### ФИЗИКА

УДК 533.9:539.4.015.2

## МНОГОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ СИЛУМИНА: СТРУКТУРА, ФАЗОВЫЙ И ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ\*

К. В. Алсараева<sup>1</sup>, Ю. Ф. Иванов<sup>2,3</sup>, В. Е. Громов<sup>1</sup>, Е. А. Петрикова<sup>2,3</sup>, С. В. Коновалов<sup>1</sup>

ФГБОУ ВПО "Сибирский государственный индустриальный университет",
Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук,
<sup>3</sup> ΦΓБОУ ВПО "Национальный исследовательский Томский государственный университет"

Поступила в редакцию 26.08.2014 г.

**Аннотация**: Сплавы алюминия с кремнием, обладая высокими удельными механическими свойствами, являются хрупким, трудно деформируемым материалом. Для расширения областей применения этих сплавов в промышленности необходимо существенно улучшить их структуру и повысить пластические свойства.

Методами современного физического материаловедения установлены закономерности формирования структуры и фазового состава силумина, подвергнутого многоцикловым усталостным испытаниям до разрушения. Анализ структуры поверхностного слоя позволил выявить источники зарождения субмикротрещин. Выявлено, что наиболее опасными концентраторами напряжений являются крупные пластины кремния, расположенные на поверхности и в приповерхностных слоях.

Ключевые слова: силумин, структура, многоцикловая усталость, фазовый состав.

# HIGH-CYCLE FATIGUE OF SILUMIN: STRUCTURE, PHASE AND ELEMENTAL COMPOSITION

## K. V. Alsaraeva, Yu. F. Ivanov, V. E. Gromov, E. A. Petrikova, S. V. Konovalov

**Abstract**: alloys of aluminium with silicon having the high specific mechanical properties are the brittle and difficultly deformed materials. It is necessary to improve essentially their structure and increase the plastic properties for expanding the spheres of these alloys application in different branches of industry.

The regularities of silumin structure and phase composition formation subjected to highcycle fatigue tests up to failure are established by methods of modern physical materials science. Analysis of the surface layer structure revealed the sources of nucleation of submicrocracks. It is revealed that the large silicon plates located on the surface and in the subsurface layer are the most dangerous stress concentrators.

Keywords: silumin, structure, high-cycle fatigue, phase composition.

<sup>\*</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания <br/> & 3.1496.2014/K на выполнение научно-исследовательской работы.

<sup>©</sup> Алсараева К. В., Иванов Ю. Ф., Громов В. Е., Петрикова Е. А., Коновалов С. В., 2014

#### введение

Сплавы системы Al-Si (силумины), содержащие железо, медь, марганец, являются одним из перспективных современных легких материалов. Данные материалы проявляют хорошее сопротивление износу, жидкотекучесть и термическую стабильность. Явным недостатком таких сплавов является плохая обрабатываемость давлением из-за склонности к образованию трещин. Наличие железа способствует, с одной стороны, повышению прочности, а с другой стороны, формируя интерметаллиды пластинчатой морфологии, снижает трещиностойкость силумина. Присутствие марганца снижает отрицательное действие железа, изменяя морфологию интерметаллидов от пластинчатой к глобулярной и, тем самым, повышая сопротивление материала к образованию трещин, увеличивает срок его службы [1], [2]. Многоцикловая усталость нагружения силумина во многом определяется структурно-фазовым состоянием материала, локальным характером зарождения субмикротрещин.

Цель работы — анализ морфологии, элементного и фазового состава включений, присутствующих в литом сплаве алюминий-кремний, подвергнутом последующему усталостному нагружению до разрушения.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала исследования был использован сплав Al-Si (силумин) в литом состоянии. Исследования структуры и фазового состава сплава осуществляли методами оптической (травленый шлиф) и сканирующей электронной микроскопии. Элементный анализ осуществляли методами микрорентгеноспектрального анализа (микроанализатором EDAX ECON IV, являющимся приставкой к растровому электронному микроскопу Philips SEM 515). Фазовый состав определяли методами рентгенофазового анализа (рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD 6000).

