

УДК 621.762

М.В. Приходько, А.Ф. Санін, А.Ф. Леднянський

*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара*

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ПО РАЗРАБОТКЕ СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКОВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК С ВЫСОКИМИ КОНСТРУКЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ**

У роботі пропонується вирішення актуальних завдань ракето- та авіабудування, зокрема досліджено проблему отримання нових дисперснозміцнених сплавів на основі алюмінію. Досліджена принципова можливість отримання заготовок високоміцних деформованих алюмінієвих сплавів з високою конструкційною міцністю традиційними

---

М.В. Приходько, А.Ф. Санін, А.Ф. Леднянський, 2015

методами порошкової металургії з порошків з надтонкою оксидною плівкою. До розгляду запропонована фізична модель поділу краплі в спутному потоці диспергуючого агенту. Визначено умови, в яких реалізується можливість отримання порошків з надтонкою оксидною плівкою, що не перешкоджає консолідації частинок. Наведено експериментальні підтвердження основних висновків теоретичних досліджень: полімодальність кривої розподілу маси частинок порошку за розмірами і властивості порошкової заготовки.

*Ключові слова:* алюмінієві сплави, порошкова заготовка, ракетобудування, авіабудування, деформовані сплави, алюмінієвий порошок, диспергування, розпорошення, гранулометричний склад, оксидна плівка, швидкість охолодження, високошвидкісна кристалізація.

В работе предлагается решение актуальных задач ракето- и авиастроения, в частности исследована проблема получения новых дисперсноупрочненных сплавов на основе алюминия. Исследована принципиальная возможность получения заготовок высокопрочных деформируемых алюминиевых сплавов с высокой конструкционной прочностью традиционными методами порошковой металлургии из порошков со сверхтонкой оксидной пленкой.

К рассмотрению предложена физическая модель деления капли в спутном потоке диспергирующего агента. Определены условия, в которых реализуется возможность получения порошков со сверхтонкой оксидной пленкой, не препятствующей консолидации частиц. Приведены экспериментальные подтверждения основным выводам теоретических исследований: полимодальность кривой распределения массы частиц порошка по размерам и свойства порошковой заготовки.

*Ключевые слова:* алюминиевые сплавы, порошковая заготовка, ракетостроение, авиастроение, деформируемые сплавы, алюминиевый порошок, диспергирование, распыление, гранулометрический состав, оксидная пленка, скорость охлаждения, высокоскоростная кристаллизация.

The paper proposes a solution of actual tasks of rocket production and aircraft construction, in particular was studied the problem of producing of new disperse

strengthened aluminum alloys based on aluminum. Studied fundamental possibility of receiving blanks of high-strength deformable aluminum alloys with high constructional strength by traditional methods of powder metallurgy from powders with a hyperfine oxide film.

To consider a physical model of fission of drops in cocurrent flow of the dispersing agent. The conditions, in which the possibility of obtaining of powders with an ultrathin oxide film which isn't impede the consolidation of particles is realized, are defined. Experimental confirmation of the main conclusions of theoretical researches: polymodality of distribution curve of mass of the powder particles by sizes and properties of powder blanks.

*Keywords:* aluminum alloys, powder preparation, rocket, aircraft, wrought alloys, aluminum powder, dispersion, spraying, particle size distribution, an oxide film, the rate of cooling, high-speed crystallization.

**Введение.** Развитие аэрокосмической техники выдвигает все более высокие требования к эксплуатационным характеристикам деформируемых алюминиевых сплавов, которые не могут быть обеспечены в рамках традиционной технологической схемы — горячая деформация литой заготовки.

В поисках путей улучшения свойств алюминиевых сплавов используется много технологических приемов, одним из которых является кристаллизация непосредственно из расплава. Этот метод, известный как высокоскоростная кристаллизация, направлен на обеспечение высокого коэффициента рассеяния тепла с поверхности раздела жидкой и твердой фазы, значительной степени переохлаждения и соответствующей скорости продвижения поверхности раздела. Обычно это достигается повышением коэффициента теплопередачи на поверхности охлаждаемой отливки и увеличением отношения поверхности отливки к ее объему, что позволяет получать скорости охлаждения в пределах от  $10^3$  до  $10^{10}$  К/с. Вторым основным направлением при высокоскоростной кристаллизации сплавов является обеспечение достаточной степени переохлаждения до появления зародышей кристаллов. Кристаллизация при существенно повышенных скоростях охлаждения и больших степенях переохлаждения, типичная для процесса распыления, обычно приводит к существенному изменению и улучшению структуры по сравнению с обычными методами литья. Высокоскоростная кристаллизация алюминиевых сплавов обычно приводит к улучшению микроструктуры, увеличению предела растворимости легирующих элементов в твердом состоянии и к образованию метастабильных фаз [1]. Все эти способы используют при создании дисперсноупрочненных сплавов на основе алюминия [2].

