

федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С.П. Королева»

**«Управление структурно-фазовыми превращениями с целью
получения изделий и материалов с более качественными
свойствами»**

Методические указания

г. Самара 2017

Авторы-составители: **Михеев В. А.**

Журавель Л.В.

Управление структурно-фазовыми превращениями с целью получения изделий и материалов с более качественными свойствами [Электронный ресурс]: электрон. метод. указания / Минобрнауки России, Самар. нац. исслед. ун-т. им. С. П. Королева; авт.-сост. В. А. Михеев, Л. В. Журавель. – Электрон. текстовые и граф. дан. (1,01 Мбайт). - Самара, 2017. - 15 с.

Методические указания предназначены для студентов института ракетно-космической техники, обучающихся по дисциплине «Обработка композиционных и наноструктурированных материалов» по направлению подготовки магистров 24.04.02 "Металлургия".

Подготовлено на кафедре обработки металлов давлением.

ВВЕДЕНИЕ

Последнее время пристальное внимание исследователей привлекают модели структурно-фазовых превращений с позиций кластерных теорий строения вещества. Особый интерес связан с изучением формирования новой фазы в различных физических полях, в частности, электромагнитных и акустических. Речь идет о фоновом акустическом влиянии на структурно-фазовые превращения в материалах через электромагнитно-акустическое преобразование с резонансным откликом в некотором интервале частот.

Слабые периодические сигналы могут оказывать влияние на неравновесные гетерофазные процессы, скорее всего, в области разрывов фазовых границ, то есть в промежуточной области, называемой мезофазой. К ней можно отнести границу между жидкой и твердой фазой в момент кристаллизации жидкой фазы и отчетливо выраженные границы раздела между компонентами композиционных и наноструктурированных материалов. Они характеризуются гетерофазными флуктуациями плотности, которым присуще свойство фазовых переходов I рода, то есть изменение свойств скачком.

Имеется предположение, что в расплавах металлов атомы находятся не в хаотичном состоянии, а формируют упорядоченные структуры - кластеры, которые являются основой для образования кристаллов[1]. Кластер – это область в некристаллическом веществе, в которой атомы создают взаимоконфигурации, имеющие существенно большее упорядочение, чем в среднем по объему вещества. Следовательно, в атомно-кластерной модели металлического расплава взаимодействие между атомами в кластере существенно сильнее, чем взаимодействие между атомами вне кластера. При этом атомно-кластерная модель желательна сохранить при затвердевании расплава. Для этой цели имеются технические средства, которые реально дают возможность показать управляющее воздействие электромагнитных полей на гетерофазные процессы посредством акустических волн, образующихся в ходе электромагнитно-акустического преобразования (ЭМАП).

Распространение в проходящей через такое метастабильное состояние электромагнитных и акустических колебаний малой мощности порождает физические эффекты, использование которых в технологиях создает реальные предпосылки улучшения качества обработки материалов, что достигается изменением режимов массо- и теплообмена. Сама мезофаза составлена из флуктуирующих надмолекулярных элементов (первичный кластер), либо более крупные структурные элементы (вторичный и третичный кластеры), откликающихся на частоту следования импульсов тока в радиодиапазоне.

Это было научным открытием, которое относится к материаловедению, металлургическому производству, к процессам литья и сварки. В описании научного открытия обобщаются регулятивные эффекты слабого импульсного электрического тока радиочастотного диапазона в короткозамкнутой петле магнитного диполя (антенны), проявляемые как тензоимпульсные синхронизирующие эффекты в конденсированной среде, претерпевающей неравновесные структурно-фазовые превращения при кристаллизации и плавлении, пластической деформации металлов и сплавов.

Научная значимость темы

1. Предложена и обоснована с позиций термодинамики необратимых процессов и кинетики конденсированных сред модель влияния слабых регулярных электромагнитных импульсов радиочастотного диапазона в короткозамкнутой петле магнитного диполя (антенны) на физико-химические процессы и свойства конечных продуктов структурно-фазовых превращений. Дано единое обоснование тензоимпульсных синхронизирующих эффектов действием имманентной акустической волны, рождаемой в скин-слое антенны совокупным явлением, известным как электромагнитно-акустическое преобразование (ЭМАП).

2. Построена модель механизма формирования акустического поля в скин-слое антенны как электромагнитно-динамический эффект и выполнены количественные оценки эффективности ЭМАП в магнитном диполе антенны для импульсов различной формы, частоты, скважности, полярности и амплитуды.

3. Обоснован режим фоновой регуляции физико-химических процессов ультраслабыми сигналами, отвечающими тонким механизмам самоорганизации кластерных структур. Показано существование верхних амплитудных порогов имманентной, адаптивной фоновой регуляции, отличающей её от директивных методов грубого нарушения хода естественной самоорганизации.

4. Предложен механизм распространения акустического регулятивного сигнала в волновом канале мезофазы с резонансным усилением на частотах фазовой синхронизации за счёт нелинейного преобразования энергии высокочастотных мод, высвобождающейся в процессах структурно-фазовых превращений и внутреннего диффузионно-конвективного тепло-массопереноса.

