

УДК 539.2:532.7:536.42:534.6

**СВЯЗЬ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ С ЛОКАЛЬНОЙ СТРУКТУРНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ В НЕРАВНОВЕСНОМ РАСПЛАВЕ АЛЮМИНИЯ**© 2019 г. В. Б. Воронцов<sup>а, \*</sup>, В. К. Першин<sup>а</sup><sup>а</sup>Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС),  
факультет естественных научных дисциплин, Екатеринбург, Россия

\*e-mail: vadimalumin2013@ya.ru

Поступила в редакцию 16.07.2018

После доработки 03.11.2018

Принята к публикации 11.12.2018

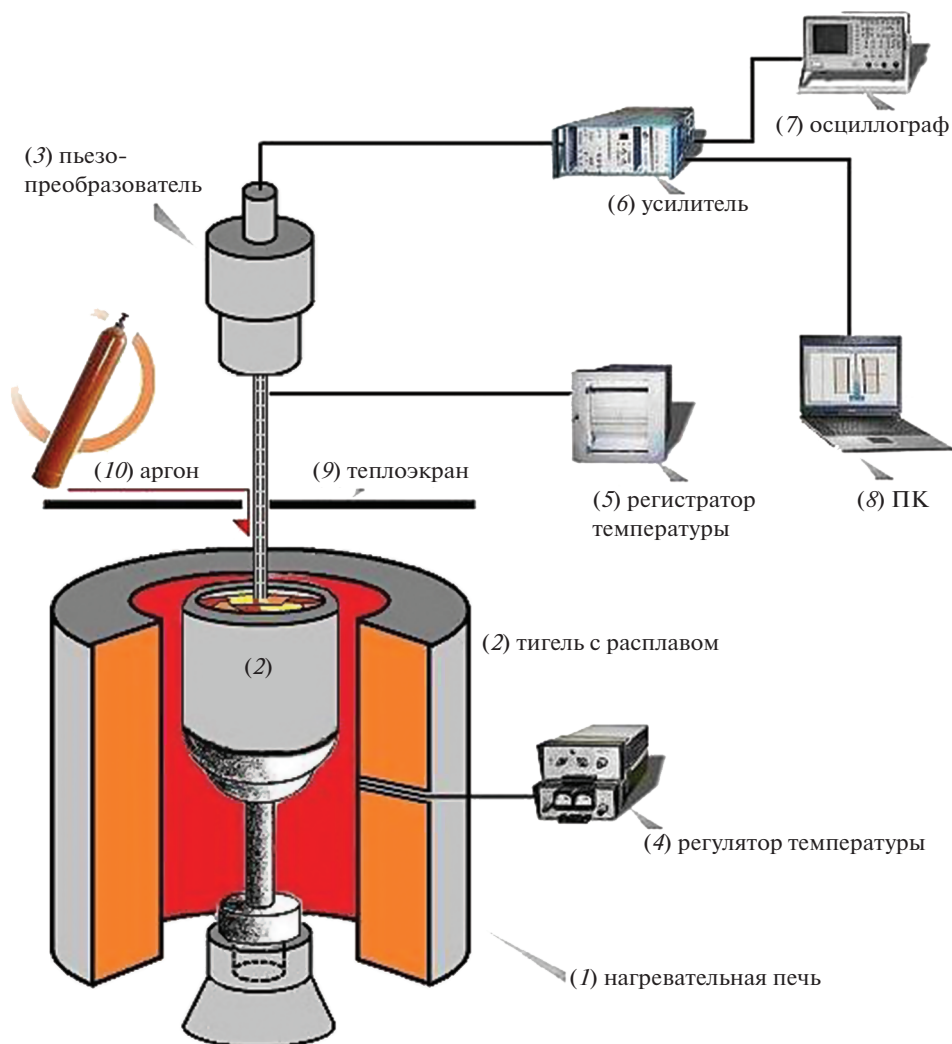
Получены и проанализированы экспериментальные результаты исследования зависимости энергии и числа сигналов акустической эмиссии (АЭ) от температуры расплава в интервале температур 680–860°С. Установлена связь акустической эмиссии со структурными изменениями в жидких металлах на примере расплава алюминия. Приведены модели кластеров.

*Ключевые слова:* кристаллическая структура, модель кластера, градиент температуры, расплав, металлы, акустика.

DOI: 10.1134/S0235010619040145

**ВВЕДЕНИЕ**

Настоящая работа посвящена экспериментальному обоснованию локально-кластерной модели строения “жидкой” фазы, возникающей на температурной оси вслед за упорядоченным состоянием, и обсуждению на ее основе причин способствующих образованию при охлаждении локального порядка в области глобального беспорядка. Сведения о том, что кристаллизация веществ, обладающих кристаллической структурой сопровождается акустической эмиссией (АЭ) известно давно [1–8]. Установление генетической связи твердой и жидкой фаз на основании анализа сигналов АЭ представляется важным условием, позволяющем на стадии подготовки расплава управлять структурой литья. Структура литья определяет его физические свойства, к тому же управлять структурой расплава температурным режимом проще, чем твердой фазой. Так как сигналы АЭ наблюдаются при фазовом превращении, появляется новая методика исследования жидко-твердого состояния, которая расширяет наши знания о механизме перехода жидкого в кристаллическое состояние. С практических позиций заниматься исследованием АЭ необходимо, потому что появляется новый, ранее не использовавшийся, рычаг воздействия на расплав в резонансе с частотами генерируемыми расплавом. Факт увеличения механических и других физических свойств литья введением в расплав ультразвука известен, но он является энергоемким и не нашел широкого использования. Введение ультразвука в резонанс с генерируемыми сигналами АЭ позволит достичь того же эффекта с меньшими энергетическими затратами. Выше перечисленные причины послужили основанием для получения информации о структурном состоянии расплава на основании Фурье-анализа акустических сигналов (АЭ), генерируемых расплавом в различных условиях. В качестве объекта исследования использован высокочистый алюминий в температурной области на 200° превышающей его температуру ликвидуса.



**Рис. 1.** Экспериментальная установка для исследования акустической эмиссии при плавлении и кристаллизации металлов.

### ЭКСПЕРИМЕНТ

Для решения поставленной задачи на установке (рис. 1) проведена серия экспериментов с расплавленным алюминием чистотой 99.999 в тигле из нитрида бора BN в атмосфере спектрально чистого аргона. Образцы алюминия массой 26 г подготавливали по размерам тигля.