Однако, несмотря на очевидные преимущества, порошковая металлургия алюминия так и не обрела широкого применения из-за наличия оксидных пленок на поверхности частиц порошка. Все известные технологические решения направлены на борьбу с уже образовавшимися оксидами. Невосстановимые оксидные пленки препятствуют консолидации частиц, из-за чего получение полуфабрикатов сильно затруднено, материалы характеризуются пониженной трещиностойкостью, что не позволяет в полной мере использовать их прочностные характеристики. Кроме того переработка порошков методами жидкофазного спекания и горячей деформации удорожает

производство и тем самым нивелирует экономический эффект от применения технологии порошковой металлургии. Следовательно, наиболее перспективным направлением в данной области следует признать не устранение влияния оксидных пленок, а предотвращение их образования в процессе диспергирования расплава.

Разработка способа получения порошков алюминиевых сплавов, состояние поверхности которых позволяет получать заготовку с высокими конструктивными свойствами, позволит решить актуальную задачу по обеспечению аэрокосмической отрасли высокопрочными деформируемыми алюминиевыми сплавами.

Толщина, структура и степень кристалличности оксидных пленок зависит от времени пребывания капли расплава в условиях, при которых окисление идет с максимальной скоростью [3]. Следовательно, минимизация времени развития окислительных процессов возможна при использовании технологических решений, обеспечивающих сверхвысокие скорости охлаждения капли ( $10^6$  К/с и более).

Сформулировать принципы достижения сверхвысоких скоростей охлаждения, а, следовательно, и получения сверхтонких оксидных пленок на порошках, может позволить анализ теоретических представлений о стадиях процесса диспергирования жидких металлов.

В настоящее время в литературе доминирующее положение занимают представления, что процесс образования капель определенного размера — это случайный процесс, который определяется отношением действующих на каплю аэродинамических сил к силе поверхностного натяжения металла, известным как критерий Вебера. В рамках данных представлений скорость охлаждения капли является функцией ее размера, что предполагает значительную долю окисленных частиц при изготовлении металлических порошков. Авторами О. Ничипоренко и М. Приходько показана ограниченность, а в ряде случаев неприменимость критерия Вебера для прогнозирования результатов диспергирования металлической струи расплава водой высокого давления (медианного диаметра и кривой распределения массы частиц по размерам) [4, 5]. Кроме того, в рамках существующих представлений не может найти объяснение экспериментально установленный полимодальный характер кривой распределения массы частиц по размерам [6].

В данной работе сделано допущение, что недостаточностью критериев, основанных на балансе действующих на каплю статических сил, для прогнозирования результатов диспергирования является то, что в них игнорируется, высказанная ещё Рэлеем мысль о том, что жидкость распадается на капли из-за развития в ее потоке колебательных процессов [7]. В пользу такого предположения служат экспериментально установленные факты, что эффективность диспергирования жидкости существенно зависит от акустической мощности, воздействие которой в 40 раз больше, чем влияние на процесс распыления аэродинамических сил [8].

Несмотря на то, что на сегодняшний день так и не сложились четкие представления о механизме воздействия колебаний среды на разрушение пленки либо струи жидкости [9], накоплены значительные экспериментальные данные по положительному влиянию акустических колебаний потока на результат диспергирования [10, 11].

Уже более полувека проводятся работы по созданию акустических форсунок для диспергирования жидкостей, в том числе, и жидких металлов [5, 8, 9, 11]. Акустические форсунки по типу источника акустических колебаний можно разделить на два основных класса:

- форсунки в которых колебания генерируются специальными электро- и магнитомеханическими излучателями (искусственно);
- форсунки в которых генерация колебаний обеспечивается их конструкцией (естественно).

Независимо от причин возникновения звуковых колебаний в потоке, его акустическая энергия и интенсивность ее воздействия на диспергируемую жидкость в значительной мере определяются конструкцией распылителя [8].

Цель данного исследования установить:

- механизм влияния акустической среды на результаты диспергирования металлических жидкостей при распаде струи расплава на капли;
- условия, в которых охлаждение капель и частиц протекает с максимальной скоростью.

Анализ математических и полуэмпирических моделей процессов связанных с распылением жидких металлов показал, что существующие представления о процессе распада струи жидкости на капли и деления капель в спутном потоке, базирующейся на критериях  $We$ ,  $La$  и др., не содержат данных, позволяющих найти подход к решению задачи повышения скорости охлаждения капель.

Согласно закону сохранения энергии, количество тепла, которое отводится с единицы поверхности в единицу времени, должно равняться теплу, подводимому из внутренних объемов капли расплава к поверхности вследствие теплопроводности. Так скорость охлаждения капли массой  $m$  можно записать выражением:

$$v_{охл} = \frac{dT}{dt} = -\alpha \cdot \nabla T \cdot S_{уд} \quad (1)$$

где  $\alpha = \frac{\lambda}{c}$  - коэффициент температуропроводности;  $\frac{S}{m} = S_{уд}$  - удельная поверхность капли.