5. Построена теоретическая основа фоновой акустической резонансной регуляции самоорганизации (ФАРПС) как параметрической синхронизации автогенераторных вихревых структур мезофазы, образующих в режиме ФАРПС систему протяжённых когерентных кластеров с аномальными кинетическими свойствами интенсивного и экстенсивного переноса в реакционной зоне. Из положений этой теории вытекают такие эффекты ФАРПС, как экспериментально наблюдаемая кинетическая и фазово-переходная память реакционных сред, высокая скорость и энергетическая эффективность неравновесных физико-химических процессов и однородность свойств их продуктов.

Практическая значимость темы

1. Апробированы на действующих предприятиях основы простой и малозатратной технологии регулирования структуры и физико-механических свойств металлов и сплавов, а также изделий из них в процессе кристаллизации и пластической деформации без изменения штатного технологического оборудования.

2. Предложены общие принципы высокоэффективной регуляции параметров неравновесных физико-химических процессов в конденсированных средах для разработки ресурсосберегающей металлургической технологии производства материалов с заданными свойствами и возможностью сохранения установленного штатного оборудования.

Проблема управления структурно-фазовыми превращениями

Актуальной задачей любого технологического процесса остается контроль над механическими и физико-химическими процессами с целью получения продуктов и изделий с заданными свойствами и заданным пространственным распределением свойств. Трудность управления гетерофазными процессами в твердой или вязкой жидкой фазе, да еще в масштабах реального промышленного производства усугубляется практической невозможностью локального мониторинга и воздействия, что легко реализуется в ньютоновских жидкофазных средах.

Механические, в частности - акустические, методы влияния апробированы и давно используются. В то время как низкочастотное (радиоволновое) электромагнитное возмущение мало изучено и с недоверием применяется практиками. Хотя технические средства дают возможность практического применения полевых воздействий в большинстве областей металлургии, машиностроения и химической технологии. Эти технологии в силу сокращения производственного цикла и изменения свойств и структуры материала или изделий весьма привлекательны, требуют небольших капитальных затрат и обладают высокой экономической эффективностью.

Гетерофазный массообмен связан со структурно-фазовыми превращениями. Традиционно исследуется массообмен, опирающийся на положение равновесной термодинамики. Например, принцип локального равновесия, в которой рассматривается не ход фазовых превращений во времени и пространстве, а лишь достигнутое в результате уже прошедшего процесса состояние равновесия между исходной и новой фазами в предположении, что новая фаза получила полное развитие.

При этом под температурой перехода при заданном давлении подразумевается не та температура, при которой переход практически начинается и происходит, а та, при которой он останавливается, то есть когда фазы остаются в равновесии друг с другом неограниченно долгое время. Сам процесс возникновения и образования новой фазы из рассмотрения исключается. При этом введенные впервые Ю. Л. Климонтовичем большие флуктуации (в отличие от обычных гомофазных) и сопутствующие им локальные изменения давления и температуры при обычном феноменологическом описании игнорируются полностью [2].

Практика показывает, что подход, основанный только на рассмотрении локальных равновесных состояний, не отражает суть явления. Большие флуктуации плотности — не что иное, как самоорганизация мезофазы, которой присуще свойство фазовых переходов I рода, то есть изменение свойств скачком. В наших работах, впервые обнаружено влияние электромагнитно-акустических полей малой мощности на процессы, протекающие при кристаллизации и сварке металлов и сплавов, твердении минеральных вяжущих материалов, графт-полимеризации термоотверждаемых акрилатных композитов в диапазоне частот 15-8000 кГц [3-5].

Сегодня накоплен обширный экспериментальный материал, не вызывающий сомнений в возможности существенного полевого влияния, как на кинетические параметры, так и на свойства продуктов физико-химических превращений. Однако зачастую под управлением физико-химическими процессами понимают принудительное, энергозатратное, т. е., директивное воздействие на систему. Неверие в возможность управления мощными процессами посредством слабых сигналов опирается на традиционную убежденность в том, что энергия команды должна быть сопоставима с

энергией объекта воздействия. В действительности энергетика эффективного управления несоизмеримо мала по сравнению с мощностью управляемых процессов. Например, управление процессом кристаллизации расплава осуществляется в диапазоне частот, который соответствует спектру поглощения кластерами жидкой фазы, находящиеся в более активной промежуточной области, называемой мезофазой.

В нелинейных открытых системах при слабом резонансном управляющем воздействии идет процесс самоорганизации, который заключается в синхронизации фазовых траекторий кластерных надмолекулярных структур в мезофазе на резонансных частотах. Это обеспечивает условие локального и когерентного снижения энтропии среды, роста температуропроводности мезофазы, согласованного увеличения предэкспонент и, следовательно, констант скоростей термически активируемых процессов. При этом мезофаза представляет собой сложную иерархическую композицию различных по размеру и составу кластеров: (гель-фракции), содержащих от нескольких единиц до сотен тысяч молекул (золь-фракции) определенной направленности. Причём, если оценить хотя бы свойства комплексов гель-фракции, то собственные частоты их колебаний оказываются как раз в радиочастотной области меггерцевого диапазона, которые способны к резонансному отклику (осцилляциям) на слабый периодический регулятивный сигнал.

Далее переход "гель-золь" обеспечивается за счёт согласованных колебательно-вращательных движений наноструктур. В результате образуется канальная структура мезофазы и возможен скачкообразный перенос внутренней энергии на большие расстояния, т.е. своеобразный тепловой пробой. Происходит быстрое выравнивание температур и, как следствие, пространственное усреднение целой гаммы характеристик продукта, а также гомогенности состава. Такой энергозатратный режим обеспечивается слабым регулятивным воздействием, а теплота кристаллизации, удерживаемая в этом объеме, становится достаточной для развития неустойчивости системы, которая приводит к спонтанному росту скорости фронта кристаллизации, наблюдаемому в эксперименте.

