25.00.19 Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ (технические науки)

DOI: 10.31660/0445-0108-2019-6-184-189

УДК 669.018/541.126

Особенности процессов формирования структуры и теплофизических свойств Al-Si сплавов с дополнительным легированием железом

А. С. Жилин[1]*, О. И. Ребрин[1], И. М. Ковенский[2], В. А. Быков[3], В. Р. Ялунина[1]

[1]Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия
[2]Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия
[3]Институт металлургии Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Россия
**e-mail: zh-al@yandex.ru*

Аннотация. Проведены металлографический анализ и анализ теплопроводности серий легких алюминиевых сплавов с содержанием кремния от 0 до 12 % (по массе) и дополнительно легированных железом 1 % (по массе). Показано, что с увеличением содержания кремния в сплаве выше 4–6 % (по массе) существенно возрастает размер кристаллов кремния с одновременным увеличением значений теплопроводности. В работе дана оценка влиянию железа на теплофизические свойства, а также показана корреляция теплопроводности при различных температурах с морфологией кремния в сплавах с содержанием кремния от 4 до 12 % (по массе) и дополнительно легированных железом 1 % (по массе). Показано, что сплав с содержанием кремния на уровне 4 % по массе обладает сбалансированным запасом теплофизических свойств, обусловленных структурными особенностями морфологии составляющих.

Ключевые слова: алюминий; алюминий-кремниевые сплавы; кремний; теплопроводность; теплообмен; железо; литье; структура

Structure formation processes and thermal conductivity features of light Al-Si alloys with additional alloying by iron

Aleksandr S. Zhilin[1]*, Oleg I. Rebrin[1], Ilya M. Kovenskiy[2], Victor A. Bykov[3], Valeria R. Yalunina[1]

[1]Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia
[2]Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

[3]*Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia*
**e-mail: zh-al@yandex.ru*

Abstract. Metallographic analysis and thermal conductivity analysis of series of light aluminum alloys with silicon content from 0 to 12 % (by weight) and additionally alloyed with iron 1 % (by weight) were carried out. It is shown that with an increase in the silicon content in the alloy above 4–6 % (by weight), the size of silicon crystals increases significantly with a simultaneous increase in the values of thermal conductivity. The article assesses the effect of iron on thermophysical properties and shows the correlation of thermal conductivity at different temperatures with the morphology of silicon in alloys with silicon content from 0 to 12 % (by weight) and additionally alloyed with iron 1 % (by weight). It is shown that alloy with a silicon content of 4 % by weight has a balanced reserve of thermophysical properties due to the structural features of the morphology of the components.

Key words: aluminum; aluminum-silicon alloys; silicon; thermal conductivity; heat exchange; iron; casting; structure

Введение

Алюминий-кремниевые сплавы с дополнительным легированием железом получили широкое применение как материалы, обладающие высокими технологическими свойствами, в частности для технологий литья под давлением, но и также как материалы, обладающие приемлемой теплопроводностью для создания деталей и конструкций отвода тепла [1]. К таким деталям и конструкциям относятся в первую очередь радиаторы, призванные обеспечивать быстрый отвод тепла от двигателей или высоконагруженных компонентов электроники [2].

Однако баланс технологичности материалов для технологий литья и конечных теплофизических свойств, связанных с отводом тепла, всегда находится в состоянии компромисса между недорогой высокопроизводительной технологией с низкими функциональными свойствами в конечном изделии, или же дорогой технологией со сложными процессами формирования структуры, но обеспечивающей высокие параметры теплообмена в конечном изделии [3].

Поиск решений для повышения параметров теплообмена легких теплопроводных сплавов на основе алюминия и кремния является актуальным для постоянно развивающейся нефтегазовой отрасли, использующей новейшее высокопроизводительное оборудование, требующее современные материалы с повышенным запасом свойств, в том числе теплопроводности. Этого можно достичь, разработав новые системы легирования сплавов и, как следствие, создав механизмы формирования структуры, позволяющие выйти на желаемый баланс функциональности и технологичности.