Как и в [3]–[7], усталостные испытания проводили на специальной установке по схеме циклического несимметричного консольного изгиба. Образцы имели форму параллелепипеда с размерами 8x14x145 мм. Имитация трещины осуществлялась надрезом в виде полуокружности радиусом 10 мм. Температура испытаний 300 К, частота нагружения образцов изгибом 15 Гц, нагрузка 10 МПа.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характерное изображение структуры травленого шлифа сплава алюминий-кремний представлено на рис. 1. Отчетливо видно, что сплав является многофазным материалом. Выделения вторых фаз имеют преимущественно пластинчатую форму. Кроме пластин наблюдаются образования в виде многогранников и выделений неправильной формы. Согласно металлографическим исследованиям, представленным в [1], [2], в сплавах на основе алюминий-кремний методами избирательного травления можно выделить следующие типы включений:

Пластинчатые включения светло-серого цвета – фаза  $\beta$  (Al<sub>5</sub>SiFe);

Включения формы правильных многогранников коричневого цвета – фаза  $\alpha$  (Al<sub>15</sub>(FeMn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>); при малом количестве железа форма частиц подобна китайским иероглифам;

Включения серого цвета овальной формы – частицы кремния.

Характерное изображение структуры сплава алюминий-кремний, полученное методами сканирующей электронной микроскопии в обратно отраженных электронах, представлено на рис. 2. Отчетливо видно, что изображения включений вторых фаз существенным образом различаются по интенсивности. Основной объем включений имеют низкую интенсивность



Рис. 1. Структура травленого шлифа сплава алюминий-кремний

и слабо отличаются по интенсивности от изображения матрицы. Известно, что включения, сформированные элементами с более высокой атомной массой, интенсивнее отражают падающий поток электронов, поэтому на изображениях структуры, полученных в обратно отраженных электронах, они имеют более светлый контраст [8]. Этот факт позволяет заключить, что выявленные в сплаве включения существенным образом различаются по элементному составу.

Более детально элементный состав матрицы и включений сплава алюминий-кремний был определен методами микрорентгеноспектрального анализа. Прежде всего, был определен элементный состав сплава в среднем по объему. С этой целью проводили микрорентгеноспектральный анализ больших площадей (1450х1050 мкм<sup>2</sup>, при толщине анализируемого слоя ~5 мкм) полированной поверхности (рис. 3). Из представленных в таблице 1 результатов следует, что основными элементами исследуемого сплава, как и следовало ожидать, являются алюминий и кремний. Концентрация кремния в среднем составляет 21.5 вес.%. Следовательно, исследуемый сплав относится к силуминам заэвтектического состава.

Отсутствие на энергетических спектрах линий более тяжелых (относительно алюминия и кремния) элементов может указывать на их сравнительно малую объемную долю (в пределах 1...2 вес.%). Для выяснения данного вопроса был осуществлен микрорентгеноспектральный анализ отдельно выбранных включений (рис. 4).

Для элементного анализа были выбраны три типа частиц, различающихся по интенсивности изображения в обратно отраженных электронах (см. рис. 2) и по морфологии. Анализируя результаты, представленные в табл. 2, можно, прежде всего, отметить, что в исследуемом сплаве, наряду с алюминием и кремнием присутствуют железо и марганец, распределенные крайне неоднородно по объему материала. Матрица, (рис. 4, спектр 1), в пределах чувствительности анализатора, сформирована алюминием. Частицы, на изображениях структуры в обратно отраженных электронах имеющие сравнительно низкий уровень контраста, сформированы атомами кремния (рис. 4, спектр 2). Частицы с более ярким фазовым контрастом,

ВЕСТНИК ВГУ. СЕРИЯ: ФИЗИКА. МАТЕМАТИКА. 2014. № 4



Рис. 2. Структура травленого шлифа сплава алюминий-кремний. СЭМ анализ поверхности в обратно отраженных электронах



Рис. 3. Изображение поверхности сплава алюминий-кремний, полученное при микрорентгеноспектральном анализе (a); б – энергетический спектр, полученный с указанного на (a) участка поверхности сплава.

содержат атомы алюминия, кремния, железа и марганца (рис. 4, спектр 3 и спектр 4).