Таким образом, минимизация времени контакта ювенильной поверхности расплава с окислительной средой при высоких температурах может быть обеспечена при длительном ( $10^{-4}$  с) поддержании высоких значений коэффициента температуропроводности, удельной поверхности капли и градиента температуры между ее поверхностью и окружающей средой. Такие условия возможно обеспечить лишь в случае протекания в капле интенсивных колебательных процессов с периодом колебаний менее  $10^{-6}$  с.

Разработка физической модели воздействия акустических колебаний спутного потока на каплю, возбуждения в ней колебательных процессов, деления и охлаждения капли в потоке позволит установить технологические параметры процесса распыления, влияющие на время контакта ювенильной поверхности капли с окислительной средой при высоких температурах. В основу модели положено высказанное Рэлеем утверждение о том, что волна с растущей амплитудой представляет собой будущую каплю, а порядок величины капли определяется длиной волны неустойчивого колебания.

**Изложение основного материала.** Рассмотрим последовательные стадии процесса распада струи на капли. На начальном этапе струя металла вовлекается в фокус распыления (место встречи водяных струй), затем металл преобразуется в тонкую пленку, которая утоняется с удалением от фокуса [10]. Край плёнки металла под действием сил поверхностного натяжения распадается на примерно равные капли [12], далее оторвавшиеся первичные капли летят в спутном потоке, в котором распространяются акустические колебания. Естественным источником акустических волн является форсунка: благодаря особенностям конструкции и микронеровностям, которые всегда присутствуют на поверхности сопел, формирующих поток [5, 7, 8, 13].

В результате взаимодействия с акустической средой капля будет совершать вынужденные колебания. Воздействие на каплю периодически действующей вынуждающей силы приводит к повышению ее энергии Гиббса, основными слагаемыми которой, в первом приближении, являются колебательная энергия капли и ее поверхностная энергия. Но из-за диссипативных процессов в капле, вязкость которой конечна, амплитуда вынужденных колебаний будет ограничена.

В случае, когда под воздействием внешней среды в капле возбуждаются резонансные колебания, происходит одновременный резкий рост, как первого, так и второго слагаемого энергии Гиббса, обусловленный неограниченным ростом амплитуды колебаний. Стремление капли как системы минимизировать свою энергию приводит к делению капли на части. В этом смысле деление капли является самопроизвольным и необратимым процессом, переводящим исходную систему — каплю — в новый минимум, который характеризуется хотя и более высоким, по сравнению с исходным, значением поверхностной энергии, но при этом более низкой энергией Гиббса.

Согласно положениям предложенной модели, основными параметрами, влияющими на скорость охлаждения металлической капли, являются:

- энергия и частота колебаний в потоке;
- амплитуда и частота резонансных колебаний в капле металла;
- вязкость и величина поверхностной энергии металла перед распылением.

С точки зрения энергетического подхода к процессу деления капель в спутном потоке акустическая энергия потока в условиях резонанса, накапливаясь в капле, расходуется на увеличение амплитуды волн, работу сил трения и увеличение поверхности.

Энергетический баланс процесса можно записать в виде:

$$W_{\text{потока}} - (A_{\text{тр}} + W_{\text{пов}}) \geq 2NW_{\text{пов}}^{\text{к}} \quad (2)$$

Уравнение (2) можно привести к виду:

$$K = \frac{W_{\text{потока}} - (A_{\text{тр}} + W_{\text{пов}})}{2NW_{\text{пов}}^{\text{к}}} \quad (3)$$

где  $W_{\text{потока}}$  – энергия одной волны, сообщаемая капле;  $A_{\text{тр}}$  – работа сил трения в капле;  $W_{\text{пов}}$  – работа по образованию новой поверхности при колебании капли;  $W_{\text{пов}}^{\text{к}}$  – энергия образования  $2N$  поверхностей.

Для вывода критерия, определяющего возможность разделения оторвавшейся от пелены первичной капли, энергию, сообщаемую капле волной, и расходуемую энергию отнесем к массе одной капли. Путем несложных преобразований (3) приводится к энергетическому критерию (4), в котором как в явном, так и в неявном виде присутствуют параметры, от которых зависит скорость охлаждения.

$$K = \frac{\frac{3}{4} \pi^2 \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{ме}}} \cdot c_{\text{в}} \cdot \vartheta \cdot \frac{A^2}{L \cdot D_0} - (2\delta \cdot y_{\text{рез}}^2 \cdot \omega_{\text{рез}} + \sigma S_{\text{уд}})}{\frac{3k \cdot \sigma}{D_0 \cdot \rho_{\text{ме}}}} \quad (4)$$

В явном виде присутствует величина удельной поверхности. В неявном виде – градиент температур (наличие конвективных потоков высокой интенсивности приводит к выравниванию температурных полей по объёму капли и, как следствие, к максимально высокому градиенту температур между поверхностью капли и окружающей средой).