После полного расплавления содержимого, в расплав вводился волновод в виде стержня из  $Al_2O_3$  со встроенной термопарой на половину высоты тигля. С холодного торца волновод находился в контакте с пьезоэлектрическим преобразователем (поз. 3 на рис. 1) (ПЭП) с частотным диапазоном 20–200 кГц.

На установке для поддержания постоянной температуры расплава во время эксперимента использовали высокоточный регулятор температуры (ВРТ) (поз. 4 на рис. 1). Регистрация температуры расплава проводилась прибором (ЭПП-09) (поз. 5 на рис. 1).

Сигналы АЭ по волноводу достигали ПЭП и, после усиления АФ, поступали на ПК (поз. 8).

Коэффициент усиления акустического тракта составлял 92 дБ ( $\kappa = 4 \cdot 10^4$ ).

В экспериментах температура расплава увеличивалась от температуры ликвидуса алюминия до 840°C с шагом 20°C. При каждой температуре расплав выдерживали 30 мин. Система автоматического контроля температуры поддерживалась с точностью  $\pm 4^\circ\text{C}$ . На ПК регистрировались сигналы АЭ из расплава в реальном масштабе времени.

Для анализа сигналов АЭ использовали программу JSVI [9] и MathCad [10].

Экспериментальные результаты вначале анализировались в аналоговой форме на ПК, затем:

1. для всех температур устанавливалось число сигналов АЭ, превышающих фон. На рис. 2 представлен типичный сигнал АЭ, сопровождающий плавление и его Фурье-анализ;

2. проводился Фурье-анализ всех сигналов АЭ для каждой температуры. В соответствии с результатами анализа, определялся коэффициент  $C_s$ , представляющий интегральную характеристику амплитуд  $A$  всех сигналов  $N$  определенной частоты  $f$

$$C_s = \frac{1}{T_0} \int_0^{\tau_0} f(\tau) e^{-i w_s \tau} d\tau, \quad (1)$$

$$w_s = s \cdot w_0 = \frac{2\pi S}{T_0}, \quad (2)$$

где:  $\tau_0$  – период сигнала, взятый за единицу,  $\tau$  – время,  $w_s$  – эквидистантные значения, рассчитанные для комплексного коэффициента Фурье для точек  $s = 0, 1, 2, \dots, (N - 1)$ .

По результатам анализа построены зависимости коэффициента Фурье  $C_s$  от частоты  $f$  для всех температур расплава (подобно тому, как это дано на рис. 3). Для каждой температуры расплава определялась полная относительная энергия  $E_{o. e}$  всех сигналов АЭ за анализируемый период, интегрированием  $C_s$  по всем частотам. Результаты зависимости  $E_{o. e}$  от  $T$  представлены на графиках рис.4 как при нагревании так и при охлаждении расплава.

На рис. 5 приведена зависимость количества сигналов АЭ  $N$  от температуры расплава.

На рис. 6, 7 представлена зависимость числа сигналов АЭ  $N$  от времени перехода на новый температурный уровень, как при нагревании, так и при охлаждении расплава.

Спектральный анализ показывает, что характер сигналов и их количество изменяются с увеличением температуры расплава. Эти изменения связаны с разупорядочением атомов в расплаве, которое согласно [10, 11], не является однородным и состоит из свободных атомов и кластеров (микро-областей, сохранивших расположение атомов твердой фазы).

Настоящая работа рассматривает этапы появления сигналов АЭ и их эволюционное развитие в связи с изменением температуры расплава на примере жидкого алюминия. Все исследователи связывают появление сигналов АЭ с фазовыми превращениями первого рода.

В настоящей работе и в [12] сигналы АЭ наблюдались при температуре, превышающей температуру ликвидуса. В этом принципиальное отличие наших работ от предыдущих исследований.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наши эксперименты (рис. 6, 7) показывают, что уже после 8 мин от начала перехода на новый температурный уровень в расплаве генерация сигналов прекращается вне зависимости от начальной температуры расплава. Так как через 8 мин температура в