Объект и методы исследования

Целью работы являлась разработка базы легирования легких теплопроводных сплавов на основе алюминия и кремния с обязательным легированием железом в количестве 1 % по массе. Легирование железом являлось необходимым шагом для повышения технологичности сплавов [4], несмотря на сложный состав фаз, образующихся с участием железа, и снижение функциональных теплофизических свойств сплавов.

Исходными материалами для выплавок являлись чистый алюминий марки А8 и сплав Al-Si с содержанием 12 % Si (по массе) такого же уровня

чистоты. Экспериментальные составы выплавлялись в лабораторных тигельных печах на базе оборудования Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ), металлографический анализ также проводился на базе оборудования УрФУ, определение температурной зависимости теплопроводности экспериментальных сплавов выполнялось на базе оборудования Института металлургии Уральского отделения РАН. База легирования по кремнию была выбрана с шагом в 2 % (% по массе), что обусловлено причинами поиска в первую очередь легирования по кремнию, позволяющего сочетать одновременно и технологичность, и функциональные характеристики сплавов. Все сплавы содержали в своем составе железо в количестве до 1 % (% по массе).

Результаты и их обсуждение

Легирование по основным химическим элементам экспериментально выплавленных сплавов приведено в таблице вместе со значениями теплопроводности сплавов (Q, Вт/К·м) при комнатной температуре. Сплавам дана нумерация от I до VII, основной компонент во всех составах — алюминий.

Химический состав экспериментально выплавленных сплавов

Сплав	I	II	III	IV	V	VI	VII
Si (% по массе)	0	2	4	6	8	10	12
Fe (% по массе)	1	1	1	1	1	1	1
Q (Вт/К·м)	244,4	198,9	191,1	161,2	167,3	162,9	141,4

Несмотря на необратимое снижение теплопроводности сплавов при повышении содержания кремния, значения теплопроводности сплавов II и III являются допустимыми для дальнейшего развития базы легирования. В сплавах IV–VII содержание кремния приводит к значительному снижению теплопроводности сплавов. С одной стороны, высокое содержание кремния позволяет повсеместно использовать технологии литья, в том числе литье под давлением для получения изделий из анализируемых в работе сплавов, однако с другой стороны, — морфология крупных кристаллов кремния (рис. 1), обладающего низкой теплопроводностью, не позволяет обеспечить требуемый уровень функциональных свойств сплавов, главная цель разработки которых — решение задач теплообмена.

Большая объемная доля кристаллов кремния в теплопроводящей матрице значительно, более чем в 1,5 раза снижает теплопроводность, как при комнатной температуре, так и при более высоких температурах: сплав III при нагревании до 100 °С имеет значение теплопроводности 177,2 Вт/К·м, в то время как сплав I — 232,5 Вт/К·м, а сплав с повышенным содержанием кремния V — 186,8 Вт/К·м. При последующем нагревании до более высоких температур 150 и 200 °С все сплавы со содержанием кремния до 8 % имели одинаковый характер распределения значений теплопроводности на уровне 165 Вт/К·м. Разумеется, сплав I, содержащий минимальное количество примесей, проявлял наиболее высокие значения теплопроводности на уровне 220 Вт/К·м, однако сплав I ввиду высокой пластичности, высокой температуры плавления в сравнении с остальными легированными Al-Si сплавами и сравнительно большим интервалом кристаллизации, как следствие, не обладает тех-

нологичностью, позволяющей использовать его в масштабном производстве, где получили широкое применение технологии литья под давлением.