Установлен эффект сокращения времени кристаллизации металлов и сплавов в режиме фонового акустического воздействия. Этот эффект был проверен количественно лабораторными опытами по кристаллизации олова, свинца, алюминия и некоторых сплавов на их основе. При повторных циклах кристаллизации металлов отмечается эффект фазово-переходной памяти, который заключается в том, что металл «запоминает» ранее проведенное фоновое акустическое воздействие, сохраняя эту информацию на протяжении нескольких циклов. В установившемся режиме генератор импульсов тока можно отключить, а память какое-то время сохраниться. Это то, что понимается под фазово-переходной памятью. Она заключается в формировании в режиме фонового резонансного электромагнитно-акустического управления кластерных структур с одинаковыми параметрами (неравновесными химическими потенциалами), что делает систему устойчивой по отношению к случайным внешним воздействиям и малым внутренним флуктуациям.

Потребность в такой эволюционной модели ощущалась давно, особенно при формировании реальных структур материала, но стала насущной в связи с развитием нанотехнологии. В нанотехнологии используются вещества, состоящие из твердых частиц нанометрового диапазона, т.е. находящихся в «наносостоянии». Через «наносостояние» вещество проходит на ранней стадии эволюции, когда только что зародившиеся частицы

фаз еще не успели укрупниться, например, на ранней стадии первичной и вторичной кристаллизации, гальваники, рекристаллизации, фазового перехода и т. д.

Однако «наносостояние» обычно кратковременно и удерживать это состояние непросто. Это обстоятельство дало толчок к расширению исследований эволюционного процесса в целом. Такой подход позволил рассматривать любую структуру как самостабилизирующийся энергетически обусловленный комплекс, рассматривая развитие открытой термодинамической системы. В процессе эволюции структуры наблюдается последовательный переход такой системы из данного состояния в ряд состояний с уменьшающейся энтропией (возрастание упорядочения структуры и в тоже время структурной сложности), причем исходное состояние должно отстоять далеко от равновесного состояния. Иными словами, состояния, близкие к равновесному, являются «слишком» устойчивыми, ибо возмущенная система возвращается каждый раз в равновесное состояние. Никакого развития системы не будет, ибо открытая система вблизи от равновесия «излишне» стабильна и не способна к эволюционному развитию.

В таких случаях существуют пороговые, критические значения соответствующих параметров, при которых возникает неустойчивость системы как потенциальный источник эволюционного развития. Неустойчивость системы означает, что при этих критических значениях параметров флуктуации, всегда существующие в системах или регулятивно наводимые в систему, не ослабляются, как в устойчивых системах, а в результате нелинейных, например, автокаталитических процессов усиливаются. Особое значение имеет самоорганизация системы и ее волновой характер при энергетических воздействиях. Флуктуации достигают макроскопического уровня и вызывают скачкообразный переход системы в новое устойчивое состояние с уменьшившейся энтропией. Появляется направленный процесс развития как последовательное возникновение неустойчивостей и соответствующих скачкообразных переходов в сторону усложнения реальной структуры материала.

Происходит развитие системы, называемое «порядок через флуктуации». Система обретает гетерогенные свойства, заключающиеся в том, что ее характеристики (концентрации компонентов, плотность, вязкость, удельная теплоемкость и др.) в объеме системы изменяются скачком (разрывом) на границах раздела фаз. Особое значение здесь играют появление промежуточных фаз переменного состава, мезофазы, химических соединений гетерогенной системы, неотъемлемым признаком которой является наличие фаз различных по физическим свойствам или по химическому составу. Таким образом, очевидным оказывается выбор технологий с возможностью мониторинга и управления физико-химическими процессами в процессе обработки композиционных и наноструктурированных материалов в противоположность традиционным способам подготовки вещества. Такие материалы в подавляющем большинстве реактивны по отношению к электромагнитным полям радиоволнового излучения. Но они способны возбудить в любой конденсированной среде механические колебания (акустические волны), способные выполнять функцию эффективного регулятивного фактора. Необходимо найти амплитудно-частотный оптимум и способ введения сигнала в конденсированную систему.

Технические характеристики метода фоновой резонансной регуляции

Современные экспериментальные и теоретические исследования уже позволяют предполагать, что в конденсированной среде могут проявляться свойства, присущие не только отдельным атомам и молекулам, но и крупным надмолекулярным упорядоченным структурным образованиям. Признание этого факта позволяет в рамках превращений части финитных движений в инфинитные объяснить причины появления радиоволнового излучения, сопровождающего физико-химические процессы и управлять с помощью электромагнитных полей (ЭМП) кинетикой роста и свойствами твердой фазы.

Экспериментальные исследования позволили установить резонансный характер воздействия ЭМП малой мощности на физико-химические процессы, в которых происходят гетерофазные превращения и фазовые переходы, причем эффект наблюдается в интервале радиочастот. При этом управление с помощью ЭМП свойствами получаемых материалов является одной из актуальных тем материаловедения.