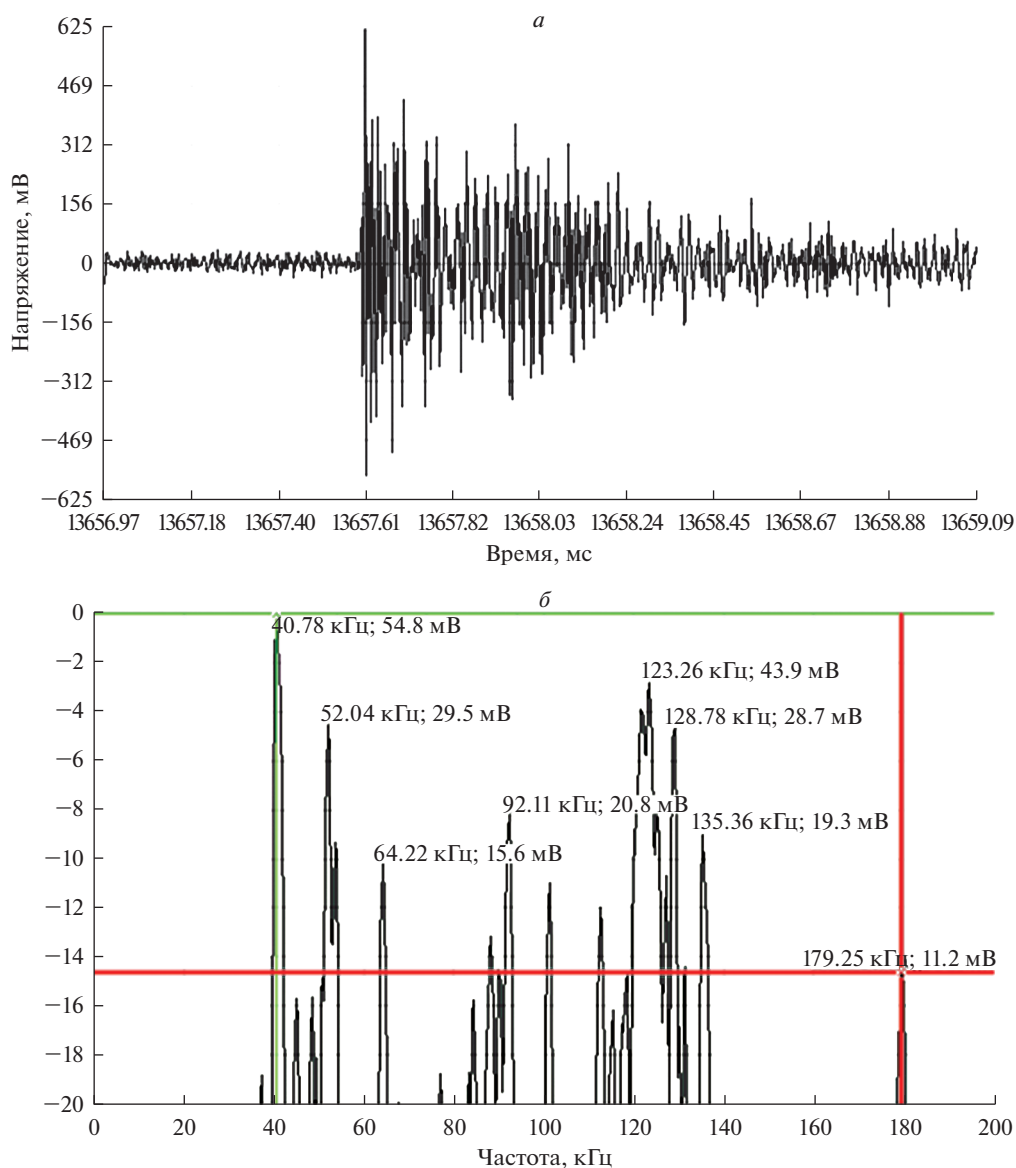


Рис. 2. Сигнал АЭ при температуре 740°C (а) аналоговый сигнал; (б) Фурье-анализ сигнала.

расплаве аппаратурно выравнивается можно утверждать, что акустическая эмиссия является следствием температурного градиента в расплаве.

В нашем эксперименте охлаждение расплава наблюдалось со стороны стенок тигля, отсюда можно предположить, что источником акустической эмиссии является температурный градиент из-за резкого изменения температурных условий в расплаве на границе со стенкой тигля.

Измерения показали, что температурный градиент в расплаве между центром тигля и его периферией всегда присутствует и равен  $G = 5^\circ/\text{см}$ , но в условиях термостата при

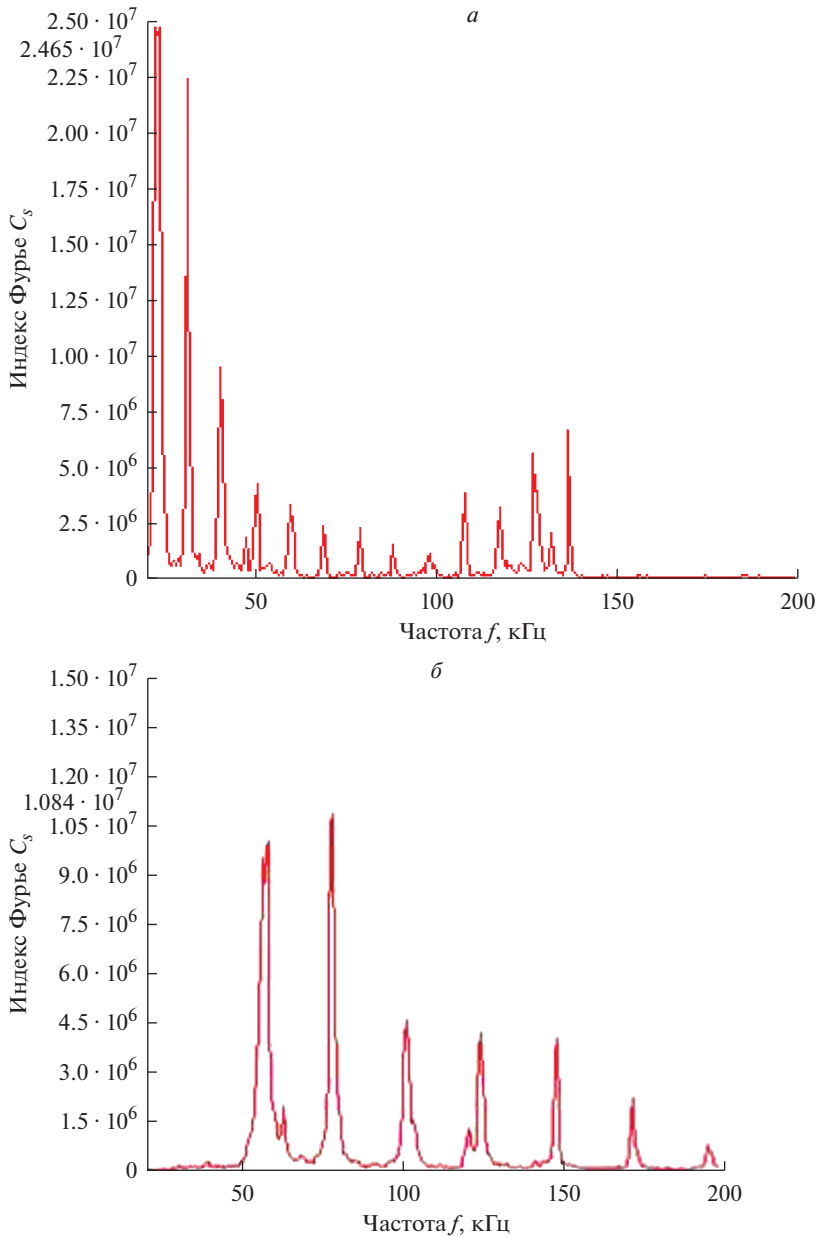


Рис. 3. Индекс Фурье  $C_s$  в зависимости от частоты для расплава при температуре (а) 740 и (б) 800°C.

отсутствии возмущений среды, нет повода для изменения ее физического состояния и нет сигналов. Только при внешнем воздействии, при резком увеличении температуры расплава, с неизменной температурой в центре тигля, начнется уменьшение плотности расплава у внутренней стенки тигля, и в расплаве появится волна давления к центру тигля, которая вызовет градиент плотности атомов, образовав кластер [13–15].

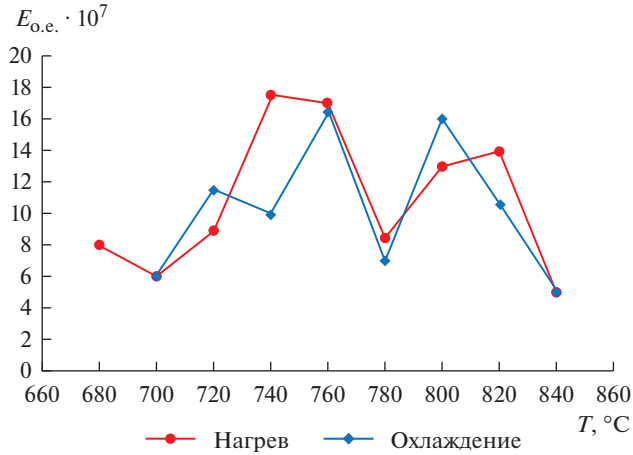


Рис. 4. Суммарная энергия  $E_{о.е.}$  для всех сигналов АЭ в зависимости от температуры расплава.

