

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г., № 1715 р.
2. Jenkins S. Environmental performance of IGCC power plants / J. Jurczak, G. Booras // 4<sup>th</sup> International Freiberg Conference on IGCC&XtL Technologies, 2010. [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: [www.gasification-freiberg.org](http://www.gasification-freiberg.org).
3. Pettinau A. Techno-economic comparison between different technologies for a CCS power generation plant integrated with a sub-bituminous coal mine in Italy / A. Pettinau, F. Ferrara, C. Amorino // Applied Energy. – 2012. – № 99. – P. 32–39.
4. Renner M. Carbon prices and CCS investment: A comparative study between the European Union and China / M. Renner // Energy Policy. 2014. – № 75. – P. 327–340.
5. Hashimoto T. Development of Coal Gasification System for Producing Chemical Synthesis Source Gas / T. Hashimoto, K. Sakamoto, R. Ota, T. Iwahashi, Y. Kitagawa, R. Yokohama // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. – 2010. – Vol. 47 – № 4. – P. 27–32.
6. Capital Cost Review of Power Generation Technologies. Recommendations for WECC's 10- and 20-Year Studies. Energy and Environmental Economics Inc. March 2014. – 105 p.

УДК 669.018/541.126

А. С. Жилин<sup>1</sup>, Li Jianguo<sup>2</sup>, В. Р. Ялунина<sup>1</sup>, В. А. Быков<sup>1,3</sup>, В. В. Токарев<sup>1</sup>,  
Д. С. Варламенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия;

<sup>2</sup> Tsinghua University, China;

<sup>3</sup> ФГБУН «Институт металлургии» УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

## ВЛИЯНИЕ КРЕМНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ Al-Si-Fe СПЛАВОВ

### Аннотация

Проведен анализ температурной зависимости теплопроводности для серии алюминиевых сплавов с 1 % железа по массе и различным содержанием кремния от 0 до 6 % по массе. Показано, что наилучшим сплавом для применения в качестве материала для отвода тепла является сплав с 4 % кремния по массе. Описан характер изменения теплопроводности сплавов в сравнении с чистым алюминием при комнатной температуре, 50 °С, 100 °С, 150 °С.

**Ключевые слова:** алюминиево-кремниевые сплавы, теплопроводность, теплообмен, железо, литейные сплавы, структура, температура.

### Abstract

Temperature dependence analysis on thermal conductivity was carried out for series of aluminum alloys with 1 % Fe (mass) and different content of silicon starting from 0 % to 6 % Si (mass). It is shown that the best alloy for heat exchange applications to be used is alloy with 4 % of silicon (mass). Temperature dependence of thermal conductivity shows the strong decreasing character upon heating the pure

aluminum, however alloyed alloys with silicon had close values to each other and very far to pure aluminum.

**Key words:** aluminum-silicon alloys, thermal conductivity, heat exchange, iron, cast alloys, structure, temperature.

*Введение.* Теплопроводность является физическим свойством, которое имеет решающее значение при конструировании изделий для теплообмена [1]. Алюминиевые сплавы широко используются для решения задач теплообмена в автомобилях и самолетах. [2]. Чистый алюминий имеет одно из лучших значений теплопроводности по сравнению с другими металлами, однако, его пластичность не позволяет использовать в качестве конструкционного материала, например, для производства радиаторов [3]. Современное оборудование в автомобилях и самолетах требует от промышленности новых решений задач теплообмена. Одним из таких требований является стоимость технологии изготовления. Алюминиево-кремниевые сплавы – это литейные сплавы, стоимость которых существенно дешевле, чем алюминиевых сплавов, полученных обработкой металлов давлением [4]. Однако низкая стоимость технологии производства приводит к тому, что с одной стороны легирование определёнными элементами повышает технологические свойства, но с другой – каждый новый элемент неизбежно снижает теплопроводность [1]. Именно поэтому поиск составов сплавов с наиболее высокой теплопроводностью является задачей данной работы.

