

**ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ В ЖИДКОМ И ТВЕРДОМ  
СОСТОЯНИИ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ И КОМПЛЕКС  
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИЛУМИНОВ**

*Изучено влияние физико-химических способов воздействия на расплав и термоциклирования в твердом состоянии на структуру и механические свойства сплава Al-18%Si(B-Sn). В работе использован один из новейших методов изучения механических свойств сплава – индентирование. С помощью этого метода определен деформационный рельеф, износ, сила трения и пластическая деформация поверхности образцов сплава Al-18%Si(B-Sn).*

*Ключевые слова: заэвтектические силумины, физико-химическая обработка, термоциклирование, твердость, дорожка трения, износ.*

*Вивчено вплив фізико-хімічних способів впливу на розплав і термоциклювання в твердому стані на структуру і механічні властивості сплаву Al-18%Si(B-Sn). У роботі використаний один з найновітніших методів вивчення механічних властивостей сплаву – індентування. За допомогою цього методу визначений деформаційний рел'єф, знос, сила тертя і пластична деформація поверхні зразків сплаву Al-18%Si(B-Sn).*

*Ключові слова: заэвтектичні силуміни, фізико-хімічна обробка, термоциклювання, твердість, смуга тертя, знос.*

*The influence of physical - chemical methods on the melt and thermal cycling in the solid state on the hypereutectic silumin structure has been studied at present work. The mechanical properties of alloy Al-18% Si (B-Sn) were studied. For researching mechanical properties was used one of the new investigation methods - indentation. The deformation relief, wear, friction force and plastic deformation of the alloy samples Al-18%Si(B-Sn) were determined by using this method.*

*Keywords: hypereutectic silumins, physical and chemical treatment, thermocycling, hardness, path of friction, wear.*

**Введение.** В настоящее время в современном, динамично развивающемся мире появляется большое количество принципиально новых технически сложных устройств, происходит усовершенствование и усложнение уже существующих при постоянно ужесточающихся требованиях к ним, что приводит к необходимости повышения их эксплуатационных характеристик. Следовательно, интенсификация разработок технологических процессов, обеспечивающих получение качественных изделий с однородной структурой и повышенными механическими свойствами весьма актуальна.

Заэвтектические силумины - литейные сплавы на основе алюминия, обладающие хорошими литейными свойствами, высоким модулем упругости, низким температурным коэффициентом линейного расширения, хорошей свариваемостью и обрабатываемостью резанием при сравнительно невысокой стоимости. [1]. С целью улучшения структуры и механических

свойств силуминов, их подвергают модифицированию, физико-химическому воздействию на расплав и термической обработке в твердом состоянии [2, 3].

**Цель работы:** исследование закономерностей структурообразования, механических свойств и износостойкости заэвтектического силумина Al-18%Si(B-Sn) в зависимости от условий охлаждения и физико-химической обработки в жидком и твердом состояниях

**Материал и методики.** Объектом исследования в настоящей работе служили образцы заэвтектического силумина, химический состав которого приведен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав исследуемого силумина

Марка сплава	Химические элементы, %					
	Si	Fe	Mn	Mg	B-Sn	Al
AK18	18.0	0.3	0.2	0.3	0.05	основа

Для выявления общей микроструктуры образцы травили 0,5% водным раствором плавиковой кислоты с последующей промывкой в струе проточной воды. Исследование микроструктуры осуществляли с помощью оптического микроскопа “Neophot-21”. Микротвердость фаз и структурных составляющих определяли с помощью микротвердомера ПМТ-3 по стандартной методике. Твердость сплава определяли методом Бринелля. Испытания на трение и износ по схеме «шар-диск» проводились на машине трения «Micron-tribo». Профилограммы с 2-D изображениями и 3-D изображения дорожки трения получены на «Микрон-альфа».

В качестве методов физико-химической обработки расплава выбраны водородная и гидроциркуляционная обработки, осуществляемые по методике чл.-корр. НАНУ Г.П.Борисова [2] на оборудовании ФТИМС НАНУ.