Исследования гетерофазных физико-химических эффектов и фазовых превращений под действием электромагнитных полей известны давно. Однако в последнее время внимание исследователей привлекают нелинейные эффекты по полям межмолекулярных сил в материалах. Они определяются эффектами локальной упорядоченности атомных и молекулярных структур. Распространение в проходящей через метастабильное состояние конденсированной фазе (между жидкой и твердой) электромагнитных и акустических колебаний малой мощности порождает физические эффекты. Использование этих эффектов в приведенной технологии создают реальные предпосылки улучшения качества конечного продукта. Это достигается изменением массо- и теплообмена.

В настоящее время данный метод испытан на большой группе неравновесных физико-химических процессов различной природы в открытых диссипативных системах. Технические средства дают возможность практического применения воздействий ЭМП в большинстве областей металлургии, машиностроения, строительной и химической промышленности. Эти технологии в силу сокращения производственного цикла, а также изменения свойств и структуры материала весьма привлекательны. Они требуют небольших капитальных затрат и обладают высокой экономической эффективностью.

В исследованиях предлагалось выявить влияние термовременной и электромагнитной обработки на структуру материала в полутвердом состоянии. Как показали исследования [1], частоты металлических расплавов и полужидких (полутвердых) состояний в области электромагнитных полей находится в области радиоволнового диапазона. Из приведенного литературного источника следует, что электромагнитное излучение радиоволнового диапазона должно резонансно поглощаться конденсированной средой и воздействие маломощного излучения радиоволнового диапазона может проявляться в изменении свойств материала, претерпевающего фазовые, метастабильные и кинетические превращения. Другими словами говоря, с помощью электромагнитного излучения радиоволнового диапазона можно регулировать структуру материала и соответственно все структурозависимые свойства.

Генератор импульсов тока для излучения радиоволнового диапазона имеет электрическую колебательную мощность не более $15B \cdot A$ – это небольшой бокс с регуляторами, индикаторами параметров и выходными клеммами для подключения петли антенны-медиатора (рисунок 1). Электрическая схема генератора импульсов тока

составлена современными интегральными и дискретными элементами, устройством мониторинга и управления и не представляет предмета специального анализа в аспекте заявленной темы.

Устройство ввода сигнала регуляции в систему влияния или антенна-медиатор представляет собой обыкновенный одножильный провод, обычно медный, диаметром не более 2 мм, в твёрдой (фторопласт) изоляции от внешних нежелательных гальванических и химических контактов. Длина провода не превосходит нескольких метров, и он накоротко (гальванически) замыкает выход генератора импульсов тока на корпус, представляя, таким образом, короткозамкнутую петлю магнитного диполя. Для стендовых (лабораторных) испытаний к “телу” петли может жёстко крепиться один, либо несколько пружинных зажимов. При необходимости петля может быть заменена отрезком тугоплавкого или химически более стойкого металла, а может быть представлена двумя проводящими фрагментами, замыкаемыми на внешний проводник.

Генератор устанавливается вблизи технологической зоны регуляции, его корпус заземляется согласно принятым нормам, он обеспечивается электропитанием от однофазной сети. Далее возможны варианты:

- 1) петля антенны вводится в механический контакт с конденсированной (жидкой, твёрдой, пастообразной) средой регуляции; здесь важно обеспечить плотное механическое примыкание петли к зоне влияния с помощью зажима или иным способом;