*Результаты и их обсуждение.* Основная идея работы заключается в изучении влияния добавления железа и кремния в сплавы на температурную зависимость теплопроводности алюминиево-кремниевых литейных сплавов. Все сплавы, представленные в работе, содержат до 1 % железа. Железо добавлялось для улучшения технологических свойств сплавов. В промышленности небольшое содержание железа оказывают значительное влияние на заполняемость формы в процессе литья под давлением. В таблице приведены сведения о составах сплавов, полученных в лабораторных печах, и значениях теплопроводности, измеренных при четырёх различных температурах.

Все экспериментальные сплавы получены в лабораторных условиях. Исходными материалами для плавов были чистый алюминий (99,98 % Al) и сплав Al-Si с 12 % S кремния по массе с таким же уровнем чистоты по примесям.

Анализ плотности производится двумя различными способами: гидростатическим весом и геометрическими измерениями. Анализ теплопроводности проводился на оборудовании для измерения теплопроводности и температуропроводности лазерной вспышкой «NETZSCH LFA 457 MicroFlash».

Таблица

Результаты измерения теплопроводности при различных температурах

Сплав	0%Si	2%Si	4%Si	6%Si
Вт/К·м (комнатная температура)	246,9	198,9	191,1	161,2
Вт/К·м (50 °С)	239,8	188,0	177,2	166,8
Вт/К·м (100 °С)	232,5	183,2	172,9	166,4
Вт/К·м (150 °С)	227,1	178,9	168,5	163,4

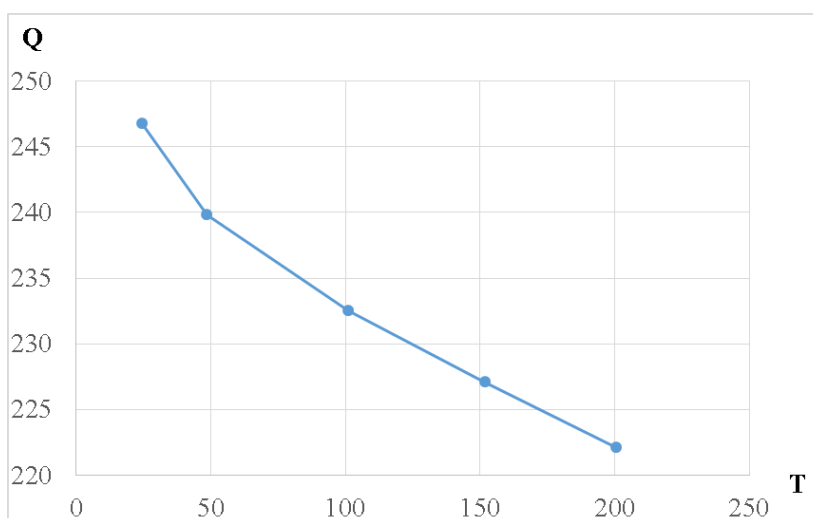


Рис. 1. Температурная зависимость теплопроводности чистого алюминия

Температурная зависимость теплопроводности для чистого алюминия показана на рисунке 1. Наблюдается уменьшение теплопроводности при нагревании металла от 246,9 Вт/К·м при комнатной температуре до 222,2 Вт/К·м при 200 °С. В работе рассмотрены сплавы с содержанием кремния до 6 %, поскольку большее количество кремния приводит к значительному уменьшению теплопроводности, а это препятствует созданию высокоэффективного теплообменного материала. Рисунок 2 содержит температурные зависимости теплопроводности для чистого алюминия и трёх выплавленных составов с 2 %, 4 % и 6 % кремния по массе.