Морфология частиц определяется относительной концентрацией в них атомов железа и кремния. А именно, в частицах в виде "скелетов" (спектр 3) отношение концентраций Al/Fe/Si = 7/4/1; в частицах пластинчатой морфологии (спектр 4) отношение концентраций Al/Fe/Si = 3/2/1. Следуя результатам, представленным в работах [1, 2], можно предположить, что частицы пластинчатой морфологии (рис. 4, спектр 4) являются  $\beta$ -фазой, состав которой определяется как Al<sub>5</sub>(Fe, Mn)Si; частицы скелетообразной формы (рис. 4, спектр 3) являются  $\alpha$ -фазой, состав которой определяется как Al<sub>8</sub>(Fe, Mn)<sub>2</sub>Si.

Интегрально фазовый состав сплава определяли методами рентгеноструктурного анализа.



Рис. 4. Изображение поверхности сплава алюминий-кремний, полученное при микрорентгеноспектральном анализе; указаны области, выбранные для элементного анализа материала.



Рис. 5. Участок рентгенограммы сплава Al-Si; цифрами обозначены дифракционные максимумы 1 - (111)Si; 2 - (111)Al; 3 - (200)Al; 4 - (220)Si; 5 - (311)Si; 6 - (220)Al; 7 - (400)Si; 8 - (331)Si; 9 - (311)Al; 10 - (222)Al; 11 - (422)Si.

Участок рентгенограммы, полученной с исследуемого сплава, представлен на рис. 5. Результаты анализа рентгенограммы приведены в таблице 3.

Анализируя сведения, представленные в табл. 3, можно отметить хорошее соответствие результатов, полученных методами рентгеноструктурного анализа (сканирующая электронная микроскопия) и методами рентгеноструктурного анализа. А именно, близкие значения соот-

ВЕСТНИК ВГУ. СЕРИЯ: ФИЗИКА. МАТЕМАТИКА. 2014. № 4

Элемент, вес. %	Номер участка						Сродное
	1	2	3	4	5	6	Среднее
Al	78	77	79	78	80	79	78.5
Si	22	23	21	22	20	21	21.5

Таблица 1. Результаты микрорентгеноспектрального анализа сплава алюминий-кремний

Таблица 2. Результаты микрорентгеноспектрального анализа участка поверхности сплава алюминий-кремний, представленного на рис. 4.

ATOMORA DOC 02	Номер участка				
Onemen1, Bec. 70	1	2	3	4	
Al	99	2.0	57	54	
Si	1.0	98	8	15	
Mn	0.0	0.0	1	1	
Fe	0.0	0.0	34	30	

Таблица 3. Результаты рентгеноструктурного анализа участка поверхности сплава алюминий-кремний

Фаза	Содержание, вес. %	Тип решетки	Парамет ки, нм	р решет-	Атомный радиус, нм
			a <sub>0</sub>	a	
Al	76.5	Fm3m	0.4050	0.40514	0.143
Si	23.5	Fm3ms	0.54307	0.54344	0.132

Примечание:  $a_0$  — табличное значение; a — значение в сплаве.

ношения фаз алюминия и кремния; отсутствие на рентгенограммах линий интерметаллидных фаз, что свидетельствует, как отмечалось выше, о малой объемной доле данных включений. Кроме этого, следует отметить, что параметры кристаллических решеток алюминия и кремния в исследуемом сплаве близки к параметрам кристаллических решеток чистых элементов, что указывает на полное расслоение данных элементов при кристаллизации сплава.

Многоцикловые усталостные испытания в выбранных режимах приводили к разрушению при 1.3 · 10<sup>5</sup> циклах нагружения. Анализ структуры поверхностного слоя позволил выявить источники зарождения субмикротрещин. Концентратором критических напряжений являлись крупные пластины кремния, расположенные на поверхности и в приповерхностных слоях. Поверхность разрушения имеет сложное строение. В двухфазных материалах, к которым относится анализируемый в настоящей работе сплав, как правило, реализуется смешанный механизм усталостного разрушения. При анализе выявляются ямки вязкого разрушения и фасетки квазискола. Ямки являются преобладающим элементом структуры поверхности разрушения и образуются в результате срезания микропор, через которые прошло разрушение зерен алюминия. Пластинки кремния разрушаются по механизму скола.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные методами современного физического материаловедения исследования сплава алюминий-кремний позволяют сделать следующие выводы:

Основными элементами исследуемого сплава являются алюминий и кремний в соотношении Al-(21-23) вес.% Si, т.е. исследуемый сплав относится к силуминам заэвтектического состава;

Сплав является многофазным материалом и содержит, кроме фаз на основе алюминия и кремния, интерметаллидные соединения состава Al-Si-Fe-Mn;

Частицы кремния и интерметаллидов имеют пластинчатую или скелетообразную форму, следовательно, могут являться источниками трещин при механических испытаниях матери-

Многоцикловая усталость силумина: структура, фазовый и элементный состав...