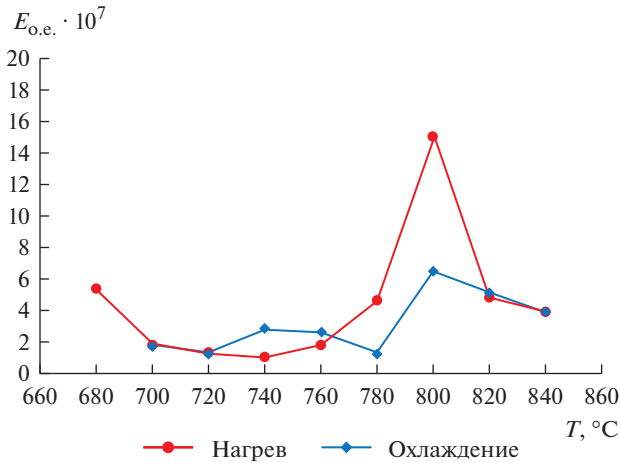


Рис. 5. Число  $N$  сигналов в зависимости от температуры расплава.

Она обуславливает появление сигналов акустической эмиссии АЭ в направлении фронта волны, параметры, которых определяются, в первую очередь, градиентом температуры и плотности расплава в соседних с кластером точках. В связи с тем, что плотность и степень локализации атомов в расплаве может быть различна, сигналы АЭ отличаются по мощности и периодичности появления.

Выше мы описали стадию зарождения кластеров в расплаве, но это только начало формирования твердой фазы. Конфигурация кластера определяется природой вещества и кинетикой процессов в расплаве.

В работе [6] подробно описан механизм формирования кластера на примере выращивания монокристаллов алюминия по методу Бриджмена в условиях вертикального температурного градиента нормального фронту  $G$  град/см.

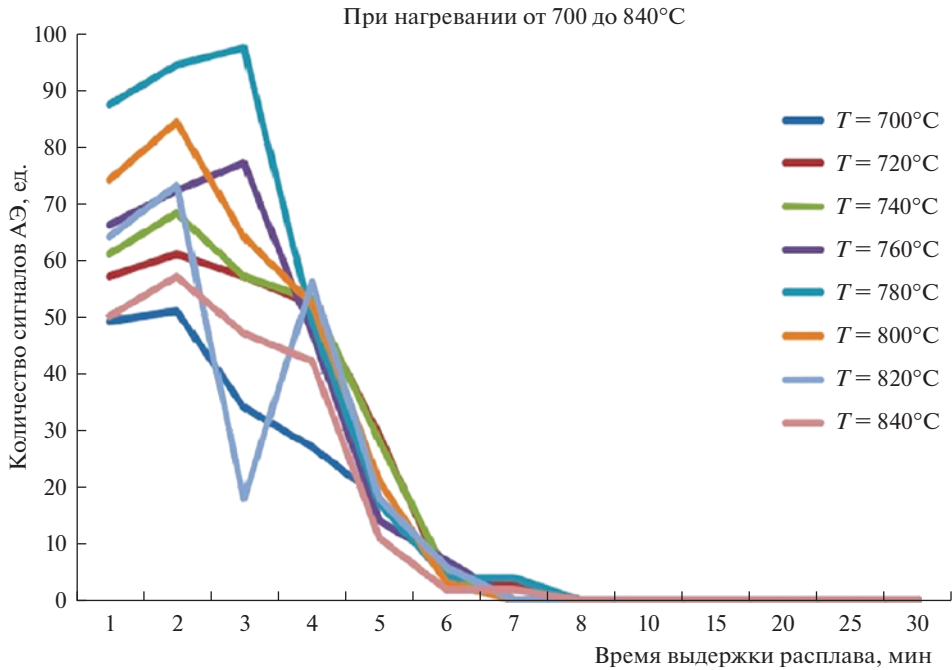


Рис. 6. Число сигналов АЭ в зависимости от времени нагревания расплава.

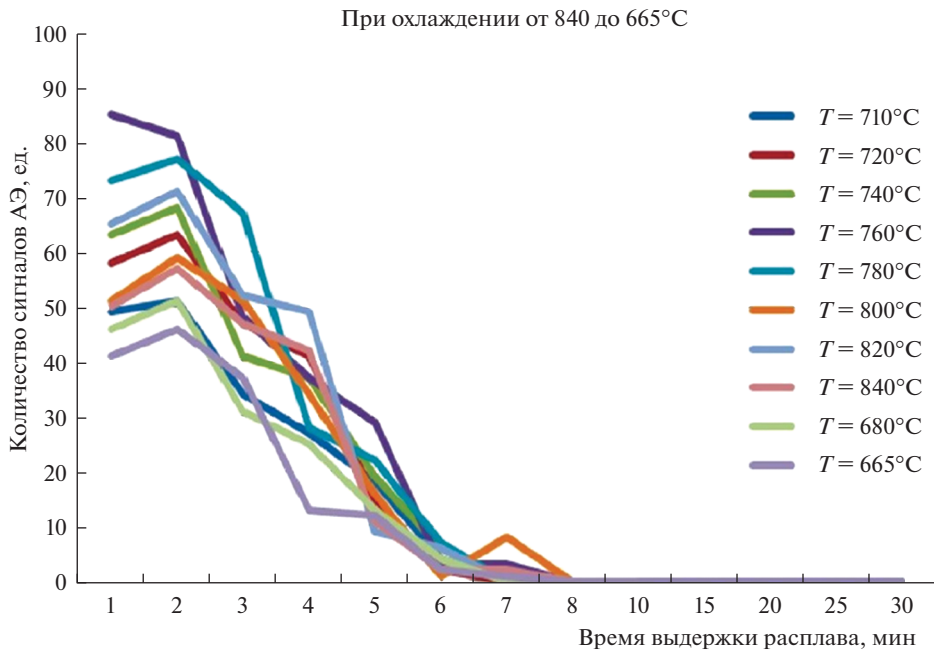


Рис. 7. Число сигналов АЭ в зависимости от времени охлаждения расплава.