Термоциклирование в твердом состоянии проводили в пять циклов в интервале температур 475-485°С. Режимы обработки приведены в таблице 2.

Таблица 2

Режимы обработки сплава AK18

Режимы обработки сплава AK18(B-Sn)	№ обр.
исходный сплав медленно охлажденный	1
исходный сплав медленно охлажденный после термоциклирования	2
30 мин гидроциркуляционной обработки с последующим медленным охлаждением	3
30 мин гидроциркуляционной обработки с последующим быстрым охлаждением и термоциклированием	4
20 мин водородной обработки с последующим медленным охлаждением	5
20 мин водородной обработки с последующим медленным охлаждением и термоциклированием	6
40 мин водородной обработки с последующим быстрым охлаждением	7
40 мин водородной обработки с последующим быстрым охлаждением и термоциклированием	8

**Результаты исследований.** В данной работе изучена структура, фазовый состав и механические свойства заэвтектического силумина АК18(B-Sn) после физико-химической обработки в жидком и твердом состоянии в соответствии с табл. 2.

Основные фазы и структурные составляющие модифицированного сплава АК18 – кремниевый твердый раствор ( $\beta$ -Si), эвтектика -  $\alpha$ -Al- $\beta$ -Si и алюминиевый твердый раствор ( $\alpha$ -Al). Легирующие элементы и примеси образуют интерметаллидные фазы, которые с помощью металлографического анализа и травления идентифицированы [3] как интерметаллиды типа  $(\text{FeMn})_3\text{Si}_2\text{Al}_{15}$ .

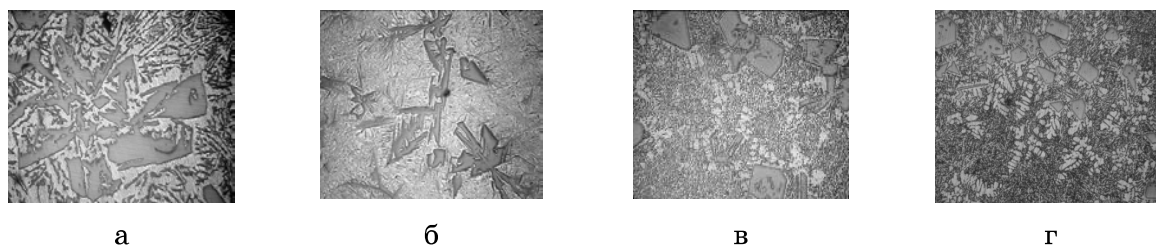


Рисунок 1 – Микроструктура сплава АК18(B-Sn) в исходном состоянии (а) и после обработок (б-в) по режимам, представленным в табл. 2:  
а – 1; б – исходный сплав, ускоренное охлаждение; в – 4; г – 8

Анализ микроструктур образцов (рис.1) свидетельствует о том, что с увеличением скорости охлаждения наблюдается уменьшение размеров первичных кристаллов  $\beta$ -Si твердого раствора и их существенное разветвление (рис. 1, а, б). Наблюдается также уменьшение сечений эвтектических кристаллов кремния и межпластинчатого расстояния в эвтектике  $\alpha$ -Al +  $\beta$ -Si, морфология эвтектики сохраняется пластинчатой. Гидроциркуляционная (рис. 1, в) и водородная (рис. 1, г) обработка наряду с термоциклированием также приводит к изменению форм и размера кристаллов первичного и эвтектического кремниевого твердого раствора, повышению дифференцированности эвтектики, появлению псевдопервичных дендритов алюминиевого твердого раствора ( $\alpha$ -Al).

Исследуемый сплав используют для изготовления поршней двигателей внутреннего сгорания, работающих в условиях циклических нагрузений. При нагружении в процессе эксплуатации на поверхности поршня формируется деформационный рельеф (ДР). ДР обусловлен явлениями, сопровождающими пластическое деформирование поверхностных слоев – образованием полос скольжения, экструзии, интрузии, ротациями дислокационной структуры [4].