ала.

Сплав указанного состава при выбранных режимах усталостного нагружения выдерживал 1.3·10<sup>5</sup> циклов до разрушения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Золоторевский В.С. Металловедение литейных алюминиевых сплавов / В.С. Золоторевский, Н.А. Белов. — М.: Издательский Дом МИСиС, 2005. — 376 с.

[2] Белов Н.А. Фазовый состав алюминиевых сплавов / Н.А. Белов. — М.: Издательский Дом МИСиС, 2009. — 392 с.

[3] Эволюция структуры и фазового состава нержавеющей стали 20Х23Н18 при циклическом деформировании / Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, В.В. Сизов и др. // Материаловедение. — 2013. — № 4. — С. 34–39.

[4] Громов В.Е. Масштабные уровни структурно-фазовых состояний и усталостная долговечность рельсовой стали после электронно-пучковой обработки / В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, В.А. Гришунин // Успехи физики металлов. — 2013. — Т. 14, № 1. — С. 67–80.

[5] Природа увеличения усталостной долговечности рельсовой стали электронно-пучковой обработкой / В.Е. Громов, В.А. Гришунин, Ю.Ф. Иванов, С.В. Коновалов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. — 2012. — № 4. — С. 49–56.

[6] Многоцикловая усталость нержавеющей стали, обработанной высокоинтенсивным электронным пучком: структура поверхностного слоя / Ю.Ф. Иванов, Н.Н. Коваль, С.В. Горбунов и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2011. — № 5. — С. 61–69.

[7] Формирование и эволюция зеренной структуры нержавеющей стали при электроннопучковой обработке и многоцикловой усталости / В.В. Сизов, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов и др. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. — 2012. — Т. 9, № 2. — С. 136–140.

[8] Кришталл М.М. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ в примерах практического применения / М.М. Кришталл, И.С. Ясников, В.И. Полунин. — М.: Техносфера, 2009. — 208 с.

#### REFERENCES

[1] Zolotorevsky V.S.,Belov N.A. Metallography of cast aluminum alloys. [Zolotorevskij V.S., Belov N.A. Metallovedenie litejnyx alyuminievyx splavov]. Moscow: Publishing house "MISiS", 2005, 376 p.

[2] Belov N.A. The phase composition of aluminum alloys. [Belov N.A. Fazovyj sostav alyuminievyx splavov]. Moscow: Publishinghouse "MISiS", 2009, 392 p.

[3] Ivanov Y.F., Gromov V.E., Sizov V.V., Vorobyev S.V., Konovalov S.V. Evolution of the structure and phase composition of stainless steel under cyclic deformation 20H23N18. [Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Sizov V.V., Vorobev S.V., Konovalov S.V. E'volyuciya struktury i fazovogo sostava nerzhaveyushhej stali 20X23H18 pri ciklicheskom deformirovanii]. *Materialovedenie — Inorganic Materials: Applied Research*, 2013, no. 4, pp. 34–39.

[4] Gromov V.E., Ivanov Y.F., Grishunin V.A. Scale levels of structural and phase states and the fatigue life of the rail steel after electron-beam processing. [Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Grishunin V.A. Masshtabnye urovni strukturno-fazovyx sostoyanij i ustalostnaya dolgovechnost' rel'sovoj stali posle e'lektronno-puchkovoj obrabotki]. Uspexi fiziki metallov — Progress in metal physics, 2013, Vol. 14, no. 1, pp. 67–80.