Рассмотрение всех возможных значений критерия  $K$ :  $K_i < 0$ ;  $0 < K_i < 1$ ,  $K_i > 1$ , где  $i=0, 1, 2$  приводит к выводу, что в зависимости от основных частот колебаний, распространяющихся в потоке и их длин волн первичные капли могут делиться больше одного раза и в следствие эффекта Доплера капли летящие в разных направлениях будут делиться на других частотах и на разное количество вторичных капель. Изменение условий наступления резонанса для наборов капель неизбежно приведёт к полимодальности кривой распределения массы частиц по размерам.

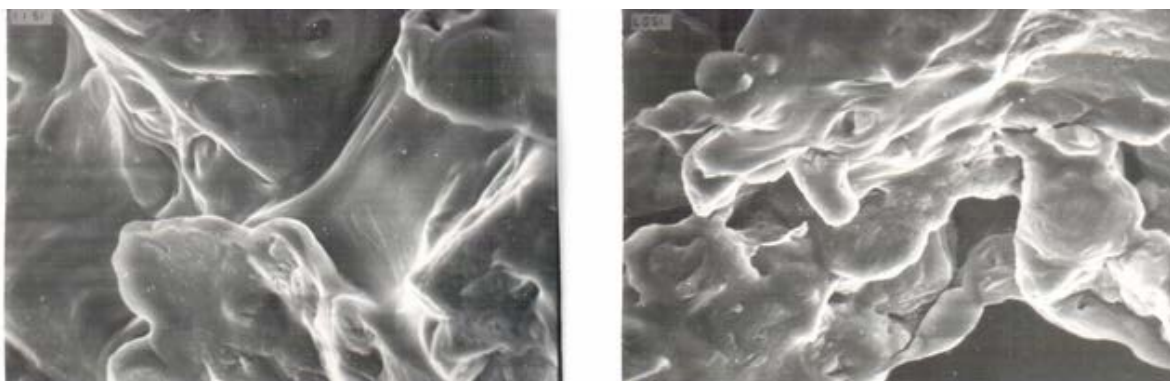
Если в последнем цикле колебаний капли диаметром  $D_i$  энергетический критерий  $K_i$  принимает отрицательное значение, значит ни одна из частот в потоке не близка к резонансной. Воспринимаемая каплей колебательная энергия полностью расходуется на работу трения.

Для случая, когда  $K_i$  капли диаметром  $D_i$  в последнем цикле колебаний положительно и принимает значение близкое к единице, одна или несколько частот в потоке могут быть близки к резонансной, однако, энергии этих частот достаточно лишь для развития интенсивных колебательных процессов со значительными амплитудами. Этой энергии все же не достаточно для

разделения на  $N$  вторичных капель с размером  $D_{i+1}$ . Амплитуда колебаний в капле нарастает по мере приближения  $K_i$  к единице.

Именно в этом случае и реализуются условия, приводящие к максимальной скорости охлаждения капли, масса которой определяется диаметром  $D_i$ . Во-первых, в этом случае длительное время сохраняется максимально высокая удельная поверхность - вплоть до кристаллизации частицы, во-вторых, интенсивные конвекционные процессы приводят к непрерывному выравниванию температуры по объёму осциллирующей капли. Именно таким образом обеспечивается максимально возможный градиент температур между непрерывно обновляющейся поверхностью капли и окружающей средой. Если такое значение  $K$  реализуется в последнем цикле колебаний, то достигается максимальное переохлаждение жидкости.

Следовательно, для любого механизма теплопередачи при  $K_i$  близких к единице могут быть реализованы максимально достижимые скорости охлаждения, которые определяются начальным размером капли. При переохлаждении резкий рост второго слагаемого в (3) приводит к стремительному уменьшению  $K_i$ , в результате чего частицы кристаллизуются в форме «замороженных» колебаний (далекой от сферической) (рис. 1). Формально этот случай описывается выражением  $\tau_{кр} \ll \tau_{сф}$



**Рис. 1. Морфология поверхности частиц водораспыленного порошка алюминиевого сплава. Растровая электронная микроскопия  $\times 2000$**

И только для третьего случая, когда  $K_i$  капли диаметром  $D_i$  больше единицы возможно её самопроизвольное разделение на  $N$  вторичных. Избыточная колебательная энергия превращается в кинетическую энергию вторичных капель, которые разлетаются в системе координат, связанной с центром масс первичной капли, со скоростью  $v$  в телесный угол  $4\pi$  радиан. Изменение условий наступления резонанса для вторичных капель, связанное с эффектом Доплера, приводит к наблюдаемой полимодальности кривой распределения массы частиц по размерам.