Для количественной оценки усталостного повреждения поликристаллических материалов авторами [4] предлагается использовать параметр D, который характеризует насыщенность поверхностного слоя следами ДР. Если площадь контролируемой поверхности равна A, а часть этой поверхности площадью S занимает ДР, то:

$$D=S/A \quad (1)$$

Определяющим фактором формирования ДР является локальное пластическое деформирование, обусловленное дислокационными

механизмами. Дислокации, двигаясь по линиям скольжения в направлении действия максимальных напряжений, выходят на свободную поверхность, что приводит к образованию ступенек и полос сдвига. Формирование ступеньки сдвига приводит к элементарному изменению рельефа поверхности и соответственно к увеличению ее площади. Таким образом, формирование ДР должно сопровождаться увеличением площади поверхности.

Важной характеристикой прочности сплава является пластическая деформация поверхности  $\varepsilon$ , равная

$$\varepsilon = \rho h / A, \quad (2)$$

где  $h$  – средняя высота ДР, характеризующая износостойкость сплава.

Площадь контролируемой поверхности равна  $A$  и для всех испытываемых образцов одинакова.

На рисунках 2 - 4 приведены микрофотографии, профилограммы с 2-D изображениями и 3-D изображения дорожки трения образцов сплава АК18(В-Sn) в зависимости от режимов физико-химической и термической обработки.

В таблице 3 приведены структурные параметры сплава АК18(В-Sn) в зависимости от режимов обработки: количественное соотношение первичных кристаллов  $\beta$ -Si твердого раствора и эвтектики  $\alpha$ -Al- $\beta$ -Si, линейные размеры первичных кристаллов  $\beta$ -Si твердого раствора и сечений кристаллов эвтектического кремниевого твердого раствора. Анализ данных таблицы 3 свидетельствует о том, что гидроциркуляционная обработка приводит к увеличению количества первичных кристаллов  $\beta$ -Si твердого раствора в среднем на 14% и уменьшению количества эвтектической составляющей на 2% в сравнении с исходным сплавом.

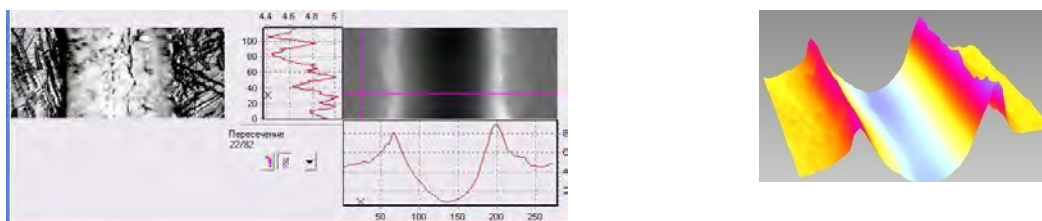


Рисунок 2 – Микроструктура, профилограммы с 2-D изображениями и 3-D изображения дорожки трения исходного сплава АК18(В-Sn) медленно охлажденного

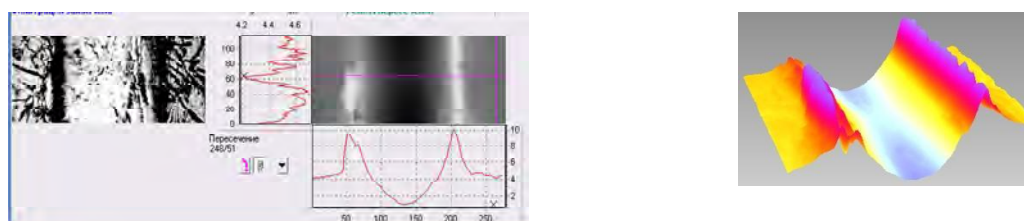


Рисунок 3 – Микроструктура, профилограммы с 2-D изображениями и 3-D изображения дорожки трения сплава АК18(В-Sn) после 30 мин гидроциркуляционной обработки с последующим медленным охлаждением и термоциклированием

