

УДК 544

# ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ ИЗДЕЛИЙ ГАЗОТУРБОСТРОЕНИЯ В НЕРАВНОВЕСНЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

*Представляємо керування фізико-хімічними процесами з метою отримання виробів з матеріалів із заданими властивостями і гомогенним розподілом властивостей по об'єму виробу для багатостадійних термічно активованих процесів, супроводжуваних масовим скиданням або поглинанням енергії. Труднощі керування такими процесами в масштабах реального промислового виробництва посилюється практичною неможливістю їх локального контролю та впливу*

*Ключові слова: фізико-хімічні процеси, нерівноважні системи, самостабілізувальна структура, матеріали з заданими властивостями*

*Представляем управление физико-химическими процессами с целью получения изделий из материалов с заданными свойствами и гомогенным распределением свойств по объему изделия для многостадийных термически активируемых процессов, сопровождающихся массовым сбросом или поглощением энергии. Трудность управления такими процессами в масштабах реального промышленного производства усугубляется практической невозможностью их локального контроля и влияния*

*Ключевые слова: физико-химические процессы, неравновесные системы, самостабилизирующая структура, материалы с заданными свойствами*

**Ф. В. Гречников**

Член-корреспондент РАН

Доктор технических наук, профессор

Кафедра обработки металлов давлением\*

e-mail gretch@ssau.ru

**В. И. Зарембо**

Доктор химических наук, профессор\*\*

e-mail ndz@list.ru

**А. А. Колесников**

Доктор химических наук, профессор\*\*

e-mail wisekaa@bk.ru

**В. А. Михеев**

Доктор технических наук, профессор

Кафедра технологии металлов и авиаматериаловедения\*

e-mail vamicheev@rambler.ru

**С. В. Сурудин**

Инженер, аспирант

Кафедра технологии металлов и авиаматериаловедения\*

e-mail: innosam63@gmail.com

**О. С. Киселева**

Аспирант\*

e-mail kiseleva\_itf@mail.ru

\*Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)

Московское шоссе, 34, г. Самара, 443086

\*\*Кафедра аналитической химии

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

Московский проспект, 26, г. Санкт-Петербург, Росси, 190013

## 1. Введение

Управление физико-химическими процессами с целью получения изделий и материалов с заданными свойствами и гомогенным распределением свойств по объёму всегда было и остается актуальной задачей любого технологического процесса. Эта задача становится особенно проблемной для многостадийных термически активируемых процессов, сопровождающихся массовым сбросом или поглощением энергии. К таким процессам относятся сварка, литье изделий, различные виды термической и химико-термической обработки, нанесение покрытий жидкофазным, плазменным и другими методами.

Запросы современной технологии, новые экспериментальные исследования требуют рассмотрения

фазового перехода как единый гомогенно-гетерофазный процесс, осложненный набором дополнительных факторов, связанных с воздействиями различных физических полей (температурных, гравитационных, электромагнитных, акустических и т.п.).

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Была привлечена обширная информационная база, включающая теоретические построения и экспериментальные результаты, данные отечественных и зарубежных публикаций, материалы дискуссий по проблеме

мам электромагнитного и других методов управления на научных форумах.

Все реальные процессы нелинейные. Нелинейность физико-химических процессов обуславливает возможность существования стабильных структур, о чем свидетельствует как повседневный опыт, так и современные научные обсуждения. Нелинейность физико-химических процессов являются движущей силой развития новых исследований в кинетике фазовых переходов. Особое внимание уделяется стационарно-неравновесному состоянию открытых физико-химических систем, в которых производство энтропии достигает минимального значения. Раскрывается суть и необходимость иерархического системного анализа неравновесных физико-химических процессов [1-6].

В результате нами была построена теоретическая основа тензоимпульсной регуляции, опирающаяся на современные физические и физико-химические представления, фундаментальные законы, математический анализ и аппарат компьютерного моделирования. Обоснован режим фоновой регуляции физико-химических процессов ультраслабыми сигналами, отвечающими тонким механизмам самоорганизации диссипативных структур. Показано существование верхних амплитудных порогов имманентной, адаптивной тензоимпульсной регуляции, отличающей её от директивных методов грубого нарушения хода естественной самоорганизации.

Однако трудность управления неравновесными физико-химическими процессами в масштабах реального промышленного производства, усугубляется практической невозможностью их локального контроля и влияния. Известно, что свойства готовых изделий при их изготовлении формируются в зависимости от внутреннего состояния материала, рассматривая фазовые переходы, сопровождающиеся поглощением, выделением и превращением тепла и различных видов энергии. Однако в производственной практике этот факт учитывается слабо, а изолированное рассмотрение процессов формирования свойств изделий может привести к фатальным ошибкам при реализации технологических процессов.