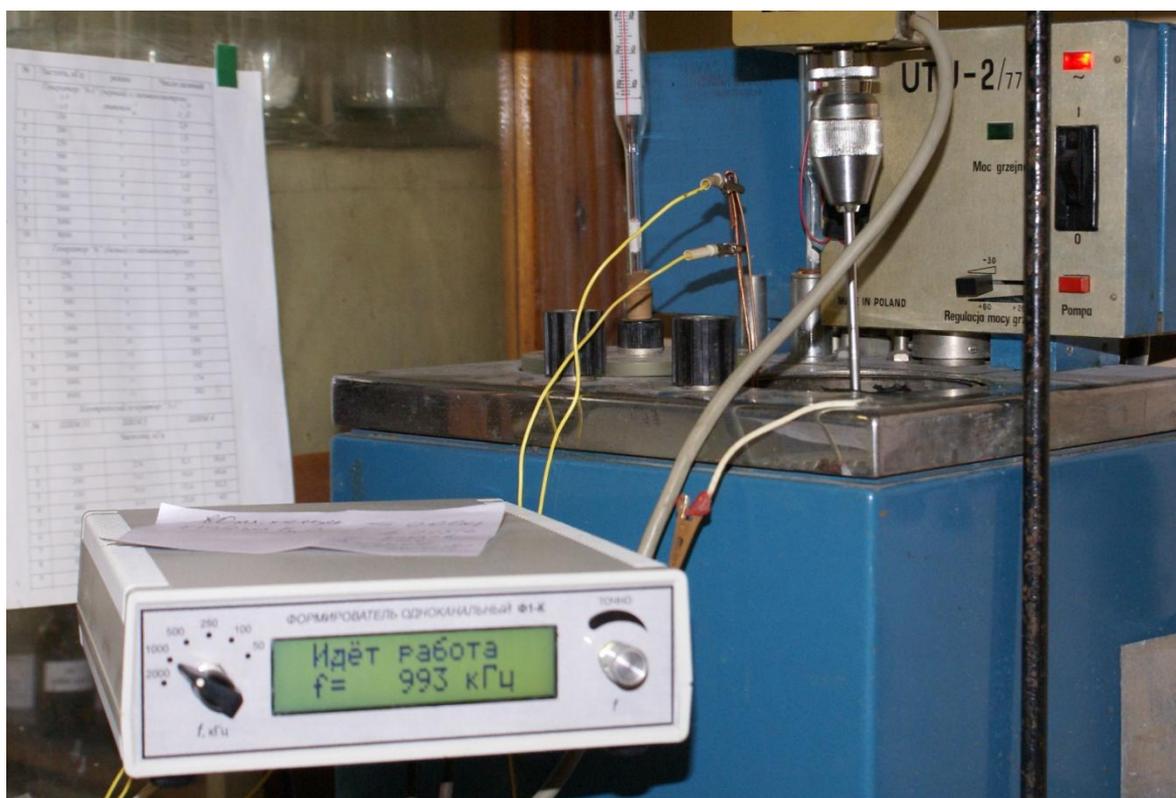


Рисунок 1– Генератор импульсов тока и его подключение к акустическому волноводу посредством петли магнитного диполя.

- 2) петля антенны разрывается, и в разрыв вводится электропроводный элемент конструкции, на который, либо через посредство которого будет осуществляться регулятивное влияние; это, например, может быть металлическая форма кристаллизатора, сварная ванна, арматурная сетка, корпус химического реактора и проч.;
- 3) петля антенны жёстко механически соединяется с монолитным акустическим проводником (волноводом), изготовленным из металла, керамики или – при необходимости – из плотного органического полимера или органно-минерального композита (фторопласт, поликарбонат, эпоксидный компаунд); при этом каких-либо особых требований к электромагнитным свойствам волновода не предъявляется;
- 4) петля антенны может иметь любую технологически удобную форму – вплоть до бифилярного провода, что выгодно отличает режим работы устройства сниженным уровнем электромагнитных помех.

После включения аппаратуры в технологическую схему никакого специального и квалифицированного надзора, кроме предусмотренного в ТУ самого производства не требуется. Заметим, что введение регуляции в физико-химические процессы – это операция, практически ничего масштабно не меняющая: аппаратура столь мала, что может быть “пристроена” в любом удобном месте. При этом уровень электромагнитных помех от антенны сопоставим с естественным фоном промышленного электрооборудования.

Среды влияния в подавляющем большинстве реактивны по отношению к электромагнитным полям (ЭМП). А поскольку переменные токи и ЭМП способны возбуждать в конденсированной среде механические колебания – акустические волны, то их стали рассматривать как действующий регулятивный фактор. Предложен механизм распространения акустического регулятивного сигнала в волновом канале мезофазы с резонансным усилением на частотах фазовой синхронизации за счёт нелинейного преобразования энергии высокочастотных мод, высвобождающейся в процессах физико-химических превращений и внутреннего диффузионно-конвективного транспорта.

Влияние на физико-химические процессы осуществляется не директивно, а имманентно согласно характеру самого неравновесного физико-химического процесса. Другими словами осуществляется фоновая подстройка под оптимальный отклик кинетических параметров и контролируемых характеристик физико-химических процессов. Отсюда и было сформулировано название метода как фоновая акустическая резонансная регуляция самоорганизации физико-химических процессов. Метод был испытан на большой группе неравновесных физико-химических процессов различной природы: плавление и литье, аргоно-дуговая сварка, гальваника, полимеризация полимерных композитов и т.д. Причём по всем позициям имеются апробационные заключения независимых экспертных групп, показывающие эффективность и воспроизводимость показателей фоновой регуляции, как на стадии самого процесса, так и в отношении потребительских свойств получаемых продуктов.

Экспериментальная часть

Плавление и кристаллизацию образцов алюминия и сплава АК10М2Н (ГОСТ 1583 – 93) в виде чушки, содержащий (масс. %): Fe -0.4, Si – 9.6, Cu – 2.0, Mn – 0.01, Mg – 1.3, Ni - 1.1, Zn – 0.03, как при наличии ЭМП, так и без него, проводим в одних и тех же условиях в графитовом тигле. Во избежание электромагнитного шума термодатчика сигнал ФАРРС от гальванической петли магнитного диполя непосредственно в плавильную зону не подавался – в массу металла погружался керамический акустический волновод, либо к внешней поверхности стеклоглеродного плавильного тигля механически примыкался провод диполя (рисунок 2). Плавление и кристаллизацию проводили при частотах, которые определили экспериментально, изучив частотную зависимость микротвердости холодного алюминия и его сплава.

