

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ СИЛУМИНОВ, ПРЕССОВАННЫХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

О.В. Гусакова<sup>1)</sup>, В.В. Рубаник<sup>2)</sup>, В.Г. Шепелевич<sup>3)</sup>, В.К. Фролов<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Международный государственный экологический институт им. А.Д. Сахарова  
Белорусского государственного университета,  
ул. Долгобродская 23/1, Минск 220070, Беларусь, ol.gusakova@gmail.com

<sup>2)</sup>Институт технической акустики НАН Беларуси,  
пр. Генерала Людникова 13, Витебск 210009, Беларусь, v.v.rubanik@tut.by

<sup>3)</sup>Белорусский государственный университет,  
пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь, Shepelevich@bsu.by

В работе представлены результаты исследований быстрозатвердевших фольг заэвтектических силуминов, легированных Fe, Cu, Ni, Mn, Mg, являющихся исходным материалом для изготовления порошков, а также прессованных образцов из данных порошков. При высокоскоростном затвердевании, реализуемом в методе сверхбыстрой закалки из расплава, затвердевание протекает с образованием равноосных включений, как первичного кремния, так и эвтектического. Обнаружено, что частицы порошка имеют дискообразную форму. В связи с дискообразной формой и широким спектром размеров частиц порошка прессование без предварительной обработки ультразвуком приводит к неоднородной структуре материала. Установлено, что максимальное влияние на твердость оказывает применение предварительной обработки ультразвуком.

**Ключевые слова:** силумины; сверхбыстрая закалка; порошки; прессование; ультразвук.

## STRUCTURE AND PROPERTIES OF RAPIDLY SOLIDIFIED SILUMINS PRESSED UNDER THE INFLUENCE OF ULTRASOUND

O.V. Gusakova<sup>1)</sup>, V.V. Rubanik<sup>2)</sup>, V.V. Shepelevich<sup>3)</sup>, V.K. Frolov<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University,  
23/1 Dolgobrodskaya Str., 220070 Minsk, Belarus, ol.gusakova@gmail.com

<sup>2)</sup>Institute of technical acoustics of the National academy of sciences of Belarus,  
13 Generala Lyudnikova Ave., 210009 Vitebsk, Belarus, v.v.rubanik@tut.by

<sup>3)</sup>Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus,  
Shepelevich@bsu.by

The paper presents the results of studying of rapidly solidified foils of hypereutectic silumins alloyed with Fe, Cu, Ni, Mn, Mg, which are the initial material for the production of powders, as well as pressed samples from these powders. During high-speed solidification, implemented in the method of ultra-fast quenching from the melt, solidification occurs with the formation of equiaxed inclusions of both primary and eutectic silicon. It was found that the powder particles have a disk-shaped shape. The reason for this shape of the particles is the relatively high plasticity of the material. More than half of the particles have sizes less than 1  $\mu\text{m}$ , but the volume fraction of particles larger than 10  $\mu\text{m}$  is 90%, while the average ratio of the maximum to minimum particle size is 5x1. Due to the disk-shaped shape and a wide range of powder particle sizes, pressing without preliminary ultrasound treatment leads to a non-uniform structure of the material. It has been established that the use of preliminary ultrasonic treatment has the maximum effect on hardness.

**Keywords:** silumins; ultra-fast quenching; powders; pressing; ultrasound.

### Введение

Увеличение объемов производства алюминиевых сплавов вызвано расширением сфер их применения и увеличением доли, прежде всего, в автомобильной и авиационной индустрии. Ожидается, что

наибольшая часть прироста будет приходить на литьевые алюминиевые сплавы, среди которых наиболее перспективны заэвтектические силумины [1]. Сплавы Al-Si с содержанием кремния выше 12 масс.% обладают низким коэффициен-

том термического расширения и повышенной фрикционной износостойкостью. При этом сплав, получаемый при традиционных методах литья, имеет повышенную хрупкость. Улучшение механических свойств силуминов достигается при использовании различных модификаторов (P, Na, Sc и др.), а также за счет увеличения скорости кристаллизации [2, 3]. Повышение скорости охлаждения расплава до  $10^6$  К/с, реализуемое в методе сверхбыстрой закалки из расплава, обеспечивает измельчение структурных составляющих до наноразмерного уровня, что приводит к увеличению микротвердости в 2-3 раза [3, 4].

Целью настоящей работы является исследование возможности изготовления материала прессованием порошка, полученного из быстрозатвердевшей фольги заэвтектических силуминов.

### Материалы и методы исследования

Представлены результаты исследования двух сплавов: Al-18Si-Fe (Al-18.2Si-0.2Fe) и Al-21Si-M (Al-21.3Si-0.8Mg-0.3Mn-0.5Fe-0.6Ni-1.4Cu) (числа у элементов даны в массовых %). Фольга изготавливалась методом сверхбыстрой закалки из расплава при затвердевании тонкого слоя расплава на внутренней поверхности медного барабана.

Для изготовления порошка использовалась планетарная шаровая мельница компании Retsch модель PM100. Осуществлялся сухой помол в течение 2 ч. Прессование порошка на 4-х тонном ручном прессе проводилось при четырех режимах: 1 - исходный порошок, 2 – прессование под воздействием ультразвука, 3 – предварительная обработка ультразвуком и прессование без ультразвука, 4 - предварительная обработка ультразвуком (20 кГц, амплитуда 10-15 мкм в течение 1 ч) и прессование под воздействием ультразвука. Прессованные образцы подвергались спеканию в вакууме при 500 °C в течение 7 ч.

### Результаты и их обсуждение

На рисунке 1 представлены СЭМ изображения микроструктуры и карты распределения кремния фольги сплава Al-18Si-Fe.

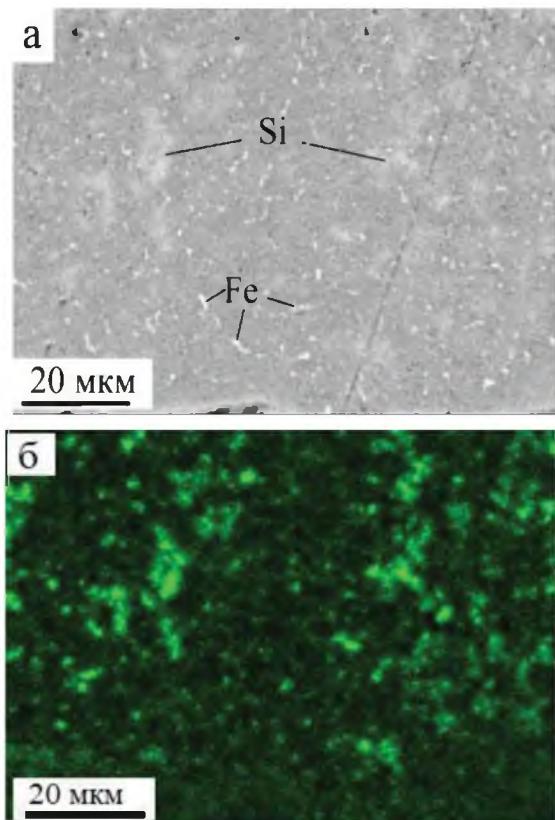


Рис. 1. Микроструктура (а) и карта распределения Si (б) фольги сплава Al-18Si-Fe

На рисунке 2 приведены общий вид микроструктуры фольги сплава Al-21Si-M и распределение Si в участке, приведенном на выноске.

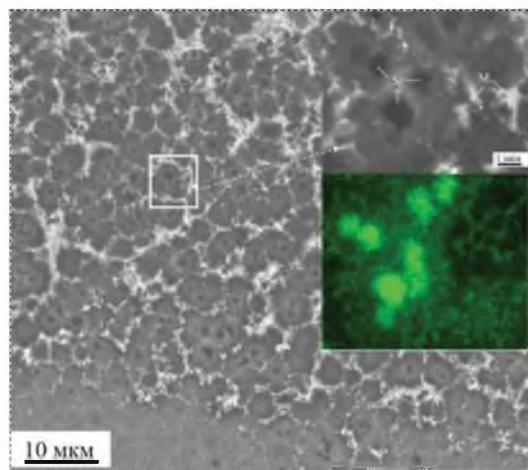


Рис. 2. Микроструктура и карта распределения Si фольги сплава Al-21Si-M

При высокоскоростном затвердевании, реализуемом в методе сверхбыстрой закалки из расплава, затвердевание протекает с образованием равноосных включений как первичного кремния, так и эвтектического. Средние значения параметров микроструктуры фольги приведены в табл. 1.

Табл. 1. Средние значения размеров зерна  $d_g$ , включений первичного  $D_p$  и эвтектического  $d_s$  Si

| Сплав      | $d_g$ , мкм | $D_p$ , мкм | $d_s$ , мкм |
|------------|-------------|-------------|-------------|
| Al-18Si-Fe | 7.4         | 2.3         | 0.4         |
| Al-21Si-M  | 5.3         | 1.6         | 0.3         |

Установлен механизм модификации микроструктуры при одновременном воздействии высокоскоростного затвердевания и многокомпонентного легирования [4].

Обнаружено, что частицы порошка имеют дискообразную форму. Причиной такой формы частиц является сравнительно высокая пластичность материала.

На рисунке 3 приведено изображение частиц порошка, полученных помолом фольги.

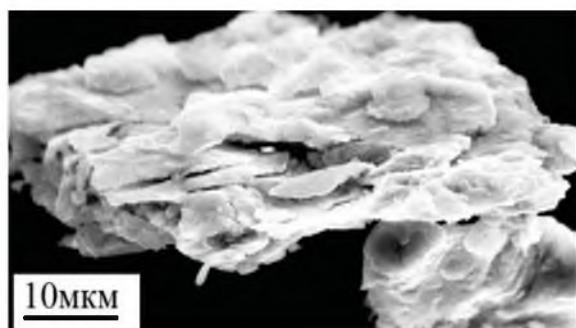


Рис. 3. Структура частиц порошка сплава Al-18Si-Fe

Более половины частиц имеют размеры менее 1 мкм, однако объемная доля частиц размером более 10 мкм составляет 90%, при этом среднее соотношение максимального размера частицы к минимальному 5x1.

В связи с дискообразной формой и широким спектром размеров частиц порошка прессование без предварительной обработки ультразвуком приводит к неоднородной структуре материала. На рисунке 4 приведены СЭМ изображения микроструктуры сплава

структур сплава после различных режимов обработки.

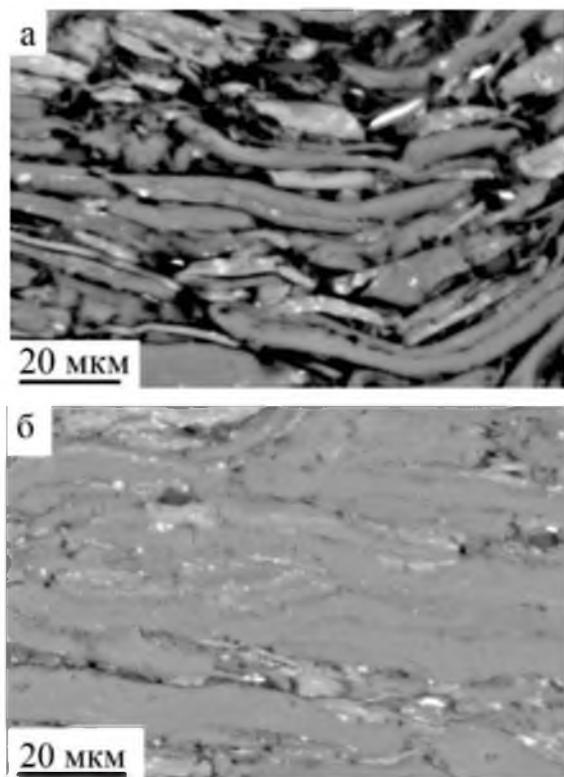


Рис. 4. СЭМ изображения микроструктуры сплава Al-18Si-Fe: а - прессование без воздействия ультразвука, б – прессование под воздействием ультразвука и последующее спекание

Установлено, что максимальное влияние на твердость оказывает применение предварительной обработки ультразвуком (рис. 5).

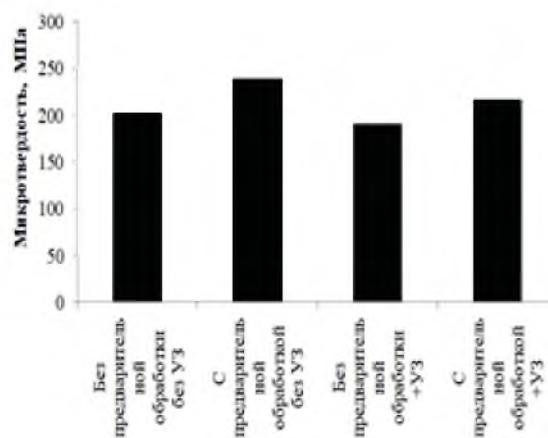


Рис. 5. Микротвердость прессованных порошков заэвтектических силуминов

Таким образом, показана эффективность воздействия ультразвука при получении массивных изделий из порошков

быстро затвердевших силуминов технологией порошковой металлургии.

### **Библиографические ссылки**

1. Рязанов С.Г., Митяев А.А., Волчок И.П. Повышение качества вторичных силуминов. *Литье и металлургия* 2003; 3: 90-96.
2. Шляпцева А.Д., Петров И.А., Ряховский А.П. Комплексное модифицирование промышленных силуминов. *Металлургия черных, цветных и редких металлов* 2021; 1(36): 4-10.
3. Apaydin N. and Smith R.W. Microstructural Characterization of Rapidly Solidified Al-Si Alloys. *Materials Science and Engineering* 1988; 98:149-152.
4. Шепелевич В.Г., Гусакова О.В., Гусакова С.В. Микроструктура заэвтектического силумина при высокоскоростном затвердевании. *Физика металлов и металловедение*. 2025; 126(3): 305-315.