---

### 3. Цель и задачи исследований

---

Прежде всего, целью наших исследований является обобщение регулятивных эффектов слабого импульсного электрического тока, протекающего в непосредственной близости, либо через конденсированную среду, претерпевающую неравновесные фазовые переходы.

Задачами исследований были и остаются апробации на действующих предприятиях простой и малозатратной технологии регулирования структуры и физико-механических свойств металлов и сплавов, а также изделий из них в технологических процессах без изменения штатного оборудования.

---

### 4. Экспериментальные исследования

---

Выполненные экспериментальные исследования уже позволяют предполагать, что в конденсированной среде могут проявляться свойства, присущие не только отдельным атомам и молекулам, но и крупным надмолекулярным упорядоченным структурным об-

разованиям. 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.

В настоящее время данное воздействие испытано на большой группе неравновесных физико-химических процессов различной природы в открытых диссипативных системах. Технические средства дают возможность практического применения воздействий ЭМП в большинстве областей машиностроения, в том числе газотурбостроении. 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.

Распространение в проходящей через метастабильное состояние конденсированной фазе (между жидкой и твердой) электромагнитных или акустических колебаний малой мощности порождает физические эффекты. Использование этих эффектов в приведенной технологии и создают реальные предпосылки улучшения качества конечного изделия. Это достигается изменением массо- и теплообмена.

В экспериментальных исследованиях предлагалось выявить влияние тензоимпульсной обработки на структуру материала в фазовом переходе. Уже известно, что частоты металлических расплавов и полужидких (полутвердых) состояний находятся в области радиоволнового диапазона. Из литературного источника [6] 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 переходы. Другими словами говоря, с помощью электромагнитного излучения радиоволнового диапазона можно регулировать структуру материала и соответственно все структурозависимые свойства.

Сам генератор импульсов тока для излучения радиоволнового диапазона имеющий электрическую колебательную мощность не более 15 В·А, представляет собой небольшой бокс с регуляторами, индикаторами параметров и выходными клеммами для подключения петли антенны-медиатора (рис. 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 тензорегуляции в систему влияния или антенна-медиатор представляет собой обыкновенный одножильный провод, обычно медный, диаметром не более 2 мм, в твердой фторопластовой изоляции от внешних нежелательных гальванических и химических контактов. Длина провода не превос-

ходит нескольких метров, и он накоротко (гальванически) замыкает выход генератора импульсов тока на корпус, представляя, таким образом, короткозамкнутую петлю магнитного диполя. Для стендовых 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;



Рис. 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 прочее;

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 тензорегуляции в физико-химические процессы, практически ничего масштабного не меняет. 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 являются реактивными по отношению к электромагнитным полям (ЭМП). А поскольку переменные токи и ЭМП способны возбуждать в конденсированной среде механические тензоимпульсы – 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 тензоимпульсами слабого акустического поля (диапазон средней амплитуды давления порядка 0,15...150 Па) 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: литье изделий, аргоно-дуговая сварка, гальваника и т.д.

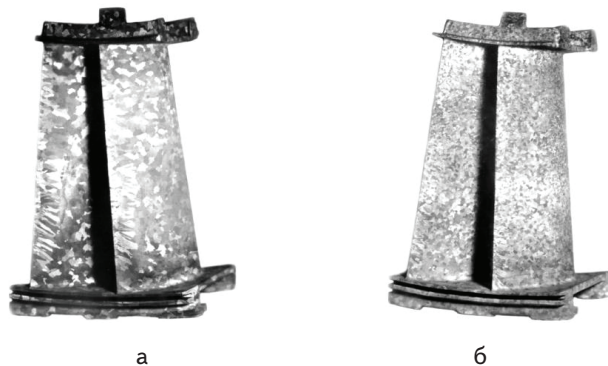


Рис. 2. Сопловые секции газовой турбины (турбинные лопатки), отлитые из сплава ЖС6УВИ в штатном (а) и резонансном режиме – 1000 кГц (б)

Выполнены опытные отливки сопловых секций газовых турбин в вакууме с применением резонансного режима фонового акустического воздействия. Следует сказать, что производство этих наиболее ответственных элементов двигателей – весьма сложная, длительная и дорогая операция, причём дополнительная обработка изделия после высокоточного литья не допускается. Здесь предъявляются весьма жёсткие требования по соответствию изделия всем металлографическим и механическим параметрам, и степень выбраковки очень высока. На рис. 2 приведены снимки двух секций, отлитых в штатном и регулятивном (1000 кГц) режимах в реальных условиях производства (вообще испытывались разные частоты униполярного меандра: 100, 200, 500, 1000 и 2000 кГц). Даже невооружённым взглядом можно выявить различия, что резонансный режим фонового акустического воздействия обеспечива-

ет большую макроскопическую однородность структуры и подавление дендритообразования.