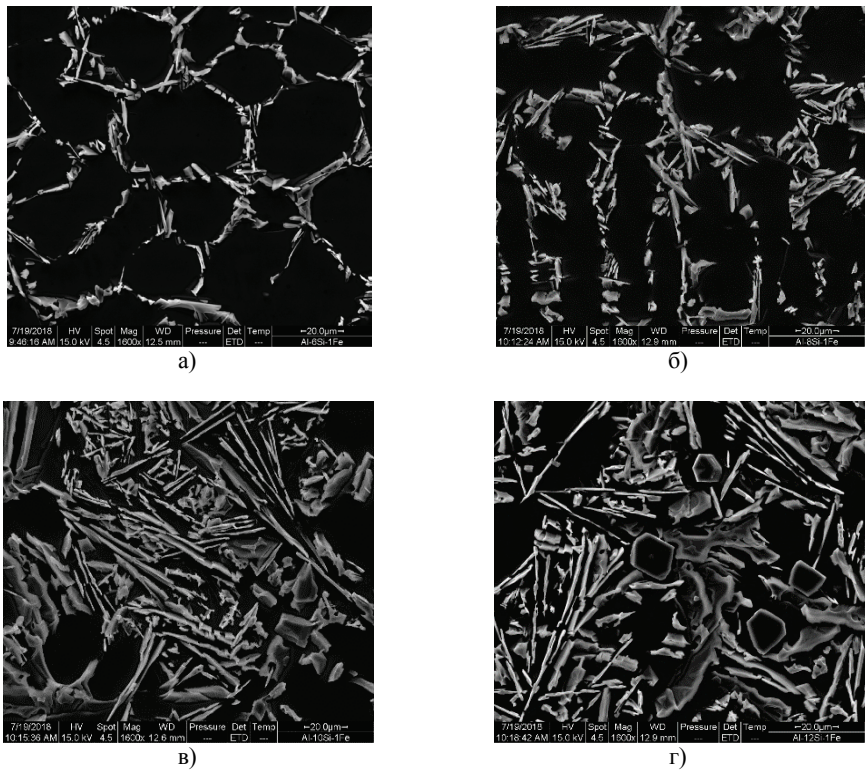

Рис. 1. ***Морфология структурных составляющих сплавов с высоким содержанием кремния:*** *а) IV; б) V; в) VI; г) VII*

Анализ морфологии структурных составляющих сплава III (рис. 2) показал, что сравнительно небольшие кристаллы кремния могут быть следствием высокой теплопроводности при комнатной температуре — 191,1 Вт/К·м. Крупные кристаллы кремния в сплавах IV–VII блокируют процессы отвода тепла.

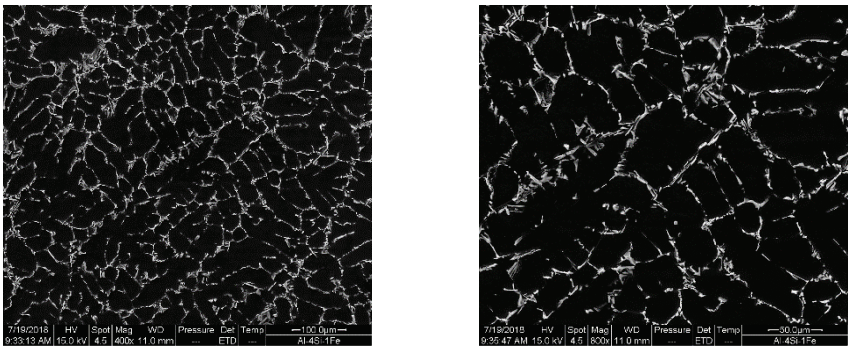

Рис. 2. ***Морфология структурных составляющих в сплаве III при различном увеличении***

По этим причинам дальнейшее изучение проанализированных сплавов, в особенности сплава III, будет направлено на формирование мелкодисперсных кристаллов кремния, в еще большей степени способствующих теплообмену основной матрицы.

Роль железа в структурообразовании сплавов заключается в формировании твердых растворов с алюминием и кремнием, при этом процессе железо остается компонентом твердого раствора. Выделений вторичных фаз с содержанием железа не было обнаружено в ходе металлографического анализа, хотя образование интерметаллидов в системе Al-Fe-Si возможно. Железо является обязательным легирующим элементом, позволяющим обеспечивать расплаву смачиваемость формы при процессах литья под давлением.