Введённый энергетический критерий позволяет сформулировать принципы достижения сверхвысоких скоростей охлаждения при диспергировании металлических жидкостей:

- необхідно забезпечити умови для розвитку в капле коливань з частотами, близькими до резонансних;

- в останньому циклі коливань поступаючої енергії не повинно бути достатньо для розділення краплі через різкий ріст в'язкості при переохолодженні рідини. В такому випадку процес стає аперіодичним, удільна поверхня частинок довгий час зберігає аномально високі значення, що призводить до надвисоким значенням теплоотдачі.

### Експериментальна перевірка теоретичних положень моделі диспергування рідких металів водою високого тиску

Експериментальна перевірка теоретичних представлень, сформульованих в межах розробленої моделі, виконана при диспергуванні сплаву АД33 водою в інтервалі тисків 5...11 МПа при температурі розплаву від 700 до 1100 °С на двох типах розпилюючих установок: - з щелевої форсунки і з сопловими насадками.

Встановлено, що в усьому досліджуваному інтервалі тисків води крива розподілу маси частинок за розмірами є полімодальною, причому положення максимумів не залежить від тиску; від тиску залежить лише відносна висота цих піків (рис. 2).

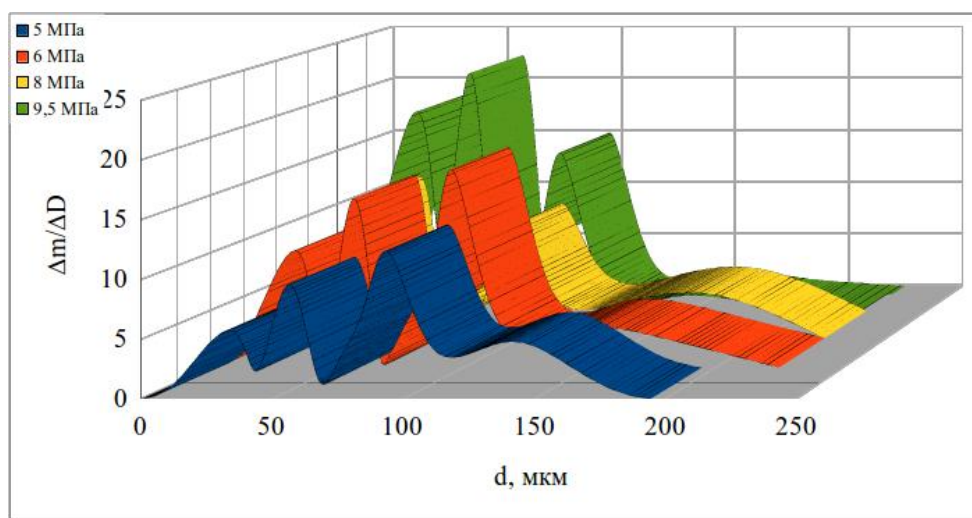


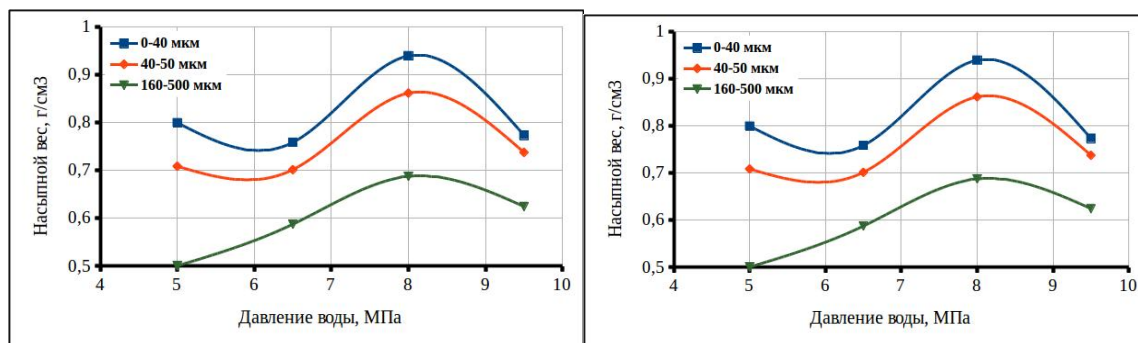
Рис. 2. Вплив тиску води на вигляд диференціальних кривих розподілу маси частинок за розмірами

На диференціальних кривих розподілу маси частинок за розмірами закономірно проявляються чітко виражені піки в інтервалах розмірів 0-40 мкм, 50-63 мкм, 90-100 мкм і 160-200 мкм. Аналогічні результати, а саме: - полімодальність кривої розподілу маси частинок за розмірами і незалежність положення піків від тиску води при диспергуванні рідких металів раніше отримані А. Саниним.