Для использования анализируемых сплавов в решении вопросов теплообмена значения теплопроводности должны быть насколько это представляется возможным высокие. Теплопроводность чистого алюминия – это недостижимая цель, но всё же главный ориентир для сопоставления полученных значений для других сплавов. Как показано на рисунке 2, существенной разницы в тенденциях поведения теплопроводностей сплавов не наблюдается. Однако состав сплава всё же оказывает решающее влияние. Мы ожидаем, что сплав с 4% кремния по массе может быть наиболее перспективен для использования в производстве теплообменных материалов. Данный сплав имеет более высокое значение теплопроводности с комбинацией более высоких свойства для литья под давлением. Тенденция снижения теплопроводности при добавлении в сплав большего количества кремния не позволяет обсуждать возможности использования сплавов с более высоким содержанием кремния как теплообменных материалов.

Кроме того, большое влияние на теплопроводность оказывает технология производства сплава. Очевидно, что литейные сплавы имеют различные дефекты литейного происхождения. Экспериментальные составы сплавов в данной работе получены методом литья. Различные плотности анализируемых сплавов также влияют на теплопроводность. Процессы формирования структуры будут в последующих работах изучены и обсуждены.

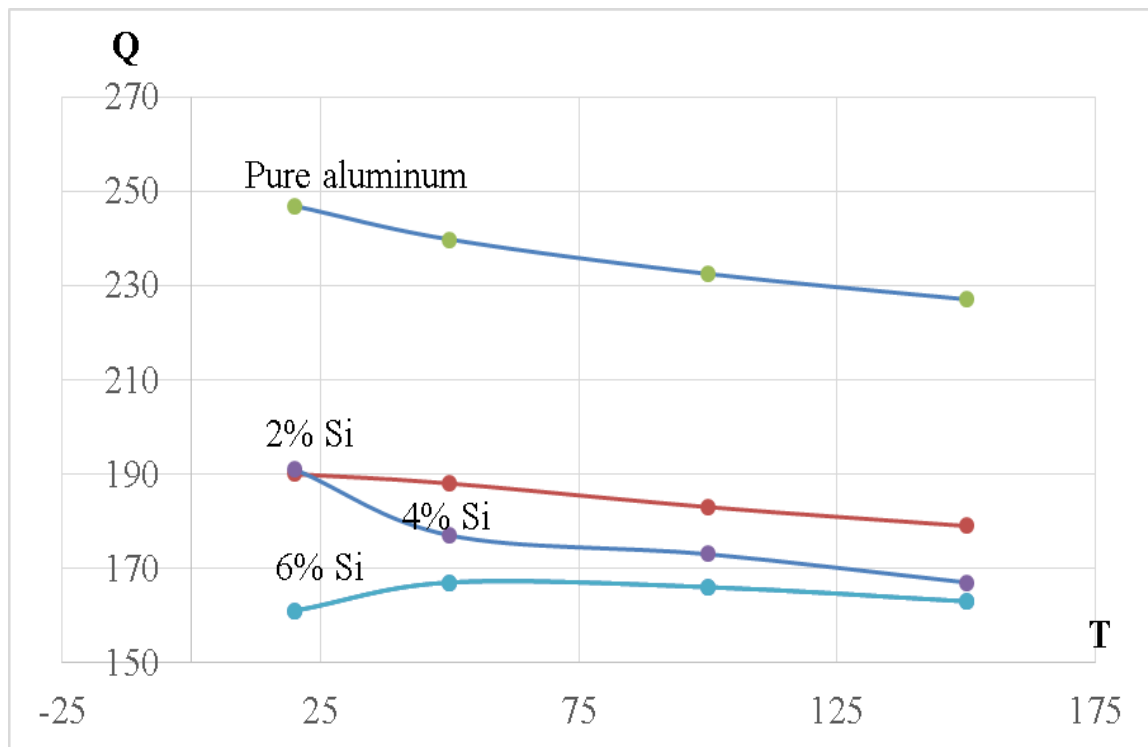


Рис. 2. Температурная зависимость теплопроводности анализируемых сплавов и алюминия

*Выводы.* Показано, как снижается теплопроводность алюминиево-кремниевых сплавов с 1 % железа и различным содержанием кремния от 2 % до 6 % по массе. Определены параметры теплопроводностей сплавов с 1 % железа по массе и сделан вывод о значительном влиянии железа на теплопроводящее свойство. Предложено использование в практических целях сплава с 4 % кремния по массе как перспективного материала с более высокими теплообменными и литейными свойствами.