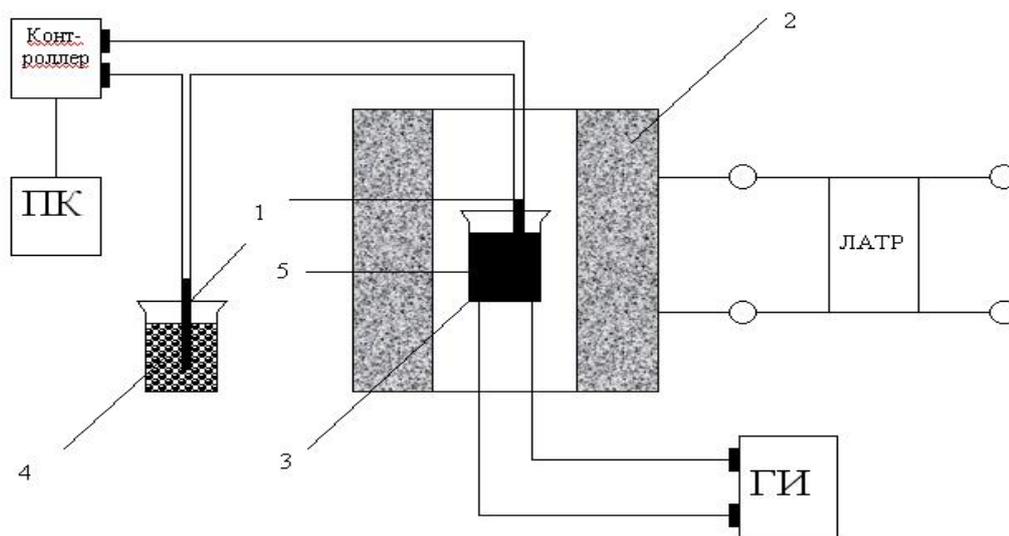


Рисунок 2 - Блок-схема экспериментальной установки :
1 – термопара, 2 – муфельная печь, 3 – графитовый тигель, 4 – сосуд с водой и льдом, 5 – образец металла или сплава.

Процесс плавления и кристаллизации во времени записывался в виде кривых охлаждения, информация о которых через контроллер отображалась на дисплее ПК. Температура записывалась с помощью хромель-алюмелевой термопары, имеющей холодный спай в смеси льда и воды. Время плавления и кристаллизации подбирали экспериментально, чтобы на кривых охлаждения четко прописывались траектории температуры при плавлении и кристаллизации. Это достигалось вариацией мощности муфельной печи, а также изменением количества вещества в тигле.

Кинетические кривые компьютерной хронотермометрии–кривые изобарного охлаждения алюминия в естественных условиях (контроль) и режиме ФАРРС на оптимальной частоте следования ИТ (215 кГц) показывают сохранение скоростей остывания как жидкой, так и твёрдой фаз металлов (наклонные участки) и отчётливое сокращение времени фазового перехода (горизонтальный участок) (рисунок 3) в режиме ФАРРС. Если принять неизменность энтальпии кристаллизации в электромагнитном и акустическом полях – а для иного нет достаточных оснований – сокращение длительности процесса твердения означает интенсификацию “сброса” внутренней энергии системы в

термостат (рисунок 3 и 4). Ещё одна особенность – исчезновение переохлаждения жидкости, что также соответствует представлениям об организуемом механизме ФАРРС.

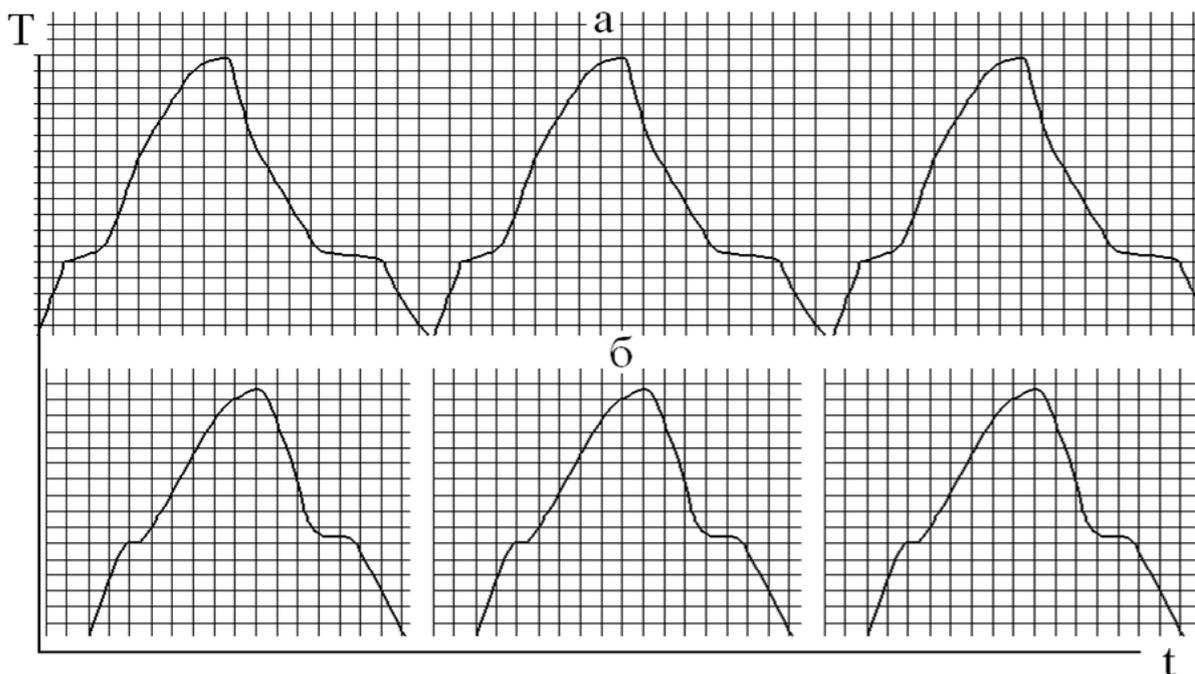


Рисунок 3 - Кривые плавления и охлаждения алюминия : а – контроль, б – при частоте ФАРРС 250 кГц.