Отметим главное из работы [6]: конфигурация кластера имеет архитектуру связи столбиков с квадратным основанием со стороны равной параметру решетки и высотой, определяемой числом межплоскостных расстояний, на которую продвинулась поверхность раздела до схлопывания свободного объема, появившегося при образовании кластера.

В настоящем эксперименте температурный градиент  $G$  составляет 12 град/см, а в подобной работе [7] 30 град/см, поэтому интегральная энергия сигналов АЭ  $E_{0, \epsilon}$  в настоящей работе на порядок меньше.

На рис. 3 приведены для температур 740 и 800°C зависимости  $C_s$  от  $f$ , отражающие особенности спектра АЭ для этих температур. Коэффициент Фурье  $C_s$  имеет физический смысл суммы амплитуд сигналов АЭ, см. (1).

Из рис. 4 следует, что ход зависимостей  $E_{0, \epsilon}$  от  $T$  в температурном диапазоне 680–840°C в основном повторяется при нагревании и охлаждении расплава при небольшом гистерезисе в температурном интервале 720–760°C. На обеих кривых наблюдаются 2 максимума  $E_{0, \epsilon}$  в температурных интервалах 740–780 и 780–840°C (рис. 5). Характер спектра для температур 740 и 800°C (рис. 3) отличается по частоте следования максимума  $C_s$  для температурных интервалов 680–780 и 800–840°C, соответственно. На основании графика (рис. 3а) максимум  $C_s$  наблюдались в частотном диапазоне 20–130 кГц с частотой следования 7–8 кГц и уменьшением  $C_s$  в частотном диапазоне от 20 до 100 кГц и увеличением от 100 до 130 кГц. Из наших экспериментальных результатов (рис. 3а) следует, что зарождение кластера для этих температурных условий начинается при частоте 123 кГц.

На рис. 3б приводится спектральное распределение  $C_s$  от  $f$  сигналов АЭ, наблюдаемых в температурном интервале 800–840°C, откуда следует, что сигналы находятся в частотном диапазоне 50–200 кГц с частотой следования максимальной амплитуды ( $C_s$ ) 20 кГц и уменьшением амплитуд сигналов  $C_s$  во всем наблюдаемом частотном диапазоне. На основании экспериментальных результатов (рис. 3б) зарождение кластера начинается при частоте 195 кГц. При  $f < 50$  кГц сигналов АЭ не наблюдалось.

Из графиков зависимости  $E_{0, \epsilon}$  от  $T$  (рис. 4) энергия сигналов акустической эмиссии постепенно увеличивается с увеличением температуры расплава от температуры 680 до 760°C, а  $N$  сигналов практически не меняется. Предполагаем, что при этом все подводимое тепло идет на удаление периферийных атомов кластеров слабо связанных с его ядром, процесс не требующий больших энергетических затрат, поэтому число сигналов АЭ не меняется. При температуре 780°C вся тепловая энергия затрачивается на разрушение ядра кластеров, а на эмиссию АЭ сигналов во много раз меньше, поэтому наблюдаем резкое уменьшение интегральной акустической энергии сигналов. В расплаве возникает особое состояние присутствия как свободных атомов, не связанных между собой, так и атомов сохранивших ближнюю связь, которая может быть как между двумя, так и большим числом атомов. На их базе формируется новая структура, которая не представляет дальнего порядка, так как основана на сохранившихся близко действующих связях между атомами.

Наши представления о связи закономерности проявления АЭ со структурными изменениями в расплаве в критических точках 780 и 800°C на рис. 4 согласуются с результатам работ [18, 19], где при нагреве чистых образцов жидкого алюминия в узком температурном интервале близком к 800°C наблюдался скачок уменьшения вязкости, что является, по мнению авторов, следствием перестройки низкотемпературной структуры в высокотемпературную. При охлаждении жидкого образца обратно перестройка происходит при более низкой температуре, что свидетельствует о некой стабильности высокотемпературной структуры при низких температурах в тех же температурных интервалах. Изменения в спектре АЭ в нашей работе наблюдались на графиках  $E_{0, \epsilon}$  от  $T$  (рис. 4) при тех же температурах. Рентгеноструктурные исследования



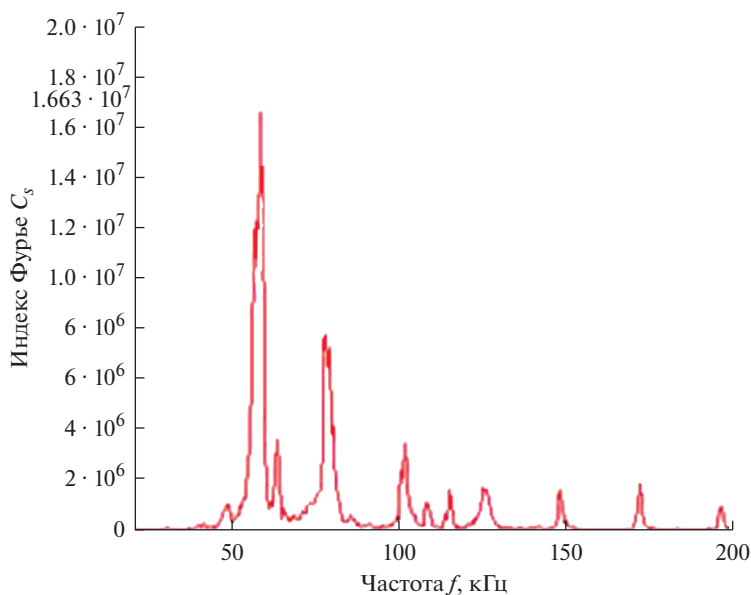


Рис. 8. Индекс Фурье  $C_s$  в зависимости от частоты для расплава при температуре  $820^\circ\text{C}$ .

[17, 19] показали, что при температурах  $800\text{--}900^\circ\text{C}$  в соответствии со скачком вязкости происходит изменение структурных параметров жидкого алюминия, наиболее сильно это проявляется на температурной зависимости кратчайшего расстояния между атомами  $r_1$  и координационного числа  $Z$ . По характеру изменения параметров  $r_1$  и  $Z$  в этом температурном интервале происходит разрыхление расплава, обусловленное уменьшением числа ближайших соседей в решетке алюминия.

При этом происходит изменение координации атомов в решетке. Рентгеновские исследования [17] показали, что при температуре  $800^\circ\text{C}$  уменьшается кратчайшее расстояние между атомами  $r_1$  а положение первого  $S_1$  и особенного второго  $S_2$  максимума на кривой интенсивности, что соответствуют гипотетической ОЦК решетке.