[5] Gromov V.E., Grishunin V.A., Ivanov Y.F., Konovalov S.V. Nature increase the fatigue life of the rail steel electron beam processing problems. [Gromov V.E., Grishunin V.A., Ivanov Yu.F., Konovalov S.V. Priroda uvelicheniya ustalostnoj dolgovechnosti rel'sovoj stali e'lektronnopuchkovoj obrabotkoj]. Problemy chernoj metallurgii i materialovedeniya – Ferrous metallurgy

ВЕСТНИК ВГУ. СЕРИЯ: ФИЗИКА. МАТЕМАТИКА. 2014. № 4

and materials science, 2012, no. 4, pp. 49–56.

[6] Ivanov Y.F., Koval N.N., Gorbunov S.V., Vorobyev S.V., Konovalov S.V., Gromov V.E. Cycle fatigue of stainless steel treated with high-intensity electron beam: the structure of the surface layer. [Ivanov Yu.F., Koval N.N., Gorbunov S.V., Vorobev S.V., Konovalov S.V., Gromov V.E. Mnogociklovaya ustalost' nerzhaveyushhej stali, obrabotannoj vysokointensivnym e'lektronnym puchkom: struktura poverxnostnogo sloya]. *Izvestiya vysshix uchebnyx zavedenij. Fizika – Russian Physics Journal*, 2011, no. 5, pp. 61–69.

[7] Sizov V.V., Gromov V.E., Ivanov Y.F., Vorobyev S.V., Konovalov S.V. Formation and evolution of grain structure of stainless steel with an electron-beam processing and high-cycle fatigue. [Sizov V.V., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vorobev S.V., Konovalov S.V. Formirovanie i e'volyuciya zerennoj struktury nerzhaveyushhej stali pri e'lektronno-puchkovoj obrabotke i mnogociklovoj ustalosti]. Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya - Fundamental problems of modern materials science, 2012, Vol. 9, no. 2, pp. 136–140.

[8] Krishtall M.M., Yasnikov I.S., Polunin V.I. Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis in the examples of practical application. [Krishtall M.M., Yasnikov I.S., Polunin V.I. Skaniruyushhaya e'lektronnaya mikroskopiya i rentgenospektral'nyj mikroanaliz v primerax prakticheskogo primeneniya]. Moscow: Publishinghouse "Texnosfera", 2009, 208 p.

Алсараева Крестина Владимировна, аспирант кафедры физики им. проф. В.М. Финкеля ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», Новокузнецк, Российская Федерация E-mail: alsaraeva\_kv@physics.sibsiu.ru Teл.: 8(3843)-78-43-67

Иванов Юрий Федорович, доктор физикоматематических наук, профессор, главный научный сотрудник Института Сильноточной электроники СО РАН, Томск, Российская Федерация E-mail: yufi55@mail.ru

Громов Виктор Евгеньевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики им. проф. В.М. Финкеля ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», Новокузнецк, Российская Федерация E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Тел.: 8(3843)-78-43-66

Петрикова Елизавета Алексеевна, аспирант Института Сильноточной электроники СО РАН, Томск, Российская Федерация E-mail: elizmarkova@yahoo.com Teл.: 8(3822)-49-17-13 Alsaraeva Krestina Vladimirovna, Postgraduate student of the Department of Physics, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation E-mail: alsaraeva\_kv@physics.sibsiu.ru Tel.: 8(3843)-78-43-67

Ivanov Yurii Fedorovich, doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Chief Researcher of the High Current Electronics Institute of the Siberian Branch of the RAS, Tomsk, Russian Federation E-mail: yufi55@mail.ru

Gromov Victor Evgenyevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Physics of the Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru Tel.: 8(3843)-78-43-66

Petrikova Elizaveta Alekseevna, Post-graduate student of the High Current Electronics Institute of the Siberian Branch of the RAS, Tomsk, Russian Federation E-mail: elizmarkova@yahoo.com Tel.: 8(3822)-49-17-13 Многоцикловая усталость силумина: структура, фазовый и элементный состав...

Коновалов Сергей Валерьевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры физики им. проф. В.М. Финкеля ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», Новокузнецк, Российская Федерация E-mail: konovalov@physics.sibsiu.ru

Тел.: 8(3843)-78-43-67

Konovalov Sergei Valeryevich, Ph.D., professor of the Department of Physics of the Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation E-mail: konovalov@physics.sibsiu.ru Tel.: 8(3843)-78-43-67