## 5. Выводы

Более детальный анализ показал преимущество резонансного режима фонового акустического воз-

действия перед штатным режимом. Исследования структурных и эксплуатационных отливок в резонансном режиме фонового акустического воздействия в настоящее время продолжают. Сегодня накоплен обширный экспериментальный материал, не вызывающий сомнений в возможности существенного влияния, как на кинетические параметры, так и на свойства продуктов неравновесных физико-химических процессов.

## Литература

1. Физико-химическая механика дисперсных структур в магнитных полях [Текст] / Под ред. Н.Н. Круглицкого. – Киев: Наук. Думка, 1976. – 193 с.
2. Фрадков, Л.А. Управление молекулярными и квантовыми системами [Текст] / Л.А. Фрадков; под ред. О.А. Якубовского. – М. – Ижевск: ИКИ, 2003. – 416 с.
3. Фомин, В.П. Влияние механических воздействий на формирование свойств многокомпонентных систем [Текст] / В.П. Фомин; Научный центр нелинейной волновой механики и технологии. – М.: Наука, 2004. – 82 с.
4. Клингер, Л.М. Диффузия и гетерофазные флуктуации [Текст] / Л.Г. Клингер // Металлофизика. - 1984. - Т.6. - №5. - С. 11-18.
5. Сурду, Н.В. Пути повышения эффективности процессов резания труднообрабатываемых материалов/Н.В. Сурду, А.А. Тарелин, В.В. Романов, А.Г. Фистик//Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. –№2. – С. 9 – 17.
6. Зарембо, В.И. Фоновое резонансно-акустическое управление гетерофазными процессами [Текст] / В.И. Зарембо, А.А. Колесников // Теоретические основы химической технологии -2006. - Т.40. - №5. - С. 520-532.
7. Поезжалов, В.М. Кинетика электромагнитного излучения, сопровождающее массовую кристаллизацию [Текст] / В.М. Поезжалов // Тезисы доклада IX научной конференции по росту кристаллов. - М. - 2000. - 368 с.

*Наведено результати дослідження енергоефективності газотурбінних двигунів (ГТД) з блокованою силовою турбіною, ускладнених застосуванням турбіни перерозширення (ТП) і регенерацією теплоти (Р). Показана можливість поєднання двох способів підвищення економічності ГТД і застосування ГТД з ТП і Р як в енергетиці, так і в газоперекачувальних агрегатах засобів освоєння шельфу – нафтогазовидобувних платформ*

*Ключові слова: газотурбінний двигун, блокована силова турбіна, турбіна перерозширення, регенерація теплоти, турбокомпресорний утилізатор*

*Приведены результаты исследования энергоэффективности газотурбинных двигателей (ГТД) с блокированной силовой турбиной, усложненных применением турбины перерасширения (ТП) и регенерацией теплоты (Р) выхлопных газов. Показана возможность сочетания двух способов повышения экономичности ГТД и применения ГТД с ТП и Р, как в энергетике, так и в газоперекачивающих агрегатах средств освоения шельфа – нефтегазодобывающих платформ*

*Ключевые слова: газотурбинный двигатель, блокированная силовая турбина, турбина перерасширения, регенерация теплоты, турбокомпрессорный утилизатор*

УДК 621.438

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ПРИВОДНЫЕ ГАЗОТУРБИННЫЕ ДВИГАТЕЛИ С БЛОКИРОВАННОЙ СИЛОВОЙ ТУРБИНОЙ

**В. Т. Матвеев**

Доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник\*  
E-mail: mvvt39@ukr.net

**В. А. Очеретяный**

Кандидат технических наук, доцент\*  
E-mail: ocheret-1961@rambler.ru

**А. Г. Андриец**

Кандидат технических наук, доцент  
E-mail: andriets1@mail.ru

\*Кафедра энергоустановок морских судов и сооружений

Севастопольского национального технического университета  
ул. Университетская, 33,  
г. Севастополь, Украина, 99053