Из сравнения графиков (рис. 3а и 3б) при достижении расплавом температуры  $800^\circ\text{C}$  изменяется частотный спектр сигналов АЭ; так как акустическая эмиссия несет информацию из расплава можно предположить о структурных изменениях в самом расплаве. При достижении температуры расплава  $800^\circ\text{C}$  происходит бурное выделение энергии и увеличение числа сигналов АЭ, потому что при формировании новой структуры уменьшается число атомов в одном структурном элементе, а самих кластеров становится больше.

При дальнейшем повышении температуры расплава новая структура (назовем ее ОЦК подобной) начинает разрушаться при  $820^\circ\text{C}$ , что видно из анализа спектра на рис. 8 (в частотном интервале  $100\text{--}150$  кГц появляются новые частоты). При дальнейшем повышении температуры расплава при  $840^\circ\text{C}$  (рис. 9) уменьшается интегральная энергия сигналов  $E_{o,c}$  в 3 раза по сравнению с энергией  $E_{o,c}$  при  $820^\circ\text{C}$ , и не наблюдается периодичности в спектре АЭ. При температуре  $860^\circ\text{C}$  отмечались отдельные сигналы АЭ. На основании приведенных данных можно заключить, что при этой температуре происходит полное разупорядочение атомов в расплаве и его переход в атомное состояние.

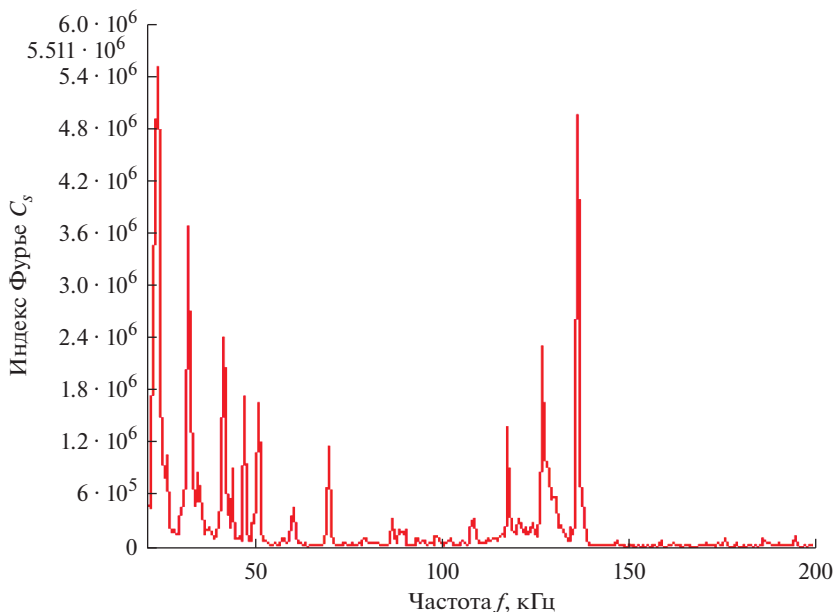


Рис. 9. Индекс Фурье  $C_s$  в зависимости от частоты для расплава при температуре  $840^\circ\text{C}$ .

Проведен анализ спектра сигналов АЭ при снижении температуры расплава в интервале  $840\text{--}640^\circ\text{C}$ . На основании анализа спектра в диапазоне температур от  $840$  до  $740^\circ\text{C}$  сохраняется ОЦК подобная структура, кроме температуры  $780^\circ\text{C}$ , при которой распределение частот соответствует акустическому спектру, наблюдаемому при нагревании расплава с ГЦК структурой, что говорит о метастабильном состоянии расплава.

При анализе графиков зависимости числа сигналов от температуры (рис. 5) кривая  $N$  от  $T$  при охлаждении расплава лежит ниже кривой, полученной при нагревании в температурном интервале  $780\text{--}820^\circ\text{C}$ , а число сигналов при максимуме энергии сигналов  $E_{o,e}$  при температуре  $800^\circ\text{C}$  меньше в 2.7 раза. Это связано с малой подвижностью атомов, необходимой для образования ГЦК структуры.

На рис. 4 в температурном интервале  $760\text{--}720^\circ\text{C}$  наблюдался гистерезис интегральной акустической энергии сигналов  $E_{o,e}$  в цикле нагрев—охлаждение. В этом температурном интервале, очевидно начинается при охлаждении формирование конечной ГЦК структуры, процесс, требующий дополнительных энергетических затрат на сборку ГЦК структуры.

На основании работы [16] проведен расчет частот  $f$  с максимальной амплитудой сигналов АЭ ( $C_s$ ) по соотношению

$$f = \frac{v}{a \cdot n}, \quad (3)$$

где:  $v = 5.9$  скорость продвижения фронта волны в расплаве, мм/мин;  $n$  — число межплоскостных расстояний;  $a$  — параметр решетки алюминия,  $a = 4.05 \cdot 10^{-7}$  мм при  $680\text{--}780^\circ\text{C}$ ,  $a = 2.025 \cdot 10^{-7}$  мм при  $800\text{--}860^\circ\text{C}$ .

Ниже даны табл. 1 и 2, где приведены экспериментальные и расчетные данные  $f$  с максимумами  $C_s$  для температур  $740$  и  $800^\circ\text{C}$ .

