирования доэвтектических силуминов: дис. ... кандидата технических наук: 05.16.01 / Ковальчук Марина Георгиевна. – Днепропетровск, 1987. – 246 с.
5. 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.
6. 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.

REFERENCES

1. Prihodko E.V. Metallohimiya mnogokomponentnykh sistem [Metal-chemistry of multicomponent systems]/ Eduard Vasilevich Prihodko. - M.: Metallurgiya, 1995. - 320 p. (in Russian).
2. Prihodko E.V. Metallohimiya kompleksnogo legirovaniya [Metal-chemistry of complex alloying]/ Eduard Vasilevich Prihodko. - M.: Metallurgiya, 1983. - 184 p. (in Russian).
3. Issledovanie protsessov modifitsirovaniya Al-Si splavov [Investigation of the Al-Si alloys modification processes]. Kimstach G.V., Muhovetskiy Yu.P., Borisov V.D. [i dr.] // MiTOM. - 1984. - №8. - P. 57-59. (in Russian).
4. Kovalchuk M.G. Zakonomernosti strukturoobrazovaniya, razrabotka i vnedrenie tehnologii modifitsirovaniya doevtekticheskikh siluminov [Patterns of structure formation, development and introduction of the hypoeutectic silumins modifying technology]: dis. ... kandidata tehnikeskikh nauk: 05.16.01 / Kovalchuk Marina Georgievna. – Dnepropetrovsk, 1987. – 246 p. (in Russian).
5. Kutsova V.Z. Vliyanie mikrolegirovaniya Sr i Sc na strukturu splava AK7ch [The effect of microalloying of Sr and Sc on the structure of the AK7ch alloy]/ V.Z. Kutsova, T.A. Ayupova // Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie: sb. nauchn. tr. – vyip. 36, ch.1. – Dnepropetrovsk, PGASiA. – 2006. - P. 201-209. (in Russian).
6. Kutsova V.Z. Vliyanie mikrolegirovaniya Sr i Sc na fazovyyi sostav i svoystva AK7ch [The influence of Sr and Sc microalloying on the phase composition and properties of AK7ch] / V.Z. Kutsova, T.A. Ayupova, M.Yu. Ambrazhey // Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie: sb. nauchn. tr. – vyip. 41, ch.1. – Dnepropetrovsk, PGASiA.– 2007. - P. 18-30.(in Russian).

Стаття рекомендована до публікації д-ром. техн. наук, проф. В.І. Большаковим (Україна), д-ром. техн. наук, проф. Г.Д. Сухомліним (Україна)