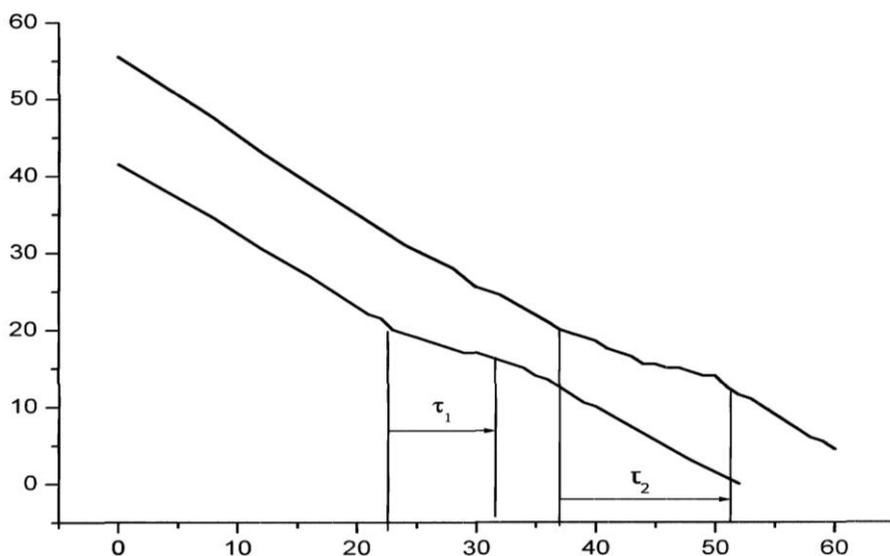


Рисунок 4 - Кривые охлаждения сплава АК10М2Н (абсцисса – время, отн.ед.; ордината – температура, отн.ед.). τ_1 - время кристаллизации при частоте ИТ 250 кГц, τ_2 - время кристаллизации в стандартных условиях.

Эффекты параметрической, в частности, структурной памяти в различных конденсированных системах известны. Выдвигаются эмпирические и теоретически обоснованные модели, некоторые из которых не только объясняют факты, но и дают прогностическую информацию. Нами обнаружен эффект памяти однократного ФАРРС

процессами плавления и кристаллизации металлов: длительность фазового перехода при повторных операциях перекристаллизации (без ФАРПС) сократилась.

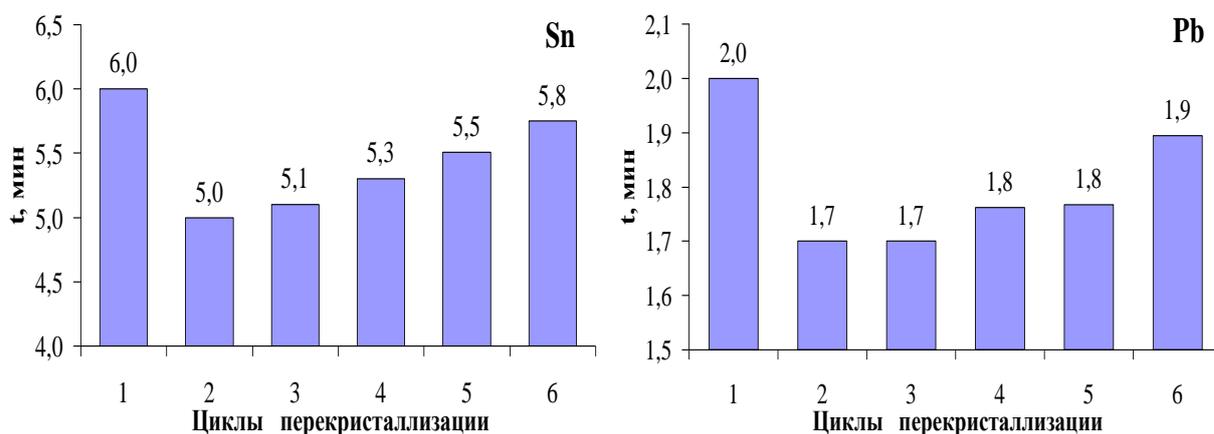


Рисунок 5 – Сокращение времени кристаллизации белого олова “чда”, пруток (вверху) и свинца “чда”, гранулы (внизу) в режиме ФАРПС (цикл 2) по сравнению со спонтанным (цикл 1) и эффект фазово-переходной памяти при повторных процессах с теми же образцами сплавов, но без ФАРПС – спонтанно (циклы 3–6)

На рисунке 5 показано сохранение и постепенное разрушение фазово-переходной (долговременной) памяти олова и свинца о режиме ФАРПС (цикл 2) в серии последовательных неуправляемых циклов (3–6) плавления – кристаллизации. Однако к исходному значению времени превращения (цикл 1) система так и не вернулась.

Сходная картина наблюдается при исследовании аккумуляторного сплава СКА7 (0.1–0.2 % Са; 0.05% Al; остальное – Рb). Рис.2.23, а, показывает устойчивую воспроизводимость времени кристаллизации 0.3 кг сплава в тигле, а тот же рисунок, б, демонстрирует сокращение длительности кристаллизации на 16% в режиме ФАРПС и сохранение памяти об этом режиме в дальнейших циклах плавления – кристаллизации.