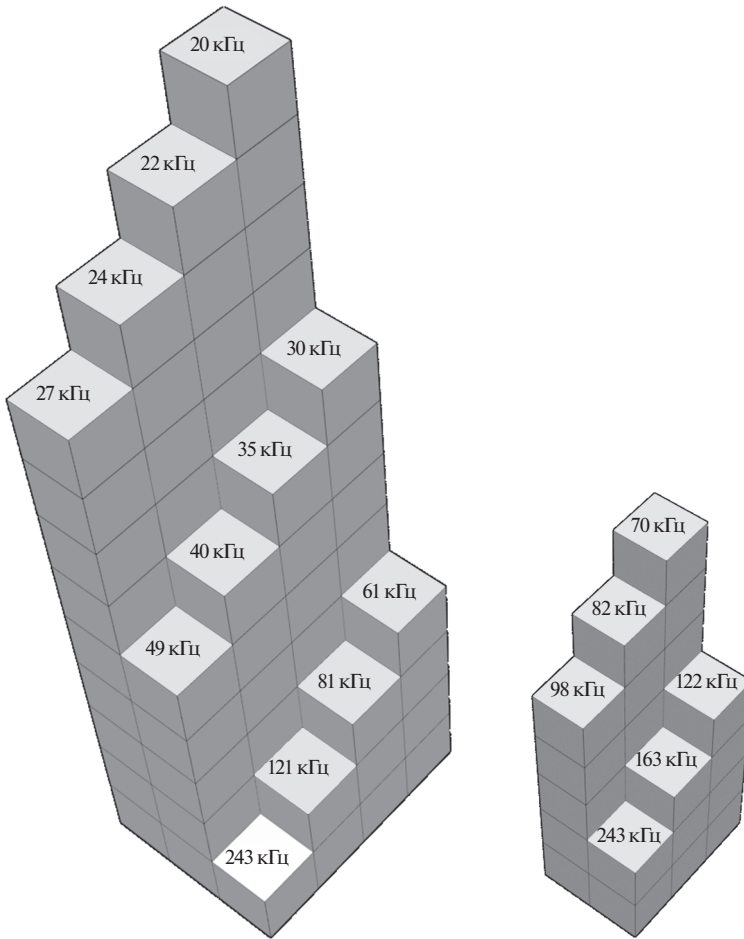


Рис. 10. Модели кластеров для температур (а) 740 и (б) 800°C.

На основании данных табл. 1 и 2 построены модели кластеров для двух температур расплава 740 и 800°C (рис. 10) откуда следует, что геометрические размеры кластеров при 800°C отличаются по объему в четыре раза. Различие в частотах сигналов в температурных интервалах 680–780 и 780–840°C, отражают кинетические изменения в структуре расплава. Переход от одного спектра (рис. 4а) к другому (рис. 4б) связан с

Таблица 1

Теоретические и экспериментальные частоты  $f$  сигналов АЭ с максимумами  $C_s$  для температуры 740°C

| $n$                        | 1                         | 2   | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9   | 10 | 11 | 12  |
|----------------------------|---------------------------|-----|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|-----|
| $f_{\text{теор.}}$ , кГц   | 243                       | 121 | 81 | 61 | 49 | 41 | 35 | 30 | 27  | 24 | 22 | 20  |
| $f_{\text{экспер.}}$ , кГц | Вне исслед. интервала $f$ | 123 | 79 | 59 | 47 | 40 | 32 | 31 | n/a | 23 | 22 | n/a |

Таблица 2

Теоретические и экспериментальные частоты  $f$  сигналов АЭ с максимумами  $C_3$  для температуры 800°C

| $n$              | 1                            | 2   | 3   | 4   | 5   | 6  | 7  |
|------------------|------------------------------|-----|-----|-----|-----|----|----|
| $f$ теор., кГц   | 486                          | 242 | 163 | 122 | 98  | 82 | 70 |
| $f$ экспер., кГц | Вне исслед.<br>интервала $f$ | 195 | 149 | 124 | 102 | 80 | 65 |

разупорядочением с температурой атомов расплава, которая приводит к перегруппировке атомов в решетке алюминия.

Параметр новой структуры должен быть меньше чем у ГЦК, так как при разупорядочении ГЦК структуры могут остаться только ближние связи между атомами.

В нашем случае был выбран параметр  $2.025 \cdot 10^{-7}$  мм, при котором рассчитанные значения частот сигналов близки к экспериментальным значениям табл. 2.

Приведенные экспериментальные данные настоящей работы согласуются с результатами [17–20] в части изменения акустического спектра при структурной перестройке в области температуры 800°C.

#### ВЫВОДЫ

Наши исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Причина генерации сигналов АЭ расплавом в термически индуцированных волнах давления.
2. При температуре 800°C происходит изменение частотного спектра сигналов АЭ, что говорит о структурной перестройке в расплаве алюминия.
3. В температурном цикле нагрев–охлаждение в интервале температур 660–860°C на графиках  $E_{0, \epsilon}$  от  $T$  характерные точки смены спектра сигналов при нагревании и охлаждении расплава совпадают.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kaiser J. Über das Auftreten von Geräuschen beim Schmelzen und Erstarren von Metallen // Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens A. 1957. **23**. № 2. P. 38–42.
2. Borchers H., Kaiser J. Akustische effekte bei phasenübergangen im system Blei-Zinn-Z // Metallkunde. 1958. **49**. № 2. P. 95–100.
3. Borchers H., Tensi H. Piezoelektrische impulsmessungen bei der phasenandeung von unlegierten proben der binaren legierugen blei antimony und kadmium zink // Metal. 1963. **17**. № 8. P. 784.
4. Задумкин С.Н., Хоконов Ж.Б., Шокаров Х.Б. Акустический эффект при кристаллизации и плавлении веществ // ЖЕТФ. 1975. **69**. С. 1315–1320.
5. Vorontsov V. B., Katalnikov V. V. Analysis of acoustic emission effect, accompanying metal crystallization // J. Physics. 2008. **98**. № 5. P. 052005.
6. Vorontsov V. B., Zhuravlev D. V. Analysis of acoustic emission signals accompanying growth of single aluminum crystals // J. Chem. Eng. 2012. **6**. № 2. P. 358–361.
7. Vorontsov V. B., Zhuravlev D. V., Cherepanov A. C. Experimental research of phase transition kinetics in a liquid melt of high-purity aluminum // J. Crystal Growth. 2014. **401**. P. 124–127.
8. Computer Program ISVI s. 5.5.3.; Instrumental Systems Technology Corporation: M., 2009.
9. Соколов О.Б., Угодникова Л.А. Метод Фурье-преобразований. Методический Сборник, Екатеринбург, 2005.

10. Ершов Г. С., Черняков И. А., М. Строение и свойства жидких и твердых металлов М., 1978.
11. Ладынов В. И. Структурные превращения в металлических расплавах и их проявления при затвердевании и кристаллизации быстро закаленных сплавов. Ижевск. Док. дис. физ.-мат. наук, 2004.
12. Vorontsov V. B., Pershin V. K. Experimental research of phase transition in a melt of high-purity aluminum // *J. Crystal Growth*. 2017. **480**. P. 170–174.
13. Huang Y. H., Bau H. H. Thermoacoustic waves in a semi-infinite medium // *J. Heat Mass Transfer*. 1995. **38**. P. 1329–1345.
14. Huang Y. H., Bau H. H. Thermoacoustic wages in a confined medium // *J. Heat and Mass Transfer*. 1997. **40**. № 2. P. 407–419.
15. Зубков П. Т., Свиридов Е. М., Губайдуллин А. А. Термоакустические волны, возникающие при нагревании идеального вязкого газа // *Теплофизика высоких температур*. 2004. **42**. № 5. P. 756–757.
16. Воронцов В. Б., Журавлев Д. В. Связь структуры сигналов акустической эмиссии при кристаллизации Al с механизмом формирования твердой фазы из расплава // *Вестник Новгородского государственного Университета*. 2012. № 67. С. 8–13.
17. Ватолин Н. А., Пастухов Е. А., Сермягин В. Н. Влияние температуры на структуру жидкого алюминия // *ДАН СССР*. 1975. **222**. № 3. С. 641.
18. Базин Ю. А., Замятин В. М., Насайров Я. А., Емельянов А. В. О структурных превращениях в жидком алюминии // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1985. № 5. С. 28–32.
19. Базин Ю. А., Емельянов А. В., Баум Б. А., Клименков Е. А. Рентгенографическое исследование строения жидкого алюминия // *Металлофизика*. 1986. **8**. № 2. С. 11–15.
20. Базин Ю. А. Структурная перестройка в жидком алюминии // *Известия Вузов. Черная металлургия*. 1985. № 5. С. 28–33.