#### Список использованных источников

1. Haizhi Ye. An Overview of the Development of Al-Si-Alloy Based Material for Engine Applications. JMEPEG (2003) 12:288-297.
2. Jablonski M., Knych T., Mamala A., Smyrak B., Wojtaszek K. Influence of Fe and Si addition on the properties and structure conductivity aluminum. Arch. Metall. Mater. 62 (2017) 3:1541-1547.
3. Tanski T., Labisz K., Krupinska B., Krupinski M., Krol M., Maniara R., Borek W. Analysis of crystallization kinetics of cast aluminum–silicon alloy. J. Therm. Anal. Calorim. (2016) 123:63-74.
4. Yu-Mi Kim, Da-Som Kang, Sung-Kil Hong, Young-Chan Kim, Chang-Seog Kang, Se-Weon Choi. Influence of variation in the silicon content on the silicon precipitation in the Al–Si binary system. J. Therm. Anal. Calorim. (2016) 123:63-74.

## ВЛИЯНИЕ КРЕМНИЯ НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ Al-Si-Fe СПЛАВОВ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

### Аннотация

*Проведен анализ плотности и теплопроводности экспериментальных литых алюминиевых сплавов, содержащих различное количество кремния: от 0 до 12 % (по массе). Все сплавы дополнительно легированы железом (до 1 %) для улучшения технологичности. Показано, как снижается теплопроводность в анализируемых сплавах с увеличением содержания кремния. Показан характер изменения плотности при увеличении содержания кремния, несмотря на это, сплавы с содержанием кремния 4 % и 8 % имели нестандартные значения плотности.*

**Ключевые слова:** *алюминиево-кремниевые сплавы, теплопроводность, теплообмен, железо, литейные сплавы, структура, температура.*

### Abstract

*Analysis of densities and thermal conductivities was carried out for cast experimental aluminum alloys contained different content of silicon from 0 to 12 % (mass). All alloys were additionally supplemented by iron up to 1 % mass for better casting properties. Results showed strong tendency of decreasing the thermal conductivity while increasing silicon content. The same character density changes had, however, alloys with 4 % and 8 % of silicon had abnormal parameters.*

**Key words:** *aluminum-silicon alloys, thermal conductivity, heat exchange, iron, cast alloys, structure, temperature.*

*Введение.* Алюминиевая промышленность стремительно развивается от десятилетия к десятилетию [1]. Алюминиевые сплавы являются хорошо известными материалами не только из-за их низкой плотности, которая дает возможность уменьшать массу механизмов и деталей, выпускаемых машиностроительной промышленностью; эти сплавы широко используются для теплообмена [2]. Чистый алюминий имеет высокое значение теплопроводности, однако из него невозможно сделать какую-либо деталь из-за его высокой пластичности [3]. Человечество начало развивать литейные алюминиево-кремниевых сплавов с главной целью сделать процесс производства недорогим и эффективным. Одним из путей этой эволюции была разработка литейных алюминий-кремниевых сплавов. Хорошо известно, что кремний сильно повышает литейные свойства [4]. Однако, теплопроводность снижается в 2 раза, что не позволяет использовать литейные алюминиевые сплавы для производства высокоэффективных двигателей и компонентов электроники [5]. Именно поэтому повышение теплопроводности является серьезной задачей для материаловедения следующих поколений.

*Результаты и их обсуждение.* Данная работа направлена на изучение влияния Fe на теплопроводность алюминиево-кремниевых литейных сплавов. Целью данной