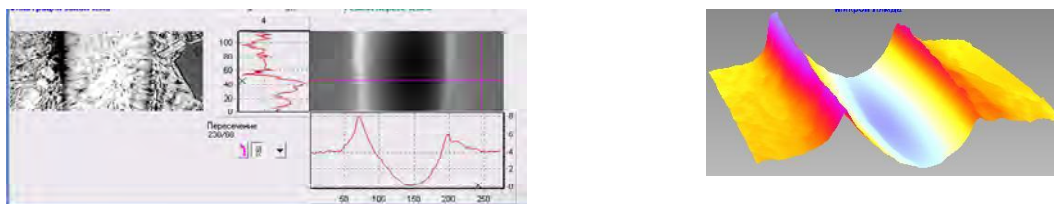


Рисунок 4 – Микроструктура, профілограмми с 2-D изображениями и 3-D изображения дорожки трения сплава АК18(В-Sn) после 40 мин водородной обработки с последующим быстрым охлаждением и термоциклированием

Таблица 3

Структурные параметры сплава АК18(В-Sn) в зависимости от режимов обработки

№ обр	ср. % структурных составляющих		линейные размеры, мкм		
	% перв. крист. $\beta$ -Si	% эвт. $\alpha$ -Al- $\beta$ -Si	перв. крист. $\beta$ -Si	эвтектич. Si	межпл. расстояние в эвтектике
1	10	90	245,5	88,5	17,28
2	7,73	92,27	194	32,5	9,92
3	11,4	88,6	255,8	82,6	19,41
4	12	88	193	29,6	9
5	6,33	93,67	158,1	67,2	11,95
6	6	94	108	60	12,3
7	6,48	93,52	103,9	27,1	5
8	6,2	93,8	70	14,6	7

В тоже время водородная обработка уменьшает количество первичных кристаллов  $\beta$ -Si твердого раствора в среднем на 36% и увеличивает количества эвтектики на 3% в сравнении с исходным сплавом. Гидроциркуляционная обработка расплава на линейные размеры первичных кристаллов  $\beta$ -Si твердого раствора практически не влияет. Водородная обработка расплава существенно уменьшает линейные размеры первичных кристаллов  $\beta$ -Si твердого раствора и эвтектического кремния в среднем на 23-35%. Термоциклирование в твердом состоянии дополнительно уменьшает линейные размеры кристаллов  $\beta$ -Si твердого раствора и эвтектического кремния на 58-84% в сравнении с исходным состоянием. Водородная обработка существенно снижает межпластинчатое расстояние в эвтектике в среднем на 30%, термоциклирование дополнительно уменьшает этот параметр в среднем на 58%. Минимальные структурные параметры формируются при водородной обработке расплава в течение 40 мин с последующим быстрым охлаждением и термоциклировании, при этом количество эвтектической составляющей максимально.

В таблицах 4-5 приведены механические свойства и параметры трения и износа сплава АК18(В-Sn) в зависимости от вида физико-химической обработки в жидком состоянии и термической обработки в твердом. Наблюдается четкая зависимость между структурными параметрами, механическими свойствами и параметрами трения и износа. Анализ

данных табл. 4 свидетельствует, что термоциклирование исследуемого сплава повышает твердость на 43%, прочность на 43%, микротвердость  $\beta$ -Si твердого раствора на 74%, эвтектики на 142%, повышая параметр D и пластическую деформацию поверхности  $\epsilon$ . Гидроциркуляционная обработка сплава и термоциклирование дополнительно повышают твердость сплава в сравнении с исходным состоянием на 105%, прочность на 136%, микротвердость  $\beta$ -Si твердого раствора на 29%, эвтектики на 94%, при этом параметры трения и износа понижаются. Водородная обработка расплава в течение 20мин с последующим медленным охлаждением практически не меняет механические свойства сплава и понижает параметры трения и износа в сравнении с исходным состоянием. Увеличение продолжительности водородной обработки до 40мин с последующим быстрым охлаждением и термоциклированием обеспечивает повышение твердости на 27%, прочности на 65%, микротвердости  $\beta$ -Si твердого раствора на 40%, эвтектики на 316% и снижение параметров трения и износа, что обусловлено структурными параметрами сплава, количественным соотношением эвтектической составляющей и первичных кристаллов  $\beta$ -Si твердого раствора, а также перераспределением легирующих элементов между фазами и структурными составляющими в процессе обработки [3].