Выводы

В результате работы дана оценка влиянию морфологии кремния на теплопроводные свойства серии экспериментально полученных сплавов I–VII. Показано, что морфология кристаллов кремния влияет на теплопроводность сплавов при низких температурах (не ниже 25 °С) в большей степени, чем при нагревании до 200 °С. Сплав III с содержанием кремния 4 % (по массе) оказался наиболее перспективным для дальнейшей разработки базы легирования и работ над измельчением структурных составляющих, в частности кристаллов кремния, для повышения теплопроводности при сохранении уровня технологичности сплава.

Библиографический список

1. Ye H. An overview of the development of Al-Si-Alloy based material for engine applications // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2003. – Vol. 12, Issue 3. – P. 288–297. DOI: 10.1361/105994903770343132
2. Influence of Fe and Si addition on the properties and structure conductivity aluminium / M. Jabłoński [et al.] // Archives of Metallurgy and Materials. – 2017. – Vol. 62, Issue 3. – P. 1541–1547. DOI: 10.1515/amm-2017-0237
3. Жилин А. С., Ялунина В. Р., Варламенко Д. С. Температурная зависимость теплопроводности Al-Si-1%Fe сплавов при нагревании до 150 °С // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2019. – № 2. – С. 104–108. DOI: 10.31660/0445-0108-2019-2-104-108
4. Taylor J. A. Iron-Containing Intermetallic Phases in Al-Si Based Casting Alloys // Procedia Materials Science. – 2012. – Vol. 1. – P. 19–33. DOI: 10.1016/j.mspro.2012.06.004

References

1. Ye, H. (2003). An overview of the development of Al-Si-Alloy based material for engine applications. Journal of Materials Engineering and Performance, 12(3), pp. 288-297. (In English). DOI: 10.1361/105994903770343132
2. Jabłoński, M., Knych, T., Mamala, A., Smyrak, B., & Wojtaszek, K. (2017). Influence of Fe and Si addition on the properties and structure conductivity aluminium. Archives of Metallurgy and Materials, 62(3), pp. 1541-1547. (In English). DOI: 10.1515/amm-2017-0237
3. Zhilin, A. S., Yalunina, V. R., & Varlamenko, D. S. (2019). Temperature dependence of thermal conductivity of Al-Si-1%Fe alloys under heating up to 150 °C. Oil and Gas Studies, (2), pp. 104-108. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2019-2-104-108
4. Taylor, J. A. (2012). Iron-Containing Intermetallic Phases in Al-Si Based Casting Alloys. Procedia Materials Science, 1, pp. 19-33. (In English). DOI: 10.1016/j.mspro.2012.06.004

Сведения об авторах

Жилин Александр Сергеевич, *к. т. н., доцент кафедры физико-химических методов анализа, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, e-mail: zh-al@yandex.ru*

Ребрин Олег Иринархович, *д. х. н., профессор, заведующий кафедрой физико-химических методов анализа, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург*

Ковенский Илья Моисеевич, *д. т. н., профессор, заведующий кафедрой материаловедения и технологии конструкционных материалов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень*

Быков Виктор Анатольевич, *к. ф.-м. н., старший научный сотрудник, Институт металлургии Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург*

Ялунина Валерия Рамильевна, *аспирант кафедры металловедения, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург*

Information about the authors

Aleksandr S. Zhilin, *Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Physical and Chemical Analysis, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, e-mail: zh-al@yandex.ru*

Oleg I. Rebrin, *Doctor of Chemistry, Professor, Head of the Department of Physical and Chemical Analysis, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg*

Ilya M. Kovenskiy, *Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Material Science and Technology of Structural Materials, Industrial University of Tyumen*

Victor A. Bykov, *Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher, Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg*

Valeria R. Yalunina, *Postgraduate at the Department of Metallography, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg*