

## СПОСОБ УПРОЧНЕНИЯ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ АЭРОТЕРМОАКУСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ В АВИА- И РАКЕТОСТРОЕНИИ

Калугина М.С.<sup>1\*</sup>, Ремшев Е.Ю.<sup>1\*\*</sup>, Данилин Г.А.<sup>1</sup>,  
Воробьева Г.А.<sup>1\*\*\*</sup>, Тельнов А.К.<sup>2\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> Балтийский государственный технический университет “Военмех” им. Д.Ф. Устинова,  
ул. 1-я Красноармейская, 1, Санкт-Петербург, 190005, Россия

<sup>2</sup> Техмаш СПб,

Приморский проспект 137, корп 1, офис 352Н, Санкт Петербург, 197374, Россия

\* e-mail: mash-kalugin@yandex.ru

\*\* e-mail: remshev@mail.ru

\*\*\* e-mail: Labmetcontrol@inbox.ru

\*\*\*\* e-mail: aleks.telnov@tehmachspb.ru

Исследуется возможность использования аэротермоакустической обработки для повышения механических свойств литейных и деформируемых алюминиевых сплавов; выявлено влияние на формирование микроструктуры сплава. Приведены экспериментальные данные, показывающие, что использование технологии аэротермоакустической обработки обеспечивает существенное повышение прочности сплавов при сохранении или небольшом снижении пластичности. Рассмотрен метод акустической эмиссии (АЭ), который используется для оценки поведения материала при режимах статического и квазистатического нагружения. Данный метод позволяет обнаружить и зарегистрировать только развивающиеся дефекты.

*Ключевые слова:* аэротермоакустическая обработка, метод акустической эмиссии, термическая обработка, микроструктура, механические свойства, надежность.

### Введение

Конструкция летательного аппарата (ЛА) должна воспринимать все внешние силовые и тепловые нагрузки, действующие на ЛА в течение всего периода эксплуатации, при этом не терять своей способности нормально функционировать при минимальном весе самой конструкции, т. е. обладать высокой работоспособностью.

Требование высокой несущей способности и минимальной массы конструкции противоречиво. Повышение несущей способности конструкции, как правило, приводит к увеличению ее массы, ухудшению летно-технических характеристик или повышению стоимости разработки, изготовления и эксплуатации ЛА.

Обычно при оценке несущей способности элементов конструкции по прочности материала пользуются значениями пределов текучести и прочности, полученными посредством испытания образцов.

Доля алюминиевых сплавов, используемых в авиационном производстве, высока. В авиа- и ракетостроении широкое применение находят изделия, изготовленные из легких сплавов (алюминиевые, титановые, магниевые сплавы и т. д.), кото-

рые применяются для производства емкостей, баков и корпусов летательного аппарата. В авиа- и ракетостроении используются как литейные, так и деформируемые алюминиевые сплавы.

Большинство деталей из алюминиевых сплавов, производится методом литья. Широкое применение нашли такие литейные алюминиевые сплавы, как силумины — сплавы, содержащие более 5% Si [25]. Силумины обладают широким спектром физико-химических свойств: низким коэффициентом линейного расширения, повышенным модулем упругости, коррозионной стойкостью, высокой технологичностью при литье, что способствует их применению в качестве материала для деталей различного назначения. Вместе с тем не всегда достаточный уровень прочности ограничивает их применение для деталей нагруженных изделий. Химический состав некоторых сплавов приведен в табл. 1. Широкое распространение получил эвтектический силумин марки АК12 [1]. Сплав термической обработкой не упрочняется, применяют его в литом состоянии или после отжига [27] для отливок сложной формы, от которых не требуется высокие механические свойства (табл. 2).

Таблица 1

**Химический состав в % по массе алюминиевых сплавов**

Марка сплава	Основные компоненты				Примеси, не более	
	Mg	Si	Cu	Mn	Fe	$\Sigma$ прим
АК12	-	10-13	-	-	0,8-1,5	2,2-2,8
АК 7ч	0,2-0,4	6,0-8,0	-	-	0,3-1,0	1,0-1,9

Таблица 2

**Механические свойства литейных алюминиевых сплавов**

Марка сплава	Термическая обработка	Механические свойства		
		$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$
		МПа		%
АК 12	T2 (отжиг, температура нагрева 300 °С, выдержка 5–10 часов)	180	90	5
АК7ч	T4 (закалка, температура нагрева 535...545 °С, выдержка 3 часа, охлаждение в воде с температурой 40...100 °С)	200	140	5
	T5 (закалка и старение при 150 °С, 2...3 часа)	220	160	3

При более высоких требованиях к механическим свойствам применяют доэвтектические силумины, в том числе и сплав АК7ч [2], упрочняемый термической обработкой. Однако во многих случаях уровень механических свойств силуминов и после упрочняющей термической обработки оказывается недостаточным для потребителя.

Детали из АК7 рассчитаны на эксплуатацию при температуре не выше 200 °С, но среди прочих силуминов он получил широкое распространение в авиационной и автомобильной промышленности. Из него изготавливают ответственные массивные детали, работающие под нагрузкой, детали самолётов, карбюраторов. Как и АК12, этот силумин обрёл широкое применение при изготовлении корпусов насосов и различных приборов. Но несмотря на хорошие показатели деталей, изготовленных из этого сплава под нагрузкой, для изготовления антифрикционных деталей оправданно применять АК7ч.

Алюминиевые деформируемые сплавы обладают более высокими механическими свойствами. Основной легирующей добавкой, увеличивающей прочностные характеристики алюминиевых сплавов, является медь [26]. Дюралюмины — высокопрочные сплавы, упрочняемые термической обработкой, используются для изготовления сборных оболочек корпусов ЛА, представляющих собой жесткие обшивки из достаточно жесткого листового материала, которые должны сопротивляться нормальным и касательным силам, а также работать на все виды нагрузки.

Дюралюмины основаны на системе алюминий-медь-магний-марганец-кремний-железо. Химический состав дюралюмина Д1 представлен в табл. 3.

Таблица 3  
**Химический состав деформируемых алюминиевых сплавов**

Марка сплава	Содержание элементов в % по массе					
	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Al
Д1	3,8-4,8	0,4-0,8	0,4-1,0	0,2-0,7	до 0,7	91,7-95,5

Применение ультразвукового воздействия на жидкие и твердые металлы [8—10] при механической обработке [11—15] и поверхностном упрочнении [16—18] является перспективным и прогрессивным направлением в современной технологии, позволяющим повысить производительность обработки, качество и надежность изделий. Эффективным способом повышения эксплуатационных характеристик изделий является ультразвуковое упрочнение (УЗУ) [28], реализуемое в том числе свободными шариками, которые хаотично перемещаются под действием ультразвукового поля. Обработка производится в специальной рабочей камере [19]. При ультразвуковом упрочнении положительный эффект (формирование в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений и его упрочнение) достигается за счет многократности микросоударений при отсутствии заданной траектории, что позволяет упрочнять тонкостенные детали сложной конфигурации и обеспечивает более равномерный характер поверхностной деформации [13]. В процессе УЗУ поверхностный слой подвергается пластической деформации-наклепу. При этом повышается сопротивление деформации и твердость поверхности, изменяется микрогеометрия поверхности, уменьшается количество микроконцентраторов

напряжений, меняются величина и знак остаточных напряжений. Глубина и степень наклёпа в значительной мере влияют на прочность деталей. УЗУ свободными шариками приводит к формированию в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений в образцах из титановых сплавов ВТ 9 от 4 до 450...500 МПа с глубиной залегания 250...350 мкм [20]. При этом область максимальных напряжений располагается на некотором расстоянии от поверхности. Известно, что прохождение ультразвуковых волн через кристалл вызывает активацию дислокаций [22]. При пластическом деформировании в ультразвуковом поле часть активированных дислокаций становится подвижной, что вызывает локализованную пластическую деформацию.

Исследования [20, 22] позволили установить, что ультразвуковое упрочнение свободными шариками титановых сплавов ВТ3-1, ВТ9 и ОТ4 сопровождается дроблением блоков мозаики, значительным развитием микроискажений и увеличением плотности дислокаций. Изменение размеров блоков, а также уменьшение микроискажений при УЗУ связаны с поглощением акустической энергии в местах элементарных пластических сдвигов, что приводит к локальному нагреву, снятию напряжений, разблокировке дислокаций, увеличению их подвижности. Все эти факторы, характеризующие в общем разупрочняющее действие ультразвука, способствуют также более равномерной пластической деформации в процессе упрочнения. Анализ интегральных интенсивностей линий  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз отожженного сплава ОТ4 показывает, что ультразвуковое упрочнение сопровождается  $\beta \rightarrow \alpha$  превращениями. Распад метастабильной  $\beta$ -фазы под воздействием пластической деформации приводит к изменению характера эпюр остаточных напряжений, что объясняется различной плотностью фаз. Как известно, высокоскоростная и квазистатическая деформации по-разному воздействуют на кристаллическую решетку. При высокоскоростной деформации имеет место перераспределение влияния отдельных факторов на физико-механические характеристики материала. Поэтому ультразвуковое упрочнение характеризуется более мелкозернистой структурой и высокой плотностью дислокаций. Электронно-микроскопические исследования показали, что максимальный распад  $\beta$ -фазы наблюдается на поверхности образца и достигает глубины 100 мкм.

Равномерное распределение дислокаций по объему металла обеспечивает однородное поглощение механической энергии в процессе деформирования, а увеличение плотности дислокаций приводит к возрастанию средней величины поглощенной

энергии. Этому, в частности, способствует УЗУ, приводящее к повышению общей энергоемкости поверхностного слоя и, как следствие, увеличению циклической прочности.

Таким образом, ультразвуковое упрочнение значительно повышает усталостную прочность титановых сплавов (до 48%). При этом зона зарождения усталостной трещины смещается под поверхность [20].

Результаты металлографических исследований, проведенных на образцах из сплава ВТ-6, показали: глубина упрочненного поверхностного слоя не более 0,02 мм, со степенью наклёпа 7—15% [23]. Каких-либо структурных изменений на поверхности в месте упрочнения не наблюдается. По результатам исследования остаточных напряжений можно судить об упрочнении поверхностного слоя на глубину до 100 мкм.

### Материалы, технологии обработки и методы исследования

Аэротермоакустическая обработка (АТАО) — принципиально новая, на основе современных достижений газовой динамики, теплофизики, аэроакустики и физики твердого тела, технология направленного изменения структуры и физико-механических свойств металлов и сплавов [1]. АТАО представляет собой термическую обработку, осуществляемую определенным образом в сильном акустическом поле звуковых частот широкого диапазона. Включает в себя нагрев обрабатываемых деталей до некоторой температуры с последующим охлаждением металла до отрицательной температуры в пульсирующем потоке газа при наличии мощных акустических полей в диапазоне частот 700—2500 Гц и уровне звукового давления более 160 дБ [5].

Чтобы понять механизм влияния АТАО на материалы, необходимо установить связь параметров их поведения под нагрузкой (механических свойств) с характером и плотностью несовершенства кристаллического строения, величиной зерна, объемной долей и распределением вторых фаз, появляющихся в материале после АТАО [4].

Отливки из сплава АК7ч для повышения прочности подвергают закалке (Т4), после чего выдерживают длительное время при комнатной температуре, т.е. такая обработка (Т4) соответствует закалке и естественному старению. Более высокие механические свойства обеспечиваются закалкой и старением при температурах 150...175 °С (Т5). После термообработки по этим режимам механические свойства сплава АК12 и модифицированного сплава АК7ч АЛ9) приводятся в табл. 5 [3].

АТАО проводилась в процессе стандартной технологической обработки или после нее. На стандартных литых образцах из модифицированного сплава АК7ч были проведены механические испытания на статическое растяжение; контролировалось изменение твердости сплавов в результате воздействия нескольких видов стандартной термической обработки (СТО) и АТАО по оптимальным режимам. Часть образцов подвергалась СТО; какие-то образцы дополнительно нагревались до определенных температур, а затем охлаждались в разных средах: одни на спокойном воздухе (чтобы оценить влияние нагрева на механические свойства), другие — по технологии АТАО.

Исследование алюминиевого сплава Д1 проводилось на плоских образцах, изготовленных из листового проката, испытанием на статическое растяжение. Результаты эксперимента даны в табл. 4.

ниевого сплава АК7 в исходном состоянии и после АТАО, реализованной по двум схемам: АТАО1 и АТАО2 (давление в камере резонатора  $p = 0,9$  и  $0,7 \times 10^5$  соответственно), регистрировались сигналы АЭ. Зависимость суммарной акустической эмиссии  $N - \Delta l$ , мм, представлена на рис. 1. Критериями оценки состояния материала может служить момент регистрации сигналов АЭ, свидетельствующий о начале процесса пластической деформации в зоне концентрации напряжений (локальная пластическая деформация), и значительная суммарная АЭ, соответствующая ускоренному развитию пластической деформации (развитию трещины).

Повышенное количество  $N$  (АЭ) при испытании сплава в исходном состоянии фиксируется при существенно меньшей деформации ( $\Delta l = 0,3$  мм) по сравнению со сплавом, прошедшим АТАО

Таблица 4

Влияние АТАО на механические свойства сплавов Д1

Вид заготовки	Вид термической обработки	Дополнительная обработка		Обработка АТАО	Механические Свойства			
		Температура нагрева, °С	Время выдержки		$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	НВ
Лист	Закалка С 500°С, охл. в воде	20, старение	5 суток	-	410-420	240-260	20-22	71-75
	Закалка С 500°С, охл. в воде	220, старение	1,5 часа	-	420-430	300	16-18	77-78
	Закалка С 500°С	220, старение	1 час	охлаждение в потоке воздуха + акустическое поле	485-492	395-400	12-14	79-80
	Закалка С 500°С	20, старение	5 суток		440-455	290-294	26-28	75-76

Метод акустической эмиссии (АЭ) используется для оценки поведения материала при режимах статического и квазистатического нагружения, при которых нагрузка медленно возрастает либо постоянна. Метод АЭ позволяет обнаружение и регистрацию только развивающихся дефектов. Это дает возможность использовать полученные результаты для оценки состояния объекта по параметрам сигналов АЭ для широкого диапазона реальных условий нагружения, включая работу при постоянной нагрузке (режим реальной эксплуатации), прочностные испытания промышленных объектов (гидро- и пневмоиспытания), а также при стандартных испытаниях материалов на статическое растяжение. Для оценки поведения материала используются целый ряд параметров АЭ, в том числе такие, как амплитуда сигнала АЭ, количество сигналов АЭ и др. [7].

В процессе механических испытаний на статическое растяжения образцов из литейного алюми-

( $\Delta l = 0,5$  мм). Ускорение темпа возрастания сигналов АЭ в сплаве, прошедшем АТАО, также происходит при большей величине деформации (рис. 1). Характер развития процесса разрушения, свойственный хрупким материалам, связан с большим числом сигналов АЭ и скоростью их нарастания перед разрушением. Сплав АК12 обладает повышенной хрупкостью как в исходном состоянии, так и после АТАО, но повышение прочности и некоторое увеличение пластичности, связанное с измельчением структурных составляющих, обеспечивает и повышение надежности материала, что подтверждает и характер изменения сигналов АЭ в процессе механических испытаний.

Таким образом, метод акустической эмиссии позволяет оценить особенности поведения сплавов под нагрузкой и выявить влияние АТАО на их механические свойства [5].

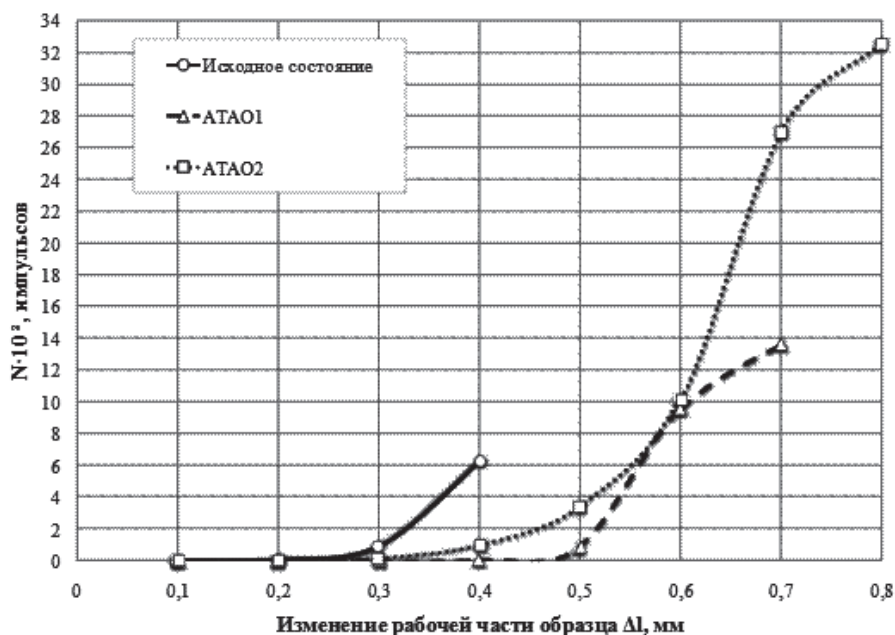


Рис. 1. Зависимость суммарной акустической эмиссии  $N$  от величины деформации  $\Delta l$ , мм

**Результаты и обсуждение**

Режимы обработки и результаты механических испытаний представлены в табл. 5.

Как видно из приведенных результатов, наиболее существенное повышение прочности по сравнению с исходными свойствами (предел прочнос-

Таблица 5

**Влияние АТАО на механические свойства сплавов АК12 и АК7ч**

Марка сплава	Вид термической и других видов обработки	Дополнительная обработка		Обработка АТАО	Механические свойства			
		Температура нагрева, °С	Время выдержки, мин (среда охлаждения)		$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta, \%$	НВ
АК12	Стандартная, Т2	-	-	-	120-130	80-90	1,5-2	50-55
	Стандартная, Т2	300	15 (воздух)	-	110-120	70-85	2,0-2,5	45-50
	Стандартная, Т2	400	10 (воздух)	-	100-110	70-80	2,0-2,5	47-49
	Стандартная, Т2	300	15	поток воздуха + акустическое поле	182-190	112-122	2,0-2,5	64-66
		400	10		171-182	116-125	2,0-2,5	62-64
		480	10		165-180	103-116	2,2-2,8	68-61
АК7ч	Стандартная, Т4	20	96 часов (воздух)	-	190-200	115-120	3,5-5,0	74-78
	Стандартная, Т4	Старение 150	2 часа (воздух)	-	195-205	120-125	3,0-4,0	75-79
	Стандартная, Т4	4(200)	15	поток воздуха + акустическое поле	195-205	105-112	7,0	63-67
	Стандартная, Т4	300	15		270-289	195-203	2,8-3,2	95-98
	УЗО расплава в металлической форме; стандартная, Т4 без УЗО	Старение 175	1 час (воздух)	-	210	180	5	-

ти и условный предел текучести возрастают на 50% и 35% соответственно, при некотором повышении пластичности) происходит при предварительном нагреве сплава АК12 при температуре 300°C с последующим охлаждением по режимам АТАО. После обработки АТАО предел прочности немодифицированного силумина равен аналогичной характеристике модифицированного силумина, а условный предел текучести выше на ~30%, пластичность при этом снижается с 5% до 2,5%.

Прочность сплава АК7ч, предварительно закаленного, максимально возрастает, если температура предварительного нагрева соответствует 300°C с последующим охлаждением по технологии АТАО. Предел прочности и условный предел текучести возрастают соответственно на 40% и 60% при снижении пластичности на 1%.

При снижении температуры нагрева до 200°C прочность после АТАО практически не меняется, а пластичность возрастает более чем в два раза по сравнению со свойствами, полученными после СТО.

Из табл. 4 следует, что применение АТАО деформируемого сплава Д1 обеспечивает повышение прочности как при естественном старении (20 °С, 5 суток) закаленного дюралюмина ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$  возрастают на 10%, 20% и 4% соответственно), так и при искусственном старении (220 °С, 1 ч). Так, при

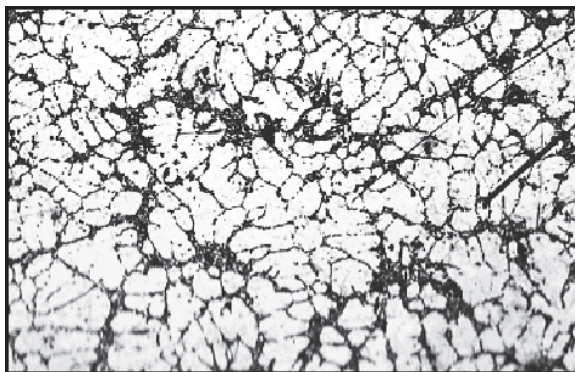
искусственном старении  $\sigma_B$  и  $\sigma_{0,2}$  возрастают на 15% и 30% соответственно,  $\delta$  снижается на 4%.

Микроструктура сплава АК7ч после СТО (рис. 2, а, б) и обработки АТАО (рис. 2, в, г) изучалась с помощью оптического металлографического микроскопа. Применение АТАО, как видно из рис. 2, в, г, приводит к измельчению кристаллов твердого раствора (в несколько раз возрастает число мелких кристаллов), более равномерному перераспределению и измельчению эвтектики, особенно кристаллов кремния.

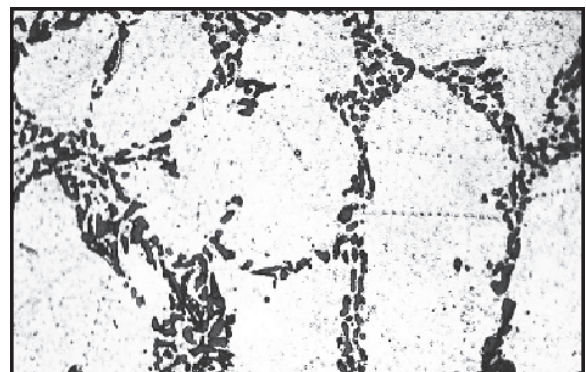
Структура сплава после СТО представляет собой достаточно крупные зерна  $\alpha$ -твердого раствора с фазами, выделяющимися при старении, и неравномерно распределенной эвтектикой по границам зерен. Кристаллы кремния в эвтектике имеют часто грубую игольчатую форму. Микроструктура сплава в продольном и поперечном сечении образцов практически одинакова. Структура поверхностного слоя сплава не отличается от структуры центра.

После АТАО изменяется микроструктура сплава: измельчаются зерна  $\alpha$ -твердого раствора, изменяется количество, характер распределения эвтектики, размер и форма кристаллов кремния.

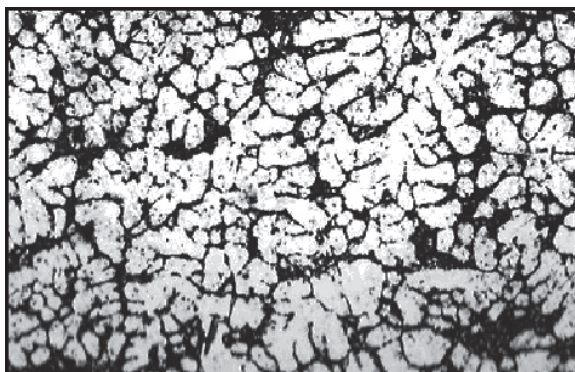
При этом кристаллы  $\beta$ -твердого раствора характеризуются повышенной травимостью, что приводит к появлению хаотически распределенных мел-



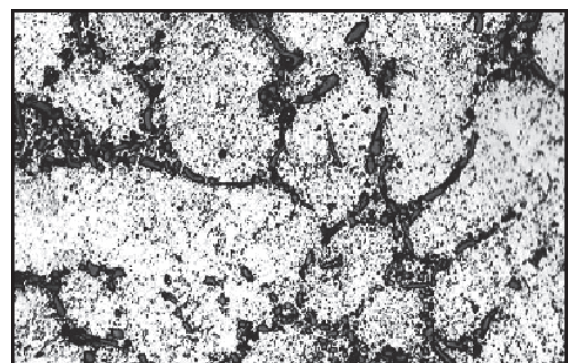
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Микроструктура сплава АК7ч: а (х50) и б (х250) — СТО; в (х50) и г (х250) — АТАО

ких ямок травления. На наличие повышенной плотности дефектов кристаллического строения в сплаве после АТАО по сравнению со СТО (рис. 3, а, б) указывает и исчезновение полосчатого контраста на микроструктурах, полученных во вторичных электронах (рис. 3, в, г), обусловленного кристаллографическим поглощением сканирующего электронного луча при различной угловой расходимости. Причиной отмеченных явлений может быть образуемая в результате воздействия АТАО субзернистая структура, состоящая из слабоориентированных фрагментов зерен. Но так как физическое уширение рентгеновских линий невелико, то, очевидно, что дислокации преимущественно сосредоточены в малоугловых границах. Увеличение протяженности границ раздела способствует развитию эвтектической реакции, т.е. площадь и объём эвтектической составляющей возрастает с 20 до 25%.

Применение ультразвуковой обработки расплава (УЗО) при кристаллизации способствует приближению к условиям формирования недендритной структуры, измельчению зерна, что обеспечивает повышение механических свойств [6]. Таким образом, влияние АТАО на формирование структуры в определенной степени аналогично влиянию УЗО. Сплав АК7ч чаще подвергают закалке и старению при 150°С, так как эта обработка обеспечивает наибольший эффект упрочнения. У дисперсионно твердеющих алюминиевых сплавов при искусствен-

ном старении в пересыщенном твердом растворе образуются скопления атомов легирующих элементов — кластеры. Кластеры легко зарождаются по всему объему матричного твердого раствора. При искусственном старении кластеры со временем приобретают достаточно большие размеры и обнаруживаются структурными методами. Старение при температуре 20°С протекает в ограниченном объеме, что и определяет менее значительный эффект упрочнения (см. рис. 2, а, б); если естественному старению предшествует обработка АТАО, то при той же продолжительности естественного старения (96 ч) количество выделяющейся дисперсной фазы намного возрастает (см. рис. 2, в, г). Это и обуславливает рост прочности сплава после этой обработки. Ускорение процессов дисперсионного твердения в сплаве связано с значительным ростом скорости диффузии и, вероятно, определяется как ростом числа вакансий, так и перераспределением дислокаций под влиянием проводимой АТАО, а также измельчением фаз и увеличением протяженности границ раздела фаз. Равномерное распределение в матрице упрочняющей фазы, повышенная дисперсность эвтектики и хрупкой фазы, входящей в её состав, обеспечивают достаточный запас вязкости сплава.

АТАО является эффективной технологией, технологический процесс и технологическое оборудование отличаются простотой и надежностью, обо-

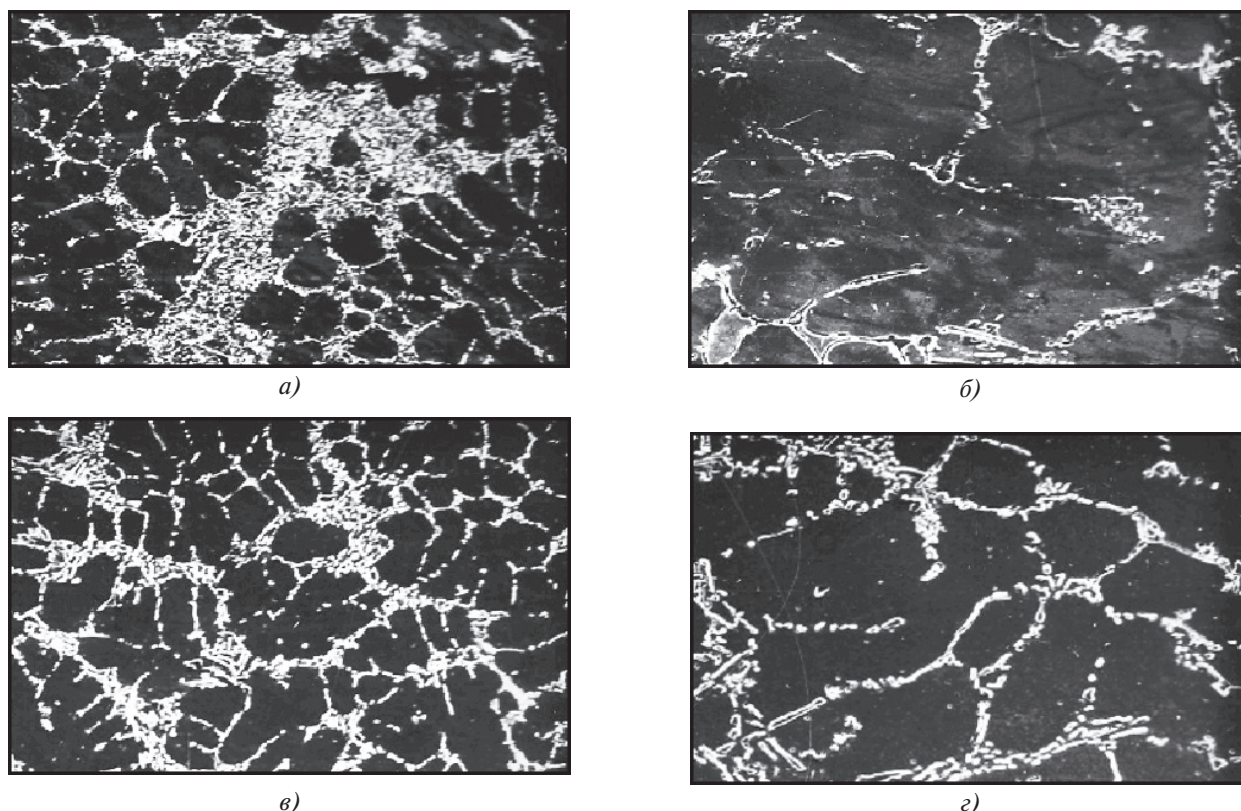


Рис. 3. Структура сплава АК7ч во вторичных электронах: а (x100) и б (x200) — СТО; в (x100) и г (x200) — АТАО

рудование совместимо со стандартными электрическими нагревательными печами. Процесс обработки легко может быть автоматизирован и использован в соответствующих производственных линиях, обработка может осуществляться крупными партиями. Работа оборудования доступна на любом промышленном предприятии, даже при низком давлении газа в сети ( $p < 4$  атм).

В ООО «Техмаш СПб» реализуется проект печей с контролируемой атмосферой, в которых будет встроены блок для АТАО. Данная конструкция печи может быть рекомендована для применения отжига (снятие наклёпа), низкотемпературного отжига, высокотемпературного отпуска. Наличие защитного газа в печи позволит заменить старые окислительные печи и исключить участки травления, которые приводят к значительным временным и материальным затратам. В охлаждающий участок будут встраиваться газоструйный генератор звука, сопло и камера для проведения АТАО.

## Выводы

Применение АТАО дает возможность в ~ 1,4 раза повысить прочность литых сплавов системы Al—Si—Mg практически при сохранении пластичности на исходном уровне или небольшом снижении; также наблюдается существенное сокращение времени выдержки.

Повышены прочностные характеристики высокопрочного алюминиевого сплава Д1 без существенной потери пластических свойств материала.

Выявлено влияние АТАО на структуру и свойства алюминиевых литейных сплавов, которое может быть связано с протеканием при обработке процессов микропластической деформации и частичной рекристаллизации, с ускорением диффузионных процессов, что и обеспечивает измельчение зерен твердого раствора. Установлено существенное влияние на свойства перераспределения и уменьшение макро- и микронапряжений в материале.

## Библиографический список

1. Осими О., Ганиев И.Н., Назаров Х.М., Бердиев А.Э. Влияние сурьмы на кинетику окисления сплава АК12 в твердом состоянии // Доклады Академии Наук Республики Таджикистан. 2013. Т. 56. № 10. С. 805-810.
2. Мосин А.И., Склямина А.В., Шутов И.В., Орлова Н.А., Кривилев М.Д. Взаимосвязь микроструктуры и термодинамических характеристик сплавов Al-Si с различным содержанием кремния // Вестник удмуртского университета. Серия: Физика и Химия. 2014. №4-3. С. 23-29.
3. Воробьева Г.А., Ремшев Е.Ю. Анализ влияния режимов аэротермоакустической обработки стали 40X на параметры акустической эмиссии // Металлы. 2016. № 2. С. 24-28.
4. Ремшев Е.Ю., Данилин Г.А., Воробьева Г.А., Силаев М.Ю. Обеспечение эксплуатационной надежности упругих элементов акустическими методами // Металлург. 2015. № 3. С. 48-51.
5. Калугина М.С., Ремшев Е.Ю., Данилин Г.А., Воробьева Г.А., Пехов В.А. Комбинированный термоакустический способ модификации структуры титанового сплава // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 2. С. 185-196.
6. Погорелов Ю.А., Ляшко Ф.Е. Исследование процесса и результатов ультразвуковой обработки металлов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4(2). С. 469-474.
7. Беспалов Д.А., Воробьева Г.А., Данилин Г.А., Ремшев Е.Ю. Организация входного контроля качества пружин, изготавливаемых из титанового сплава // Металлообработка. 2016. № 1(91). С. 41-47.
8. Абрамов В.О., Абрамов О.В., Артемьев В.В., Градов О.М., Коломеец Н.П., Приходько В.М., Эльдарханов А.С. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении. — М.: Янус-К, 2006. — 687 с.
9. Абрамов О.В. Воздействие мощного ультразвука на жидкие и твердые металлы. — М.: Наука, 2000. — 311 с.
10. Ватолин Н.А., Пастухов Э.А. Воздействие низкочастотными звуковыми колебаниями в режиме кавитации на металлические расплавы и порошки // Технология металлов. 2004. № 1, с. 2-8. № 2, с. 2-6.
11. Ким Чанг Сик. Технологические и структурные закономерности ультразвуковой финишной и упрочняющей обработки конструкционных и инструментальных материалов: Дис. ... канд. техн. наук. — М.: Моск. гос. индустр. ун-т, 2005. — 25 с.
12. Круглов В.В., Сорокин В.М., Пучков В.П. Электрофизикохимические и комбинированные методы обработки: Учеб. пособие. — Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т, 1998. — 93 с.
13. Марков А.И. Ультразвуковая обработка материалов. — М.: Машиностроение, 1980. — 237 с.
14. Марков А.И., Ивкин Е.И., Бекренев Н.В. Ультразвуковая интенсификация процессов сверления глубоких отверстий в труднообрабатываемых материалах // СТИН. 1996. № 12. С. 23-27.
15. Холопов Ю.В. О некоторых особенностях безабразивной ультразвуковой финишной обработки металлов // Металлообработка. 2002. № 2. С. 46-48.
16. Осипенкова Г.А., Филимонов И.Е., Драчева Л.А. Отделочно-упрочняющая обработка наружной цилиндрической поверхности ультразвуковыми крутильными колебаниями инструмента // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов.— Донецк: ДонНТУ, 2008. Вып. 36. С. 134-142.



17. Осипенкова Г.А., Пегашкин В.Ф., Филимонов И.Е. Повышение износостойкости деталей поверхностным пластическим деформированием с помощью ультразвуковых крутильных колебаний // Вестник машиностроения. 2009. № 2. С. 74-75.
18. Приходько В.М. Ультразвуковые технологии при производстве и ремонте техники. — М.: Техполиграфцентр, 2000. — 252 с.
19. Вологин М.Ф., Калашиников В.В., Нерубай М.С., Штриков Б.Л. Применение ультразвука и взрыва при обработке и сборке. — М.: Машиностроение, 2002. — 264 с.
20. Александров М.К., Паншева Н.Д., Акушская О.М. Ультразвуковое упрочнение деталей ГТД // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. 2011. № 3-1(27). С. 271-275.
21. Тяпунина Н.А., Силис М.И., Подсобляев Д.С., Бушуева Г.В., Богуненко В.Ю. Поперечное скольжение винтовой дислокации в поле неподвижной дислокации и в ультразвуковом поле // Материаловедение. 2003. № 11. С. 2-8.
22. Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентгенографический и электронографический анализ металлов. (Практическое руководство по рентгенографии, электронографии и электронной микроскопии): учеб. пособие для вузов. — М.: Металлургиздат, 1963. — 256 с.
23. Коновалов Д.И., Ширваньянц Г.Г. Метод ультразвукового упрочнения поверхностей узлов и деталей авиационных газотурбинных двигателей как одна из перспективных технологий в авиастроении // Молодой ученый (Казань). 2015. № 22(102). С. 141-147.
24. Libby C.C. Sonic Reveting of Aircraft Aluminum Alloys // IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics. 1969. Vol. 16. No. 3, pp. 117-125. DOI: 10.1109/T-SU.1969.29513
25. Wang F., Liu H., Ma Y., Jin Y. Effect of Si content on the dry sliding wear properties of spray-deposited Al-Si alloy // Materials & Design. 2004. Vol. 25. No. 2, pp. 163-166. DOI: 10.1016/j.matdes.2003.08.005
26. Muratoglu M., Aksoy M. The effects of temperature on wear behaviours of Al-Cu alloy and Al-Cu/SiC composite // Materials Science and Engineering: A. 2000. Vol. 282. No. 1-2, pp. 91-99. DOI: 10.1016/S0921-5093(99)00767-4
27. Cho S.S., Chun B.S., Won C.W., Kim H.K., Lee B.S., Yim K.H., Eom S.H., Baek H., Song B.J., Suryanarayana C. Microstructure and mechanical properties of rapidly solidified hypereutectic Al-Si and Al-Si-Fe alloys // Journal of Materials Synthesis and Processing. 1998. Vol. 6. No. 2, pp. 123-131.
28. Singh R., Khamba J.S. Investigation for ultrasonic machining of titanium and its alloys // Journal of Materials Processing Technology. 2007. Vol. 183. No. 2-3, pp. 363-367. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.10.026

## A METHOD OF LIGHT ALLOYS REINFORCING BY AERO-THERMOACOUSTIC TREATMENT FOR AEROSPACE INDUSTRY

Kalugina M.S.<sup>1\*</sup>, Remshev E.Yu.<sup>1\*\*</sup>, Danilin G.A.<sup>1</sup>, Vorob'eva G.A.<sup>1\*\*\*</sup>, Tel'nov A.K.<sup>2\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> Baltic State Technical University "Voenmeh" named after D.F. Ustinov,  
1, Krasnoarmeiskaya str., Saint Petersburg, 190005, Russia

<sup>2</sup> Tekhmash SPb,  
137, build. 1, Primorsky av., office 352N, Saint Petersburg, 197374, Russia

\* e-mail: mash-kalugin@yandex.ru

\*\* e-mail: remshev@mail.ru

\*\*\* e-mail: Labmetcontrol@inbox.ru

\*\*\*\* e-mail: aleks.tel'nov@tehmachspb.ru

### Abstract

The article studies the possibility of developing technological basics of higher mechanical properties of aluminum casting alloys ensuring, and wrought aluminum alloy while employing aero-thermoacoustic treatment (ATAT).

The share of aluminum alloys employed in aviation industry is high. Thus, both casting and wrought alloys find application in aerospace industry. Casting aluminum alloys are used for containers and tanks production. In machine building such casting aluminum alloys as silumin are widely spread.

Aluminum wrought alloys present great interest, due to their higher mechanical properties. They are used for aircraft hulls manufacturing. The above said alloys are employed for manufacturing prefabricated shells of aircraft hulls, representing rigid encasements of rather rigid sheet material, which should resist normal and tangent forces and carry all types of loads.

ATAT employing enables increasing the strength of silumins about 1.4 times, practically with preserving elasticity at the initial level or its slight reduction. Significant holding time reduction was observed as well.

The article studies ways of increasing strength characteristics of extra-high tensile wrought aluminum

alloy without significant loss of plastic properties of the material.

The article studies ways of increasing strength characteristics of high-strength wrought aluminum alloy without significant loss of plastic properties of the material.

The ATAT effect on the structure and properties of aluminum casting alloys was revealed, which could be associated with the process of micro-plastic deformation and partial recrystallization while treatment, with diffusion processes acceleration, which ensures grinding of solid solution grains. The redistribution and reduction of macro and microstrains in the material significantly affects its properties.

**Keywords:** aero-thermoacoustic treatment, acoustic emission method, thermal treatment, microstructure, mechanical properties, reliability.

## References

- Osimi O., Ganiev I.N., Nazarov Kh.M., Berdiev A.E. *Doklady Akademii Nauk Respubliki Tadjikistan*, 2013, vol. 56, no. 10, pp. 805-810.
- Mosin A.I., Sklyamina A.V., Shutov I.V., Orlova N.A., Krivilev M.D. *Vestnik udmurtskogo universiteta. Seriya: Fizika i Khimiya*, 2014, no. 4-3, pp. 23-29.
- Vorob'eva G.A., Remshev E.Yu. *Metally*, 2016, no. 2, pp. 24-28.
- Remshev E.Yu., Danilin G.A., Vorob'eva G.A., Silaev M.Yu. *Metallurg*, 2015, no. 3, pp. 48-51.
- Kalugina M.S., Remshev E.Yu., Danilin G.A., Vorob'eva G.A., Pekhov V.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 185-196.
- Pogorelov Yu.A., Lyashko F.E. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2011, vol. 13, no. 4(2), pp. 469-474.
- Bespalov D.A., Vorob'eva G.A., Danilin G.A., Remshev E.Yu. *Metalloobrabotka*, 2016, no. 1(91), pp. 41-47.
- Abramov V.O., Abramov O.V., Artem'ev V.V., Gradov O.M., Kolomeets N.P., Prikhod'ko V.M., El'darkhanov A.S. *Moshchnyi ul'trazvuk v metallurgii i mashinostroenii* (Powerful ultrasound in metallurgy and mechanical engineering), Moscow, Yanus-K, 2006, 687 p.
- Abramov O.V. *Vozdeistvie moshchnogo ul'trazvuka na zhidkie i tverdye metally* (Strong ultrasound effect in liquid and solid metals), Moscow, Nauka, 2000, 311 p.
- Vatolin N.A., Pastukhov E.A. *Tekhnologiya metallov*, 2004, no. 1 - pp. 2-8, no. 2, pp. 2-6.
- Kim Chang Sik *Tekhnologicheskie i strukturnye zakonomernosti ul'trazvukovoi finishnoi i uprochnyayushchei obrabotki konstruktivnykh i instrumental'nykh materialov* (Technological and structural regularities of ultrasonic finishing and hardening treatment of structural and tool materials). References of Doctor's thesis, Moscow, MGIU, 2005, 25 p.
- Kruglov V.V., Sorokin V.M., Puchkov V.P. *Elektrofizikokhimicheskie i kombinirovannye metody obrabotki* (Electrophysical chemical and combined methods of treatment), Nizhnii Novgorod, NGTU, 1998, 93 p.
- Markov A.I. *Ul'trazvukovaya obrabotka materialov* (Ultrasonic treatment of materials), Moscow, Mashinostroenie, 1980, 237 p.
- Markov A.I., Ivkin E.I., Bekrenev N.V. *STIN*, 1996, no. 12, pp. 23-27.
- Kholopov Yu.V. *Metalloobrabotka*, 2002, no. 2, pp. 46-48.
- Osipenkova G.A., Filimonov I.E., Dracheva L.A. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya, Sbornik statei*, Donetsk, Don-NTU, 2008, no. 36, pp. 134-142.
- Osipenkova G.A., Pegashkin V.F., Filimonov I.E. *Vestnik mashinostroeniya*, 2009, no. 2, pp. 74-75.
- Prikhod'ko V.M. *Ul'trazvukovye tekhnologii pri proizvodstve i remonte tekhniki* (Ultrasonic technology in machinery production and maintenance), Moscow, Tekhpolygon, 2000, 252 p.
- Vologin M.F., Kalashnikov V.V., Nerubai M.S., Shtrikov B.L. *Primenenie ul'trazvuka i vzryva pri obrabotke i sborke* (Ultrasound and explosion employing while treatment and Assembly), Moscow, Mashinostroenie, 2002, 264 p.
- Aleksandrov M.K., Papsheva N.D., Akushskaya O.M. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva*, 2011, no. 3-1(27), pp. 271-275.
- Tyapunina N.A., Silis M.I., Podsoblyayev D.S., Bushueva G.V., Bogunenkov V.Yu. *Materialovedenie*, 2003, no. 11, pp. 2-8.
- Gorelik S.S., Rastorguev L.N., Skakov Yu.A. *Rentgenograficheskii i elektronograficheskii analiz metallov* (X-ray and electron diffraction analysis of metals), Moscow, Metallurgizdat, 1963, 256 p.
- Konovalov D.I., Shirvan'yants G.G. *Molodoi uchenyi (Kazan)*, 2015, no. 22(102), pp. 141-147.
- Libby C.C. Sonic Revetting of Aircraft Aluminum Alloys. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, 1969, vol. 16, no. 3, pp. 117 - 125. DOI: 10.1109/T-SU.1969.29513
- Wang F., Liu H., Ma Y., Jin Y. Effect of Si content on the dry sliding wear properties of spray-deposited Al-Si alloy. *Materials & Design*, 2004, vol. 25, no. 2, pp. 163-166. DOI: 10.1016/j.matdes.2003.08.005
- Muratoplu M., Aksoy M. The effects of temperature on wear behaviours of Al-Cu alloy and Al-Cu/SiC composite. *Materials Science and Engineering: A*. 2000, vol. 282, no. 1-2, pp. 91-99. DOI: 10.1016/S0921-5093(99)00767-4
- Cho S.S., Chun B.S., Won C.W., Kim H.K., Lee B.S., Yim K.H., Eom S.H., Baek H., Song B.J., Suryanarayana C. Microstructure and mechanical properties of rapidly solidified hypereutectic Al-Si and Al-Si-Fe alloys. *Journal of Materials Synthesis and Processing*, 1998, vol. 6, no. 2, pp. 123-131.
- Singh R., Khamba J.S. Investigation for ultrasonic machining of titanium and its alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, vol. 183, no. 2-3, pp. 363-367. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.10.026

Редакторы *М.С. Винниченко, Е.Л. Мочина*  
Художественное оформление *В.И. Володиной, И.В. Романовой*  
Компьютерная верстка *О.Г. Лавровой*

Сдано в набор 9.04.18. Подписано в печать 1.06.18.  
Бумага писчая. Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 27,90. Уч.-изд. л. 30,00. Тираж 175 экз. Заказ 891/605.

Издательство МАИ  
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993  
Типография Издательства МАИ  
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993