Таблица 4

Механические характеристики сплава АК18(B-Sn)  
в зависимости от режима обработки

№ обр.	Твердость сплава, НВ	Прочность $\sigma_B$ , МПа	Микротвердость $\beta$ -Si, МПа	Микротвердость эвтектики, $\alpha$ -Al+ $\beta$ -Si, МПа
1	75,9	99	6600	165
2	109	141,7	11546	400
3	156	234	8514	321
4	130	195	7789	315
5	81	105,3	6600	147
6	155	201	9842	724
7	72,5	94,25	7380	186
8	126	163,8	9292	687

Таблица 5

Характеристики износа и трения сплава АК18(B-Sn)  
в зависимости от режима обработка

Режимы обработки сплава АК18(B-Sn)	Глубина дорожки Н, мкм	Сила трения F, г	Насыщенность поверхностного слоя следами ДР, D	пластическая деформация поверхности, $\epsilon$
1	3,7	17	0,42	0,061
2	4	20	0,48	0,067
3	3,4	11	0,46	0,056
4	4,1	13	0,44	0,068
5	2,9	22	0,34	0,044
6	4	16	0,42	0,66
7	3	18	0,38	0,061
8	4	15	0,37	0,48

Таким образом анализ экспериментальных данных позволяет рекомендовать для формирования благоприятной структуры и улучшения свойств водородную обработку в течении 40 минут с дальнейшим быстрым охлаждением и термоциклированием в твердом состоянии. Такие параметры обработки обеспечивают высокую прочность сплава наряду с сопротивлением материала к разрушению. Данная обработка обеспечивает высокую микротвердость структурных составляющих, а параметры трения и износа минимальны.

**Выводы.** Изучена структура, фазовый состав, механические свойства, параметры трения и износа сплава АК18(B-Sn) в зависимости от режимов физико-химической обработки расплава и термоциклирования в твердом состоянии. Показано, что:

- гидроциркуляционная и водородная обработка расплава наряду с термоциклированием в твердом состоянии приводит к изменению количественного соотношения первичных кристаллов  $\beta$ -Si твердого раствора и эвтектики  $\alpha$ -Al+ $\beta$ -Si, формы и размера первичных и эвтектических кристаллов кремниевого твердого раствора, повышению дифференцировки эвтектики, появлению дендритов псевдопервичного алюминиевого твердого раствора ( $\alpha$ -Al);

- наблюдаемые структурные изменения обеспечивают улучшение комплекса механических свойств и снижение параметров трения износа;

- полученные экспериментальные данные позволяют рекомендовать для практического использования водородную обработку в течении 40 минут с дальнейшим быстрым охлаждением и термоциклирование в твердом состоянии при 475-485°C в течение 5 циклов для улучшения комплекса механических свойств и снижения параметров трения износа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов: Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1979.- 640 с.
2. Борисов Г.П. Водородная обработка расплава – как метод снижения водородной пористости отливок из алюминиевых сплавов// Водородная обработка материалов. – Донецк, ДонГТУ, 2001. – с. 202-204.
3. Куцова В.З., Носко О.А., Купчинська А.О. Вплив фізичних способів обробки розплаву на мікромеханічні властивості  $\beta$ -Si твердого розчину та механічні властивості сплаву типу АК18 // машинознавство. – Львів. – 2013. – с. 25-30.
4. Мониторинг выработки усталостного ресурса летательных аппаратов: монография/ С.Р. Игнатович, М.В. Карускевич. – К.: НАУ, 2014. – 260с.
5. Куцова В.З., Носко О.А., Купчинская А.О. Улучшение структуры и свойств силумина АК18(B-Sn) путем водородной обработки и термоциклирования // Металлургическая и горнорудная промышленность. - №2 – 2015. – с. 75-80.