Вперше встановлено, що насипний вага фракції порошку не є монотонною функцією тиску води. В досліджуваному інтервалі тисків води



кривая насыпного веса характеризуется чётко выраженным максимумом при  $P=8$  МПа (рис. 3 а).



**Рис. 3. Влияние условий распыления на насыпную плотность водораспыленного порошка**

При давлении воды 8 МПа насыпная плотность для всех фракций порошка выше чем при давлении воды 9,5 МПа (рис. 3 б). Установлено, что дифференциальные кривые распределения массы частиц по размерам и величина максимумов в пиках, не зависят от степени перегрева расплава. Об отсутствии влияния степени перегрева расплава на частоту и амплитуду резонансных колебаний в капле свидетельствует отсутствие смещения положения максимумов и их относительных высот на дифференциальных кривых распределения массы частиц по размерам. Установлено, что кривые распределения не описываются нормальным распределением, как принято считать в существующих моделях диспергирования жидких металлов. Характерной особенностью наблюдаемых кривых является наличие четырех и более максимумов.

Полученные экспериментальные результаты не полностью согласуются с теоретическими представлениями, развитыми в работе [12] так как, согласно им, частота волны, несущей энергию к каплям, пропорциональна скорости воды на срезе сопла и, следовательно, положение максимумов полимодального распределения должно смещаться в сторону меньших размеров с увеличением давления воды, а насыпной вес должен был быть падающей монотонной функцией от давления воды.

Согласия с экспериментальными данными (независимость положения пиков распределения от давления воды) можно достичь, если рассматривать диспергирующий узел как резонаторную систему, состоящую из осциллирующей системы, связанной с резонатором.

Осциллирующая система в данном случае представляет собой поверхность щелей, формирующих поток диспергирующего агента, с определённой волнистостью и шероховатостью. Резонатор — это совокупность узлов диспергирующей установки с присущими им особенностями формы и взаиморасположением в конструкции, в том числе и полость (ее длина и сечение), из которой вытекает сформированный поток.

Набор частот колебаний в потоке диспергирующего агента определяется геометрическими особенностями поверхности форсунки, а набор резонансных частот, которые могут быть реализованы (усилены), определяются конструкционными особенностями резонатора.

Каждый резонатор характеризуется собственным набором частот колебаний  $\omega_{pj} = \frac{2\pi}{\lambda_j} \cdot c_v$ , которые он может излучать в окружающую среду (рис. 4). Резонатором усиливаются лишь те колебания  $\omega_{\phi i} = \frac{2\pi}{L_i} \cdot v$ , которые близки к его собственным частотам, все остальные частоты глушатся ( $\omega_{\phi i}$  — частота колебаний, возбуждаемых в потоке воды;  $\omega_{pj}$  — одна из частот резонатора;  $\lambda_j$  — длина волны соответствующая одной из частот резонатора;  $L_i$  — шаг волнистости поверхности щели форсунки;  $v$  — скорость потока среды через щель форсунки;  $c_v$  — скорость звука в воде).



Рис. 4. Условная спектральная амплитудно-частотная характеристика резонатора

Каждая форсунка характеризуется своим индивидуальным профилем поверхности, формирующим поток воды. Поэтому в потоке возбуждаются колебания с длинами волн, обусловленными волнистостью и шероховатостью поверхности конкретной щели. Частоты же этих колебаний  $\omega_{\phi i}$  (рис. 5) пропорциональны скорости потока среды (воды, газа), в которой распространяются акустические колебания. Амплитуды колебаний  $H_i$  соответствующие  $\omega_{\phi i}$ , в общем случае, пропорциональны  $L_i$ .

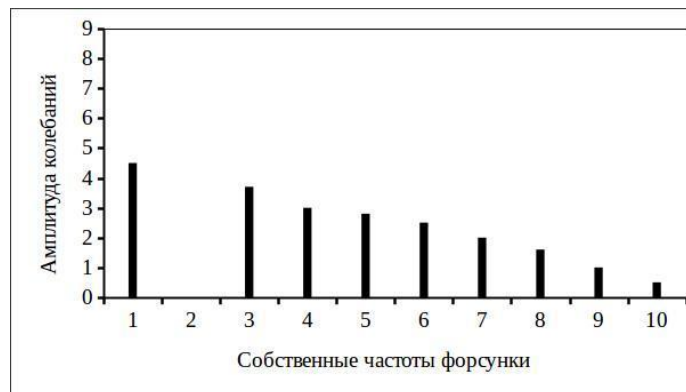


Рис. 5. Условная спектральная амплитудно-частотная характеристика колебаний, возбуждаемых в потоке при протекании воды через щель с постоянной скоростью