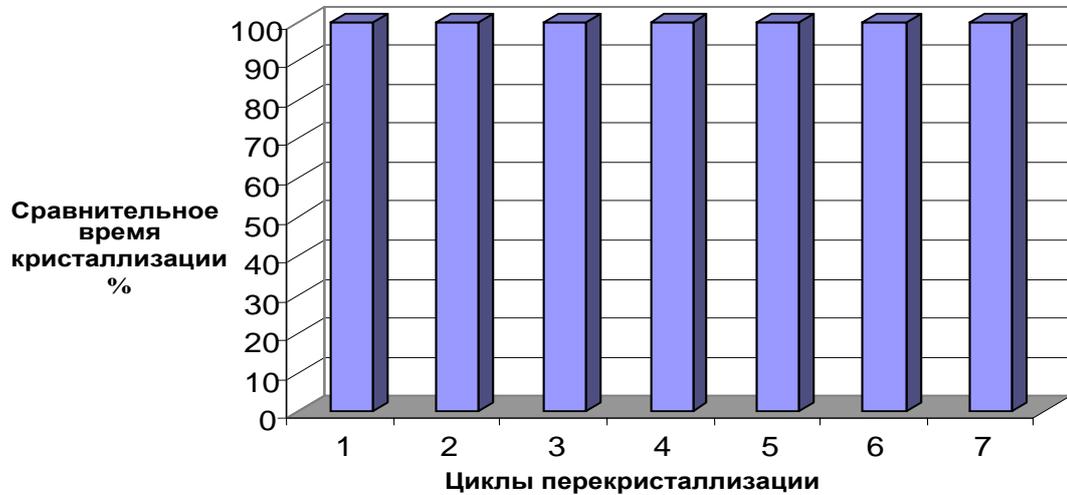
В Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН (СПб) проводились опыты по ФАРПС кристаллизации алюминиевого сплава АМц при вертикальном вытягивании кристаллизующейся полосы через фильеру с подключением антенны-медиатора непосредственно к литейной машине. В таблице 1 представлены усреднённые значения плотностей и поперечных сечений ($\pm 1.6\%$) полос АМц непрерывного литья как функции скорости вытягивания слитка из расплава и частоты ИТ ФАРПС.

Таблица 1 – Характеристики литой полосы из сплава АМц в зависимости от скорости вытягивания изделия и частоты ИТ ФАРПС кристаллизации.

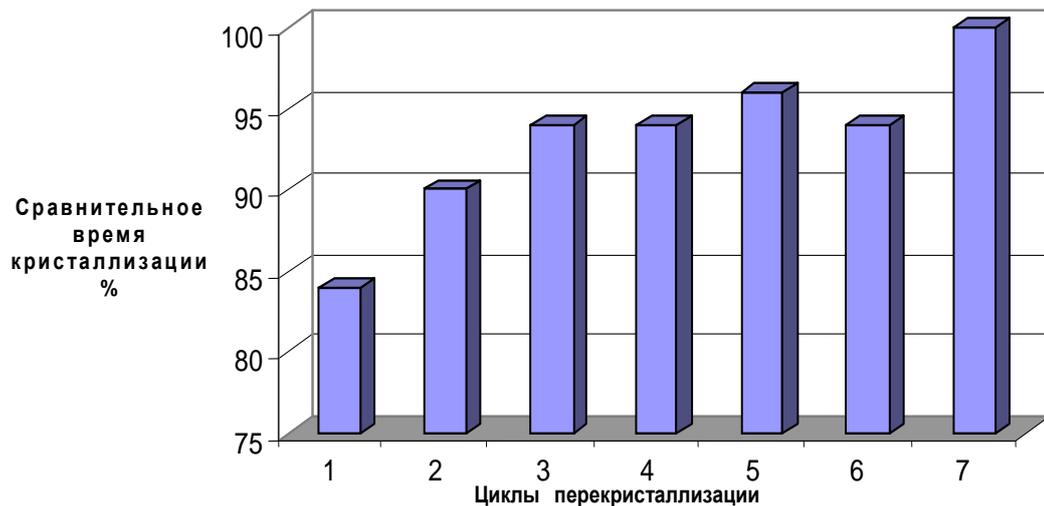
Данные ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, 2006 г.

№ серии	Скорость тяги, мм/с	Частота ИТ, кГц	Линейная плотность полосы, г/см	Поперечное сечение полосы, мм ²
1	0.56	—	1.164	43,0
2	0.56	250	1.176	43.5

3	0.56	500	1.162	43.0
4	0.65	500	1.120	41.5
5	0.74	500	1.081	40.0
6	0.81	500	1.058	39.2
7	0.85	500	1.046	38.8
8	1.11	500	0.887	32.9



a



б

Рисунок 6 – Воспроизводимость времени кристаллизации аккумуляторного сплава СКА7 в спонтанном режиме (*a*), его сокращение (*б*) в режиме ФАРРС (цикл 1) и эффект фазово-переходной памяти при повторных процессах с тем же образцом сплава, но без ФАРРС – спонтанно (циклы 2–7)

При малых скоростях вытягивания (серии 1–3) штатный и ФАРРС режимы показывают близкие результаты (рисунок 6). Однако повышение скорости вытягивания

при частоте ИТ 500 кГц (серии 3–8) отчётливо показывает существенное сужение слитка при сохранении структурных и эксплуатационных параметров изделия на скоростях вытягивания (серии 7, 8), не реализуемых в штатном (спонтанном) режиме из-за разрыва полосы, не успевающей затвердеть в зоне фильеры. Это прямо свидетельствует об ускорении процесса кристаллизации в режиме ФАРРС и проникновении зоны твердения вглубь отверстия фильеры, что аналогично результатам по ФАРРС кристаллизации олова, свинца и алюминия.