### Connection of Acoustic Emission with Local Structural Change on Melt in Non-Equilibrium Aluminum

*V. B. Vorontsov<sup>1</sup>, V. K. Pershin<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Ural State University of Railway Transport, Faculty of natural Sciences, Yekaterinburg, Russia*

Obtained and analyzed experimental results of investigation of the dependence of energy and number of AE signals from molten metal temperature in the range 680–860°C. The connection of acoustic emission with structural changes in liquid metals on the example of Al melt is established. The models of clusters are given.

*Keywords:* crystal structure, cluster model, temperature gradient, melt, metals, acoustics

#### REFERENCES

1. Kaiser J. Über das Auftreten von Geräuschen beim Schmelzen und Erstarren von Metallen // *Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens A*. 1957. **23**. № 2. P. 38–42.
2. Borchers H., Kaiser J. Akustische effekte bei phasenübergangen im system Blei-Zinn-Z // *Metallkunde*. 1958. **49**. № 2. P. 95–100.
3. Borchers H., Tensi H. Piezoelektrische impulsmessungen bei der phasenandeung von unlegierten proben der binaren legierungen blei antimony und kadmium zink // *Metal*. 1963. **17**. № 8. P. 784.
4. Zadumkin S. N., Khokonov ZH. B., Shokarov H. B. Akusticheskiy effekt pri kristallizatsii i plavlenii veshchestv [Acoustic effect during crystallization and melting of substances] // *ZHETF*. 1975. **69**. P. 1315–1320 (in Russian).
5. Vorontsov V. B., Katalnikov V. V. Analysis of acoustic emission effect, accompanying metal crystallization // *J. Physics*. 2008. **98**. № 5. P. 052005.
6. Vorontsov V. B., Zhuravlev D. V. Analysis of acoustic emission signals accompanying growth of single aluminum crystals // *J. Chem. Eng.* 2012. **6**. № 2. P. 358–361.

7. Vorontsov V.B., Zhuravlev D.V., Cherepanov A.C. Experimental research of phase transition kinetics in a liquid melt of high-purity aluminum // *J. Crystal Growth*. 2014. **401**. P. 124–127.
8. Computer Program ISVI s. 5.5.3.; Instrumental Systems Technology Corporation: M., 2009.
9. Sokolov O.B., Ugodnikova L.A. Metod Fur'ye-preobrazovaniy. Metodicheskiy Sbornik [Fourier transform method. Methodical Collection]. Yekaterinburg, 2005 (in Russian).
10. Yershov G.S., Chernyakov I.A. Stroyeniye i svoystva zhidkikh i tvordykh metallov [Structure and properties of liquid and solid metals]. M., 1978 (in Russian).
11. Lad'yanov V.I. Strukturnyye prevrashcheniya v metallicheskih rasplavakh i ikh proyavleniya pri zatverdevanii i kristallizatsii bystro zakalonnnykh splavov [Structural transformations in metal melts and their manifestations during solidification and crystallization of rapidly hardened alloys]. *Izhevsk. Dok. dis. fiz.-mat. nauk*, 2004 (in Russian).
12. Vorontsov V.B., Pershin V.K. Experimental research of phase transition in a melt of high-purity aluminum // *J. Crystal Growth*. 2017. **480**. P. 170–174.
13. Huang Y.H., Bau H.H. Thermoacoustic waves in a semi-infinite medium // *J. Heat Mass Transfer*. 1995. **38**. P. 1329–1345.
14. Huang Y.H., Bau H.H. Thermoacoustic wages in a confined medium // *J. Heat and Mass Transfer*. 1997. **40**. № 2. P. 407–419.
15. Zubkov P.T., Sviridov Ye.M., Gubaydullin A.A. Termoakusticheskiye volny, vznikayushchiye pri nagrevanii ideal'nogo vyzkogo gaza [Thermoacoustic waves that occur when a perfect viscous gas is heated] // *Teplofizika vysokikh temperatur*. 2004. **42**. № 5. P. 756–757 (in Russian).
16. Vorontsov V.B., Zhuravlev D.V. Svyaz' struktury signalov akusticheskoy emissii pri kristallizatsii Al s mekhanizmom formirovaniya tvordoy fazy iz rasplava [Connection of the structure of acoustic emission signals during Al crystallization with the mechanism of formation of a solid phase from a melt] // *Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo Universiteta*. 2012. № 67. P. 8–13 (in Russian).
17. Vatolin N.A., Pastukhov Ye.A., Sermyagin V.N. Vliyaniye temperatury na strukturu zhidkogo alyuminiya [Influence of temperature on the structure of liquid aluminum] // *DAN SSSR*. 1975. **222**. № 3. P. 641 (in Russian).
18. Bazin Yu.A., Zamyatin V.M., Nasayrov Ya.A., Yemel'yanov A.V. O strukturnykh prevrashcheniyakh v zhidkom alyuminiy [On structural transformations in liquid aluminum] // *Izvestiya vuzov. Chornaya metallurgiya*. 1985. № 5. P. 28–32 (in Russian).
19. Bazin Yu.A., Yemel'yanov A.V., Baum B.A., Klimenkov Ye.A. Rentgenograficheskoye issledovaniye stroyeniya zhidkogo alyuminiya [X-ray study of the structure of liquid aluminum] // *Metallofizikap*. 1986. **8**. № 2. P. 11–15 (in Russian).
20. Bazin Yu.A. Strukturnaya perestroyka v zhidkom alyuminiy [Structural adjustment in liquid aluminum] // *Izvestiya Vuzov. Chornaya metallurgiya*. 1985. № 5. P. 28–33 (in Russian).