При рассмотрении распылительного узла как резонаторной системы полученные экспериментальные данные находят логическое объяснение. Диспергирующий узел в целом представляет собой резонаторную систему, обладающую индивидуальным набором частот  $\omega_{pj}$  и коэффициентом усиления «силы звука»  $E_j$  (амплитуды колебаний), в общем случае зависящем от частоты  $\omega_{pj}$ . Этот набор частот определяет возможное положение пиков в полимодальном распределении. Коэффициент усиления  $E_j$  принимает максимальное значение при совпадении резонансной частоты  $\omega_{pj}$  с одной из возбуждаемых частот  $\omega_{\phi i}$  то есть зависит от относительной разности частот  $\omega_{\phi i}$  и  $\omega_{pj}$ . В случае если с какой-то из  $\omega_{pj}$  не совпадает ни одна из  $\omega_{\phi i}$ , то пик на кривой распределения массы частиц по размерам не проявится.

$$E_j = \frac{A_j}{H_i}; \quad 1 < E_j < 1 + E_j^{\max} \quad 0 < E_j < E_j^{\max} \quad (5)$$

где  $E_j^{\max}$  — максимальный коэффициент усиления амплитуды частоты  $\omega_{pj}$ ;  $A_j$  — амплитуда колебаний  $\omega_{pj}$ ;  $H_i$  - «глубина» волнистости (шероховатости);  $E_j \gg 1$  при  $\omega_{\phi i} \approx \omega_{pj}$ ;  $E_j < 1$  при  $\omega_{\phi i} \neq \omega_{pj}$ .

Усиленные резонатором частоты распространяются в потоке со скоростью звука в воде, длиной волны  $\lambda_i = L_i \cdot \frac{c_w}{v}$  и амплитудой  $A_j = E_j \cdot H_i$ .

В некотором интервале скоростей потока из-за несовпадения большей части спектральных линий осциллирующей системы  $\omega_{\phi i}$  и собственных частот резонатора  $\omega_{pj}$  возможно снижение эффективности диспергирования (малые  $E_j$ ), связанное с уменьшением энергии колебаний потока на частотах  $\omega_{pj}$ . Откуда следует, что эффективность диспергирования, определяемая как массовая доля частиц меньше определённого размера не может быть монотонной функцией от скорости потока, а и должна быть кривой, обладающей экстремумами (рис. 2).

Линейное моделирование различных участков немонотонной функции может приводить (и приводит) к существенным различиям коэффициентов в соотношениях [10], определяющих эффективность диспергирования в зависимости от давления воды. Только учёт рассмотрения диспергирующего узла как резонаторной системы, обладающей индивидуальным спектром собственных частот приводит к естественному объяснению экспериментально наблюдаемых фактов.

В рамках развитых предположений о механизме диспергирования жидких металлов полученные экспериментальные факты находят следующее объяснение. При определённых скоростях истечения воды через щель форсунки часть возникающих частот колебаний совпадает с собственными частотами резонатора. В потоке воды возникают колебания с высокой энергией, которые вызывают развитие вынужденных колебаний в капле. В случае если эти частоты совпадают с собственными колебаниями капли, капля начинает делиться уже через малое число колебаний. Так как частоты колебаний, приводящие к делению капли, составляют несколько мегагерц то велика скорость нарастания колебательной энергии до значения, приводящего к делению, а, соответственно, общее время колебаний капли до деления мало и,

соответственно, мал интервал температур охлаждения капли в условиях высоких значений градиента температур и удельной поверхности.

В результате к последнему циклу колебаний при диспергировании расплава капля не достигает сильного переохлаждения и после начала кристаллизации поверхность таких частиц длительное время находится при температурах, когда охлаждение поверхности протекает по механизму плёночного кипения. Длительное взаимодействие алюминия с паром приводит к интенсивному окислению поверхности частиц.

Следует отметить, что в каждом цикле колебаний протекают процессы взаимодействия алюминия с окислительной средой (паром). Непрерывное обновление поверхности капли приводит к замешиванию оксидов в объём. Однако, наличие равномерно распределённых в объёме дисперсных частиц оксидов, как и в случае материалов типа САП, не должно приводить к снижению конструкционной прочности, но может приводить к повышению жаропрочности сплава. К снижению конструкционной прочности приводит только окисление уже не трансформирующейся поверхности частицы.

Экспериментально установлено, что для каждого распыливающего устройства возможно подобрать давления воды, при которых достигается некоторое рассогласование между возникающими в потоке воды частотами и собственными частотами резонатора. При таких давлениях коэффициент усиления колебаний  $K_j$  недостаточно велик, развитие резонансных колебаний в капле до деления в каждом цикле протекает за более длительное время и к последнему циклу колебаний капля уже значительно переохлаждена. Как известно, алюминиевые сплавы могут быть переохлаждены на  $400^\circ$  [2]. Такое глубокое переохлаждение приводит к смене механизма охлаждения поверхности частицы с плёночного на пузырьковое кипение, которое характеризуется на порядки более высокими коэффициентами теплоотдачи. Именно в этом случае минимизируется время контакта поверхности частиц порошка с окислительной средой при высоких температурах.

Реализация развитых представлений о процессе диспергирования струи металла водой дала возможность получения порошков алюминиевых сплавов, толщина оксидной плёнки на поверхности которых не превышает 1,8 нм [3]. Показано, что использование традиционных методов порошковой металлургии позволяет получать из порошков сплава АК6 заготовки с уровнем физико-механических характеристик, не уступающих по свойствам заготовке, полученной горячей деформацией слитка [3].

**Выводы.** Акустические колебания среды возбуждают в капле вынужденные колебания. В случае близости частот акустических колебаний среды и собственных колебаний капли происходит деление первичной капли на вторичные в результате развития резонансных процессов. Полиmodalность наблюдаемого гранулометрического состава обусловлена частотным спектром акустической среды.

Установлено, что максимальная скорость охлаждения капель и частиц достигается при некотором рассогласовании спектра акустических колебаний среды с частотами собственных колебаний капли.

Необходимое рассогласование частот при проектировании установок распыления позволит обеспечить низкую энергоёмкость процесса диспергирования металлических жидкостей. На действующих установках необходимое рассогласование частот достигается путём подбора скоростей потока.

Сформулированные принципы управления технологическими параметрами процесса получения порошков алюминиевых сплавов позволили изготовить из высококачественных порошков заготовку методами традиционной порошковой металлургии. Уровень механических характеристик материала порошковой заготовки не уступает уровню свойств материала, полученного горячей деформацией слитка [3].

Полученные результаты открывают новые возможности при создании дисперсноупрочненных алюминиевых сплавов для аэрокосмической техники.

#### **Библиографические ссылки**

1. Хэтч Дж. Е. Алюминий свойства и физическое металловедение. Справочник пер. с англ. - М.: Металлургия, 1989. - 395 с.
2. Добаткин В.И. Гранулируемые алюминиевые сплавы / В.И. Добаткин, В.И. Елагин. - М.: Металлургия, 1981. - 176 с.
3. Федорова М. В., Санин А. Ф., Леднянский А. Ф., Симонов В. С. Разработка технологии получения порошковых заготовок из водораспыленных порошков алюминиевых сплавов / М. В. Федорова, А. Ф. Санин, А. Ф. Леднянский, В. С. Симонов // Теория и практика металлургии. – Днепропетровск, 2013. – 5-6 (94-95). – С. 116-121.
4. Ничипоренко О. С. Распылённые металлические порошки / О. С. Ничипоренко, Ю. И. Найда, А. Б. Медведовский. – Киев: «Наукова думка», 1980. - 240 с.
5. Витман Л.А. Распыливание жидкости форсунками / Л.А. Витман, Б.Д. Кацнельсон, И.И. Палеев. - М.: ГЭИ, 1962. - 256 с.
6. Федорова М. В., Санин А. Ф., Получение порошков алюминиевых сплавов для изготовления конструкционных деталей / М. В. Федорова, А. Ф. Санин // Вісник ДНУ. Ракетно-космічна техніка.; № 4, выпуск 17, том 2. – Днепропетровск, 2013. – С. 159-167
7. Рэлей Д.В. Теория звука - М.: ОГИЗ, 1944. – Том 2. 395 с.
8. Пажи Д.Г. Основы техники распыливания жидкостей / Д.Г. Пажи, В.С. Галустов. - М.: Химия, 1984. - 256 с.
9. Коровина Н.В. Создание аэрозольных сред с помощью автономных распылительных устройств, их эволюция и распространение в замкнутых объёмах. Диссертация. – Бийск, 2014. – 120 с.
10. Терновой Ю. Ф. Инженерные расчёты технологических процессов распыления расплавленных металлов / Ю. Ф. Терновой, С. С. Кудиевский, Н. Н.

Пашетнева. – Запорожье: Издательство Запорожской государственной академии, 2005. – 149 с.

11. Гессингер Г.Х. Порошковая металлургия жаропрочных сплавов; пер. с англ. - Челябинск: Металлургия, 1988. - 320 с.

12. Физическая модель дробления жидкой капли в высокоскоростном потоке: материалы международной конференции «Порошковая металлургия: современное состояние и будущее» (22-25 апр. 2014 г., Киев). / НАНУ ИМП им. И.Н. Францевича. - К., 2014. - С. 32

13. Демкин Н.Б. Контактное шлифование шероховатых поверхностей. - М.: Наука, 1970. - 227 с.

*Надійшла до редколегії 13.05.2015*